

AVİYONİK ÜRÜN DOĞRULAMASINDA TİTREŞİM FİKSTÜRÜ TASARIMI

İbrahim YILDIRIM *^{ID}

Ramazan MERAL *^{ID}

Caner GÜVEN *^{ID}

Cansu MENŞUR ÇETİN *^{ID}

Mehmet DEMİR *^{ID}

Fikret Kamil ÇORBACI *^{ID}

Alınma: 31.01.2023; düzeltme: 23.10.2023; kabul: 23.10.2023

Öz: Bu çalışma kapsamında, havacılık sektöründe kullanılan aviyonik bir ürün için, titreşim fikstürü tasarlanarak doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modal analizler gerçekleştirilmiştir. Modal analizlerle tasarımı doğrulanan model, üretildikten sonra titreşim testlerine tabi tutulmuştur. Titreşim testleri esnasında ivmeölçerler yardımıyla veri toplanarak analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Korelasyonu sağlanan analiz ve test sonuçları ile titreşim fikstür tasarımının uygunluğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim fikstürü, Modal Analiz, İvmeölçer

Vibration Fixture Design In Avionics Product Verification

Abstract: In this study, a vibration fixture was designed and verified for an avionic product used in the aviation industry. Modal analyses were performed using the finite element method. After the model, whose design was confirmed by modal analysis, was produced, the fixture was subjected to vibration tests. During the vibration tests, data were collected with the help of accelerometers and presented in comparison with the analysis results. The appropriateness of the vibration fixture design was evaluated with the correlated results of analysis and tests.

Keywords: Vibration fixture, Modal analysis, Accelerometer

1. GİRİŞ

Tasarlanan ürünler, kullanıldıkları ortamlarda çeşitli çevresel etkilere maruz kalırlar. Mekanik tasarım açısından, irdelenmesi gereken en önemli çevresel etkilerden biri de titreşimdir. Ürünler, kullanıldıkları ortam ya da platformlara göre çeşitli genlik ve frekans aralıklarında titreşimlere maruz kalabilirler. Titreşim sebebiyle, ekipmanlar rezonansa maruz kalıp, çalışma kabiliyetlerini yitirebilmektedir. Bu sebeple, kullanılacak cihazların üretim aşamasından önce, titreşim testlerinin gerçekleştirilmesi ve ortam şartlarından kaynaklı titreşimlere dayanabilecek şekilde tasarlanması oldukça önemlidir. Aviyonik sistemler içinse titreşim testleri, uçaklarda kullanılan elektronik sistemlerin titreşimlere karşı dayanıklılığını ve performansını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen önemli bir test türüdür. Aviyonik sistemler için yapılan titreşim testlerine uçuş koşullarının simülasyonu, uçuş güvenliği, performans ve veri bütünlüğü,

* STG Mühendislik, Ostim Teknopark Teknoloji Geliştirme Bölgesi Ostim OSB Mahallesi 100. Yıl Bulvarı 55E/12 06374 Ankara

İletişim Yazarı: İbrahim Yıldırım (ibrahim.yildirim@stgm.com.tr)

sertifikasyon gereklilikleri, müşteri beklentileri ve uzun ömür gibi nedenlerden dolayı ihtiyaç duyulmaktadır.

Tasarım süreçlerinde, ürünlerin maruz kaldıkları titreşimlere dayanımının irdelenebilmesi için operasyonel olarak kullanılacakları ortamdan titreşim verileri hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Otomotiv, savunma ve havacılık gibi sektörlerde bu titreşim seviyeleri için tanımlı gerekliliklerin yer aldığı standartlar bulunmaktadır. Ürün geliştirme süreçlerinde ilk prototipler, standartlarda yer alan tanımlı titreşim profilleri ile test edilmektedir. Bu testler esnasında, ürünlerin sarsıcılar üzerinde sağlıklı bir biçimde konumlandırılması sağlamak amacıyla titreşim fikstürleri kullanılmaktadır. Test fikstürü, test numunesinin bir şok veya titreşim test cihazına takılmasını sağlayan özel bir yapıdır (Harris ve Piersol, 2002).

Titreşim fikstürlerinin, sarsıcıdan gelen titreşimleri doğru bir biçimde test edilecek ekipmana iletebilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, fikstür gelen titreşimi sönmüleyebilir ya da arttırılmış bir şekilde test edilecek ekipmana iletebilir. Bu durumlarda ekipmanın testi, sağlıklı bir sonuç vermeyecek, sahada aynı titreşimlere maruz kaldığında hata durumları oluşacak ve bağlı olduğu platformun çalışmasını olumsuz yönde etkileyecektir. Fikstür, tasarım aşamasından sonra yapılacak modal analizlerle elde edilen doğal frekans değerleri ve üretiminden sonra yapılacak fiziksel testlerle doğrulanabilir.

Titreşim fikstürü tasarımında, sarsıcı tarafından verilen titreşimin, test edilecek ürüne net bir şekilde iletilmesini sağlamak, dikkat edilmesi gereken en önemli husustur. Tasarım yapılırken, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak fikstürün doğal frekans değerleri bulunmalı ve bu frekans değerlerinin, test edilecek frekans aralığının dışında olması gerekmektedir (Kaya, 2021).

Otomotiv bileşenlerinin yol ve rüzgardan kaynaklı titreşim etkilerinden arındırılması, sürücü emniyeti ve konforu açısından oldukça kritiktir. Test edilecek ekipmanın bir fikstür yardımıyla sarsıcı tablaya bağlanması gerekmektedir. Fikstürün sarsıcı tabla ve test edilecek ekipman arasında titreşimi doğru iletecek şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir (Yenilmez, 2020).

Uygun fikstür tasarımlarıyla ürüne gelen titreşimler ölçülmeli ve gerekli stabilizasyon çalışmaları yapılmalıdır (Yenilmez ve Kocacı, 2021). Fikstür tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden bir tanesi de fikstür için uygun malzeme seçimidir (Sowjanya, 2013). Çelik ve alüminyum yaygın olarak kullanılan titreşim fikstürü malzemeleridir. Malzeme seçimi yapılırken, sarsıcının ağırlık ve kuvvet limitleri göz önüne alınmalıdır. Titreşim testi, test edilen ürünlerin operasyonel koşullarının benzetimidir. Ürünleri, kullanılacakları platformlarda test etmek her zaman mümkün değildir ya da daha pahalı bir yöntemdir. Yapısal titreşim testinde, en doğru test gerçek çalışma ortamının en ideal şekilde simüle edildiği testlerdir (Takeshita ve diğ., 2022). Amaç, malzemenin bir yaşam döngüsü boyunca maruz kalabileceği titreşim ortamlarının tanımlanması ve laboratuvar titreşim testlerinin yürütülmesi için rehberlik sağlamaktır (MIL-STD-810G). Ürünün geliştirme sürecinde maruz kalacağı çevresel koşullara göre üretilmesi için sayısal olarak ve test ortamında doğrulanması ve bu koşulları aşabilecek şekilde üretilmesi, kullanım sırasında ortaya çıkabilecek sorunları en aza indirmektedir (Barros ve Souto, 2016).

Çalışma kapsamında hava araçları kokpitlerinde kullanılan geniş ekran (Large Area Display-LAD) ürününün titreşim testleri için, MIL-STD-810G standartında yer alan gereklilikler referans alınarak bir fikstür tasarımı gerçekleştirilmiştir. Hedeflenen doğal frekans değerlerine ulaşmaya kadar sonlu elemanlar analizleri ve tasarım değişiklikleri tekrarlanmıştır. Nihai tasarım için prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Titreşim testlerinde ivmeölçerler aracılığıyla veriler toplanarak korelasyon ve iletilebilirlik durumları değerlendirilmiştir.

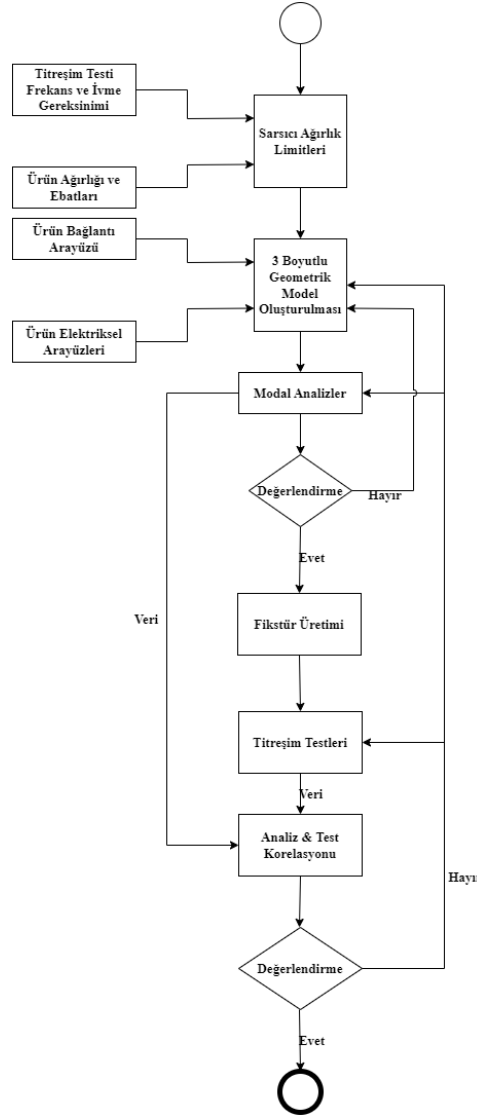
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Yöntem

Titreşim fikstürü tasarımı, test edilecek ekipmanın geometrisi, ağırlığı ve sarsıcı cihaz limitlerine dikkat edilerek yapılmalıdır. Öncelikle, test edilecek ekipmanın sabitleneceği bir fikstür tasarlanmalı ve bu fikstürün bağlantı noktaları sarsıcı tabladaki deliklere göre

ayarlanmalıdır. Oluşturulan üç boyutlu geometrinin, sonlu elemanlar yöntemi ile modal analizi gerçekleştirilerek doğal frekans değerleri bulunur. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlardan Simcenter 3D kullanılmıştır. Bulunan doğal frekans değerlerinin testin yapılacağı frekans aralığının dışında olması hedeflenmektedir. İstenilen değer üstüne çıkılmadığı durumlarda, tasarım değişikliği yapılarak geometri daha rijit bir hale getirilir. Bu işlem, istenilen değerler elde edilene kadar devam ettirilir. İstenilen değerlere ulaşıldığı takdirde, fiktür üretimi gerçekleştirilerek test aşamasına geçilebilir. Titreşim testlerinin gerçekleştirilmesinin ardından, elde edilen veriler ile modal analiz sonuçları kıyaslanarak korelasyonu kontrol edilir. Titreşim fiktürü tasarımı için çalışma kapsamında izlenen akış şeması Şekil 1’de yer almaktadır.

Testin gerçekleştirileceği frekans değer aralığı ve titreşimi meydana getirecek ivme değerlerine göre, sarsıcının testi gerçekleştirebileceği maksimum ağırlık değişmektedir. Bu ağırlıktan, test edilecek ürün ağırlığı çıkarıldıktan sonra kalan ağırlık, titreşim fiktürü için maksimum ağırlık limitidir. Bağlantı deliklerinin deseni, civata ebatı ve dış ölçüleri gibi sarsıcı tablanın detayları dikkate alınarak fiktür tasarımı gerçekleştirilmelidir.



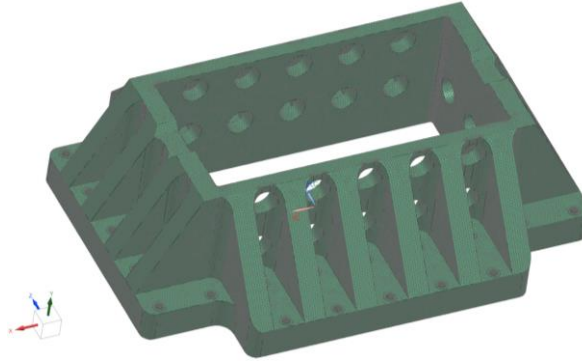
Şekil 1:
Akış Şeması

Test numunesinin ebatı, ağırlığı, mekanik ve elektronik arayüzleri, tasarımı etkileyen diğer girdilerdir. Bu veriler doğrultusunda, fikstür tasarımının gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Titreşim testleri, MIL-STD-810G standardında paylaşılan PSD (Power Spectrum Density) datalarına göre gerçekleştirilmiştir. Tasarlanacak fikstürlerin, titreşim gereksinimi olarak belirlenen PSD datasının frekans aralığında, iletilirliği sağlıklı bir biçimde sağlamaları gerekmektedir. Tasarım sürecinde, modal analizler sonucunda elde edilen doğal frekans değerlerinin, testin yapılacağı frekans aralığının dışında olması hedeflenir. Fakat bu durum, testin gerçekleştirilmesi hedeflenen, titreşim ivmelerinden kaynaklı ağırlık limitleri içerisinde, her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda, test edilecek ekipmanın doğal frekans değerleri ile titreşim fikstürünün doğal frekans değerlerinin çakışmamasına özen gösterilmelidir. Bu sınırlamalar sebebiyle yapılan modal analiz sonuçlarına göre hedeflenen doğal frekans limitleri aşılmaya çalışılır.

2.2. Fikstür Tasarımı ve Modal Analizi

Fikstür modeli, rijit bir yapıda, aviyonik ürünün yatay eksene bağlanabildiği şekilde oluşturulmuştur. Tasarım yapılırken, sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla tasarım doğrulanarak Şekil 2’de nihai tasarıma ulaşılmıştır. Fikstür aracılığıyla test edilecek ekipmanın konnektör boyutlarına göre kablaj bağlantılarının yapılabilmesi için uygun delikler açılmıştır. Test esnasında çalışacak aviyonik ekipmanın kablaj bağlantıları ve kablaj dönüş yarıçapları da hesaba katılarak fikstür boyutları belirlenmiştir. Model, yapılan iyileştirmeler sonucunda 110 kg olarak tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar modeli, 5 mm boyutlu düzgün dört yüzlü elemanlardan oluşmaktadır. Sınır şartı olarak fikstür, bağlantı deliklerinden tüm serbestlik derecelerinde harekete kısıtlanmıştır.



Şekil 2:
Fikstür Modeli

Kullanılacak malzeme, rijitlik ihtiyacı, titreşim tablası ağırlık limiti ve üretim yöntemi olarak seçilen talaşlı imalat göz önünde bulundurularak, Al6061 T6 olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen modal analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme Özellikleri

<(https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=1b8c06d0ca7c456694c7777d9e10be5b)>

Malzeme	Yoğunluk (kg/mm ³)	Elastite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Akma Mukavemeti (MPa)
AL6061-T6	2,7E-06	68.9	0.33	276

2.3. Titreşim Testleri

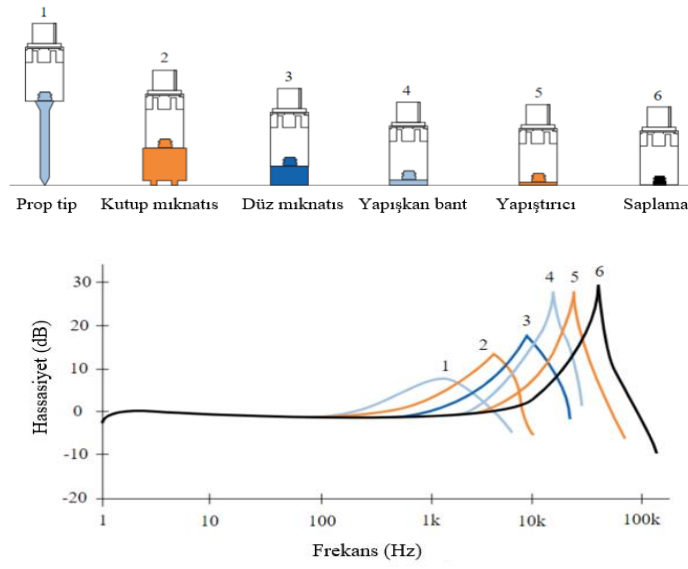
Titreşim testleri esnasında, ivme verilerinin toplanabilmesi için ivmeölçerler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen testler için Tablo 2’de özellikleri sunulan sarsıcı tabla kullanılmıştır.

Tablo 2. Sarsıcı tabla özellikleri

Ekipman İç Boyutları	Kayar Tabla:900x900mm Kafa Geniştirici:900x900mm
Maksimum Test Ağırlığı	600 kg (kablaj ve fiktür dahil)
Test Kapasitesi	Frekans:1-2500Hz Güç:60KN Sinüs: 100G Şok Sağlama Random: 50G Şok Sağlama

Testlerde kullanılan ivmeölçerler, IEPE tip ivmeölçerlerdir. İvmeölçerlerimiz kablo uzunluğu ve kalitesinden bağımsız olarak sabit hassasiyete sahip olmakla birlikte, yüksek bir çıkış sinyaline bağlı olarak daha az gürültüdür. Mükemmel dinamik yanıt kabiliyetine sahiptir. Ayrıca kir ve nem gibi zorlu koşullara dayanıklıdır.

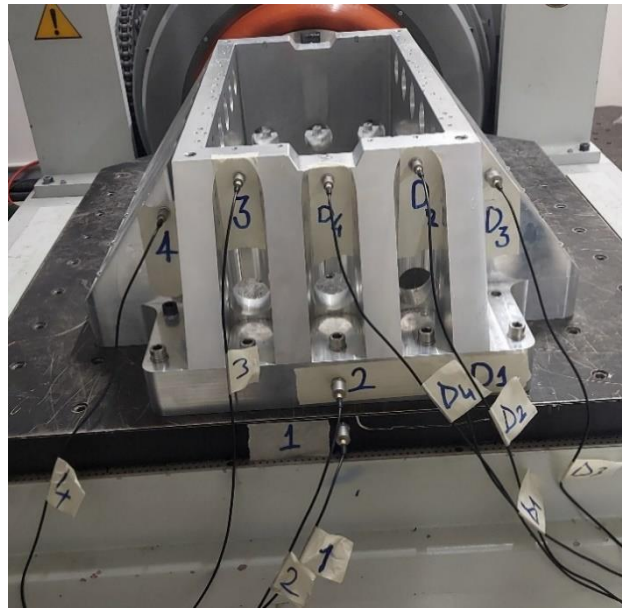
İvmeölçerler, ölçüm yapılacak yüzeye saplama cıvatası, yalıtım flanşı veya yapışkan pedlerle saplama montajı, manyetik taban, balmumu, siyanoakrilat, epoksi yapıştırıcı veya ince çift taraflı yapıştırıcı, yapıştırıcı bant, el basıncıyla sonda, yaylı uç ile otomatik bant yöntemleri ile bağlanabilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde, cıvata montajı ve siyanoakrilatın en iyi bağlantı koşulunu sağladığı görülmüştür.



Şekil 3:

İvmeölçer montaj kıyaslaması < (<https://dewesoft.com/daq/measure-shock-vibration-with-accelerometers#ipe-accelerometers>) >

İvmeölçerler, analiz sonuçlarına göre, mod şekillerinin en düzensiz olduğu yerlere montajlanacaktır. İletilebilirliği ölçmek adına sarsıcı tabla, fikstür tabanı ve fikstür üst noktasına konumlandırılması hedeflenmiştir. İvmeölçerlerin bir kısmı, LabGenius yazılımını kullanan kontrolcüye, bir kısmı ise Dewesoft veri toplama cihazına bağlanarak, ivme verileri toplanmıştır. Dewesoft veri toplama cihazı yardımıyla zamana bağlı olarak toplanan ivme verileri, FFT (Fast Fourier Transform) analizi ile frekans alanına dönüştürülerek incelenmiştir.



Şekil 4:

Fikstür Sarsıcı Tabla Montajı

Tablo 3. Titreşim profili<MIL-STD-810G W/Change 1 514.7 Procedure 1>

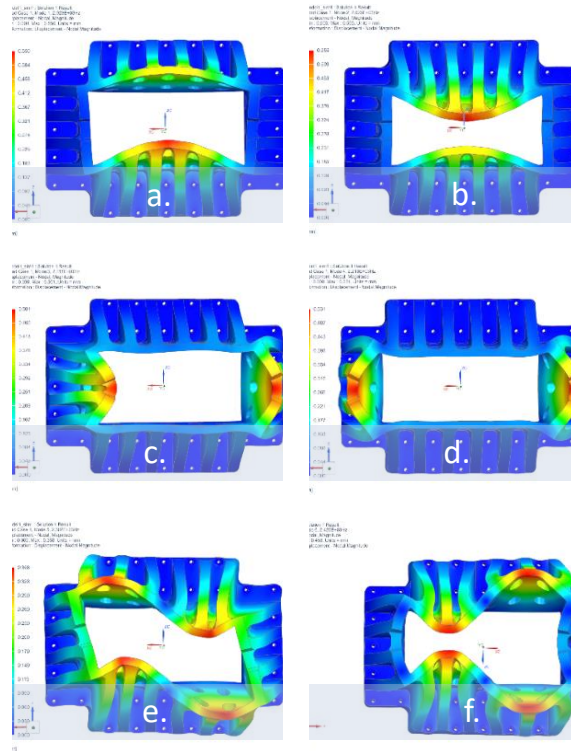
F (Hz)	PSD (g ² /Hz)
15	0,002
50	0,002
1000	0,002
2000	0,0005

Test Süresi
1 saat/eksen

Şekil 4'teki fikstüre uygulanacak titreşim profili, MIL-STD-810G W/Change 1 514.7 Procedure 1'den alınmıştır. Tablo 3'te uygulanacak olan titreşim profili gösterilmiştir.

3. SONUÇLAR

Simcenter 3D programı kullanılarak yapılan modal analiz sonuçları, Şekil 5 ve Tablo 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'te, Şekil 5'te gösterilen analiz sonuçlarından elde edilen mod şekillerine göre ivmeölçerlerin bağlanacağı noktalar gösterilmiştir.



Şekil 5:

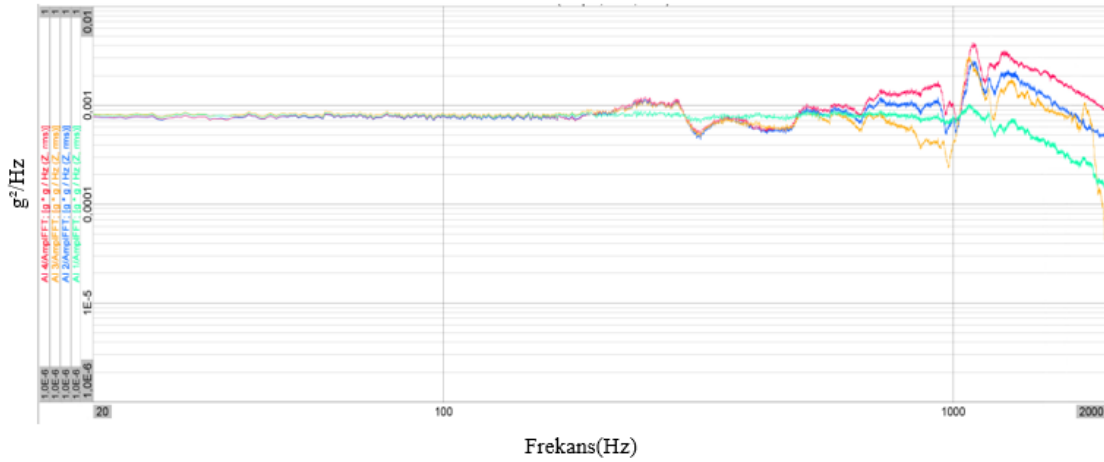
Fikstür Mod Şekilleri

a. Mod-1 b. Mod-2 c. Mod-3 d. Mod-4 e. Mod-5 f. Mod-6

Tablo 4. Fikstür Mod Değerleri

Mode	Frekans (Hz)
Mod-1	2023
Mod-2	2026
Mod-3	2158
Mod-4	2210
Mod-5	2307
Mod-6	2425

Titreşim profili incelendiğinde, testler 15-2000 Hz aralığında gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçları incelendiğinde ise fikstürün doğal frekansları 2000 Hz üzerindedir. Dolayısıyla test esnasında elde edilen verilerden, fikstürün bu aralıkta rezonansa uğramaması beklenmektedir. Gerçekleştirilen modal analizler sonucunda, fikstürün doğal frekans değerleri bulunmuştur. İlk mod, 2023 Hz olarak fiziksel testin gerçekleştirileceği frekans aralığının dışında elde edilmiştir.



Şekil 6:
Fikstür, FFT

Test sonucunda ivmeölçerlerden toplanan veriler, Şekil 6'daki grafikte gösterilmiştir. İvmeölçerlerden toplanan veriler incelendiğinde, 2000 Hz'e kadar olan frekanslarda doğal frekans olarak değerlendirilebilecek ciddi bir ayrılma gözlemlenmemiştir. Bu durum, analiz çıktıları ile de uyumludur.

Tablo 5. Titreşim Seviyeleri

Kanal	Tip	PSD (Grms)
İvmeölçer 1	Kontrolcü	1.7130
İvmeölçer 2	Gözlem	1.9351
İvmeölçer 3	Gözlem	2.4013
İvmeölçer 4	Gözlem	2.3059

Gerçekleştirilen testlerde, kontrol ivmeölçerinin 1,713 grms titreşim uygulaması sağlanmıştır. Her bir ivmeölçer için elde edilen değerler, Tablo 5'te sunulmuştur. Test sonucunda ivmeölçerlerden toplanan veriler incelendiğinde, ivme seviyelerinin maksimum 2,4 grms seviyesinde meydana geldiği görülmektedir.

4. DEĞERLENDİRME

Aviyonik bir ürünün, 2000 Hz'e kadar farklı profillerde gerçekleştirilecek titreşim testleri için fikstür tasarlanmıştır. Bu tasarım için modal analizler gerçekleştirilerek doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Fikstür üretildikten sonra, titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Titreşim testlerinde, ivmeölçerlerden toplanan veriler ile FFT grafiklerinde görülen doğal frekans değerleriyle alakalı çıkarımlar yapılarak, modal analizle korelasyonu kontrol edilmiştir.

Çalışma kapsamında, gerçekleştirilen titreşim testlerinde, FFT sonuçlarına göre kontrolcü tarafından uygulanan ve ivmeölçerden elde edilen PSD (grms) değeri kıyaslandığında, 1,4 katına kadar sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Sarsıcı tabla ile fikstürde aviyonik ürünün montajlandığı yüzeyler arasında yükselti farkı bulunmaktadır. Fikstür doğrulaması amaçlanan çalışmada, sarsıcının kontrolcü ivmeölçeri, sarsıcı tablada yer almıştır. Aviyonik ürün testlerinin gerçekleştirileceği durumlarda, kontrolcü ivmeölçer montaj yüzeyine yakın bağlanarak 1,4'lük oranın da altında bir iletilebilirlik performansı elde edilmiş olacaktır. Bu bağlamda Şekil-4'te gösterilen fikstür tabanındaki 2 numaralı ivmeölçer, kontrolcü ivmeölçer olarak belirlenerek iletim oranı düşürülmüştür. Bu durumda yeni iletim oranı 1,24 olmuştur. Ürün titreşim testleri bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapılan değişiklik ile iletilebilirlik oranı kabul edilebilirlik sınırına düşürülmüştür.

Bu çalışmanın devamında tasarlanacak yeni fikstürler için, özellikle ilk doğal frekansın 2000 Hz üzerine çıkarılmadığı durumlarda modal analize ilave olarak zorlanmış titreşim analizlerinin de gerçekleştirilerek iletilebilirlik performansının fikstür üretimi öncesinde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

YAZAR KATKISI

Caner Güven çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ile veri analizi, Ramazan Meral mekanik tasarım çalışmalarının yapılması, İbrahim Yıldırım veri toplama ve veri analizinin yapılması, Cansu Menşur Çetin sonlu elemanlar analizlerinin yapılması, Fikret Kamil Çorbacı tasarım gözden geçirilmesi ve makalenin derlenmesi, Mehmet Demir test ortamının ve şartlarının hazırlanması aşamalarında rol almışlardır. Her bir yazar makalenin son halini okudu ve onayladı.

KAYNAKLAR

1. Barros, E. ve Souto, C. (2017) Evaluation of a Vibration Text Fixture, *International Journal of Acoustics and Vibration*, 22(3), 348-352. doi: [10.20855/ijav.2017.22.3480](https://doi.org/10.20855/ijav.2017.22.3480)
2. MIL-STD-810G, 2008. Department of Defense, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, USA.
3. Harris, C.M. ve Piersol, A.G. (2002) *Harris' Shock And Vibration Handbook*, McGraw- Hill, New York.
4. https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=1b8c06d0ca7c456694c7777d9e10be5b, Erişim Tarihi: 08.01.2023, Aluminum 6061-T6.
5. <https://rnc.com.tr/ivmeolcerler-ile-sok-ve-titresim-olcme/>, Erişim Tarihi: 21.01.2023, Konu: *İvmeölçerler*
6. <https://dewesoft.com/daq/measure-shock-vibration-with-accelerometers#iepe-accelerometers>, Erişim Tarihi: 21.01.2023, Konu: *İvmeölçer montajı*
7. <https://rnc.com.tr/fft-analiz-nedir/>, Erişim Tarihi: 21.01.2023, Konu: *FFT Analizi*.
8. Kaya, D.F. ve Nalbant, M. (2021) Titreşim Fikstürlerinde Vibrasyon Ölçümleriyle Sonlu Elemanlar Model Sonuçlarının Karşılaştırılması, *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2(1), 1-17.
9. Sowjanya, G.P., Rao, P.D., Kiran, C.U. (2013) Finite Element Analysis of Vibration Fixture made of Aluminum and Magnesium Alloys. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2(1), 84-89.
10. Takeshita, A., Sedillo, H., Jankowski, K., Barba, J., Bouma, A., Billingsley, E., Abdelkefi, A. (2022) Effects of test fixture connections and interference of the BARC structure on its dynamic responses, *International Journal of Mechanical Science*, 221, 107186. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2022.107186](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107186)
11. Yenilmez, K.Y. (2020). Otomotiv Bileşenlerinin Titreşim Testleri, *Yüksek Lisans Tezi*, U.Ü., Bursa.
12. Yenilmez, K.Y, Kamış Kocabaçak, Z. (2022) Otomobil Yan Geri Görüş Aynası İçin Titreşim Fikstürü Tasarımı ve Analizi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1), 12-23. doi: [10.31202/ecjse.910478](https://doi.org/10.31202/ecjse.910478)