

## HAVACILIKTA KULLANILAN ALUMİNYUM VE KOMPOZİT YAPILARIN SONLU ELEMANLAR MODELLERİNİN MODAL GÜNCELLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK GERÇEK YAPI İLE BENZEŞTİRİLMESİ

Kurtuluş ERSOY<sup>1</sup>

Mekanik Analiz ve Test Birimi, HUPEMM/REHİS, Aselsan A.Ş., ANKARA

### ÖZET

*Bu çalışma sonlu elemanlar modellerinin doğrulanması ve güncellenmesi amacıyla kullanılan modal güncelleme yöntemleri üzerinedir. Bu çalışmada örnek yapılar için modal güncelleme yapıp güncellenen sonlu elemanlar modelinin farklı yükleme koşullarında verdiği sonuçların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Örnek modeller havacılık yapılarında çoğunlukla kullanılan alüminyum ve kompozit plakalardır. Sonlu elemanlar modellerinin oluşturulmasında ve çözülmesinde Altair Hypermesh yazılımı ve Radioss çözücüsü, modal testlerin yapılması ve analiz edilmesi için LMS Scadas Veri Toplama Sistemi ve LMS Testlab yazılımı, modal güncelleme çalışmaları için LMS Virtual Lab yazılımı ve Nastran optimizasyon çözücüsü kullanılmıştır. Çalışmada doğal frekans ve mod şekilleri farklarını artık değerler olarak kullanan metod uygulanmıştır. Alüminyum plaka sonlu elemanlar modelinde ilk üç doğal frekans değeri, elastik modülü ve yoğunluk değerleri güncellenerek, testler ile uyumlu hale getirilmiştir. Daha sonra test edilen plakaya ve güncellenmiş sonlu elemanlar modeline belirli bir ağırlık eklenerek testler ve analizler tekrarlanmıştır. Güncellenmiş sonlu elemanlar modeli analiz sonuçlarının test sonuçları ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Kompozit plaka için de benzeri çalışma yapılmıştır. Kullanılan test verileri ve parametreler ile aynı anda birden çok mod için yakınsama sağlanamamış ve çalışmalar sadece ilk mod güncellenerek yapılmıştır. Bu yapı için metal plakadan farklı olarak ivmeölçer kütle ve tahmini atalet momenti değerleri de sonlu elemanlar modeline eklenmiş ve bu parametreler de güncellenmiştir.*

### GİRİŞ

Hazırlanan sonlu eleman modelleri, genel olarak, modellemedeki belirsizlikler, sınır koşullarının tam olarak uygulanamaması, bağlantı elemanları ve temas modellemelerindeki hatalar vb. nedenlerle gerçek yapıdan farklı dinamik davranışlar gösterebilmektedir. Gerçek yapıyla olası her koşulda (sonradan ağırlık eklenmesi, farklı konfigürasyonlar) test yapılması ve yapının dinamik davranışının ne olacağının öngörülmesi pratikte mümkün olmamaktadır. Bu durumda da rezonans çakışmaları, entegrasyon yapılan yapıların (helikopter kuyruğu, uçak kanadı vb.) ömür yetersizlikleri vb. doğru olarak saptanamamaktadır. Bu kapsamda sonlu elemanlar modelinin referans modal test sonucuna göre güncellenip tüm koşullarda doğru dinamik davranış gösterecek şekilde kullanılabilmesi dinamik tabanlı analizler açısından oldukça önemlidir. Modal güncelleme çalışmaları yaklaşık 35 yıllık bir geçmişe sahiptir. Baruch katılık ve esneklik matrislerini güncellerken [Baruch, 1978], Berman ve Nagy kütle ve katılık matrislerinin güncellenmesi için yöntemler geliştirmiştir [Berman ve Nagy, 1983]. Lin ve Zhu Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF) metodu ile katılık ve kütle matrislerinin yanı sıra sönümlenme matrislerinin tanımlanmasını da sağlamıştır [Lin ve Zhu, 2006.]. [Göge ve Link, 2003] doğal frekans ve mod şekilleri farklarını, artık

<sup>1</sup> Uzman Mühendis, E-posta: kersoy@aselsan.com.tr

değerler olarak kullanan yöntem ile doğal frekans ve FRF hatalarını kullanan yöntemi karşılaştırmıştır. İki yöntem de kütle ve katılık matrisleri ile geometrik parametreleri güncelleyebilmektedir. İkinci yöntem FRF'leri de kullandığı için ayrıca sönümlenme değerlerini de güncelleyebilmektedir. İki yöntemin de başarılı sonuçlar elde edebildiği gösterilmiştir [Göge ve Link, 2003]. Bu çalışmada doğal frekans ve mod şekilleri farklarını artık değerler olarak kullanan metod uygulanmıştır.

## YÖNTEM

Modal güncelleme işlemleri uygun formatta modal analiz ve test sonuçları elde edildikten sonra temel olarak 3 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar korelasyon analizleri, parametre hassasiyet analizleri ve optimizasyon aşamalarıdır.

### Korelasyon Analizleri

Test verileri ile sonlu elemanlar modelinin (sayısal model) karşılaştırılıp, test modeli (gerçek model) ile sonlu elemanlar modeli arasındaki farklılıkların tespit edildiği kısımdır. Temel olarak geometrik korelasyon ve dinamik korelasyon olmak üzere 2 adımdan oluşmaktadır.

**Geometrik Korelasyon:** Test geometrik modeli ile sonlu elemanlar modelinin eşleştirildiği bölümdür. Bu aşama ile test modelinde yer alan veri toplama noktalarına karşılık gelen sonlu elemanlar modelindeki düğüm noktaları belirlenmektedir.

**Dinamik Korelasyon:** Bu aşamada test ve sonlu eleman modelinin doğal frekansları ve mod şekilleri karşılaştırılmaktadır. Mod şekillerinin korelasyon derecelerinin elde edilmesi için de MAC (Modal Assurance Criterion) fonksiyonu ile yapılmaktadır.

MAC hesaplanırken 1 numaralı denklem kullanılmaktadır. Bu denklemde  $\{\varphi\}_r$  ve  $\{\varphi\}_s$  ilgili iki mod şeklidir.  $MAC=1$  mükemmel korelasyonu,  $MAC=0$  ise korelasyon olmadığını göstermektedir. Pratik uygulamalarda ise, örneğin uydu için, temel eğilme modu için MAC değerinin 0.9'dan büyük frekans sapmasının %3'ten küçük, diğer modlar için ise MAC değerinin 0.8'den büyük, frekans sapmasının %10'dan küçük olması gerektiği belirtilmektedir [ECSS Requirements & Standards Deviation, 2008].

$$MAC_{rs} = \frac{|\{\varphi\}_r^T \{\varphi\}_s|^2}{[\{\varphi\}_r^T \{\varphi\}_r][\{\varphi\}_s^T \{\varphi\}_s]} \quad (1)$$

Korelasyon analizleri modal güncelleme tekniğinin ilk aşaması olması yanı sıra test modeli ile analiz modelinin ya da iki farklı yöntemle hazırlanmış analiz modellerinin mod şekillerinin uyumluluğunun tespiti için de kullanılabilir. Uhl ve çalışma arkadaşları bir helikopter modeli için yapılan modal analiz ve modal test sonuçlarını kullanarak korelasyon analizleri yapmış ve sonlu elemanlar modelinin kullanılabilmesi için modal güncelleme adımlarının uygulanması gerektiğine karar vermişlerdir. Ayrıca bu çalışmada bazı veri toplama noktalarını modal test sonuçlarından çıkardıklarında MAC değerlerinin arttığını göstermişlerdir [Uhl, Bochniak, Lisowski, Hermans, Auweraer ve Malecki, 1998]. Çınar ise çalışmasında alüminyum bal peteği malzemedan oluşan bir plaka için oluşturduğu kabuk ve katı elemanlardan oluşan modellerin mod şekillerinin uyumlu olup olmadığını korelasyon analizleri sonucu hesapladığı MAC değerleri ile değerlendirmiştir [Çınar, 2014].

### Hassasiyet Analizleri

Hassasiyet analizleri ile modal frekansların ve mod şekillerinin, tasarım parametrelerine ait olan hassasiyetleri belirlenir. Bu sayede bir sonraki aşamada yapılacak modal güncelleme işleminde hangi parametrelerin önemli ya da önemsiz olduğuna karar verilir.

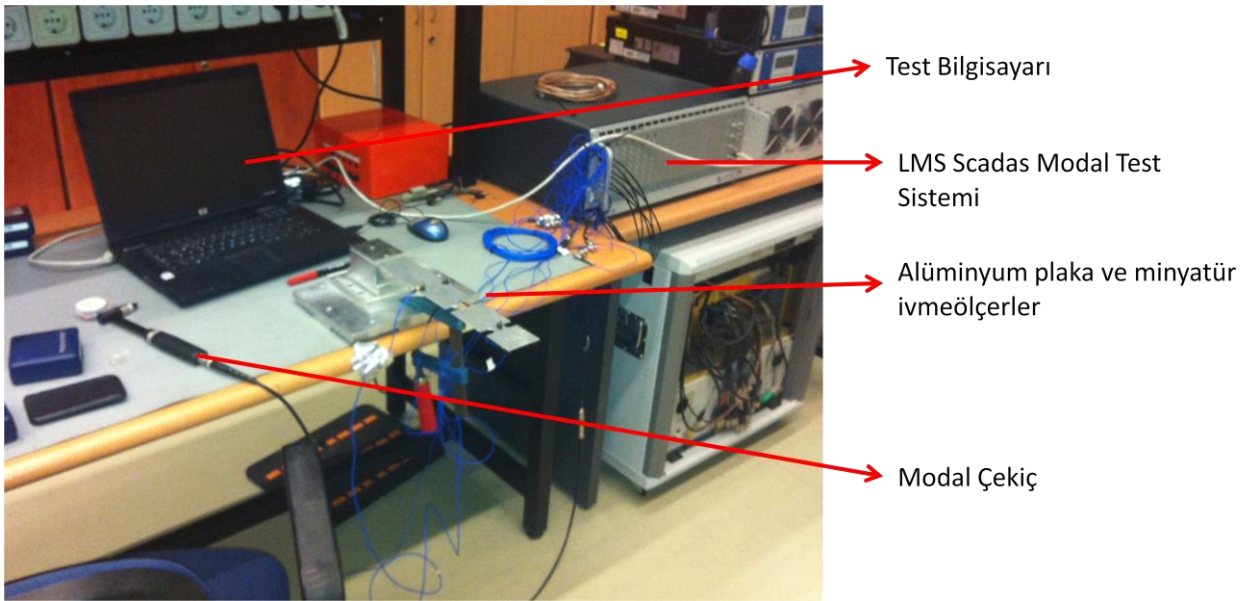
## Optimizasyon

Optimizasyon çalışmalarına hassasiyet analizleri sonucu belirlenen değişkenler (kalınlık, yoğunluk, elastik modülü, kompozit malzeme mevcut ise fiber açısı vb.) girdi olarak tanımlanır. Sonlu elemanlar modelinde, test modeli ile eşleşmesi istenen modlar belirlenir ve çıktı olarak tanımlanır. Nastran SOL200 gibi optimizasyon çözücülerini kullanılarak test modeli baz alınarak sonlu elemanlar modeli test modeli ile uyumlu hale getirilebilmektedir.

## UYGULAMALAR

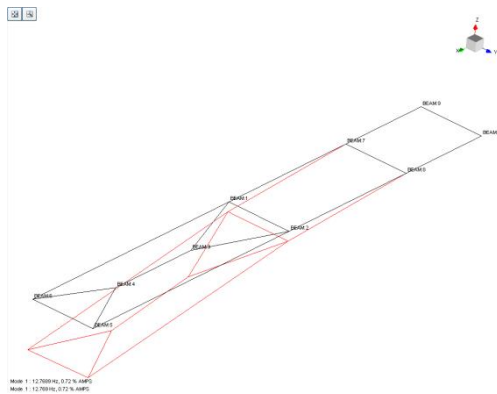
### Alüminyum Plaka Modal Güncelleme Çalışmaları

**Modal Test:** Modal Test Düzeneği Şekil 1 ile gösterilmiştir. Alüminyum plaka ve bağla olduğu fikstür mengene yardımı ile sabitlenmiştir. Uygun noktalardan modal çekiç ile tahrik edilmiş ve minyatür ivmeölçerler de yardımıyla 6 noktadan LMS Scadas Veri Toplama Sistemi ile veri toplanmıştır.

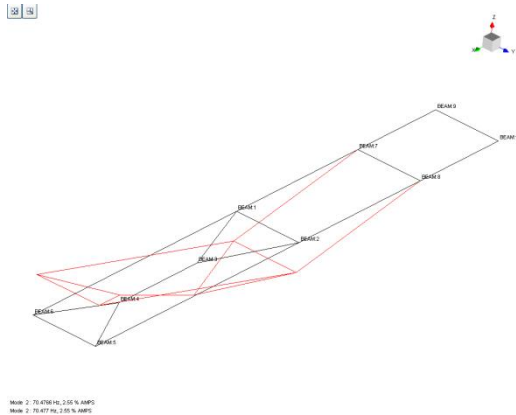


Şekil 1: Alüminyum Plaka Test Düzeneği

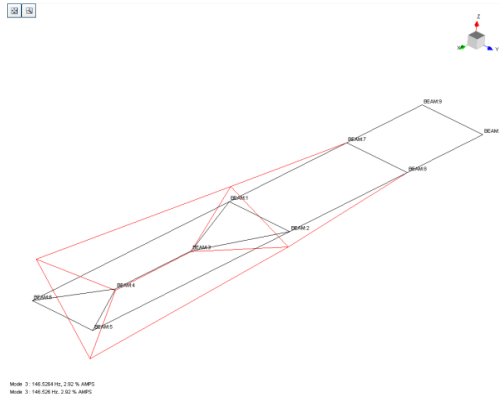
Modal testler sonucunda ilk doğal frekans değeri 12.8 Hz (Şekil 2), ikinci doğal frekans değeri 70.5 Hz (Şekil 3), üçüncü doğal frekans değeri 146.5 Hz (Şekil 4) olarak hesaplanmıştır. Modal test verilerinin analizlerinde LMS Testlab yazılımında yer alan Polymax modal parametre tahmini metodu kullanılmıştır [Lau, Lanslots, Peeters ve Auweraer, 2007].



Şekil 2: Alüminyum Plaka Modal Test Sonucu 1. Eğilme Mod Şekli-12.8 Hz



Şekil 3: Alüminyum Plaka Modal Test Sonucu 2. Eğilme Mod Şekli-70.5 Hz



Şekil 4: Alüminyum Plaka Modal Test Sonucu 1. Burulma Mod Şekli-146.5 Hz

Modal Analiz: Test edilen yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 5 ile gösterildiği gibi kabuk elemanları kullanılarak hazırlanmıştır.



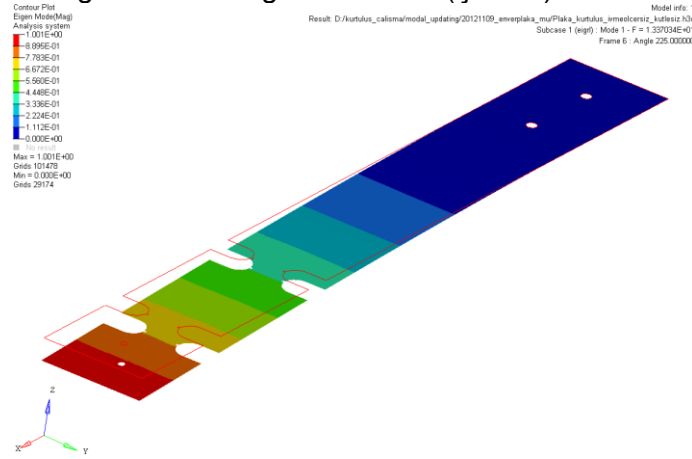
Şekil 5: Alüminyum Plaka Sonlu Elemanlar Modeli

Model ile ilgili bilgiler Tablo 1 ile özetlenmiştir.

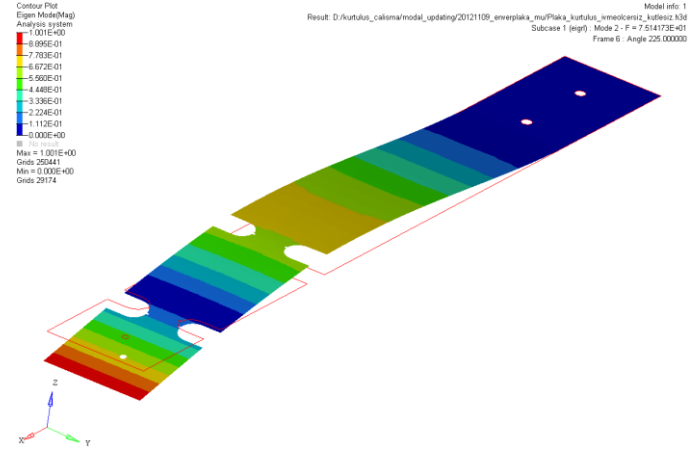
Tablo 1: Alüminyum Plaka Sonlu Elemanlar Modeli Bilgileri

Düğüm Noktası Sayısı	6579
Serbestlik Derecesi	39162
Eleman Sayıları	6413
- QUAD4	6222
- TRIA3	191
SPC Sayısı	1
Malzeme	Alüminyum
- Elastik Modülü	69000 MPa
- Yoğunluk	2800 kg/m <sup>3</sup>
Kalınlık	1.6 mm

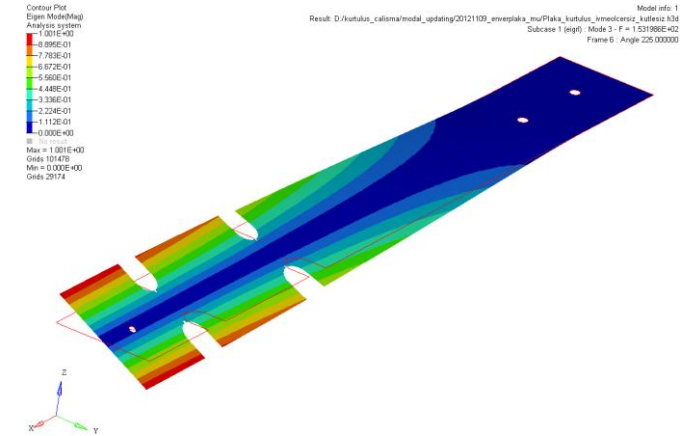
Modal analizler sonucunda ise ilk doğal frekans değeri 13.4 Hz (Şekil 6), ikinci doğal frekans değeri 75.1 Hz (Şekil 7), üçüncü doğal frekans değeri 153.2 Hz (Şekil 8) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6: Alüminyum Plaka Modal Analiz Sonucu 1. Eğilme Mod Şekli-13.4 Hz

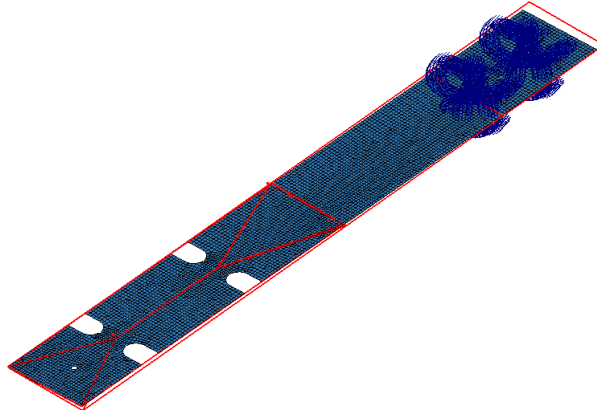


Şekil 7: Alüminyum Plaka Modal Analiz Sonucu 2. Eğilme Mod Şekli-75.1 Hz



Şekil 8: Alüminyum Plaka Modal Analiz Sonucu 1. Burulma Mod Şekli-153.2 Hz

Modal Güncelleme: Test modeli ile sonlu elemanlar modeli Şekil 9 ile gösterildiği gibi üst üste getirilerek ve düğüm noktası eşleştirmeleri yapılarak geometrik korelasyon sağlanmıştır.



Şekil 9: Alüminyum Plaka Test ve Analiz Modeli Geometrik Korelasyonu

Geometrik korelasyon tamamlandıktan sonra dinamik korelasyon analizleri MAC (Modal Assurance Criterion) fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Şekil 10 ile gösterilen mod eşleşme tablosu incelendiğinde ilk 3 modun yüksek uyumlu olarak eşleştiği görülmektedir. Aynı tablo frekans farklarını da içermektedir. İlk eğilme modu için frekans sapması % 4.7 ikinci ve üçüncü modlar için ise frekans sapması sırasıyla %6.1 ve %4.5'tir.

MAC Mode Pair Table.2

Mode Pair Table Name : MAC Mode Pair Table.2

Mode or Vector Tracking : Track highest MAC value, set 2 (Reduced Verification N

Creation: Threshold MAC Value 0 Apply

Automatic  Max Frequency Difference 0

Manual  Max Damping Difference 0

Diagonal Filter No Filter

Display Mode Images Colored Images from s

Filter Images using MAC options Export ...

Animate Mode Images Print ...

Complex Mode Phase Offset (deg) : 0

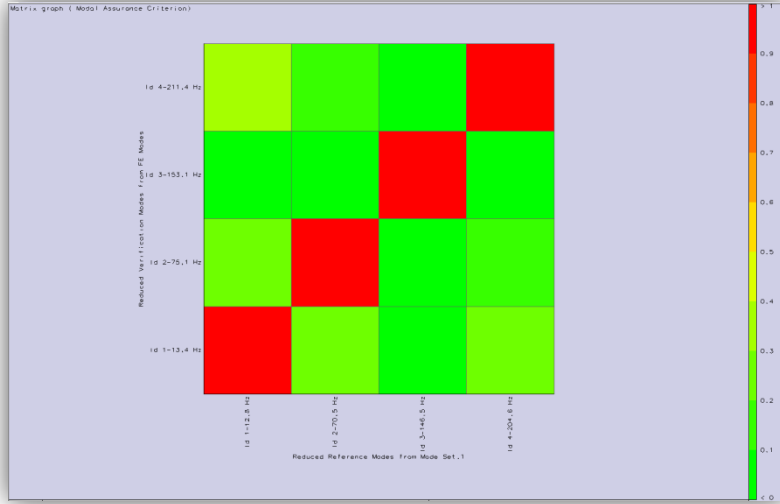
Reuse Existing Images

Id1	Freq1	Id2	Freq2	MAC Value	Freq2-Freq1 ...
1	12,8	1	13,4	0,964	0,60
2	70,5	2	75,1	0,989	4,66
3	146,5	3	153,1	0,964	6,56

Close

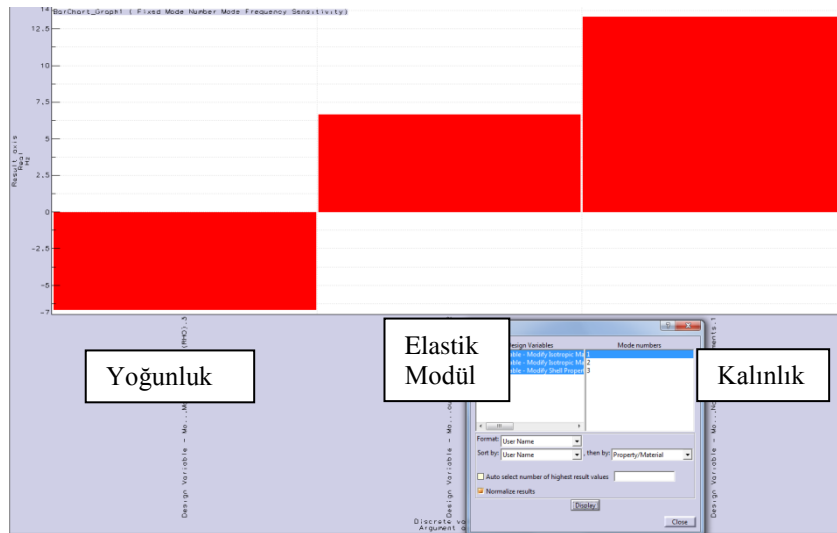
Şekil 10: Alüminyum Plaka Mod Eşleşmesi Tablosu

Şekil 11 ile gösterilen MAC matrisinde diyagonal terimlerin "1"e yakın olması diğer terimlerin "0" a yakın olduğu görülmektedir. Bu durum mod şekillerinin oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. Ancak özellikle hesaplanan doğal frekans değerleri farkının iyileştirilmesi çalışmalarını için model güncellenmiştir.



Şekil 11: Alüminyum Plaka MAC Matrisi

İlk mod için yoğunluk, elastik modülü ve kalınlık değerleri normalize edilmiş hassasiyet analizleri sonuçları Şekil 12 ile gösterilmiştir. Kalınlık değerinin yoğunluk ve elastik modülü değerlerine göre daha etkin olduğu gözükmektedir.



Şekil 12: Alüminyum Plaka İlk Moda Göre Hassasiyet Analizleri Sonuçları

Hassasiyet analizleri özellikle kompleks ve çok sayıda parametre içeren modellerde daha kısa sürede çözüme ulaşmak için kullanılmaktadır. Alüminyum plaka modeli için Şekil 13 ile gösterildiği gibi yoğunluk ve elastik modülü değerleri güncellenerek doğal frekans değerlerini test sonuçları ile uyumlu hale getirme yolu seçilmiştir.

Exp	Iter	Mode	Goal	Young's Modulus (N_m2)	Density (kg_m3)	MAC_1_1	MAC_2_2	MAC_3_3	Freq_Diff_1_1	Freq_Diff_2_2	Freq_Diff_3_3	Status
1	0		6.52007e+007	6,9e+010	2800	0,964359	0,98937	0,963975	0,598714	4,65917	6,56767	SUCCEEDED
2	1		6.54736e+007	6,90138e+010	2800	0,964359	0,98937	0,963975	0,600051	4,66669	6,58298	SUCCEEDED
3	1		6.49283e+007	6,9e+010	2800,56	0,964359	0,98937	0,963975	0,597377	4,65166	6,55237	SUCCEEDED
4	1		7.15415e+007	6,21e+010	3080	0,964359	0,98937	0,963975	0,677435	2,51373	8,04759	SUCCEEDED
5	1		1.69305e+006	6.56284e+010	2936,82	0,964359	0,98937	0,963975	0,0392685	1,07323	0,736907	SUCCEEDED
6	2		1.69305e+006	6.56422e+010	2936,82	0,964359	0,98937	0,963975	0,0379295	1,08076	0,723572	SUCCEEDED
7	2		1.7056e+006	6.56284e+010	2937,38	0,964359	0,98937	0,963975	0,0404825	1,06641	0,752808	SUCCEEDED
8	2		1.6623e+006	6.57058e+010	2933,8	0,964359	0,98937	0,963975	0,0252247	1,15218	0,578064	SUCCEEDED
9	3		1.66213e+006	6.57196e+010	2933,8	0,964359	0,98937	0,963975	0,0238857	1,1597	0,562744	SUCCEEDED
10	3		1.66296e+006	6.57058e+010	2934,36	0,964359	0,98937	0,963975	0,0264397	1,14534	0,591995	SUCCEEDED
11	3		1.66213e+006	6.56973e+010	2932,98	0,964359	0,98937	0,963975	0,0242634	1,15758	0,567062	SUCCEEDED
12	4		1.66239e+006	6.57111e+010	2932,98	0,964359	0,98937	0,963975	0,0229254	1,16509	0,551743	SUCCEEDED
13	4		1.66239e+006	6.56973e+010	2933,54	0,964359	0,98937	0,963975	0,0254803	1,15073	0,580994	SUCCEEDED
14	4		1.66237e+006	6.56533e+010	2930,44	0,964359	0,98937	0,963975	0,0230083	1,16463	0,552689	SUCCEEDED
15	4		1.66217e+006	6.56777e+010	2931,85	0,964359	0,98937	0,963975	0,0237017	1,16073	0,560638	SUCCEEDED
16	4		1.66213e+006	6.56878e+010	2932,44	0,964359	0,98937	0,963975	0,0239935	1,15909	0,56398	SUCCEEDED
17	4		1.66213e+006	6.56926e+010	2932,71	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241299	1,15833	0,565536	SUCCEEDED
18	4		1.66213e+006	6.56949e+010	2932,84	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241947	1,15797	0,566269	SUCCEEDED
19	4		1.66212e+006	6.56961e+010	2932,91	0,964359	0,98937	0,963975	0,0242281	1,15778	0,56665	SUCCEEDED
20	5		1.66241e+006	6.57099e+010	2932,91	0,964359	0,98937	0,963975	0,0228901	1,1653	0,551331	SUCCEEDED
21	5		1.66239e+006	6.56961e+010	2933,47	0,964359	0,98937	0,963975	0,0254469	1,15992	0,580612	SUCCEEDED
22	5		1.66782e+006	6.54432e+010	2918,9	0,964359	0,98937	0,963975	0,0182934	1,19113	0,498688	SUCCEEDED
23	5		1.66276e+006	6.56109e+010	2928,19	0,964359	0,98937	0,963975	0,022234	1,16898	0,543823	SUCCEEDED
24	5		1.66222e+006	6.56594e+010	2930,88	0,964359	0,98937	0,963975	0,0233717	1,16259	0,556839	SUCCEEDED
25	5		1.66218e+006	6.56788e+010	2931,96	0,964359	0,98937	0,963975	0,0238237	1,16005	0,562027	SUCCEEDED
26	5		1.66214e+006	6.56878e+010	2932,45	0,964359	0,98937	0,963975	0,0240335	1,15887	0,564438	SUCCEEDED
27	5		1.66211e+006	6.56921e+010	2932,69	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241346	1,15829	0,565582	SUCCEEDED
28	5		1.66212e+006	6.5694e+010	2932,79	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241785	1,15805	0,566086	SUCCEEDED
29	5		1.66211e+006	6.5695e+010	2932,85	0,964359	0,98937	0,963975	0,0242023	1,15791	0,56636	SUCCEEDED
30	6		1.66241e+006	6.57088e+010	2932,85	0,964359	0,98937	0,963975	0,0228643	1,16544	0,551041	SUCCEEDED
31	6		1.66239e+006	6.5695e+010	2933,41	0,964359	0,98937	0,963975	0,0254192	1,15108	0,580307	SUCCEEDED
32	6		1.81953e+006	6.43871e+010	2860,52	0,964359	0,98937	0,963975	0,00681305	1,33225	0,211151	SUCCEEDED
33	6		1.66518e+006	6.55086e+010	2922,54	0,964359	0,98937	0,963975	0,0198736	1,18225	0,516785	SUCCEEDED
34	6		1.66253e+006	6.56256e+010	2929,01	0,964359	0,98937	0,963975	0,0225935	1,16696	0,547928	SUCCEEDED
35	6		1.66221e+006	6.56642e+010	2931,15	0,964359	0,98937	0,963975	0,023489	1,16193	0,558182	SUCCEEDED
36	6		1.66216e+006	6.56805e+010	2922,05	0,964359	0,98937	0,963975	0,0238686	1,1598	0,562546	SUCCEEDED
37	6		1.66214e+006	6.56882e+010	2932,47	0,964359	0,98937	0,963975	0,024045	1,15881	0,56456	SUCCEEDED
38	6		1.66211e+006	6.56918e+010	2932,67	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241299	1,15833	0,565521	SUCCEEDED
39	6		1.66212e+006	6.56934e+010	2932,76	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241652	1,15813	0,565933	SUCCEEDED
40	6		1.66213e+006	6.56943e+010	2932,81	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241871	1,158	0,566193	SUCCEEDED
41	6		1.66213e+006	6.56947e+010	2932,84	0,964359	0,98937	0,963975	0,0241976	1,15794	0,566315	SUCCEEDED

Şekil 13: Alüminyum Plaka Optimizasyon Adımları

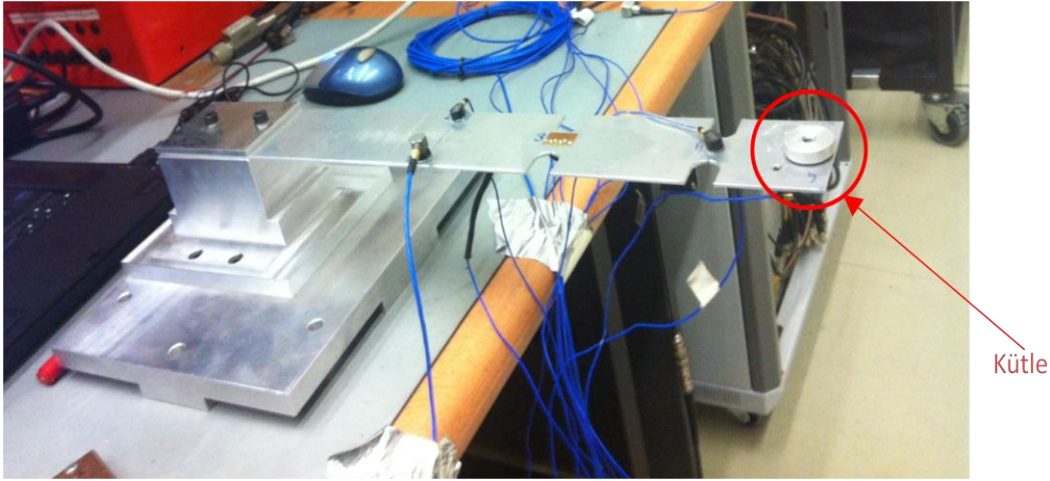
Güncelleme adımlarından önce ve sonra elde edilen doğal frekans değerlerinin modal test sonuçları ile karşılaştırması Tablo 2 ile verilmiştir. İlk üç mod için test sonuçlarına yakınsanabildiği görülmüştür.

Tablo 2: Alüminyum Plaka Modal Test, Sonlu Elemanlar Modeli ve Güncellenmiş Model Test Sonuçları Karşılaştırması

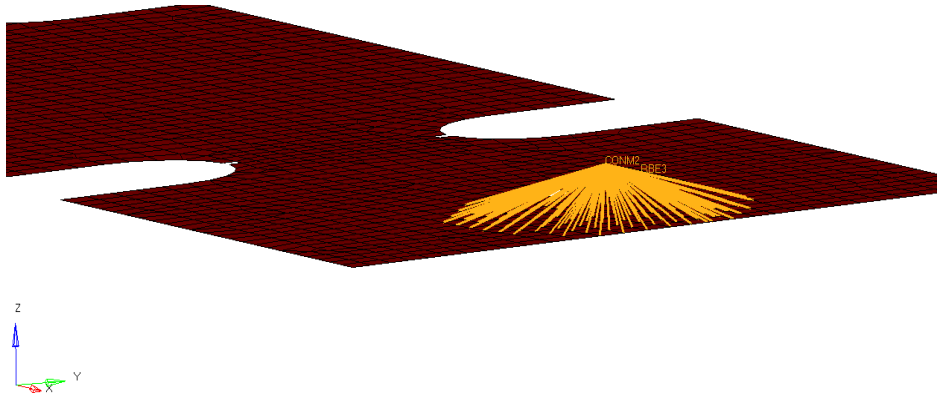
	Mod 1 [Hz] (%Fark)	Mod 2 [Hz] (%Fark)	Mod 3 [Hz] (%Fark)
Test	12.8	70.5	146.5
Sonlu Elemanlar Modeli	13.4 (%4.7)	75.1 (%6.1)	153.1 (%4.5)
Güncellenmiş Sonlu Elemanlar Modeli	12.7 (%0.8)	71.6 (%1.6)	146.0 (%0.3)

Yapının dinamik davranışını değiştirecek bir yapısal değişiklik yapıldığında güncellenmiş sonlu elemanlar modelinin doğru sonuçlar verip vermediğinin kontrol edilebilmesi için alüminyum plaka üzerine Şekil 14 ile gösterildiği gibi 5 gramlık bir ağırlık eklenmiş ve modal testler yenilenmiştir. Kütle ve atalet momenti değerleri Şekil 15 ile gösterildiği gibi güncellenmiş sonlu elemanlar modeli üzerine noktasal kütle olarak eklenerek modal analizler tekrarlanmıştır.





Şekil 14: Kütleye Eklenmiş Alüminyum Plaka



Şekil 15: Kütleye Eklenmiş Alüminyum Plaka Güncellenmiş Sonlu Elemanlar Modeli

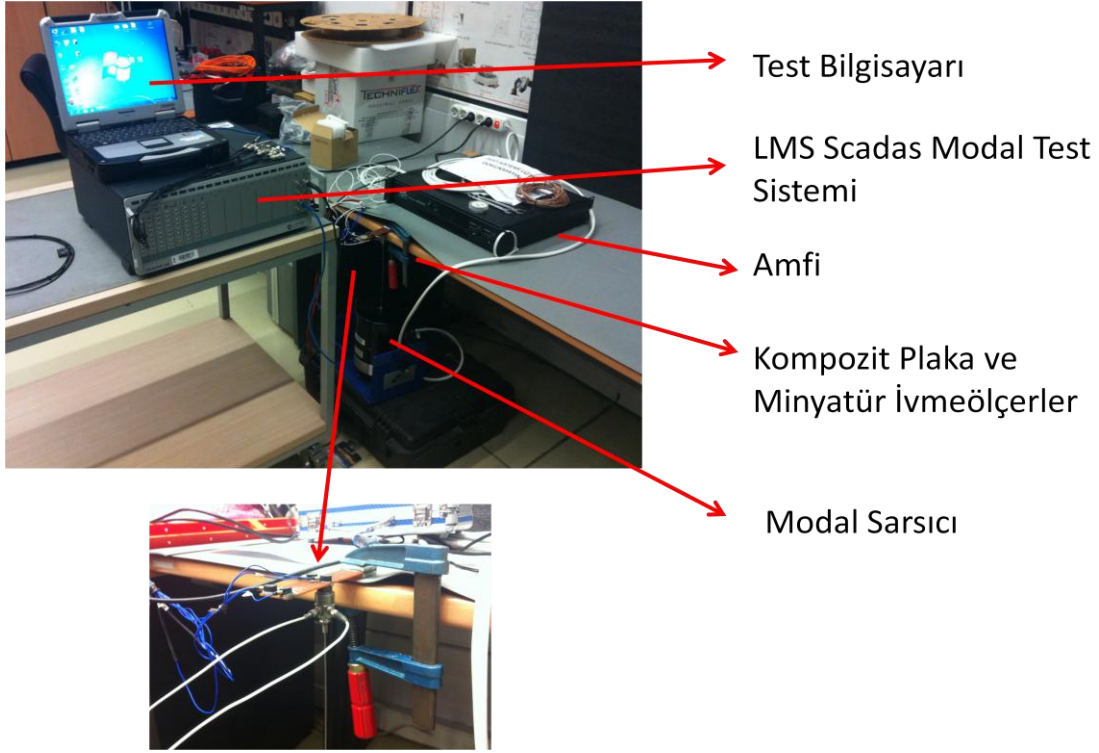
Kütleye eklenmiş alüminyum plaka için test ve analiz sonuçları Tablo 3 ile verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 2. ve 3. modlar için hata oranlarının %1 civarında olduğu, mod 1 için ise test ve analiz sonuçları arasında 0.5 Hz fark olmasına rağmen yüzde farkın %4.2 olmasının nedeni ilk doğal frekans değerinin yüksek olmamasıdır.

Tablo 3: Kütleye Eklenmiş Alüminyum Plaka Modal Test, Sonlu Elemanlar Modeli ve Güncellenmiş Model Test Sonuçları Karşılaştırması

	Mod 1 [Hz] (%Fark)	Mod 2 [Hz] (%Fark)	Mod 3 [Hz] (%Fark)
Test	11.8	66.8	145.5
Güncellenmiş Sonlu Elemanlar Modeli	11.3 (%4.2)	66.1 (%1.0)	143.9 (%1.1)

### Kompozit Plaka Modal Güncelleme Çalışmaları

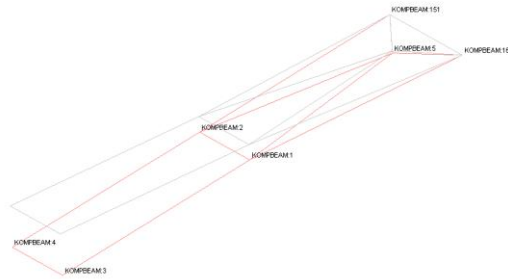
**Modal Test:** Modal Test Düzeneği Şekil 16 ile gösterilmiştir. Kompozit plaka mengene yardımı ile ankastre sınır koşulu oluşturmak için sabitlenmiştir. Kompozit plakaya katılık katmamak için bağlantı bölgesine en yakın noktadan plaka modal sarsıcı ile tahrik edilmiş ve minyatür ivmeölçerler ile 4 noktadan LMS Scadas Veri Toplama Sistemi ile veri toplanmıştır.



Şekil 16: Kompozit Plaka Test Düzeneği

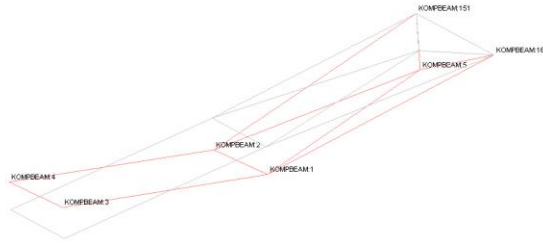
Modal testler sonucunda ilk doğal frekans değeri 58.9 Hz (Şekil 17), ikinci doğal frekans değeri 223.4 Hz (Şekil 18) olarak hesaplanmıştır.

100



Mode 1: 58.9026 Hz, 0.24 %

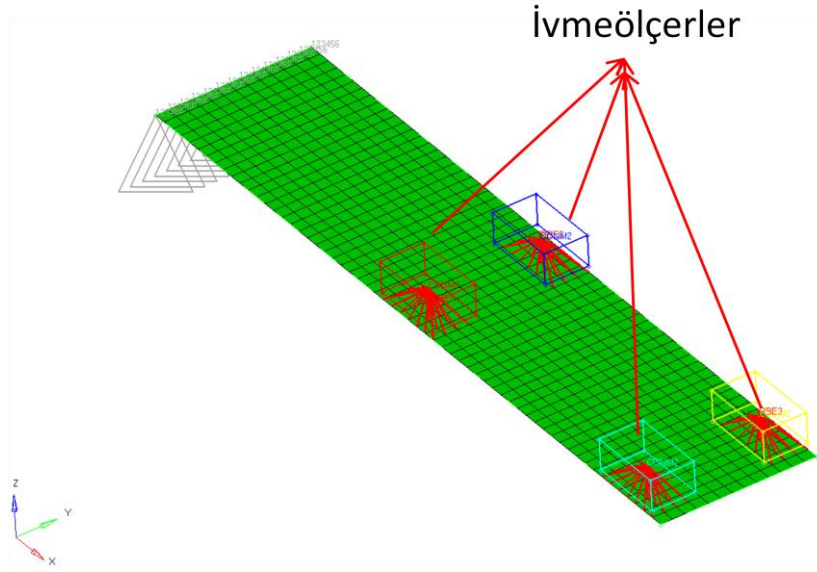
Şekil 17: Kompozit Plaka Modal Test Sonucu 1. Eğilme Mod Şekli-58.9 Hz



Mode 1: 223.3942 Hz, 1.51 %

Şekil 18: Kompozit Plaka Modal Test Sonucu 2. Eğilme Mod Şekli-223.4 Hz

**Modal Analiz:** Test edilen yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 19 ile gösterildiği gibi kabuk elemanlar kullanılarak hazırlanmıştır. Modellenen kompozit kupon ağırlığı (12.6 gram) göz önünde bulundurularak ivmeölçer kütlelerinin (toplam 3.2 gram) de modele eklenmesine karar verilmiştir.



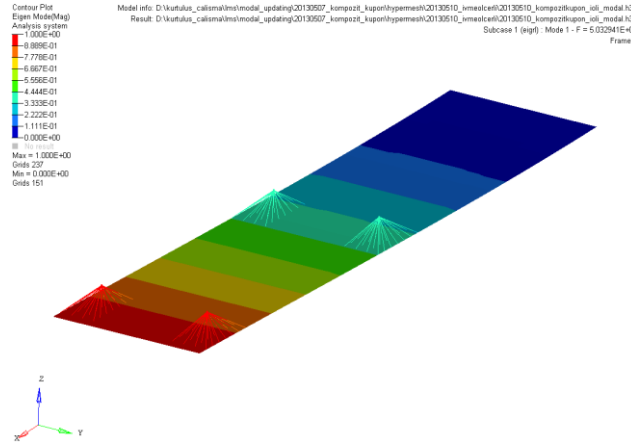
Şekil 19: Kompozit Plaka Sonlu Elemanlar Modeli

Model ile ilgili bilgiler Tablo 4 ile özetlenmiştir.

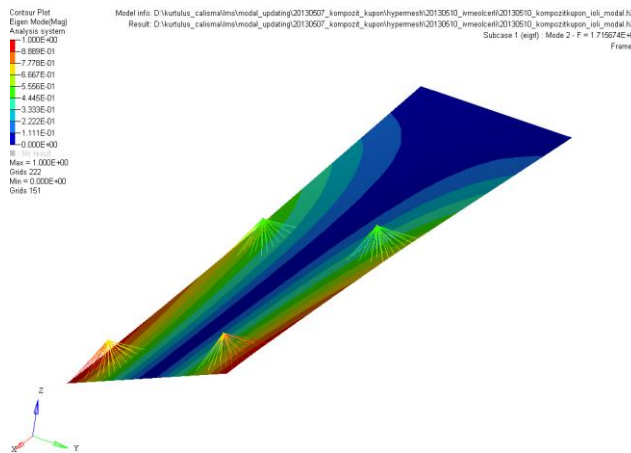
Tablo 4: Kompozit Plaka Sonlu Elemanlar Modeli Bilgileri

Düğüm Noktası Sayısı	858
Serbestlik Derecesi	39162
Eleman Sayıları	788
QUAD4	780
CONM2	4
RBE3	4
SPC Sayısı	1
Malzeme	Cam Kompozit
Elastik Modülü	
-E11	21 GPa
-E22	18 GPa
-G12	3.8 GPa
-G13	10 MPa
-G23	10 MPa
Yoğunluk	2100 kg/m3
Katman Sayısı	8
Katman Kalınlığı	0.25 mm
Serilim Açılımları	[0,90,0,90,0,90,0,90]

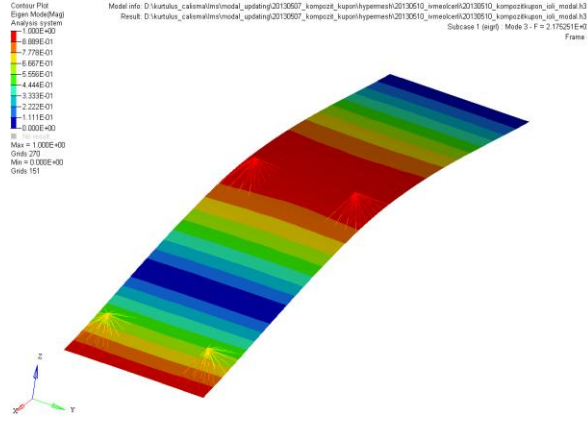
Modal analizler sonucunda ise ilk doğal frekans değeri 50.3 Hz (Şekil 20), ikinci doğal frekans değeri 171.6 Hz (Şekil 21), üçüncü doğal frekans değeri 217.6 Hz (Şekil 22) olarak hesaplanmıştır. Analizler sonucunda hesaplanan 1. burulma modu testler sonucunda saptanamamıştır. Bunun nedeni olarak ivmeölçer sayısının yetersizliği veya tahrik şekline bağlı olarak kompozit plakanın burulmasına engel olunması gösterilebilir. Bu nedenle modal güncelleme adımları için elde edilen 1. ve 3. eğilme modları kullanılmıştır.



Şekil 20: Kompozit Plaka Modal Analiz Sonucu 1. Eğilme Mod Şekli-50.3 Hz

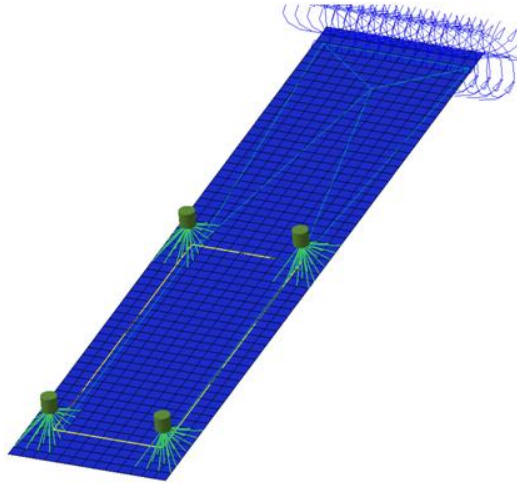


Şekil 21: Kompozit Plaka Modal Analiz Sonucu 1. Burulma Mod Şekli-171.6 Hz



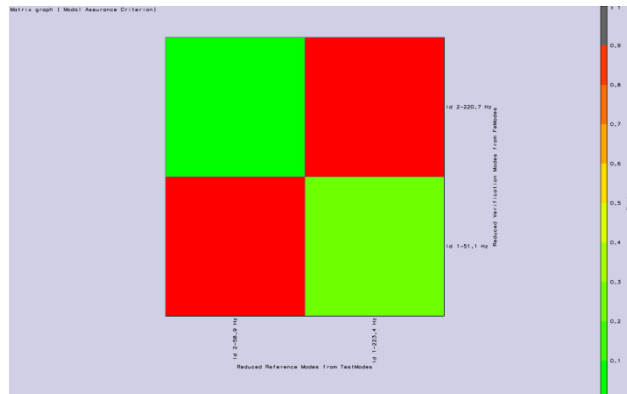
Şekil 22: Kompozit Plaka Modal Analiz Sonucu 2. Eğilme Mod Şekli-217.6 Hz

**Modal Güncelleme:** Test modeli ile sonlu elemanlar modeli, Şekil 23 ile gösterildiği gibi üst üste getirilerek ve düğüm noktası eşleştirmeleri yapılarak geometrik korelasyon sağlanmıştır.



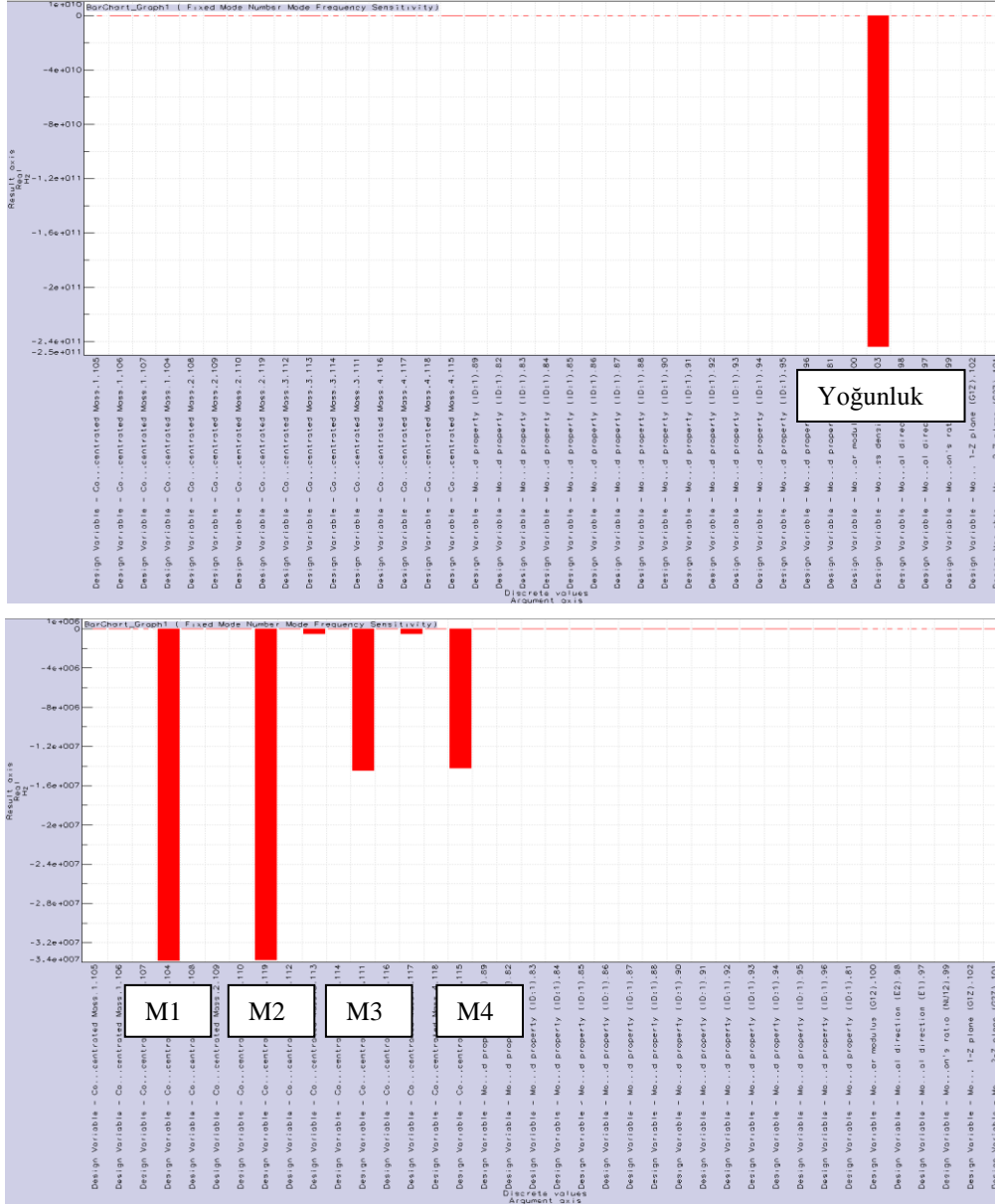
Şekil 23: Kompozit Plaka Test ve Analiz Modeli Geometrik Korelasyonu

Geometrik korelasyon tamamlandıktan sonra dinamik korelasyon analizleri, MAC (Modal Assurance Criterion) fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Şekil 24 ile gösterilen MAC matrisi 1. ve 2. bükülme mod şekilleri kullanılarak hesaplanmıştır. Diyagonal terimlerin “1”e yakın olması diğer terimlerin “0” a yakın olduğu ve mod şekillerinin oldukça uyumlu olduğunu görülmüştür. Ancak özellikle hesaplanan doğal frekans değerleri farkının iyileştirilmesi çalışmaları için model güncellenmiştir.



Şekil 24: Kompozit Plaka MAC Matrisi

İlk mod için yoğunluk, elastik modül, kalınlık değerleri, ivmeölçer kütleleri ve atalet momenti değerleri vb. normalize edilmiş hassasiyet analizleri sonuçları Şekil 25 ile gösterilmiştir. Hassasiyet analizlerinde yoğunluk değerinin en yüksek hassasiyet değerine sahip olduğu, ivmeölçer kütle değerlerinin de yüksek hassasiyet değerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 25: Kompozit Plaka İlk Moda Göre Hassasiyet Analizleri Sonuçları

Kompozit plaka modeli için yapılan optimizasyon analizlerinde, kullanılan parametreler ve modal test veri toplama noktaları ile aynı anda 1. ve 2. eğilme modlarına yakınsama sağlanamamıştır. Kompozit plaka geometri ve ağırlığı göz önünde bulundurularak daha fazla veri toplama noktası eklenmeyerek sadece 1. mod doğal frekans değeri için modal güncelleme gerçekleştirilmiştir. Modal güncelleme adımları, kontrollü ilerleyebilmek için Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28 ile gösterildiği gibi 3 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Exp	Iter	Mode	Goal	M1_MassValue (kg)	M1_JyyValue (kgxm2)	M2_JyyValue (kgxm2)	M3_MassValue (kg)	M3_JyyValue (kgxm2)	M4_MassValue (kg)	M4_JyyValue (kgxm2)	M2_MassValue (kg)	Freq_Diff_2_X	Status
1	0	START	7,3506e+007	0,00079954	1,1452e-008	1,1452e-008	0,00079954	1,1452e-008	0,00081159	1,1625e-008	0,00079954	8,57356	SUCCEDED
2	1	GRAD	7,3508e+007	0,0007997	1,1452e-008	1,1452e-008	0,00079954	1,1452e-008	0,00081159	1,1625e-008	0,00079954	8,57368	SUCCEDED
3	1	GRAD	7,3506e+007	0,00079954	1,1463e-008	1,1452e-008	0,00079954	1,1452e-008	0,00081159	1,1625e-008	0,00079954	8,57357	SUCCEDED
4	1	GRAD	7,3506e+007	0,00079954	1,1452e-008	1,1463e-008	0,00079954	1,1452e-008	0,00081159	1,1625e-008	0,00079954	8,57357	SUCCEDED
5	1	GRAD	7,35175e+007	0,00079954	1,1452e-008	1,1452e-008	0,0007997	1,1452e-008	0,00081159	1,1625e-008	0,00079954	8,57423	SUCCEDED
6	1	GRAD	7,3506e+007	0,00079954	1,1452e-008	1,1452e-008	0,00079954	1,1463e-008	0,00081159	1,1625e-008	0,00079954	8,57357	SUCCEDED
7	1	GRAD	7,35177e+007	0,00079954	1,1452e-008	1,1452e-008	0,00079954	1,1452e-008	0,000811752	1,1625e-008	0,00079954	8,57425	SUCCEDED
8	1	GRAD	7,3506e+007	0,00079954	1,1452e-008	1,1452e-008	0,00079954	1,1452e-008	0,00081159	1,1636e-008	0,00079954	8,57357	SUCCEDED
9	1	GRAD	7,3508e+007	0,00079954	1,1452e-008	1,1452e-008	0,00079954	1,1452e-008	0,00081159	1,1625e-008	0,0007997	8,57368	SUCCEDED
10	1	LINE	7,25616e+007	0,000798437	1,14496e-008	1,14496e-008	0,000793279	1,14496e-008	0,000805126	1,16226e-008	0,000798437	8,51831	SUCCEDED
11	2	GRAD	7,25637e+007	0,000798597	1,14496e-008	1,14496e-008	0,000793279	1,14496e-008	0,000805126	1,16226e-008	0,000798437	8,51843	SUCCEDED

83	10	GRAD	6,018e+007	0,000719746	1,12447e-008	1,12447e-008	0,000719586	1,11411e-008	0,000730431	1,13141e-008	0,000719586	7,75758	SUCCEDED
84	10	GRAD	6,01782e+007	0,000719586	1,12557e-008	1,12447e-008	0,000719586	1,11411e-008	0,000730431	1,13141e-008	0,000719586	7,75746	SUCCEDED
85	10	GRAD	6,01782e+007	0,000719586	1,12447e-008	1,12557e-008	0,000719586	1,11411e-008	0,000730431	1,13141e-008	0,000719586	7,75746	SUCCEDED
86	10	GRAD	6,0189e+007	0,000719586	1,12447e-008	1,12447e-008	0,000719746	1,11411e-008	0,000730431	1,13141e-008	0,000719586	7,75816	SUCCEDED
87	10	GRAD	6,01782e+007	0,000719586	1,12447e-008	1,12447e-008	0,000719586	1,11521e-008	0,000730431	1,13141e-008	0,000719586	7,75746	SUCCEDED
88	10	GRAD	6,01893e+007	0,000719586	1,12447e-008	1,12447e-008	0,000719586	1,11411e-008	0,000730593	1,13141e-008	0,000719586	7,75817	SUCCEDED
89	10	GRAD	6,01782e+007	0,000719586	1,12447e-008	1,12447e-008	0,000719586	1,11411e-008	0,000730431	1,13251e-008	0,000719586	7,75746	SUCCEDED
90	10	GRAD	6,018e+007	0,000719586	1,12447e-008	1,12447e-008	0,000719586	1,11411e-008	0,000730431	1,13141e-008	0,000719746	7,75758	SUCCEDED
91	10	LINE	6,01774e+007	0,000719586	1,12225e-008	1,12225e-008	0,000719586	1,1119e-008	0,000730431	1,1292e-008	0,000719586	7,75741	SUCCEDED

Şekil 26: Kompozit Plaka Optimizasyon Adımları – İvmeölçer Kütle ve Atalet Momenti Değerleri Güncellemesi

Exp	Iter	Mo...	Goal	LMSMdmMat8Youn...	LMSMdmMat8YoungModulusBC_E2 (...)	LMSMdmMat8Pois...	LMSMdmMat8ShearModulusBC_G12 ...	LMSMdmMat8ShearModulusBC_G...	LMSMdmMat8ShearModulusBC_G...	LMSMdmMat2RHOB_C_RH...	Freq_Diff_2_X
1	0	ST...	7,15044e+007	2,05e+010	1,84e+010	0,3	3,8e+009	1e+007	1e+007	2070	8,45603
2	1	GR...	7,15051e+007	2,05041e+010	1,84e+010	0,3	3,8e+009	1e+007	1e+007	2070	8,45607
3	1	GR...	7,14346e+007	2,05e+010	1,84037e+010	0,3	3,8e+009	1e+007	1e+007	2070	8,4519
4	1	GR...	7,15034e+007	2,05e+010	1,84e+010	0,30006	3,8e+009	1e+007	1e+007	2070	8,45597
5	1	GR...	7,15042e+007	2,05e+010	1,84e+010	0,3	3,80076e+009	1e+007	1e+007	2070	8,45602
6	1	GR...	7,14885e+007	2,05e+010	1,84e+010	0,3	3,8e+009	1,0002e+007	1e+007	2070	8,45509
7	1	GR...	7,15044e+007	2,05e+010	1,84e+010	0,3	3,8e+009	1e+007	1,0002e+007	2070	8,45603
8	1	GR...	7,15645e+007	2,05e+010	1,84e+010	0,3	3,8e+009	1e+007	1e+007	2070,41	8,45598

74	10	GR...	1,57074e+007	1,94009e+010	2,024e+010	0,322249	3,84716e+009	1,1e+007	1,00082e+007	1863	3,96325
75	10	GR...	0	1,93968e+010	2,02437e+010	0,322249	3,84716e+009	1,1e+007	1,00082e+007	1863	--
76	10	GR...	1,57062e+007	1,93968e+010	2,024e+010	0,322309	3,84716e+009	1,1e+007	1,00082e+007	1863	3,9631
77	10	GR...	1,57067e+007	1,93968e+010	2,024e+010	0,322249	3,84792e+009	1,1e+007	1,00082e+007	1863	3,96317
78	10	GR...	0	1,93968e+010	2,024e+010	0,322249	3,84716e+009	1,1002e+007	1,00082e+007	1863	--
79	10	GR...	1,57068e+007	1,93968e+010	2,024e+010	0,322249	3,84716e+009	1,1e+007	1,00102e+007	1863	3,96318
80	10	GR...	1,57399e+007	1,93968e+010	2,024e+010	0,322249	3,84716e+009	1,1e+007	1,00082e+007	1863,41	3,96735
81	10	LINE	1,55597e+007	1,8999e+010	2,024e+010	0,33	3,8639e+009	1,1e+007	1,00106e+007	1863	3,94458

Şekil 27: Kompozit Plaka Optimizasyon Adımları – Elastik Modül ve Yoğunluk Güncellemesi

Exp	Iter	Mode	Goal	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T4 (mm)	T5 (mm)	T6 (mm)	T7 (mm)	T8 (mm)	Freq_Diff_2_X	Status
1	0	START	1,55597e+007	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	3,94458	SUCCEDED
2	1	GRAD	1,55492e+007	0,25005	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	3,94324	SUCCEDED
3	1	GRAD	1,55492e+007	0,25	0,25005	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	3,94324	SUCCEDED
4	1	GRAD	1,55492e+007	0,25	0,25	0,25005	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	3,94324	SUCCEDED
5	1	GRAD	1,55492e+007	0,25	0,25	0,25	0,25005	0,25	0,25	0,25	0,25	3,94324	SUCCEDED
6	1	GRAD	1,55492e+007	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25005	0,25	0,25	0,25	3,94324	SUCCEDED
7	1	GRAD	1,55492e+007	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25005	0,25	0,25	3,94324	SUCCEDED
8	1	GRAD	1,55492e+007	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25005	0,25	3,94324	SUCCEDED
9	1	GRAD	1,55492e+007	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25005	3,94324	SUCCEDED
10	1	LINE	4,61303e+006	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	2,1478	SUCCEDED
11	2	GRAD	4,60738e+006	0,258535	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	2,14648	SUCCEDED
12	2	GRAD	4,60738e+006	0,258485	0,258535	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	2,14648	SUCCEDED
13	2	GRAD	4,60738e+006	0,258485	0,258485	0,258535	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	2,14648	SUCCEDED
14	2	GRAD	4,60738e+006	0,258485	0,258485	0,258485	0,258535	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	2,14648	SUCCEDED
15	2	GRAD	4,60738e+006	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258535	0,258485	0,258485	0,258485	2,14648	SUCCEDED
16	2	GRAD	4,60738e+006	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258535	0,258485	0,258485	2,14648	SUCCEDED
17	2	GRAD	4,60738e+006	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258535	0,258485	2,14648	SUCCEDED
18	2	GRAD	4,60738e+006	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258485	0,258535	2,14648	SUCCEDED
19	2	LINE	13556,5	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,116432	SUCCEDED
20	3	GRAD	13257,9	0,268301	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,268251	0,115143	SUCCEDED

Şekil 28: Kompozit Plaka Optimizasyon Adımları – Katman Kalınlıkları Güncellenmesi

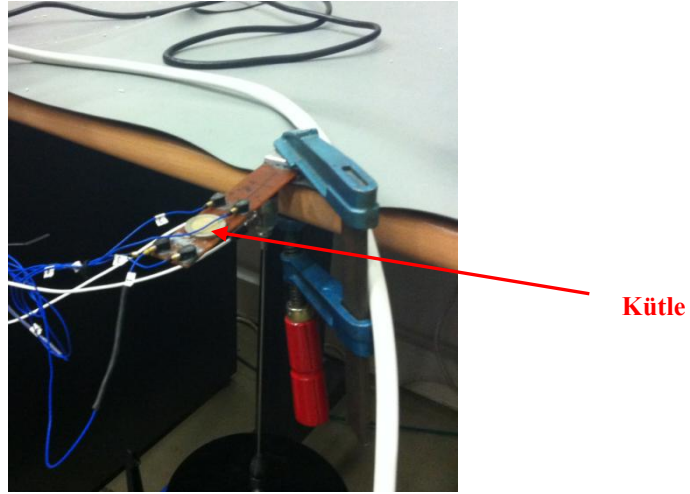
Güncelleme adımlarından önce ve sonra elde edilen doğal frekans değerlerinin modal test sonuçları ile karşılaştırması Tablo 5 ile verilmiştir. İlk bükülme modu için test sonuçlarına yakınsanabildiği görülmüştür.

Tablo 5: Kompozit Plaka Modal Test, Sonlu Elemanlar Modeli ve Güncellenmiş Model Test Sonuçları Karşılaştırması

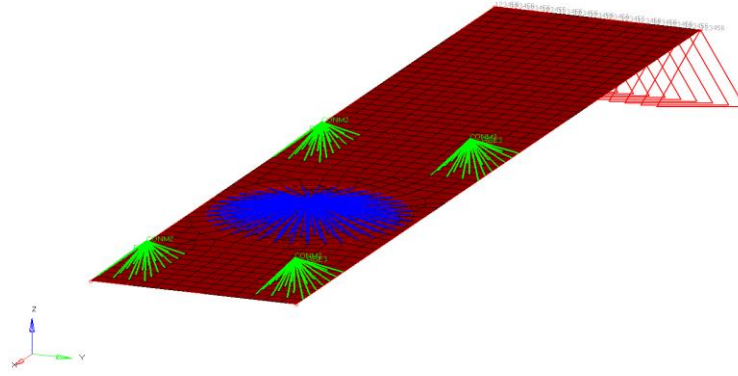
	Mod 1 [Hz] (%Fark)
Test	58.9
Sonlu Elemanlar Modeli	50.3 (%14.6)
Güncellenmiş Sonlu Elemanlar Modeli	58.9 (%0)

Güncellenmiş sonlu elemanlar modelinin dinamik davranışını değiştirecek bir etmen eklendiğinde doğru sonuçlar verip vermediğinin kontrol edilebilmesi için kompozit plaka üzerine Şekil 29 ile gösterildiği gibi 6.8 gramlık bir ağırlık eklenmiş ve modal testler yenilenmiştir. Bu kütle ve atalet momenti değerleri Şekil 30 ile gösterildiği gibi güncellenmiş sonlu elemanlar modeli üzerine de noktasal kütle olarak eklenerek modal analizler tekrarlanmıştır.





Şekil 29: Kütleye Eklenmiş Kompozit Plaka



Şekil 30: Kütleye Eklenmiş Kompozit Plaka Güncellenmiş Sonlu Elemanlar Modeli

Kütleye eklenmiş kompozit plaka için test ve analiz sonuçları **Tablo 6**'da karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 1. mod için hata oranlarının %1 civarında olduğu görülmüştür.

Tablo 6: Kütleye Eklenmiş Kompozit Plaka Modal Test, Sonlu Elemanlar Modeli ve Güncellenmiş Model Test Sonuçları Karşılaştırması

	Mod 1 [Hz] (%Fark)
Test	45.3
Güncellenmiş Sonlu Elemanlar Modeli	44.8 (%1.2)

## SONUÇ

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde modal güncelleme çalışmalarının havacılıkta en yaygın olarak kullanılan alüminyum ve kompozit malzemelerde işlevsel olduğu görülmüştür. Bu teknik kullanılarak endüstriyel uygulamalarda henüz üretimi yapılmamış yapıların (radar sistemleri, gece görüş sistemleri vb.) hava araçlarına entegrasyonunun rezonans çakışması, ömür noksanlığı gibi riskleri oluşturup oluşturmadığının tespiti, farklı entegrasyon konfigürasyonların kontrolü gibi çalışmaları oldukça kısaltabilecek bir yöntemdir. Bu çalışmada bu tekniğin kullanımı kompleks olmayan yapılarda uygulanmıştır. Özellikle kompozit plaka üzerinde yapılan çalışmada modal güncellemenin tüm durumlarda ve modlar için yakınsama göstermeyebildiği görülmüştür. Bunun sağlanabilmesi için sınır koşullarının ya da varsa bağlantı elemanlarının parametrik olarak modellenmesi ve test sonuçlarına göre güncellenmesinin, modal testlerde mümkün olduğunca çok

noktadan veri toplanmasının vb. önemli olduğu değerlendirilmiştir. Bu yöntemin sağlıklı uygulanabilmesi için sonlu elemanlar modelinin gerçek yapı ile mümkün olduğunca benzer modellenmesi, bağlantı elemanları direngenlik karakteristiği, kompozit yapılarda üretimden kaynaklı kalınlık ve serilim açısı gibi belirsizlikler içeren parametrelerin güncellenmesi gereken parametreler olarak dikkate alınması gerekmektedir. . Bu sayede gerçek yapı ile aynı mukavemet ve dinamik (modal)karakteristiğe sahip sonlu elemanlar modelleri oluşturulabilecek ve optimum özelliklere sahip havacılık yapılarının hızlı şekilde tasarlanması mümkün olabilecektir.

### Kaynaklar

- [1] Baruch, M., 1978., *Optimization Procedure to Correct Stiffness and Flexibility Matrices Using Vibration Tests*, AIAA Journal, Cilt. 16, s. 1208-1210.
- [2] Berman, A., Nagy, E. J., 1983., *Improvement of a Large Analytical Model Using Test Data*, AIAA Journal, Cilt. 21, No. 8, s. 1168-1173.
- [3] Çınar, O., 2014., *Evaluation of Effective Elastic Properties of Honeycomb Sandwich Structures by Optimization Involving Modal Behaviour*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ.
- [4] ECSS Requirements & Standarts Deviation, 2008., *Space Engineering Modal Survey Assessment*, ECSS Secretariat, s.15-49.
- [5] Göge, D., Link, M., 2003., *Assessment of Computational Model Updating Procedures With Regard to Model Validation*, Aerospace Science And Technology, Cilt.7, s. 47-61.
- [6] Lau, J., Lanslots, J.,Peeters, B.,Auweraer, H.V., 2007. *Automatic Modal Analysis: Reality or Myth*, IMAC 25, Orlando.
- [7] Lin, R. M. , Zhu, J., 2006., *Model Updating of Damped Structures using FRF Data*, Mechanical Systems and Signal Processing, Cilt. 20, s. 2200-2218.
- [8] Uhl, T., Bochniak, W., Lisowski, W., Hermans, L., Auweraer, H. V., Malecki, J., 1998., *Fe-Model Correlation of a Helicopter Using Ground Test Results*