

BÖLGESEL YAPISAL DEĞİŞİKLİĞE UĞRAYAN YAPILARIN DİNAMİK ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YAZILIM VE HAVACILIK YAPILARINA UYGULANMASI

Sertaç KÖKSAL*, Mutlu D. CÖMERT* ve H. Nevzat ÖZGÜVEN**

(*)TÜBİTAK-SAGE, Silah Sistemleri ve Kontrol Teknolojileri Grubu, P.K. 16, 06261, Mamak,
ANKARA

(**) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06531, ANKARA
skoksal@sage.tubitak.gov.tr, mcomert@sage.tubitak.gov.tr, ozguven@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada; bölgesel değişikliğe uğrayan yapıların dinamik cevaplarını hesaplayabilmek amacıyla geliştirilen, biri yazarlar tarafından yakın zamanda geliştirilmiş bir yöntem olmak üzere üç farklı yöntemi kullanabilen bir yazılım tanıtılmıştır. Yapısal Değişiklik Araç Kutusu olarak adlandırılan bu yazılım, yapının dinamik analizi için MSC Nastran© programının titreşim biçim analizi sonuçlarını kullanmakta, yapıdaki bölgesel değişikliklerin yapının frekans tepki fonksiyonlarını nasıl değiştireceği, programlanan üç yöntemden istenilen biriyle hesaplanabilmektedir. Yöntemlerin hepsi kesin sonuçları verdikleri için, bu yöntemler sadece çözüm süreleri açısından karşılaştırılmışlardır. Geliştirilen yazılımın uygulaması literatürde kullanılan ölçekli bir uçak modeli için verilmiştir. Yapısal değişiklik analizi sonuçları, değiştirilmiş uçak yapısının deneysel olarak elde edilen sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapı Dinamiği, Yapısal Dinamik Değişiklik, Yapısal Değişiklik, Yeniden Çözümleme.

SOFTWARE DEVELOPED FOR THE DYNAMIC ANALYSIS OF STRUCTURES WITH LOCAL STRUCTURAL MODIFICATION AND ITS APPLICATION TO AIRCRAFT STRUCTURES

ABSTRACT

In this study; a software which is developed for the calculation of the dynamic response of structures with local structural modifications by using three different methods, one of which has been recently developed by the authors, is presented. This software, named as Structural Modification Toolbox, uses the modal analysis result files of MSC.Nastran© for the dynamic analysis of a structure and can be used to study the change in the frequency response functions due to local structural modifications by employing one of the three methods. Since all the methods are exact, they are compared in terms of computational efficiency only. Application of the software developed is given for a scaled aircraft structure that is used in the literature. The structural modification analysis results are compared with the experimental results obtained on the modified structure.

Keywords: Structural Dynamics, Structural Dynamic Modification, Structural Modification, Reanalysis.

1. GİRİŞ

Mühendislik ürünlerinin geliştirilmesinde, ilk denemede bütün gereksinimleri karşılayan en uygun ürünü elde etmek neredeyse olanaksız

olduğundan, mühendislikte kullanılan temel yaklaşımlardan birisi, hesaplama zamanını ve dolayısıyla geliştirme maliyetlerini azaltmak amacıyla, yeni tasarımı daha önce kullanılan bir ürünü temel alarak yapmaktır. Böyle bir

süreçte, yapıda değişiklikler yapılacağında, yeni yapının dinamik özelliklerini öngörebilmek gerekebilmektedir. Bunun gibi durumlarda, yeni yapının dinamik özelliklerini, yeni yapıyı bütün olarak analiz etmeye gerek olmadan, esas yapının yapısal özellikleri ve yapılacak değişikliklerin bilgisini kullanarak elde etmek için genellikle yapısal değişiklik analiz yöntemlerine başvurulur.

Bu bildirinin ilk bölümünde; yapısal değişiklik analiz yöntemleri, bu yöntemlerin önemi, literatürde kullanılan yöntemlerin temel özellikleri ve uygulama alanları hakkında özet bilgi verilmiştir. Geliştirilen yazılım ve yazılım içerisinde programlanan yöntemlerden söz edildikten sonra, bu yöntemlerin çözüm performansları bir plaka modeli kullanılarak karşılaştırılmış ve programın ölçekli bir uçak yapısına uygulaması gösterilmiştir.

2. YAPISAL DEĞİŞİKLİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Yapısal değişiklik çözümlerinde kullanılabilecek en basit yöntem, her değişiklik için, değiştirilmiş yapının analitik modelini doğrudan oluşturmaktır. Fakat bu durumda, yapının değişikliğe uğrayacağı her durum için bütün modeli yeniden oluşturmak ve çözmek için zaman ve emek harcamak gerekir. Bunun yerine, önceden elde edilen dinamik tepki verilerini kullanan, daha ekonomik yöntemlerin kullanılması tercih edilmektedir. Titreşim biçim analizinde (modal analizde) kullanılan ana terimlerden birisi olan yapısal değişiklik, ya değiştirilmiş bir yapının dinamik özelliklerini öngörmeyi (ileri yapısal değişiklik, yeniden çözümleme) ya da istenilen dinamik özellikleri elde edebilmek amacıyla mevcut bir yapı üzerinde gerekli yapısal değişiklikleri belirlemeyi (tersine yapısal değişiklik) ifade etmektedir. Yeniden çözümleme olarak da bilinen ileri yapısal değişiklik yöntemlerinde, esas yapının deneysel ya da teorik bilgiler ile oluşturulmuş yapısal özellikleri ve yapılacak değişikliklerin bilgisi kullanılır. Tersine yapısal değişiklik yöntemleri ise yapı tasarlandıktan sonra ortaya çıkan titreşim sorunlarını ortadan kaldırmak amacıyla kullanılır. Hem ileri hem de tersine yapısal değişiklik yöntemlerinde uzaysal model ya da kısmi biçim analiz modeli gerekmektedir. İleri yapısal değişiklik

yöntemlerinde çözüm tek iken, tersine yapısal değişiklik yöntemlerinde çözüm birden fazladır ya da çözüm yoktur. Çözümün birden fazla olması durumunda, incelenen yapıya göre fiziksel olarak en uygun olan çözüm veya çözümler kullanılır.

Yapısal değişiklik ile ilgili teorik çalışmalar, deneysel titreşim biçim analizi teorisinin temellerinin atılmasından sonra başlamıştır. Yeniden çözümleme yöntemlerinin analitik temeli Lancaster'ın [1, 2] çalışmaları ile başlar. Bölgesel özdeğer değişiklik yöntemi ilk olarak Weissenburger [3] tarafından sunulmuştur. Yeniden çözümlemenin ilk uygulamaları bir uçak gövdesinin kesik açılmış bir panelinin gerilme analizinde görülmektedir [4].

Yapıların yeniden çözümlemesi için geliştirilen yöntemler iki gruba ayrılır: kesin sonuç veren yöntemler ve yaklaşık sonuç veren yöntemler. Kesin sonuç veren yöntemler, yapısal yeniden çözümleme çerçevesinde, sonlu elemanlar yöntemlerinin ve sınır elemanlar matris denklemlerinin, yapısal analiz hesaplamalarında standart haline gelmesinden önce geliştirilmişlerdir. Modern yapısal yeniden çözümleme yöntemlerinin incelenmesi göstermiştir ki geliştirilen ilk yöntemler temelde Sherman-Morrison (SM) [5] ve Woodbury [6] isimli iki genel matris güncelleme formülüne dayanmaktadır. Sack vd. [7], SM formülünü esas yapı matrisinin değiştirilen her kolonu için bir defa kullanarak, değiştirilmiş yapı matrislerinin tersini elde etmiştir. Kavlie ve Powell [8], Sack vd. tarafından yapılan çalışmayı [7] bir adım daha ileri götürerek, SM formülünü değiştirilmiş yer değiştirme vektörünün hesaplanması amacıyla kullanmışlardır. Bu çalışmalarda, SM formülünde de olduğu gibi yapısal değişikliğin mertebesinde ziyade, değişiklik yapılan matris kolonlarının sayısı önemlidir. Kirsch ve Rubinstein [9], değiştirilmiş yapının matris tersinin ve yer değiştirme vektörünün hesaplanması için Woodbury formülünü kullanmışlardır. Kesin sonuç veren yöntemlerden birisi de Huand ve Verchery [10] tarafından geliştirilen yöntemdir. Akgün vd. [11], SM formülü ile doğrusal analizleri, doğrusal olmayan analizlere genişletmişlerdir. Şanlıtürk [12], yapılan değişikliğin esas yapının serbestlik derecesini değiştirmediği durumlarda geçerli olan ve SM formülüne

dayanan yeni bir yöntem önermiştir. Yöntemin, kesin sonuç veren bir yöntem olmasının yanı sıra, çözümün sadece değişiklik yapılan ve tepki fonksiyonlarının istendiği koordinatlarla sınırlandırılması, çözümde kullanılan matris boyutlarını küçültmekte ve böylece çözüm süresini azaltmaktadır. Özgüven [13], bir yapının sönümsüz FTF'lerinden sönümlü FTF'lerin elde edilebildiği bir yapısal değişiklik yöntemi geliştirmiştir. Yöntem daha sonra, matris tersi almayı gerektirmeyecek etkili bir çözüm algoritması ile birleştirilmiştir [14]. Böylece, değiştirilmiş yapının FTF'lerini, esas yapının FTF'lerini kullanarak elde edebilen yeni bir yapısal yeniden çözümleme yöntemi sunulmuş ve yöntem, yapısal değişikliğin yapının serbestlik derecesini artırması durumunda da kullanılabilir şekilde genişletilmiştir [15]. Önceki FTF yöntemleri ile karşılaştırıldığında, bu yöntemin, çözüm sürelerinde önemli bir azalma sağladığı görülmüştür.

Bae, Grandhi ve Canfield [16], statik analiz için ardışık matris tersi alma yöntemi olarak isimlendirilen bir yeniden çözümleme yöntemi geliştirmişlerdir. Köksal, Cömert ve Özgüven [17], statik analiz için geliştirilen ardışık matris tersi alma yöntemini yapıların dinamik analizi için genişletmişlerdir. Yöntem, esas yapının FTF'lerini kullanarak, değiştirilmiş yapının FTF'lerini bulmaya olanak sağlamaktadır. Bunun için, yapılacak değişiklik ile ilgili kütle, direnç ve sönümlenme matrisleri kullanılır. Bu yöntemde kullanılan temel eşitlik, Özgüven tarafından geliştirilen yöntemde [14] kullanılan temel eşitlik ile aynıdır. Bu yöntemde, matris tersi alma işlemi yerine güç serisi açılımı kullanılmaktadır.

Deneysel yeniden çözümleme yöntemleri de, kesin sonuç veren yöntemler ve yaklaşık sonuç veren yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Titreşim biçim modeli kullanan kesin cebir yöntemlerine Weissenburger [18], Pomazal [19, 20], Snyder [20] ve Mahalingam'ın [21, 22] çalışmaları önemli katkılarda bulunmuşlardır. Bu alandaki ikinci grup yöntemler ise kesik serilere ve duyarlılık analizine bağlı yöntemlerdir.

Kirsch vd. [23, 25] geliştirdikleri yöntemleri; tasarım, yapısal analiz, yeniden çözümleme ve eniyileme için kullanmışlardır. Çok fazla

tasarım parametresi değiştirilmesine rağmen doğru sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel FTF'leri kullanan FTF bağlantı yöntemi Ewins [26] tarafından incelenmiştir.

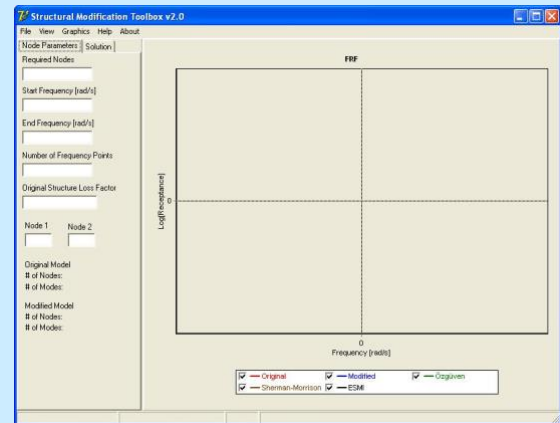
Deneysel yöntemlerde en önemli engel dönme serbestlik dereceleri ile ilgili veri toplanamamasıdır. Bu amaçla literatürde titreşim biçim genişletme ve daraltma yöntemleri kullanılmaktadır.

3. YAPISAL DEĞİŞİKLİK ARAÇ KUTUSU VE KULLANILAN YÖNTEMLER

Yapısal Değişiklik Araç Kutusu, analitik biçim analizi verilerini kullanarak, esas yapının kütle, direnç ve sönümlenme özellikleri değiştiğinde, değişmiş yapının dinamik cevabını hesaplayan bir yazılımdır. Yazılım, yapısal değişikliğin, esas yapının serbestlik derecesini değiştirmedikleri durumlarda kullanılabilir. Yazılım; Borland Delphi® kullanılarak geliştirilmiştir. Hesaplamalarda; özdeğerler, kütle göre normalize edilmiş özvektörler ve aşağıdaki formül kullanılarak FTF matrisi hesaplanır.

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{ir}\phi_{jr}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta\omega_r^2} \quad (1)$$

Esas yapı için FTF matrisi hesaplandıktan sonra, ek yapıya ilişkin veriler matris şeklinde girilir. İstenilen yöntem ile sonuç elde edilir. Yazılım, hesaplanan veriyi grafik ve sayısal veri olarak kullanıcıya sunabilir. Yazılım ile ilgili kullanım kılavuzu program içerisinde ve [27] numaralı kaynakta verilmiştir.



Şekil 1. Yapısal Değişiklik Araç Yüzü

Yazılım içerisinde, yapılan ön çalışmalarla belirlenen ve biri yazarlarca geliştirilmiş olan üç yöntem programlanmıştır. Bu yöntemler sırasıyla Özgüven yapısal değişiklik yöntemi [13-15], Sherman-Morrison yöntemini kullanan yapısal değişiklik yöntemi [12] ve genişletilmiş ardışık matris tersi alma yöntemidir [17].

3.1. ÖZGÜVEN YAPISAL DEĞİŞİKLİK YÖNTEMİ

Bölgesel değişiklikler için yapısal değişiklik formülleri aşağıdaki gibidir [14, 15]:

$$[\gamma_{11}] = \left[[I] + [\alpha_{11}][Y_{11}] \right]^{-1} [\alpha_{11}] \quad (2)$$

$$[\gamma_{12}]^T = [\alpha_{21}] \left[[I] - [Y_{11}][\gamma_{11}] \right] \quad (3)$$

$$[\gamma_{21}] = [\gamma_{12}]^T \quad (4)$$

$$[\gamma_{22}] = [\alpha_{22}] - [\alpha_{21}][Y_{11}][\gamma_{12}] \quad (5)$$

Formüllerde $[\alpha]$ esas yapının dinamik esneklik şeklinde yazılan FTF matrisi, $[\gamma]$ değiştirilmiş yapının FTF matrisi, $[I]$ birim matris, $[Y]$ ise $[Y] = \left[[\Delta K] - \omega^2 [\Delta M] + i[\Delta H] \right]$ şeklinde verilen değişiklik matrisidir. Burada 1 ve 2 indisleri sırasıyla, yapının değiştirilen ve değiştirilmeyen kısımlarına ait koordinatları göstermektedir. (2) numaralı formülde matris tersi alma işlemi olsa dahi, tersi alınacak matris boyutları değişiklik yapılan koordinat sayısı ile sınırlı olacağından, bölgesel değişiklikler için matris tersi alma işlemi çözüm süresini çok fazla arttırmayacaktır. Bununla birlikte, Özgüven tarafından önerilen çözüm algoritması kullanılarak [14], matris tersi almaktan kaçınmak mümkündür ve geliştirilen yazılımda bu algoritma kullanılmıştır. Algoritma ile ilgili ayrıntılar [14] numaralı kaynakta verilmiştir.

3.2. SHERMAN-MORRISON YÖNTEMİNİ KULLANAN YAPISAL DEĞİŞİKLİK YÖNTEMİ

Şanlıtürk tarafından önerilen yapısal değişiklik yöntemi [12], değiştirilmiş matris tersini, esas matris ve değişiklik matrisleri bilgilerini kullanarak doğrudan doğruya elde etmeye olanak sağlamaktadır.

Bu yöntemde eğer değişiklik matrisi $[Y]$,

$$[Y] = \{u\}\{v\}^T \quad (6)$$

şeklinde yazılabilirse Sherman-Morrison formülü kullanılarak $[\gamma]$ matrisi

$$[\gamma] = [\alpha] - \frac{([\alpha]\{u\})(\{v\}^T [\alpha])}{1 + \{v\}^T [\alpha]\{u\}} \quad (7)$$

eşitliğinden bulunabilir. [12] numaralı kaynakta, yapılan değişiklik boyutunun, tüm matris boyutundan daha küçük olması ve çözümün sadece bu koordinatlarda istenmesi durumunda yöntemin hesaplama süresi açısından fayda sağladığı gösterilmiştir.

3.3. GENİŞLETİLMİŞ ARDIŞIK MATRİS TERSİ ALMA YÖNTEMİ

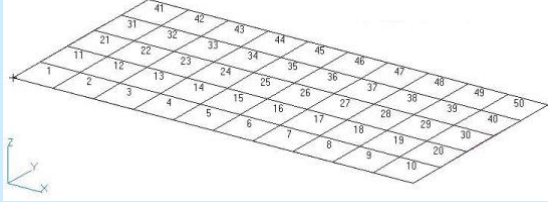
Statik yapılar için geliştirilen ardışık matris tersi alma yöntemindeki [16] temel düşünce, direngenlik matrisinin sadece değiştirilmiş kısmını kullanarak, değiştirilmiş yapının tepkisini elde etmektir. Bu makalenin yazarları tarafından önerilen yöntemde [17], ardışık matris tersi alma yöntemi, dinamik yapısal değişiklik analizi için genişletilmiştir. Değiştirilmiş yapının tepkisi, dinamik direngenlik matrisinin değiştirilmiş kısmı kullanılarak bulunabilir. Yöntemin, Özgüven Yapısal Değişiklik Yönteminden [14,15] farkı; matris tersi almak için özel bir çözüm algoritması yerine güç serisi açılımı kullanılmasıdır. Algoritma ile ilgili ayrıntılı bilgi [17] numaralı kaynakta verilmiştir.

Bu yöntemlerin teorilerine ilişkin daha ayrıntılı bilgi kaynak [28]'de verilmiştir.

4. YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmada önce, örnek sistem olarak iki ayrı plaka modeli kullanılarak yöntemlerin çözüm süreleri karşılaştırılmıştır. İkinci olarak; bir sonraki bölümde, literatürde kullanılan ölçekli bir uçak modeli, Yapısal Değişiklik Araç Kutusu kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen yapısal değişiklik analizi sonuçları, değiştirilmiş yapının deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Yöntemlerin çözüm sürelerinin karşılaştırılması için, serbest olarak asılmış bir plaka modeli kullanılmıştır. İlk modelde 50 eleman ve 6 serbestlik dereceli 66 düğüm noktası alınmıştır (bkz. Şekil 2). İkinci modelde aynı plaka 1250 eleman ve 1326 düğüm noktası ile modellenmiştir.

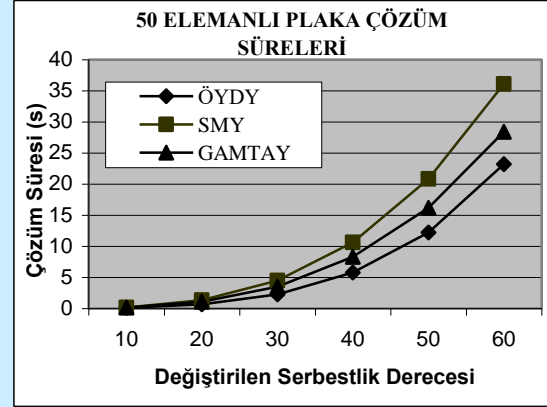


Şekil 2. 50 elemanlı plaka modeli

İlk plaka modelinde, yapı, sırasıyla 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 koordinata kütleler eklenerek değiştirilmiştir. Yapısal Değişiklik Araç Kutusu kullanılarak üç yöntem için çözüm elde etme süreleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1 ve Şekil 3'te verilmiştir. Burada ÖYDY, Özgüven Yapısal Değişiklik Yöntemini; SMY, Sherman-Morrison formülünü kullanan yapısal değişiklik Yöntemini; GAMTAY, Genişletilmiş Ardışık Matris Ters Alma Yöntemini belirtmektedir.

Tablo 1. 50 elemanlı plaka için çözüm süreleri

Değiştirilen serbestlik derecesi adedi	ÖYDY (s)	SMY (s)	GAMTAY (s)
10	0.09	0.17	0.14
20	0.69	1.33	1.06
30	2.28	4.48	3.52
40	5.78	10.6	8.30
50	12.2	20.8	16.2
60	23.2	36.1	28.4

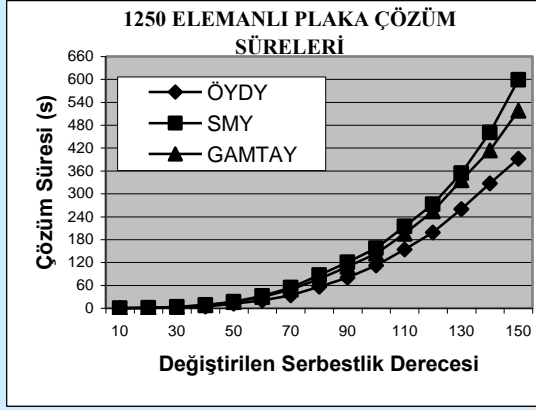


Şekil 3. 50 elemanlı plaka için çözüm sürelerinin karşılaştırılması

İkinci plaka modeli için sırasıyla 10, 20, 30, 40, ..., 150 koordinata kütle eklenmiştir. Üç yöntemin çözüm süreleri Tablo 2 ve Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 2. 1250 elemanlı plaka için çözüm süreleri

Değiştirilen serbestlik derecesi adedi	ÖYDY (s)	SMY (s)	GAMTAY (s)
10	0.09	0.17	0.14
20	0.69	1.33	1.06
30	2.30	4.48	3.53
40	5.58	10.6	8.28
50	11.9	20.7	16.2
60	21.4	36.0	28.1
70	38.6	57.5	45.4
80	61.7	89.0	71.6
90	92.2	131	107
100	132	183	154
110	181	270	218
120	235	350	282
130	303	452	365
140	378	571	459
150	465	709	569

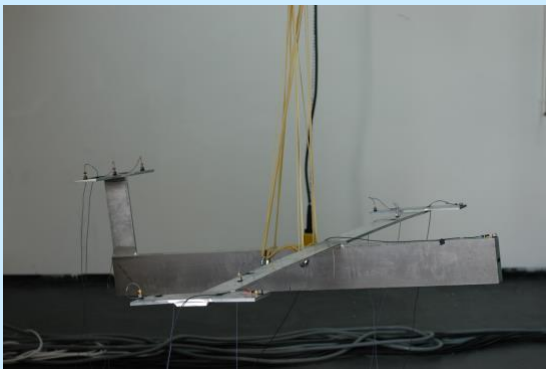


Şekil 4. 1250 elemanlı plaka için çözüm sürelerinin karşılaştırılması

Yapısal Değişiklik Araç Kutusu, değiştirilmiş yapı için de MSC.Nastran® kullanılarak analiz yapma yeteneğine sahiptir. Plaka modeli için tüm çözümler, doğrulama amacıyla, MSC-Nastran® ile de yapılmış ve sonuçların aynı olduğu görülmüştür.

5. ÖLÇEKLİ UÇAK MODELİ UYGULAMASI VE SONUÇLAR

Yapısal Değişiklik Araç Kutusu kullanılarak, ölçekli bir uçak yapısı üzerindeki yapısal değişiklikler incelenmiştir. Literatürde de kullanılan deneysel model, GARTEUR SM-AG19 modeli olarak bilinmektedir. Kullanılan modelin GARTEUR SM-AG19 modelinden iki küçük farkı vardır: gövde-kanat, gövde-dikey dengeleyici ve dikey dengeleyici-yatay dengeleyici bağlantıları cıvata yerine kaynak ile yapılmıştır ve ayrıca GARTEUR SM-AG19 modelinde kullanılan viskoelastik şerit, bu çalışma kapsamında üretilen modelde kullanılmamıştır. Ölçekli uçak modelinin genel görünümü Şekil 5'te verilmiştir.

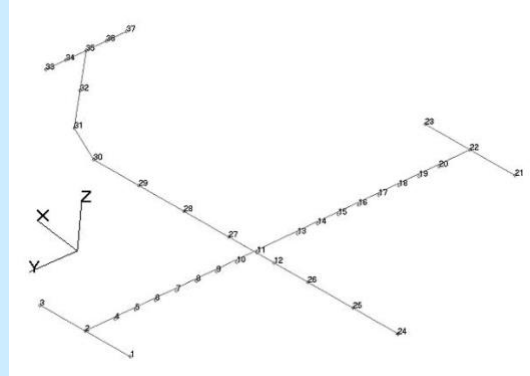


Şekil 5. Ölçekli uçak modeli

Yapısal değişiklik uygulamasından önce, yapının sonlu elemanlar modeli, bir başka

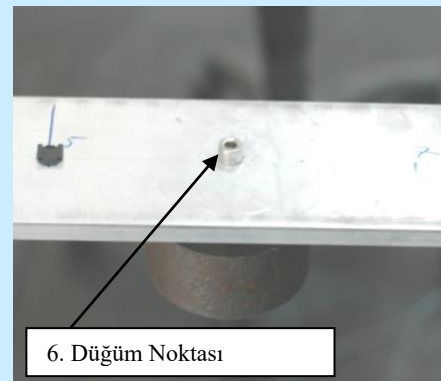
çalışma kapsamında [28], deneysel titreşim analizi verisi kullanılarak güncellenmiştir ve bu çalışmada güncellenmiş sistem matrisleri kullanılmıştır.

Yapının ek kütsüz ve ek kütleler asılmış hali üzerinde iki test yapılmıştır. Testlerde yapıyı tahrik etmek için 2 farklı büyüklükte darbe çekici ve 12 ivmeölçer kullanılmıştır. Yapı 36 düğüm noktasından toplam 66 serbestlik derecesinden tahrik edilmiştir. Her iki testte de aynı eksen takımı, ölçüm ve tahrik noktaları kullanılmıştır (bkz. Şekil 6). Testler ve titreşim biçim analizleri için LMS.TestLab® yazılımı ve LMS SCADAS III® donanımı kullanılmıştır.

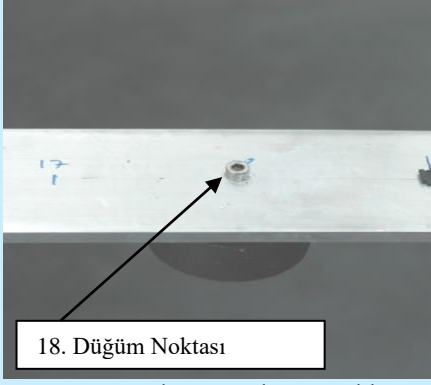


Şekil 6. Koordinat takımı, ölçüm ve tahrik noktaları

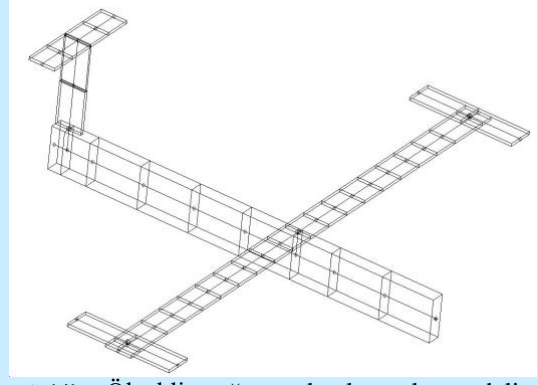
Yapısal değişiklik olarak her iki kanada da 1.8 kg'lık kütleler eklenmiştir (bkz. Şekil 7 ve Şekil 8).



Şekil 7. Altıncı düğüm noktasına eklenen kütle



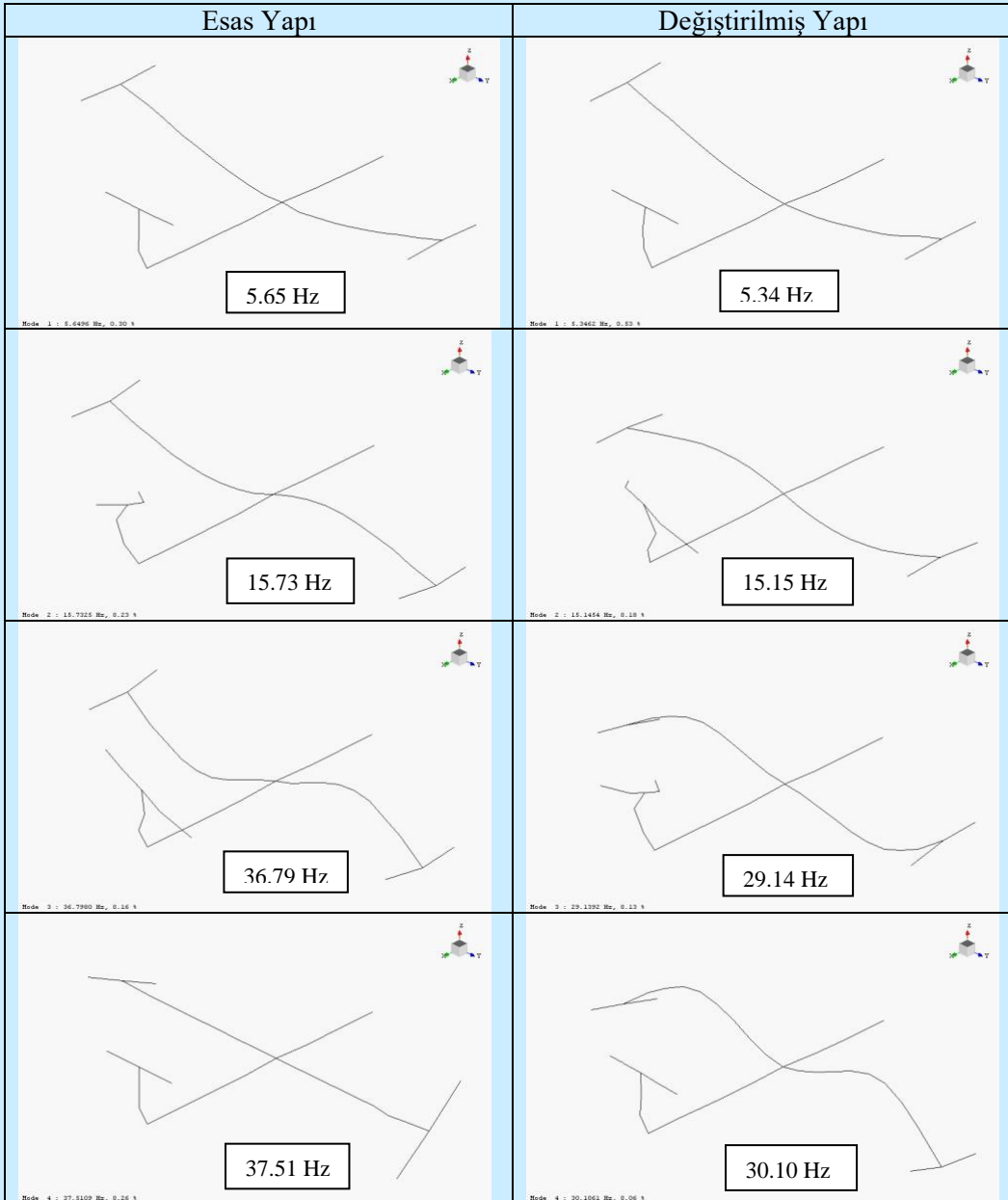
Şekil 8. Onsekizinci düğüm noktasına eklenen kütle

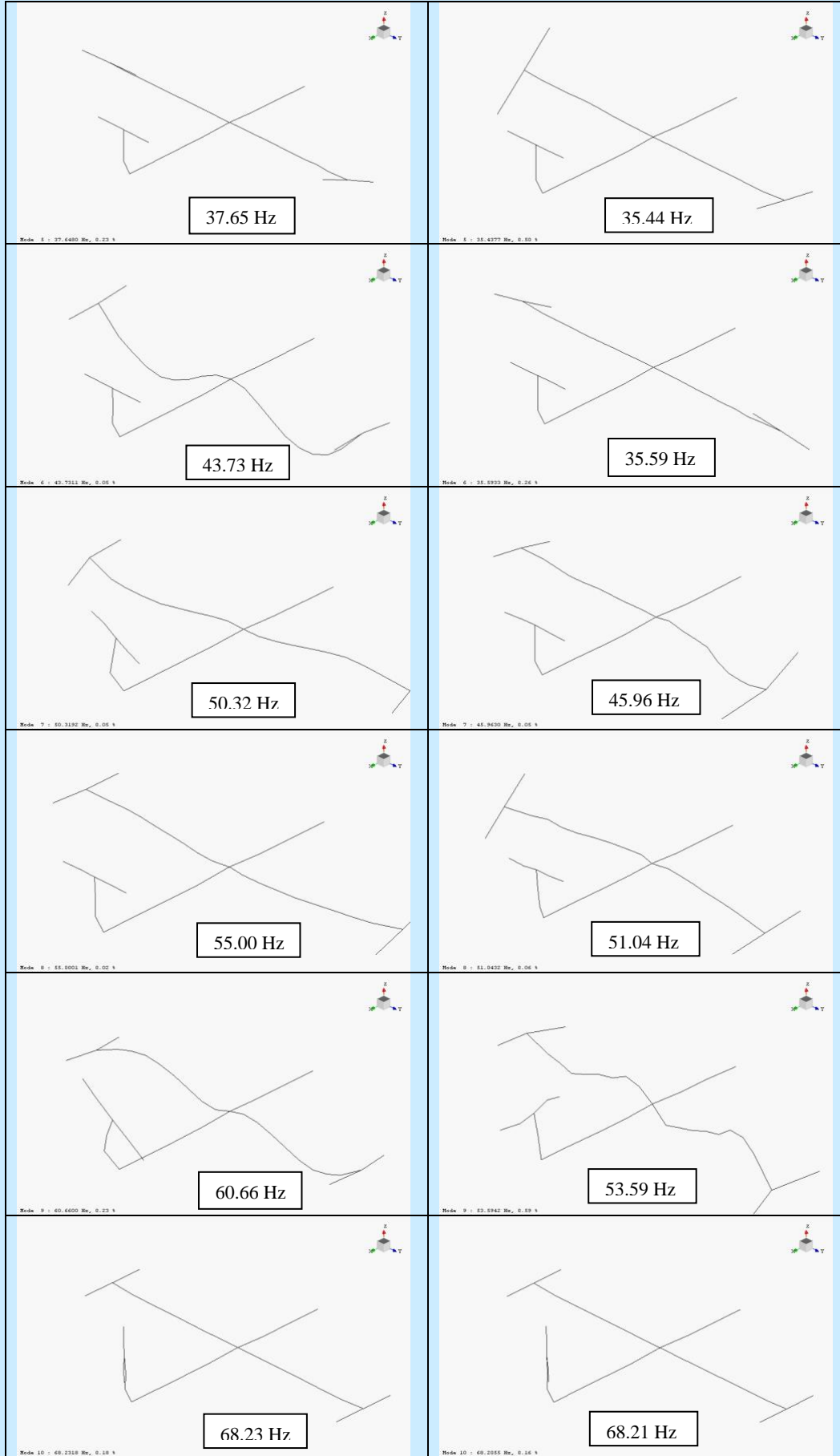


Şekil 9. Ölçekli uçta sonlu elemanlar modeli

Kiriş elemanlardan oluşturulan 3 boyutlu güncellenmiş sonlu elemanlar modeli Şekil 9'da gösterilmiştir.

Her iki test sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve titreşim biçimleri Şekil 10'da verilmiştir.

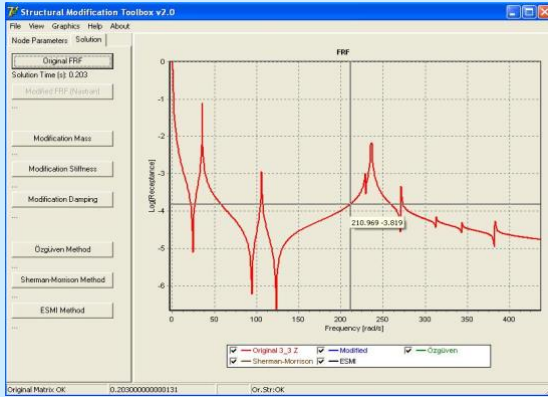




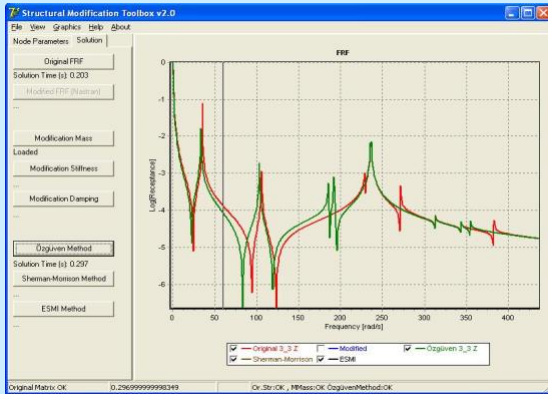
Şekil 10. Esas ve değiştirilmiş yapının deneysel doğal frekansları ve titreşim biçimleri

Yapısal Değişiklik Araç Kutusu kullanılarak, MSC.Nastran® ile oluşturulan esas model üzerine yapılan yapısal değişiklikler yansıtılmıştır. Yapısal Değişiklik Araç Kutusunda elde edilen sonuçlar Şekil 11 ile Şekil 14 arasında verilmiştir. Burada sadece 3 numaralı düğüm noktası için çözüm yapılmıştır.

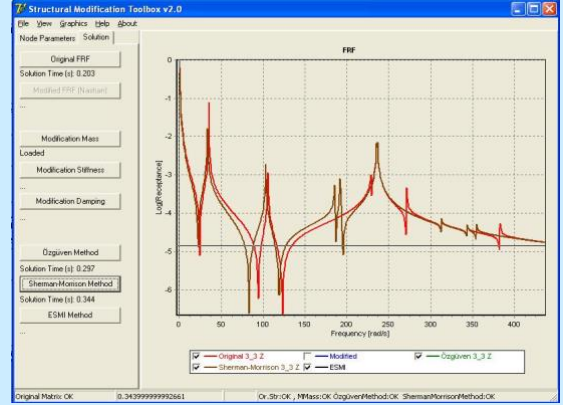
Her yapının mutlaka sönümleme özelliği olduğundan, yapısal sönümlemeyi modellemek için ölçekli uçak yapısı analiz edilirken kayıp faktörü 0.002 olarak alınmıştır.



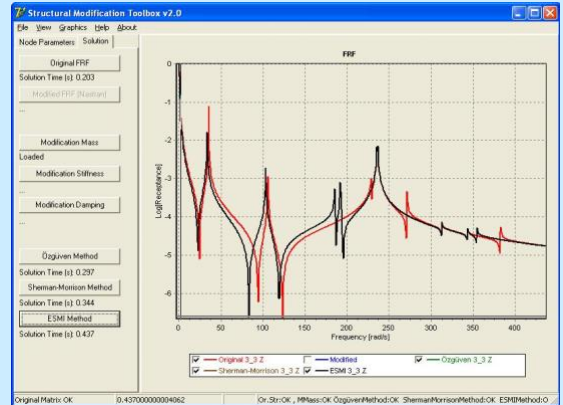
Şekil 11. Esas yapının FTF'si.



Şekil 12. ÖYDY ile elde edilen çözüm



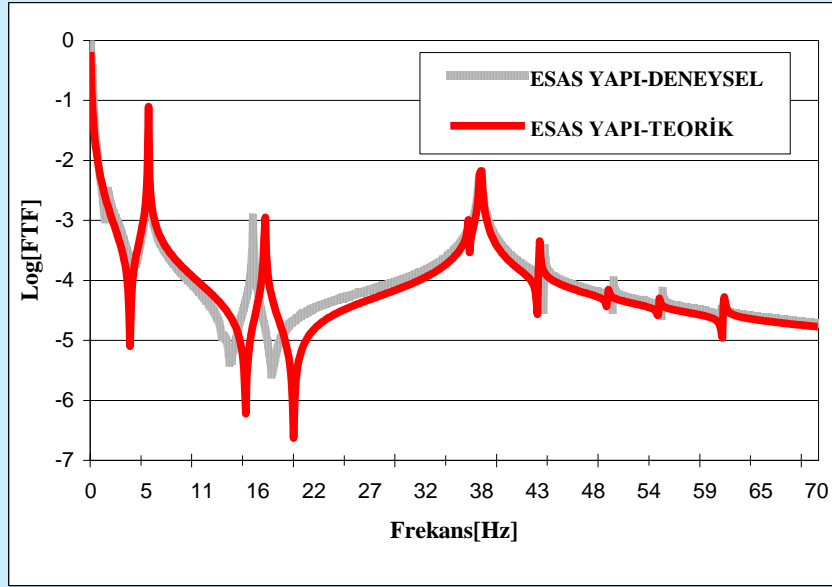
Şekil 13. SMY ile elde edilen çözüm



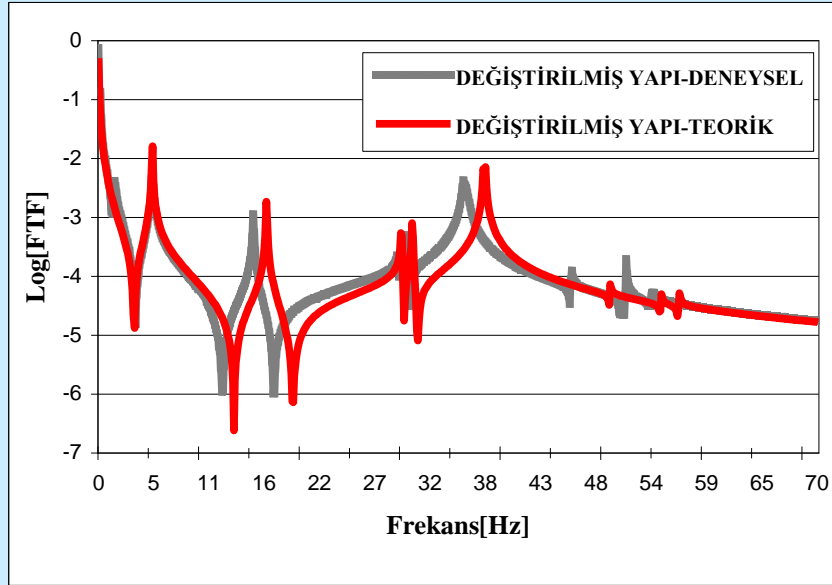
Şekil 14. GAMTAY ile elde edilen çözüm

Asıl yapının güncellenmiş sonlu elemanlar modelinden elde edilen FTF'ler ile deneysel FTF'lerin karşılaştırılması Şekil 15'te verilmiştir. Daha sonra, değiştirilmiş yapının teorik FTF'leri Yapısal Değişiklik Araç Kutusu kullanılarak hesaplanmış ve değiştirilmiş yapının deneysel FTF'leri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 16).

Şekil 15'ten de görülebileceği gibi, esas yapının deneysel ve teorik FTF'leri, yapının ikinci doğal frekansı dışında uyum içerisindedir. Benzer uyum değiştirilmiş yapı için verilen FTF'lerde de gözlenmektedir.



Şekil 15. 3 numaralı düğüm noktası için esas yapının deneysel ve teorik FTF karşılaştırması



Şekil 16. 3 numaralı düğüm noktası için değiştirilmiş yapının deneysel ve teorik FTF karşılaştırması

Değiştirilmiş yapının ikinci doğal frekansında oluşan farklılık, esas yapının ikinci doğal frekansındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Bunun dışındaki uyumsuzluğun nedeni ise yapılan değişikliğin modellenmesi ile ilgilidir. Kullanılan bütün yöntemler kesin sonuçlar veren yöntemler olduğundan, yapısal değişikliğin modellenmesi ne kadar iyi olursa, elde edilen sonuçlar da o kadar gerçeğe uygun olacaktır. Burada yapıya eklenen kütleler sadece doğrusal serbestlik derecelerinde nokta kütle olarak modellenmiştir. Gerçekte bu kütleler, dönme serbestlik derecelerini de ataletleri yüzünden etkilemektedirler. Yapının sönüm matrisi güncellenmediğinden FTF'

lerin büyüklüklerinde özellikle doğal frekans ve antirezonslar civarında uyumsuzluk olması beklenen bir sonuçtur.

6. SONUÇ

Bu çalışmada; bölgesel değişikliğe uğrayan yapıların dinamik cevaplarını hesaplamakta kullanılan, biri bu bildirinin yazarları tarafından yakın zamanda geliştirilmiş, üç farklı yöntemi kullanabilen bir yazılım tanıtılmıştır. Yöntemlerin hepsi kesin sonuçlar veren yöntemlerdir. Bu yöntemler çözüm süreleri açısından karşılaştırılmışlardır. Özgüven Yapısal Değişiklik Yönteminin,

çözüm süresi açısından en hızlı yöntem olduğu görülmüştür. Örnek uygulamalar, sistemin toplam serbestlik derecesine ve değişiklik yapılan koordinatlarının sayısına bağlı olarak, Sherman-Morrison formülünü kullanan yapısal değişiklik Yönteminin % 90'ı, Genişletilmiş Ardışık Matris Tersi Alma Yönteminin ise %50'yi geçen oranlarda daha fazla çözüm süresi gerektirebildiğini göstermiştir. Ayrıca, geliştirilen yazılımın uygulaması, literatürde kullanılan ölçekli bir uçak modeli için verilmiştir. Yapısal değişiklik analizi sonuçları, değiştirilmiş uçak yapısının deneysel olarak elde edilen sonuçlarıyla da karşılaştırılmış ve bu yazılımın gerçek yapılar için başarıyla kullanılabileceği gösterilmiştir.

7. SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>
i	Birim sanal sayı
$[I]$	Birim matris
η	Kayıp katsayısı
$\{u\}$	Çözülme vektörü
$\{v\}$	Çözülme vektörü
$\{\phi\}$	Kütleye göre normalize edilmiş özdeğer vektörü
ω	Tahrik frekansı
$[Y]$	Değişiklik matrisi
$[\alpha]$	Esas yapı FTF matrisi
$[\gamma]$	Değiştirilmiş yapı FTF matrisi
$[\Delta H]$	Yapısal sönümleme değişiklik matrisi
$[\Delta K]$	Dirençlilik değişiklik matrisi
$[\Delta M]$	Kütle değişiklik matrisi
$\{ \}^T$	Vektör transpozu
$[]^{-1}$	Matris tersi
<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
FTF	Frekans Tepki Fonksiyonu
GAMTAY	Genişletilmiş Ardışık Matris Tersi Alma Yöntemi
GARTEUR	Avrupa Havacılık Araştırma ve Teknoloji Topluluğu
SM	Sherman-Morrison
SMY	Sherman-Morrison Yöntemini Kullanan Yapısal Değişiklik Yöntemi

ÖYDY Özgüven Yapısal Değişiklik Yöntemi

8. KAYNAKLAR

- [1] Lancaster, P., Free Vibrations of Lightly Damped Systems by Perturbation Methods, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 13, s. 138-155, 1960.
- [2] Lancaster, P., Lambda Matrices and Vibrating Systems, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [3] Weissenburger, J. T., Effects of Local Modifications on the Vibration Characteristics of Linear Systems, Tr ASME, Journal of Applied Mechanics, 35, s. 327, 1968.
- [4] Cicala, P., Effect of Cut-outs in Semimonocoque Structures, Journal of the Aeronautical Sciences, 15, n.3, s. 171, 1948.
- [5] Sherman, J., Morrison, W. J., Adjustment of an Inverse Matrix Corresponding to Changes in the Elements of a Given Column or Given Row of the Original Matrix, Ann. Math. Statist., 20, s.621, 1949.
- [6] Woodbury, M., Inverting Modified Matrices, Memorandum Report 42, Statistical Research Group, Princeton University, Princeton, NJ, 1950.
- [7] Sack, R. L., Carpenter, W. C., Hatch, G. L., Modification of Elements in the Displacement Method, AIAA Journal, 5, n.9, s. 1708-1710, 1967.
- [8] Kavlie, D., Powell, G. H., Efficient Reanalysis of Modified Structures, Journal of the Structural Division, ASCE, 97 (ST1), s. 377-392, 1971.
- [9] Kirsch, U., Rubinstein M. F., Reanalysis for Limited Structural Design Modifications, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 98 EM1, s. 61-70, 1972.
- [10] Huang, C., Verchery, G., An Exact Structural Static Reanalysis Method, Communications in Numerical Methods in Engineering, 13, s. 103-112, 1997.
- [11] Akgün, M. A., Garcelon, J. H., Raphael, T. H., Fast Exact Linear and Nonlinear Structural Reanalysis and the Sherman-Morrison-Woodbury Formulas, International Journal for

- Numerical Methods in Engineering, 50, s. 1587-1606, 2001.
- [12] Şanlıtürk, K. Y., An Efficient Method for Linear and Nonlinear Structural Modifications, Proceedings of ESDA 2002: 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2002/APM -028, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [13] Özgüven, H. N., Determination of Receptances of Locally Damped Structures, Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, v.2, s. 887-892, Southampton, İngiltere, 9-13 Nisan 1984.
- [14] Özgüven, H. N., A New Method for Harmonic Response of Non-proportionally Damped Structures Using Undamped Modal Data, Journal of Sound and Vibration, 117, n. 2, s. 313-328, 1987.
- [15] Özgüven, H. N., Structural Modifications Using Frequency Response Functions, Mechanical Systems and Signal Processing, 4, n.1, s. 53-63, 1990.
- [16] Bae, H., Grandhi, R. V., Canfield, R. A., Successive Matrix Inversion Method for Reanalysis of Engineering Structural Systems, AIAA Journal, 42, n. 8, s. 1529, 2004.
- [17] Köksal, S., Cömert, M. D., Özgüven, H. N., Reanalysis of Dynamic Structures Using Successive Matrix Inversion Method, Proceedings of the 24th International Modal Analysis Conference (IMAC XXIV), St. Louis, MO, 30 Ocak- 2 Şubat 2006.
- [18] Weissenburger, J. T., The Effect of Local Modifications on the Eigenvalues and Eigenvectors of Linear Systems, ScD Dissertation, Server Institute, Washington U, St Louis, MO, 1966.
- [19] Pomazal, R. J., The Effect of Local Modifications on the Eigenvalues and Eigenvectors of Damped Linear Systems, PhD Thesis, Michigan Technological University, 1969.
- [20] Pomazal, R. J., Synder, V. W., Local Modifications of Damped Linear Systems, AIAA Journal, 9, s. 2216, 1970.
- [21] Mahalingam, S., The Synthesis of Vibrating Systems by Use of Internal Harmonic Receptances, Journal of Sound and Vibration, 40, s. 337, 1975.
- [22] Mahalingam, S., The Response of Vibrating Systems with Coulomb and Linear Damping Inserts, Journal of Sound and Vibration, 41, s. 311, 1975.
- [23] Kirsch, U., A Unified Reanalysis Approach for Structural Analysis, Design, and Optimization, Struct. Multidisc. Optim., 25, s. 67-85, 2003.
- [24] Kirsch, U., Bogomolni, M., Error Evaluation in Approximate Reanalysis of Structures, Struct. Multidisc. Optim., 28, s. 77-86, 2004.
- [25] Kirsch, U., Papalambros, P. Y., Structural Reanalysis for Topological Modifications-A Unified Approach, Struct. Multidisc. Optim., 21, s. 333-334, 2001.
- [26] Ewins, D. J., Mobility Measurements for the Vibration Analysis of Connected Structures, Combined Experimental Analytical Modeling of Dynamic Structural Systems, 67, s. 31, 1985.
- [27] Köksal, S., Development and Comparative Evaluation of a New Structural Modification Method in Application to Aircraft Structures, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2006.
- [28] Köksal, S., Cömert, M. D., Özgüven, H. N., Comparison and Application of Reanalysis Methods, Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference (IMAC XXV), Orlando, Florida, 19 - 22 Şubat 2007.
- [29] Kozak, M. T., Cömert, M. D., Özgüven, H. N., A Model Updating Routine Based on the Minimization of a New Frequency Response Based Index for Error Localization, Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference (IMAC XXV), Orlando, Florida, 19 - 22 Şubat 2007.