

## **SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN ÜÇ BOYUTLU ÇELİK YAPILARIN OPERASYONEL MODAL ANALİZİ**

**Mehmet Aydın KÖMÜR, İbrahim Özgür DENEME\***

*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye*

*Geliş / Received: 03.09.2015*

*Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 09.10.2015*

*Kabul / Accepted: 12.10.2015*

### **ÖZ**

Bu çalışmada laboratuarda inşa edilen biri simetrik diğeri simetrik olmayan iki çelik yapının operasyonel modal analizleri yapılarak dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Bunun için her iki çelik yapıda da altı adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Çevresel etkilerden yararlanılarak yapılan deneysel ölçüm sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesinde ARTEMİS programında mevcut frekans tanım alanında ayrıştırma ve stokastik altalan belirleme yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca sözkonusu çelik yapılar nümerik olarak da modellenerek mod şekilleri ve doğal frekansları belirlenmiştir. Nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasında birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik yapı, operasyonel modal analiz, dinamik karakteristik

## **OPERATIONAL MODEL ANALYSIS OF SYMMETRIC AND ASYMMETRIC THREE DIMENSIONAL STEEL STRUCTURES**

### **ABSTRACT**

In this study, symmetric and asymmetrical steel structures were constructed in the laboratory and analyzed using operational modal analysis to determine the dynamic characteristics. Six different single-axis accelerometers were used for both steel structures. The test results obtained from the environmental excitation were evaluated by ARTEMİS software package which can perform Stochastic Subspace Identification Method and Peak Picking Method. Mode shapes and natural frequencies of the two steel structures were also calculated numerically. A good agreement was observed when the results obtained from experimental and numerical analysis were compared.

**Keywords:** Steel structure, operational modal analysis, dynamic characteristics

### **1. GİRİŞ**

Son yirmi yılda deneysel ölçüm yöntemleri mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemler zorlanmış titreşim testleri, serbest titreşim testleri ve çevresel titreşim testleri olmak üzere üç grupta toplanabilir. Zorlanmış titreşim testlerinde yapı; bir titreştirici ya da düşürülen ağırlık gibi bir etki ile uyarılmaktadır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı ölçüm sırasında yapıdaki asli faaliyetlerin kesilecek olmasıdır. Çevresel titreşim testleri ise rüzgâr, trafik, insan hareketi ve dalga gibi etkileri kullandığı için ölçüm esnasında yapıdaki günlük faaliyetler devam edebilmektedir.

Yapıların dinamik değişkenleri olan doğal frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen mod şekilleri ve sönüm oranları deneysel modal analiz yöntemleri ile belirlenebilir. Sistemin dinamik değişkenleri, sistemdeki kütle

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 382 288 23 36; e-mail/e-posta: ideneme@gmail.com

*SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN ÜÇ BOYUTLU ÇELİK YAPILARIN OPERASYONEL MODAL ANALİZİ*

miktar ve dağılımı ile sistemi oluşturan elemanların sıklığı ve bunun dağılımı arasındaki ilişki sonucu ortaya çıkar. Sönüm oranları ise harekete maruz kalan sistemin malzemesi dâhilinde ve elemanları arasında oluşan iç sürtünmelerin veya tüketilen enerjinin bir ölçüsü olarak ortaya çıkar [1].

Laboratuarda inşa edilen çelik yapıların modal parametrelerinin belirlenmesi ile ilgili olarak literatürde bazı çalışmalar mevcuttur [2-9]. Molina ve diğerleri [2] gerçek boyutlarda iki katlı çelik çerçevenin deneysel olarak modal parametrelerini belirlemiş daha sonra yapıya hasar vererek tekrar parametreleri belirleyerek sonuçlar karşılaştırmıştır. Wu ve Li [3] çelik bir yapının yapısal parametrelerinin belirlenmesi ve hasar tespiti için iki aşamalı bir sonlu elemanlar güncelleştirme metodu geliştirmiştir. Bu amaç için 4 katlı çelik çerçeve sistemde çaprazlar kaldırılarak hasarlar oluşturulmuş ve çevresel titreşim testleri yapılmıştır. Xiaodong ve diğerleri [4] hasar tanı yöntemlerinin etkinliğini doğrulamak için iki katlı çaprazlı çelik yapı üzerinde deneysel ölçüm yapmıştır. Model üzerinde bazı çaprazları kaldırarak hasarlar oluşturmuş ve hasarlı modeller üzerinde de ölçümler yapmıştır. Çalışmada hasarlı ve hasarsız yapıların modal parametrelerinin belirlenmesinde NEXT-ERA tekniğini kullanılmış olup belirlenen doğal parametreleri doğrulamak için Sap2000 programından yararlanılmıştır.

Türker ve diğerleri [5] modal testle üç çelik yapı üzerinde yarı-rijit bağlantı durumunu değerlendirmiştir. Bu amaçla yapıların dinamik karakteristiklerini deneysel ve analitik olarak belirlemiştir. Sonrada analitik sonuçları ölçülen sonuçlara yaklaştırmak için analitik modelde elastik dönel yaylar tanımlayarak modeli güncellemiştir. Türker ve Bayraktar [6] çelik yapılarda çapraz şeklinin dinamik karakteristiklere etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Bu amaçla laboratuarda gerçek bir yapının ½ si ölçeğinde bir yapı inşa edilmiş ve dört farklı çapraz şekli için deneysel modal analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan yapının analitik modeli güncellenmiştir. Davoodi ve diğerleri [7] 3 boyutlu- 3 katlı çelik yapının deneysel modal analizini yaparak dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Çelik yapının kolon-kiriş bağlantı yerlerinde alın plakasının bulonlarla birleştirildiği bağlantı (flanşlı bağlantı) kullanılmıştır. Söz konusu yapıyı ANSYS bilgisayar programı ile rijit ve mafsallı düğümlü olmak üzere iki farklı şekilde modelleyerek elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Gomaa ve diğerleri [8] küçük ölçekte iki katlı çelik çerçevenin deneysel ve analitik olarak frekanslarını elde ederek karşılaştırmıştır. Türker ve Bayraktar [9] çaprazlı ve çaprazsız çelik yapıların operasyonel modal analizini yaparak sonuçları karşılaştırmıştır. Daha sonra yapıların başlangıç analitik modelini ölçülen sonuçlarla kalibre ederek geliştirmiştir. Pelayo ve diğerleri [10] iki katlı ve her iki doğrultuda tek açıklıklı olan çelik yapıda kütle değiştirme metodunu kullanarak ilk iki eğilme ve burulma modlarının ölçeklendirme faktörlerini belirlemiştir. Çelik yapının hem deneysel ölçümle hem de nümerik olarak frekanslarını tespit etmişlerdir. Daha sonra modelin kütlesini ek ağırlıklar yardımıyla % 3,95 ve % 8,94 oranlarında artırarak işlemleri tekrarlamışlar ve literatürde mevcut formüller yardımıyla ölçeklendirme faktörlerini belirlemiştir.

Bu çalışmada simetrik ve simetrik olmayan iki katlı ve her iki doğrultuda tek açıklıklı olan iki adet çelik yapı modelinin deneysel ölçümler sonucu elde edilen dinamik karakteristikleri nümerik bir yöntem olan sonlu elemanlar yönteminden (SEY) elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın çıktığı gözlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Operasyonel Modal Analiz

Operasyonel modal analiz yapıların modal parametrelerinin tahmininde kullanılan bir yöntem olup bina, köprü, kule, offshore platform gibi pek çok inşaat mühendisliği yapısına uygulanmıştır. Bu yöntemde yapı rüzgar, trafik, insan hareketi ve dalga gibi çevresel bir etki ile titreştirilmekte ve yapının bu titreşime karşı vermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Ölçüm yapılırken yapıda normal faaliyetlere devam edilebilmekte ve dolayısı ile elde edilen veriler yapının kullanımındaki davranışını temsil etmektedir. Ölçülen verilerin değerlendirilmesinde frekans alanında ayrıştırma yöntemi ve stokastik altalan belirleme yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır.

#### 2.1.1. Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (FTAA) Yöntemi

Operasyonel modal analiz yöntemleri zaman ve frekans tanım alanında çalışan yöntemler diye kategorize edilebilir. Frekans tanım alanında ayrıştırma tekniği frekans ortamında çalışan bir tekniktir. Bu yöntemde tepkinin güç yoğunluğu fonksiyonu (PSD) hesaplanır ve sistemin ölçeksiz mod şekillerini de içeren modal parametrelerini belirlemek için tekil değer ayrışımı gerçekleştirilir. Bilinmeyen etki ve ölçülen tepkiler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilir [11,12].

M.A. KÖMÜR, İ.Ö. DENEME

$$[G_{yy}(j\omega)] = [\overline{H}(j\omega)][G_{xx}(j\omega)][H(j\omega)]^T \quad (1)$$

Burada  $G_{xx}(j\omega)$  etkinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu,  $G_{yy}(\omega)$  tepkinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ve  $H(j\omega)$  frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Ayrıca “T” üst indisi matrisin transpozunu, “—” üst indisi ise matrisin kompleks eşleniğini göstermektedir. Bu bağıntıda etkinin beyaz gürültü olduğu varsayılarak etki sinyaline ait spektral yoğunluk fonksiyonu sabit alınmıştır. Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayrik değerler olarak,

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir. Burada;  $U_i$ ,  $u_{ij}$  tekil vektörlerinden (mod vektörlerinden) oluşan birim matrisi,  $S_i$ ,  $s_{ij}$  tekil değerlerden (özdeğerlerden) oluşan diyagonal matrisi göstermektedir [12,13].

### 2.1.2. Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi (SAB)

Stokastik altalan belirleme yöntemi zaman ortamına dayalı parametrik bir yöntem olup zaman ortamında kaydedilmiş verilerden direkt olarak modal parametrelerinin belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Dolayısıyla ölçülen verilerin spektumlara dönüştürülmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntem, güçlü sayısal teknikler kullanarak ölçüm verilerinden konum alan matrislerini belirlemektedir. Bu yöntemle ilgili ayrıntılı bilgi literatürde bulunmaktadır [14,15].

## 2.2. Deney Modelleri

Bu çalışmada iki adet bir açıklıklı-iki katlı çelik yapıların operasyonel modal analizleri yapılmıştır. Yapıların kısa kenar ve uzun kenar açıklıkları sırasıyla 56 cm, 66 cm olup kat yükseklikleri ise 40 cm dir (Şekil 1). Çelik yapılardan biri simetrik olarak imal edilmiş diğerinin ise döşemesinde boşluk oluşturularak simetrisi bozulmuştur. Sistemde kolon ve kirişler  $3 \times 3 \times 0,15$  cm ebatlarında profillerden oluşturulmuş olup Kolon-kiriş bağlantı yerleri kaynaklı olarak birleştirilmiştir. Döşeme olarak 5 mm kalınlığında levhalar kullanılmıştır. Simetrik olmayan modelin döşemesinde  $28 \times 33$  cm ebatlarında boşluk oluşturulmuştur.



Şekil 1. Simetrik ve simetrik olmayan çelik yapılar

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 3.1. Sonlu Eleman Modellemesi

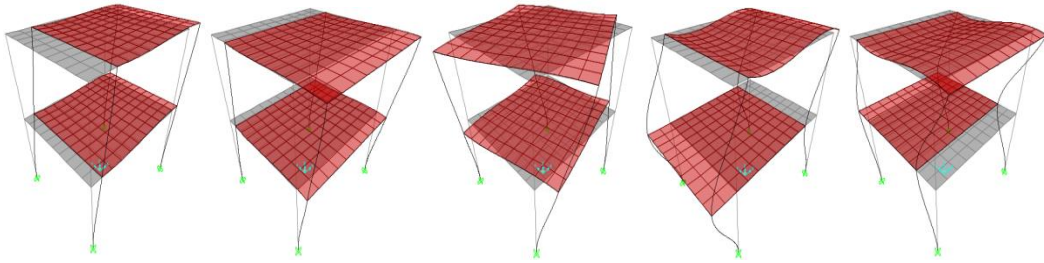
Operasyonel modal analiz ile elde edilecek frekansları ve mod şekillerini kıyaslamak için öncelikle simetrik ve simetrik olmayan çelik yapıların Sap2000 [16] programı yardımıyla modal analizleri yapılmıştır. Modellemede malzeme özelliği olarak elastisite modülü  $E=2 \times 10^5$  MPa, Poisson oranı  $\nu=0,3$  ve kütle yoğunluğu  $7850 \text{ kg/m}^3$

*SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN ÜÇ BOYUTLU ÇELİK YAPILARIN OPERASYONEL MODAL ANALİZİ*

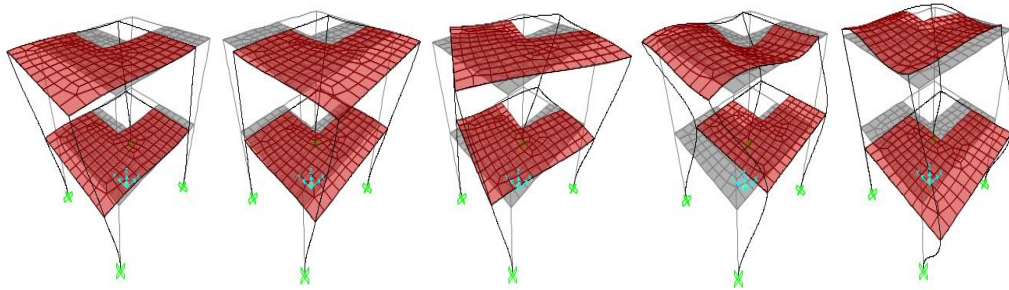
kullanılmıştır. Çelik yapıların kolon ve kirişleri bir boyutlu elastik eleman olarak döşemeleri ise shell eleman olarak modellenmiştir. Söz konusu yapıların mesnetleri ankastre düğüm noktaları ise rijit olarak dikkate alınmıştır. Analiz sonucunda 5 moda ait doğal frekans değerleri Tablo 1’de mod şekilleri ise Şekil 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Sonlu eleman analizinden elde edilen doğal frekanslar

Mod	Simetrik Model	Simetrik Olmayan Model
	Doğal Frekansı (Hz)	Doğal Frekansı (Hz)
Eğilme 1(X)	27,240	29,989
Eğilme 1(Y)	28,263	31,060
Burulma	45,125	50,131
Eğilme 2(X)	91,861	101,094
Eğilme 2(Y)	93,318	102,717



a) Simetrik Çelik Yapı



b) Simetrik olmayan çelik yapı

**Şekil 2.** Sonlu eleman analizinden elde edilen mod şekilleri

### 3.2. Deneysel Çalışma

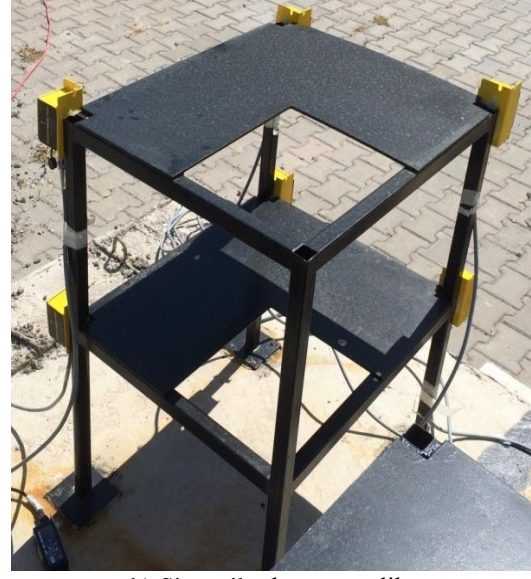
Çelik yapıların dinamik karakteristiklerinin titreşim testleri yapılarak belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler çerçeve sistemlerin birinci ve ikinci katlarında seçilen düğüm noktalarına altı adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirildikten sonra 0-250 Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller ölçüm süresince (15 dakika) 20 kanallı TESTBOX6501 veri toplama ünitesinde birleştirilip TESTLAB NETWORK yazılımına aktarılmıştır (Şekil 4). Burada sinyaller işlendikten sonra Artemis yazılımında [17] frekans tanım alanında ayrıştırma ve stokastik altalan belirleme yöntemleri kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.



M.A. KÖMÜR, İ.Ö. DENEME



a) Simetrik çelik yapı



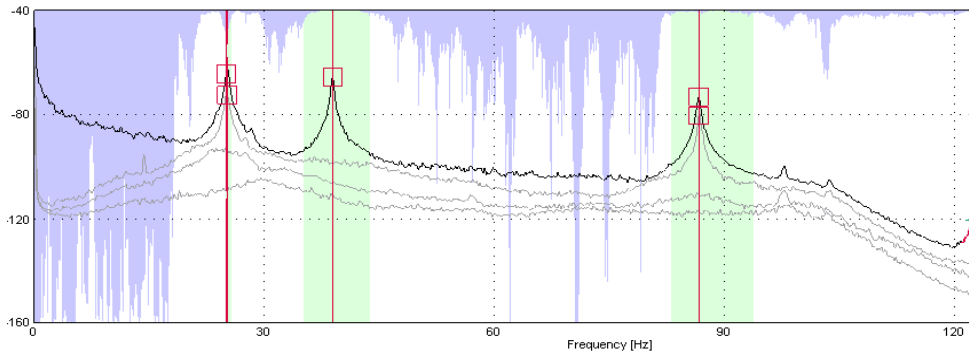
b) Simetrik olmayan çelik yapı

Şekil 3. Çelik yapılar üzerinde ivmeölçer yerleşimleri



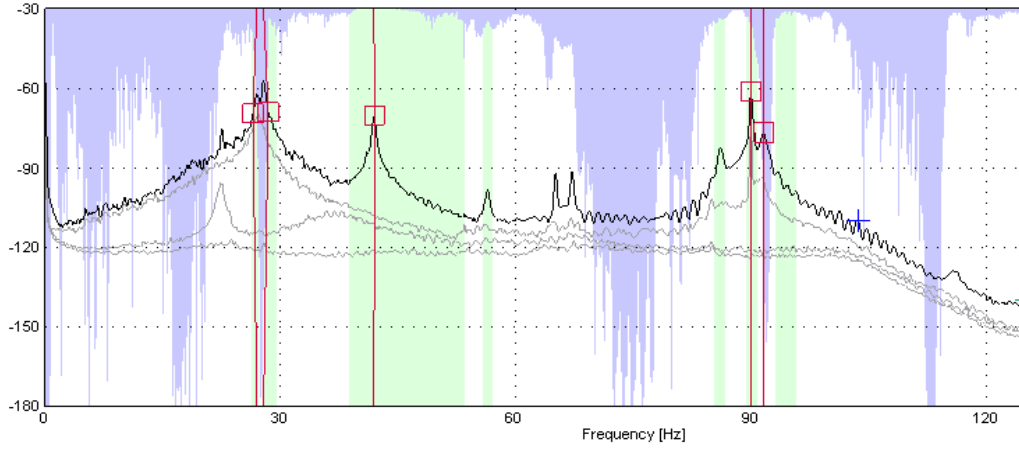
Şekil 4. Deneysel ölçümlerde kullanılan veri toplama ünitesi ve tek eksenli ivmeölçer

Simetrik ve simetrik olmayan çelik yapılarda yapılan ölçümler sonrasında, FTAAs yöntemi ile elde edilen tekil değerler Şekil 5 ve 6'da gösterilmiştir. Sözkonusu şekillerde yapılara ait beşer frekans değeri görülmektedir.



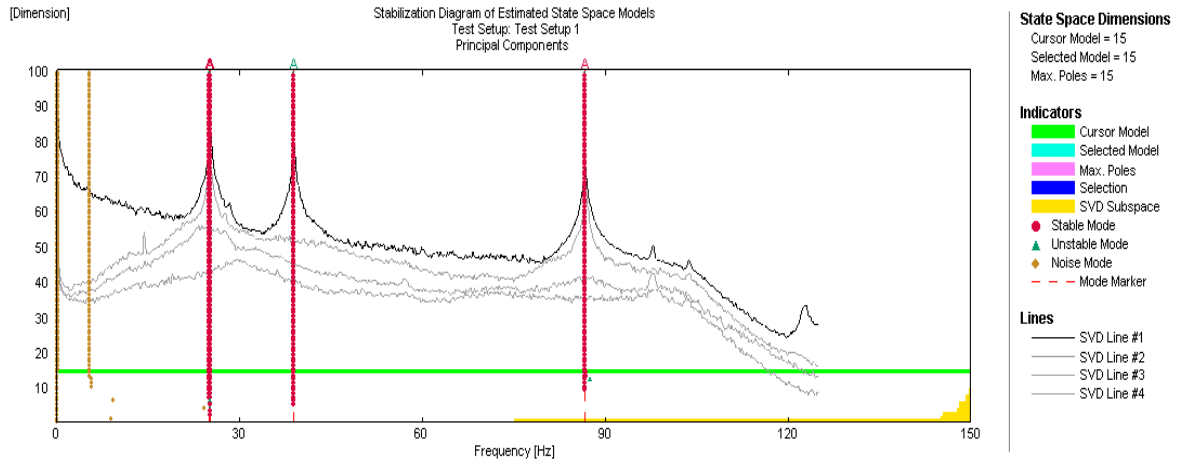
Şekil 5. Simetrik yapıda her bir titreşim sinyaline ait tekil değerler

*SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN ÜÇ BOYUTLU ÇELİK YAPILARIN OPERASYONEL MODAL ANALİZİ*

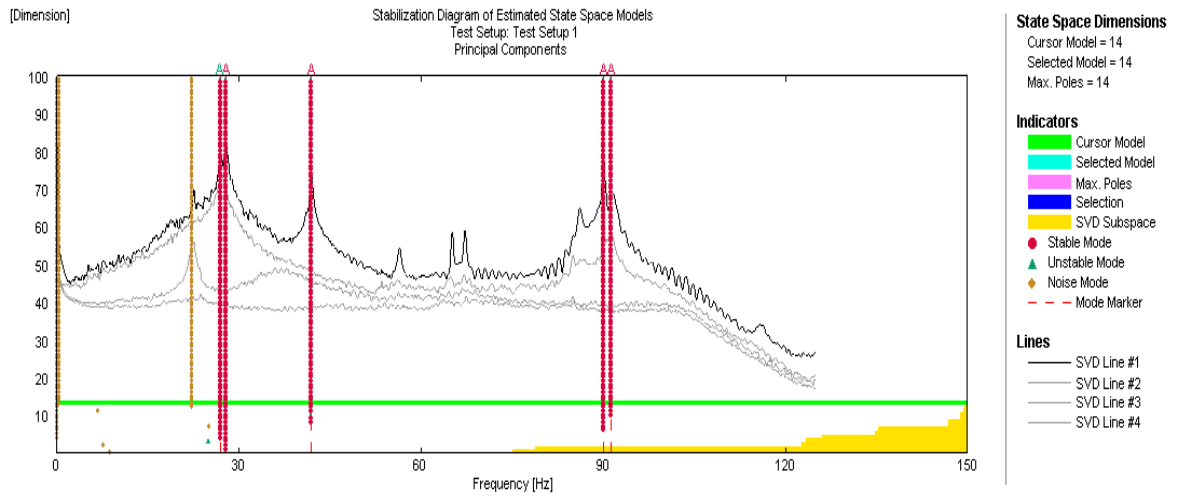


Şekil 6. Simetrik olmayan yapıda her bir titreşim sinyaline ait tekil değerler

Simetrik ve simetrik olmayan çelik yapılar için ölçülen verilerden SAB yöntemi kullanılarak elde edilen stabilizasyon diyagramları Şekil 7 ve 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Simetrik çelik yapı ölçümü için stabilizasyon diyagramı



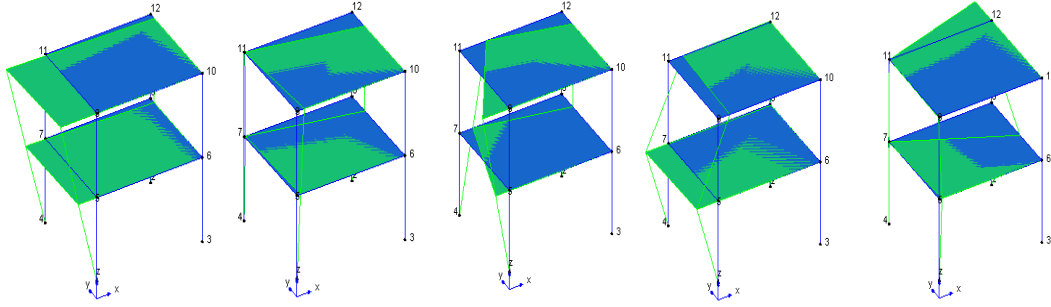
Şekil 8. Simetrik olmayan çelik yapı ölçümü için stabilizasyon diyagramı

Modellerin deneysel ölçümünden elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2’de verilmiştir. Her iki yöntemde birbiri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Simetrik yapıda hesaplanan tüm frekans değerleri için iki yöntem arasındaki fark en fazla % 0,2 civarında simetrik olmayan yapı da ise yaklaşık % 2,2 olmuştur.

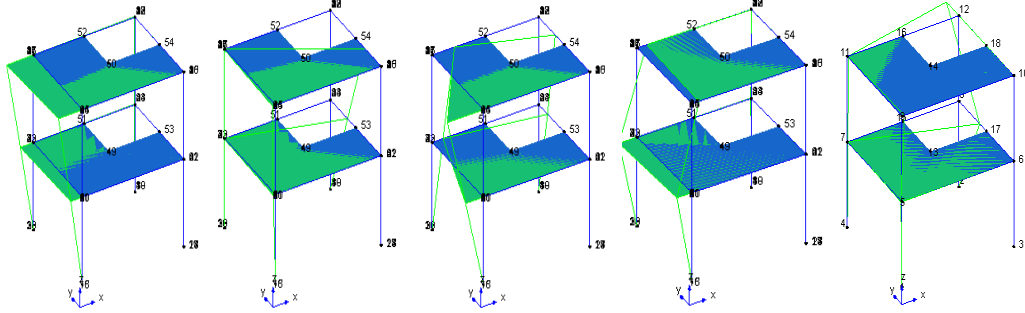
**Tablo 2.** Deneysel ölçümden sağlanan frekanslar ve modal sönüm oranları

Mod	Simetrik Model			Simetrik Olmayan Model		
	FTAA	SAB	Sönüm oranı	FTAA	SAB	Sönüm oranı
Eğilme 1(X)	25,05	25,04	1,04	26,49	27,01	0,71
Eğilme 1(Y)	25,15	25,20	0,47	28,44	27,84	0,64
Burulma	38,94	38,88	0,34	41,99	41,91	0,32
Eğilme 2(X)	86,67	86,66	0,19	89,97	90,03	0,09
Eğilme 2(Y)	86,74	86,71	0,28	91,21	91,25	0,89

Çelik yapılar üzerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen verilerden sağlanan mod şekilleri ise Şekil 9’da verilmiştir.



a) Simetrik çelik yapı



b) Simetrik olmayan çelik yapı

**Şekil 9.** Deneysel ölçümden sağlanan mod şekilleri

Yapıların sonlu elemanlar modellemesinden ve deneysel ölçümlerinden elde edilen frekans değerleri Tablo 3’te karşılaştırılmıştır. Hem simetrik hem de simetrik olmayan çelik yapıda sonlu eleman analizinden operasyonel modal analiz sonuçlarına göre daha büyük değerler elde edilmiştir. Sözkonusu yapılarda her iki yöntem sonuçları arasında önemli hatalar mevcuttur. Hatalar simetrik olmayan çelik yapıda simetrik yapıya göre daha büyük olup maksimum hata burulma modu için gerçekleşmiştir.

İki yöntem sonuçlarının epeyce farklı olmasının en önemli nedeni ölçümlerde kullanılan her bir ivmeölçerin ağırlığının 5,13 N olması ve dolayısı ile toplam yapı ağırlığı yanında ihmal edilemeyecek düzeyde olmasıdır. Bu nedenle ivmeölçer ağırlıkları da dikkate alınarak yeniden nümerik modelleme yapılmış ve sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir. Simetrik çelik yapıda tüm modlar için hata % 8’den, simetrik olmayan yapıda ise % 9’dan küçük çıkmıştır. Dolayısıyla daha gerçekçi bir durum olan yeni modellemelerden sonra sonuçların birbirine yaklaştığı görülmüştür.

*SİMETRİK VE SİMETRİK OLMAYAN ÜÇ BOYUTLU ÇELİK YAPILARIN OPERASYONEL MODAL ANALİZİ***Tablo 3.** Sonlu eleman analizi ve deneysel ölçümden elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

Mod	Simetrik Model (Frekans)			Simetrik Olmayan Model (Frekans)		
	SEY	Deneysel	Hata	SEY	Deneysel	Hata
Eğilme 1(X)	27,240	25,04	8,79	29,989	27,01	11,03
Eğilme 1(Y)	28,263	25,20	12,15	31,060	27,84	11,57
Burulma	45,125	38,88	16,06	50,131	41,91	19,62
Eğilme 2(X)	91,861	86,66	6,00	101,094	90,03	12,29
Eğilme 2(Y)	93,318	86,71	7,62	102,717	91,25	12,57

**Tablo 4.** Deneysel ve güncellenen modelle ait frekansların karşılaştırılması

Mod	Simetrik Model (Frekans)			Simetrik Olmayan Model (Frekans)		
	SEY	Deneysel	Hata	SEY	Deneysel	Hata
Eğilme 1(X)	26,174	25,04	4,53	28,505	27,01	5,53
Eğilme 1(Y)	27,153	25,20	7,75	29,522	27,84	6,04
Burulma	41,428	38,88	6,55	45,680	41,91	8,99
Eğilme 2(X)	88,335	86,66	1,93	96,075	90,03	6,71
Eğilme 2(Y)	89,704	86,71	3,45	97,826	91,25	7,21

**4. SONUÇLAR**

Bu çalışmada laboratuvar ortamında inşa edilen simetrik ve simetrik olmayan iki adet çelik yapının nümerik olarak ve operasyonel modal analizi yapılarak dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çelik yapıların deneysel ölçümünden elde edilen verilerin değerlendirilmesinde FTAA ve SAB yöntemlerinden yararlanılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasında azda olsa farklılıklar olmuştur. Simetrik yapıda dikkate alınan tüm frekans değerleri için iki yöntem arasındaki fark en fazla % 0,2 civarında simetrik olmayan yapı da ise yaklaşık % 2,2 civarında olmuştur.

Sonlu eleman modellemesinden elde edilen frekans değerleri ile deneysel ölçümden elde edilen değerler arasında epey fark gözlenmiştir. Bu fark simetrik olmayan yapıda simetrik yapıya göre daha fazla olmuştur. Küçük modellerde İvmeölçer ağırlıklarının dinamik karakteristiklere etkisi ihmal edilemeyecek düzeyde olacağından sözkonusu ağırlıklar sonlu eleman modellemesinde dikkate alındığında sonuçların birbirine daha da yaklaştığı gözlenmiştir.

**KAYNAKLAR**

- [1] DÖNMEZ, C., KARAKAN, E., “Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları”, İMO Teknik Dergi, 20, 4851-4863, 2009.
- [2] MOLINA, F.J., PASCUAL, R., GOLINVAL, J.C., “Description of the Steelquake Benchmark”, Mechanical Systems and Signal Processing, 17, 77-82, 2003.
- [3] WU, J.R., LI, Q.S., “Structural Parameter Identification and Damage Detection for a Steel Structure Using a Two-stage Finite Element Model Updating Method”, Journal of Constructional Steel Research, 62, 231-239, 2006.
- [4] XIAODON, J., JIARU, Q., LONGHE, X., “Damage Diagnosis of a Two-story Spatial Steel Braced-frame Model”, Structural Control and Health Monitoring, 14, 1083-1100, 2007.
- [5] TURKER, T., KARTAL, M.E., BAYRAKTAR, A., MUVAFIK, M., “Assessment of Semi-rigid Connections in Steel Structures by Modal Testing”, Journal of Constructional Steel Research, 65, 1538-1547, 2009.
- [6] TURKER, T., BAYRAKTAR, A., “Experimental and Numerical Investigation of Brace Configuration Effects on Steel Structures”, Journal of Constructional Steel Research, 67, 854-65, 2011.



*M.A. KÖMÜR, İ.Ö. DENEME*

- [7] DAVOODI, M.R., MAHDAVI, M., MOSTAFAVIAN S.A., “Experimental and Analytical Determination of Dynamic Properties of a Steel Frame with Bolted Flange Joints”, Proceedings of International Conference on Engineering and Information Technology “ICEIT2012”, 1-6, Toronto, Canada, 2012.
- [8] GOMAA, F., TAYEL, M., KANDIL, K., HEKAL, G., “Validation Study Illustrates the Accuracy of Operational Modal Analysis Identification”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2, 658-667, 2012.
- [9] TURKER, T., BAYRAKTAR, A., “Finite Element Model Calibration of Steel Frame Buildings with and without Brace”, Journal of Constructional Steel Research, 90, 164–173, 2013.
- [10] PELAYO, F., FRAILE, A., BRINCKER, R., BLASÓN, S., DEL SAGRARIO, M., AENLLE, M.L., HERMMANS, L., “Modal Scaling of a Symmetric Scale Model of a Two Story Building”, 11th International Conference on Vibration Problems, 1-10, Lisbon, Portugal, 2013.
- [11] BENDAT, J.S., PIERSOL, A.G., Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons, USA, 1986.
- [12] BRINCKER, R., ZHANG, L., ANDERSEN, P., “Output-only Modal Analysis by Frequency Domain Decomposition”, Proceedings of the ISMA25 Noise and Vibration Engineering, 717-723, Leuven, Belgium, 2000.
- [13] BAYRAKTAR, A., TURKER, T., ALTUNIŞIK, A.C., SEVİM, B., ŞAHİN, A., ÖZCAN D.M., “Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi” İMO Teknik Dergi, 337, 5185-5205, 2010.
- [14] VAN OVERSCHEE, P., DE MOOR, B., Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1996.
- [15] PEETERS, B., DE ROECK, G., “Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering”, Inverse Problems in Engineering, 8, 47–74, 2000.
- [16] CSI, SAP2000 V-14, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, USA, 2009.
- [17] ARTEMIS V-5.3, Ambient Response Testing and Modal Identification Software, Structural Vibration Solutions A/S, Denmark, www.svibs.com.