

## HAVA ARACI GELİŞTİRME PROJELERİNDE YER TİTREŞİM TESTİ SÜRECİ VE ÖNEMİ

Süleyman Cem YENİCELİ\*  
TUSAŞ, Ankara

### ÖZET

*Bu çalışmada, yer titreşim testlerinin hava aracı geliştirme projelerindeki süreç ve önemi incelenmiştir. Çalışma bünyesinde, yer titreşim testlerinin hazırlık aşamasından test sonuçlarının raporlanmasına kadar geçen süreç detaylandırılmış ve elde edilen test sonuçlarının geliştirme projesine sağladığı girdilerin önemi belirtilmiştir. Yer titreşim testleri, hava aracı geliştirme projelerinde ilk uçuştan önceki son yer testlerinden biri olması nedeniyle icra süresi büyük önem teşkil etmektedir. Bu nedenle test sürecinin detaylı olarak tanımlanması, icra süresinin belirlenebilmesi ve kısaltılabilmesi için gereklidir. Yer titreşim testi süreci; test hazırlığı, modal veri toplama, modal veri analizi ve test sonuçlarının raporlanması olarak dört ana başlıkta incelenebilir. Bu maddeler içinde, test sürecinin detaylı olarak planlandığı test hazırlığı evresi, test icra süresinde büyük bir etkiye sahiptir. Elde edilen test sonuçları, hava aracının çarpınma analizlerinde kullanılan analitik dinamik modelinin doğrulanmasında ve güncellenmesinde, uçuş çarpınma testlerinin planlanmasında ve uçuş test sonuçlarının yorumlanmasında kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, havacılık otoriteleri tarafından sertifikalandırılacak bir hava aracı için, sertifikasyon gereksinimlerinin sağlanmasında da yer titreşim test sonuçları kullanılmaktadır. Bu nedenle, hava aracının sertifikasyon sürecinde de yer titreşim testleri önemli bir yere sahiptir. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler, TUSAŞ tarafından gerçekleştirilmiş yer titreşim testlerinden kazanılan deneyimlerle birleştirilip ileride yapılması planlanan yer titreşim testlerinde kullanılacaktır.*

### GİRİŞ

Yer titreşim testleri, hava aracının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi, doğrulanması ve geliştirilmesinde önemli bir test adımıdır ve genellikle geliştirme sürecinin en son safhalarında, uçuşa çıkmadan önce prototip üzerinde icra edilen testlerdir. Bu testlerin esas amacı, hava aracının yapısal dinamik sonlu elemanlar modelini doğrulamak ve iyileştirmede kullanmak üzere bütün hava aracı yapısının doğal frekans, sönümlenme ve mod şekillerini içeren deneysel titreşim verisini elde etmektir. Diğer amaçlarla da kullanılmasının yanı sıra, temel olarak çarpınma analizlerine girdi oluşturmaları ve güvenlik açısından kritik olan uçuş testlerinin planlanmasında kullanılması sebepleriyle, dinamik modellerin doğrulanmaları ve güvenilir olmaları hava aracı açısından hayati önem taşımaktadır [Peeters, 2008].

Yer titreşim testleri bir hava aracı için yerde yapılabilecek en karmaşık ve pahalı testlerdendir. Bunun yanı sıra, hava aracını geliştirme projelerinde, ilk uçuşu yapacak olan prototipin yer titreşim testleri için çok sınırlı bir süre için müsait olarak planlanması ve birden çok konfigürasyonun test edilmesi gerekmesi nedeniyle, test sonuçlarının elde edilmesi için oldukça fazla zaman baskısı bulunmaktadır. Bu sebeple, günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte birkaç yüz kanaldan ölçüm yapabilen veri toplama sistemleri kullanılarak aynı anda hava aracı üzerindeki birçok noktadan test verisi toplanmaktadır. Böylece mümkün olduğunca az sayıda test ölçümü yapılabilmekte ve daha kaliteli test sonuçları elde edilebilmektedir.

\* Tasarım Mühendisi, E-posta: scyeniceli@tai.com.tr

Yer titreşim testlerinin icrasında öncelikle ölçüm alınacak noktalara ivmeölçerler yerleştirilir. Hava aracı serbest-serbest sınır koşulunu sağlayacak duruma getirilmek üzere askılanır. Önceden belirlenen noktalardan sarsıcı veya darbe çekici ile uygulanan kuvvetler ölçülerek hava aracı uyarılır ve aynı anda ölçüm noktalarındaki ivme değerleri ölçülür. Ölçülen veri modal parametrelerin belirlenmesinde kullanılır. Şekil 1'de TUSAŞ'ta gerçekleştirilen bir yer titreşim testi örneği verilmiştir.

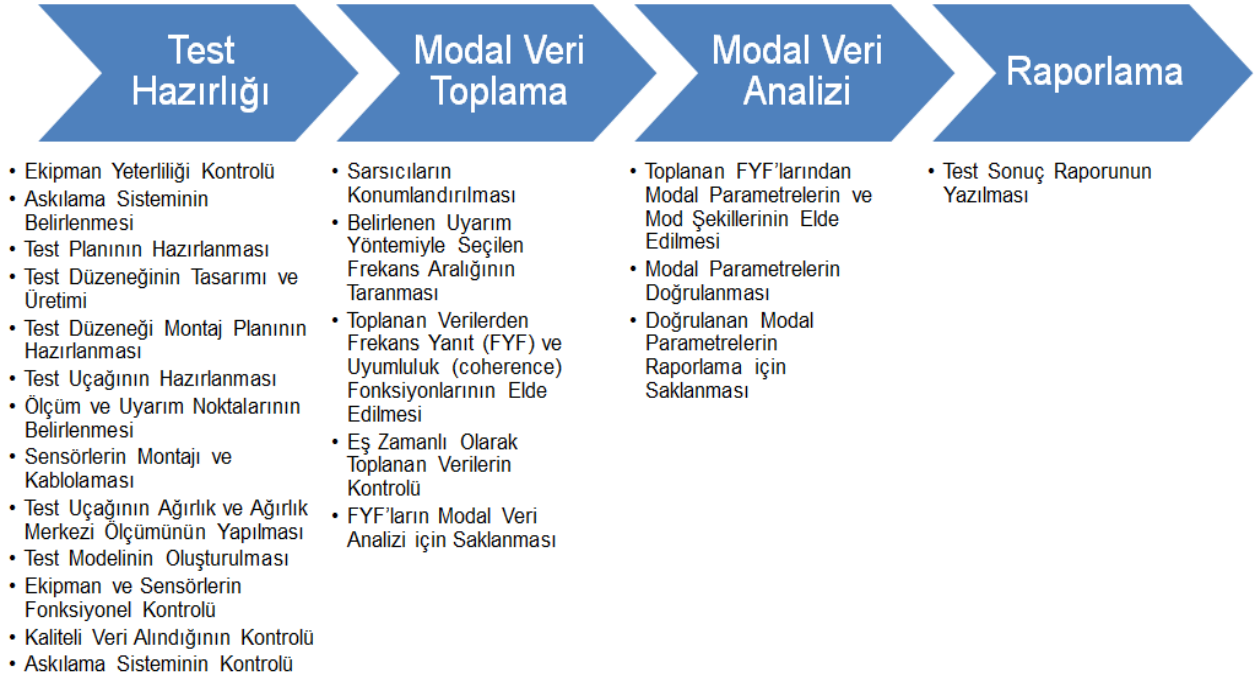


Şekil 1: Yer Titreşim Testi Örneği

Bu işlemlerin en kısa zamanda gerçekleştirilmesi için ölçüm ve uyarım noktalarının test icrasından önce çeşitli yöntemler kullanarak en iyi sonucu verecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, hava aracının askılama yöntemi test sonuçlarını etkilemeyecek şekilde belirlenmelidir. Bu testler dış etkenlere fazlasıyla duyarlı olabileceği için dikkatle icra edilmesi gereken testlerdir. Tüm bu sebeplerle, önceden dikkatli ve detaylı test planlaması yapılması testin ve test sonuçlarının kalitesini arttıracak gibi vakit israfını ve maddi kayıpları da azaltacaktır.

### YER TİTREŞİM TESTİ SÜRECİ

Yer titreşim testi süreci; test hazırlığı, modal veri toplama, modal veri analizi ve test sonuçlarının raporlanması olarak dört ana başlıkta incelenebilir. Bu maddeler içinde, test sürecinin detaylı olarak planlandığı test hazırlığı evresi, test icra süresinde en önemli etkiye sahiptir. Bu süreç Şekil 2'de detaylandırılarak gösterilmiştir.



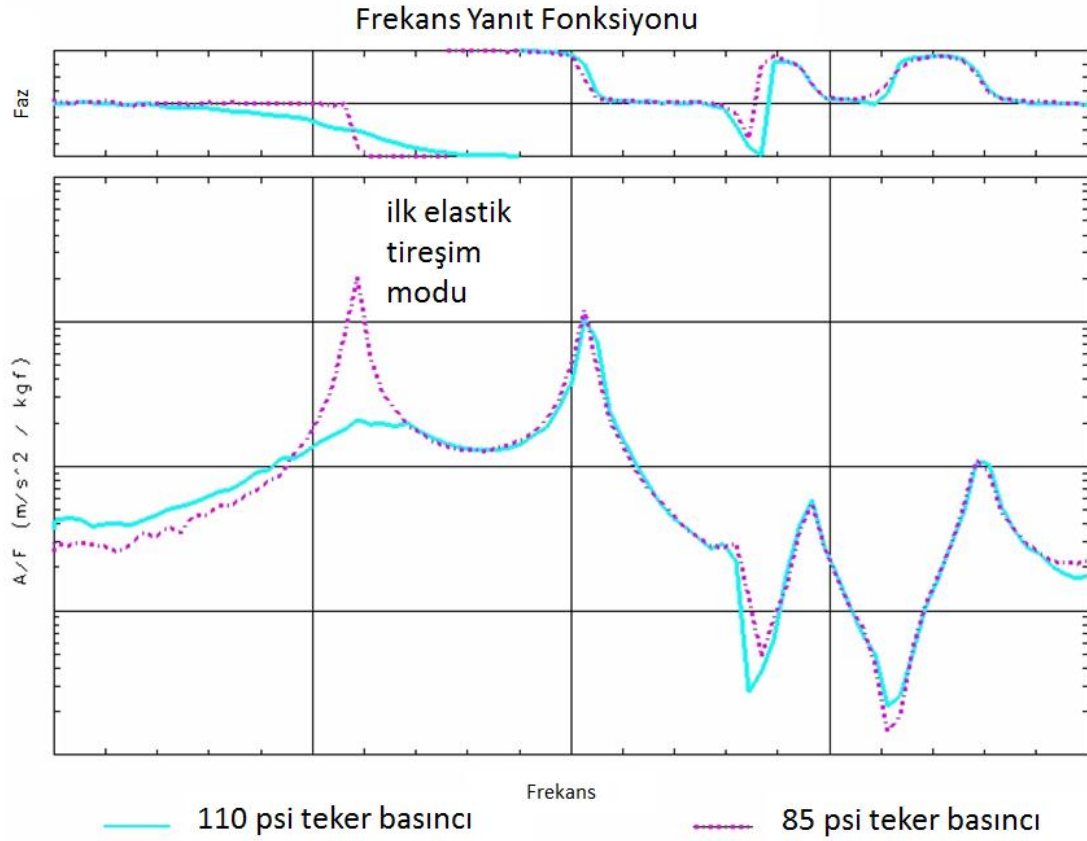
Şekil 2: Yer Titreşim Test Süreci

**Test Hazırlığı:** Test hazırlığı adımının başlayabilmesi için test koşulları ve gereksinimlerinin belirlendiği test istek dokümanının sağlanması gerekmektedir. Test hazırlığı adımında yapılan işler aşağıda detaylandırılmıştır.

- **Ekipman Yeterliliği Kontrolü:** Test istek dokümanında belirtilen istekleri karşılamak amacıyla eldeki ekipmanların (ivmeölçer, yükölçer, sarsıcı, data toplama sistemi ve yazılımı) yeterliliği üzerine çalışma yapılır ve gerekli ise satın alma faaliyetleri planlanır.
- **Askılama Sisteminin Belirlenmesi:** Test uçağı için serbest-serbest uçuş sınır koşullarını sağlamak amacıyla; uçağın ilk altı katı cisim titreşim frekansının ilk elastik titreşim frekansının dörtte biri olacak şekilde askılama sistemi kullanılmalıdır. Bu amaçla Şekil 1'de görülen elastik kordonlar ya da Şekil 3'te görülen süspansiyon sistemleri kullanılır. Eğer var ise eldeki askılama sisteminin test gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığı belirlenir. Bunun için test edilecek konfigürasyonların ağırlık, ağırlık merkezi, ağırlık merkezine göre atalet bilgisine ve ek olarak her konfigürasyon için test uçağının kaldırma noktalarına gelen yük bilgilerine ihtiyaç vardır. Askılama sisteminin test uçağının ilk elastik titreşim biçimine etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Bu örnekte, süspansiyon sistemi olarak test uçağının iniş takımı tekerleri kullanılmış olup farklı teker hava basınçlarının etkisi görülmektedir. Şekil 5'te iniş takımı tekerlerinin farklı bir yer titreşim testinde kullanımı görülmektedir.



Şekil 3: Yer Titreşim Testleri için Süspansiyon Sistemi Kullanımı

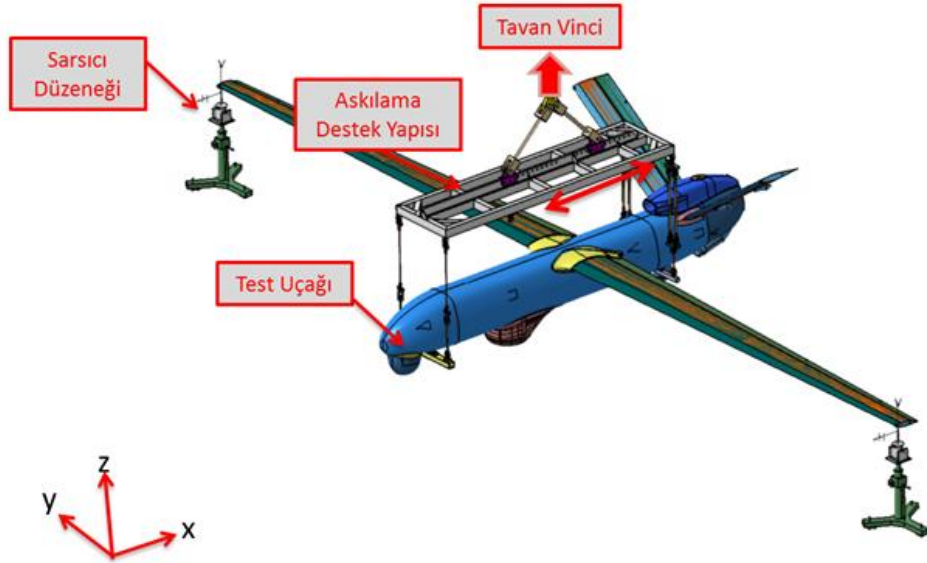


Şekil 4: Süspansiyon Sisteminin Ölçümlere Etkisi [Giacomin, Moreira, 2005]



Şekil 5: Süspansiyon Sistemi Olarak İniş Takımlarının Kullanımı [Peeters, 2008]

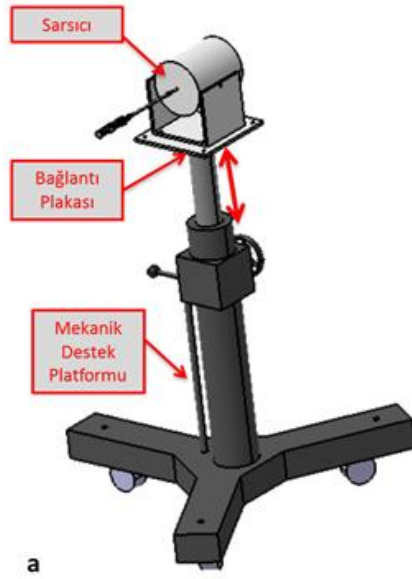
- **Test Planının Hazırlanması:** Test isteği dokümanında belirtilen gereksinimler doğrultusunda gerekli çalışmalar yapıp yer titreşim testinin nasıl icra edileceğini detaylı olarak anlatan bir test planı hazırlanır.
- **Test Düzeneğinin Tasarımı ve Üretimi:** Test icrası için gerekli test düzenekleri tasarlanır. Test düzeneği; sarsıcıların montajı ve askılanması için gerekli yapıları ve askılama sistemiyle test uçağının bağlantısını sağlayan yapıları içerir. Askılama için elastik kordonlar kullanıldığında elastik kordonların bağlandığı askılama destek yapısının da tasarlanması gerekmektedir. Şekil 6'da yer titreşim testlerinde kullanılan test düzeneklerinin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 6: Yer Titreşim Testlerinde Kullanılan Test Düzenekleri

Şekil 7'de görülen, sarsıcıların montajı için kullanılan yapılar tekerlekli ve yüksekliği ayarlanabilen düzeneklerdir. Bu yapılar uyarım yapılacak noktaya göre ayarlanıp

sabitlenebilmektir. Sarsıcıların montajı için hareket serbestliği olan ve kolay ayarlanabilen yapıların kullanılması test süresinin kısaltılmasında önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 8’de görülen örnek sarsıcı düzeneğinin taşınması ve uyarım noktası için ayarlanması zaman kaybettirici özelliğe sahiptir.



Şekil 7: Sarsıcı Düzeneği



Şekil 8: Sarsıcı Düzeneği Örneği

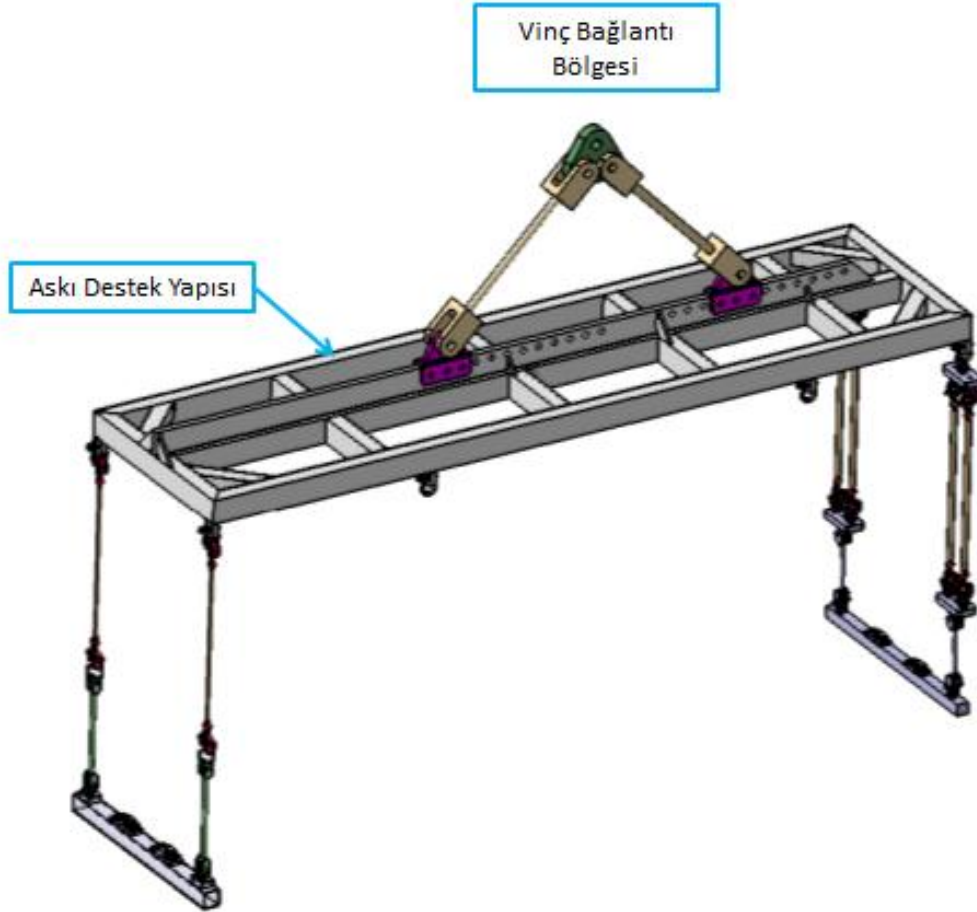
Sarsıcı ile test uçağı arasında bağlantı sağlamak ve sarsıcının yük uygulama yönü doğrultusunda test parçasına titreşimin iletilmesi amacıyla Şekil 9’da görülen sarsıcı çubuklar kullanılmaktadır. Sarsıcı bağlantı çubuğu düzeneğe istenilen esnekliği sarsıcıya yerleştirilme uzunluğuna göre belirlenebilir ve bilyeli mafsallı düzeneği küresel tek noktalı temas sayesinde sarsılma esnasında ölçümün kalitesini düşürecek yanıl yüklerin etkisini

azaltır ve sarsılma yükünün doğrusal bir şekilde test parçasına aktarılmasını sağlamaktadır. Sarsıcı çubuğun boyunun yanlış ayarlanması ve çubuk doğrultusunun yük uygulama yönünden kaçıklığı toplanan test verisi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.

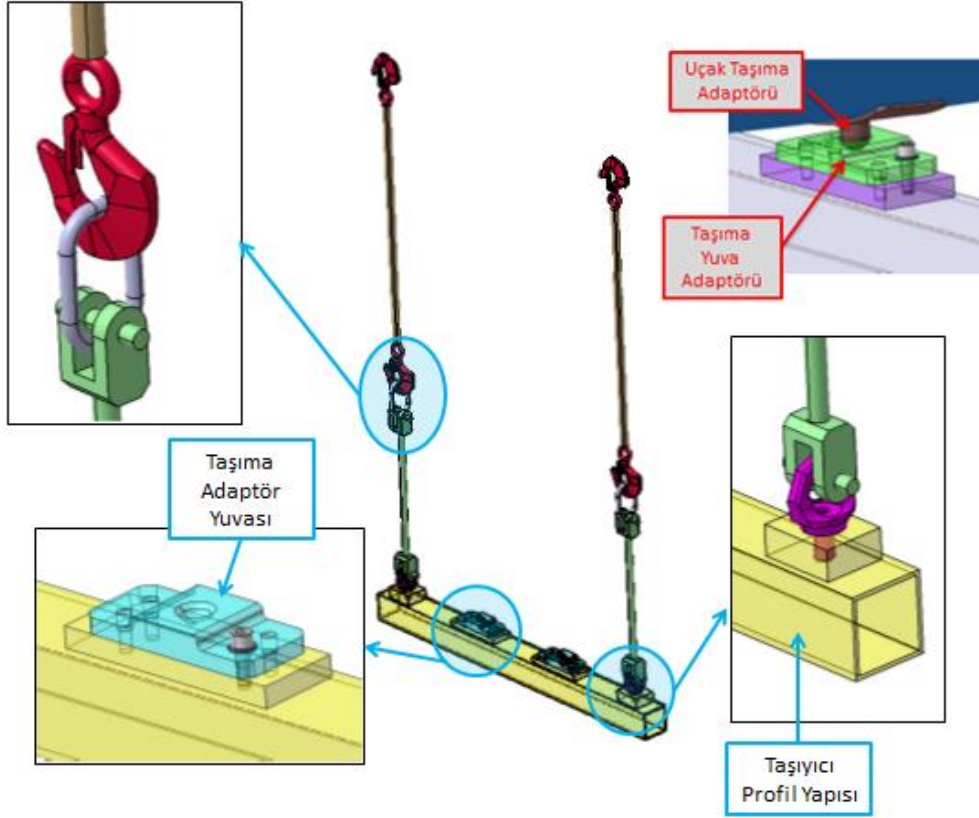


Şekil 9: Sarsıcı Çubuk

Şekil 6'da görülen askılama destek yapısının detayları örnek olması açısından Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 10'da görülen askı destek yapısı genel olarak test uçağı kaldırma operasyonu için daha önceden tasarlanıp üretildiğinden hazır halde bulunmaktadır. Elastik kordonların ve vinç bağlantısı için gerekliyse üzerinde modifikasyonlar yapmak gerekebilmektedir. Şekil 11'de ise askılama sistemi ile test uçağı arasındaki ara yüz bağlantı parçaları görülmektedir.



Şekil 10: Askılama Destek Yapısı

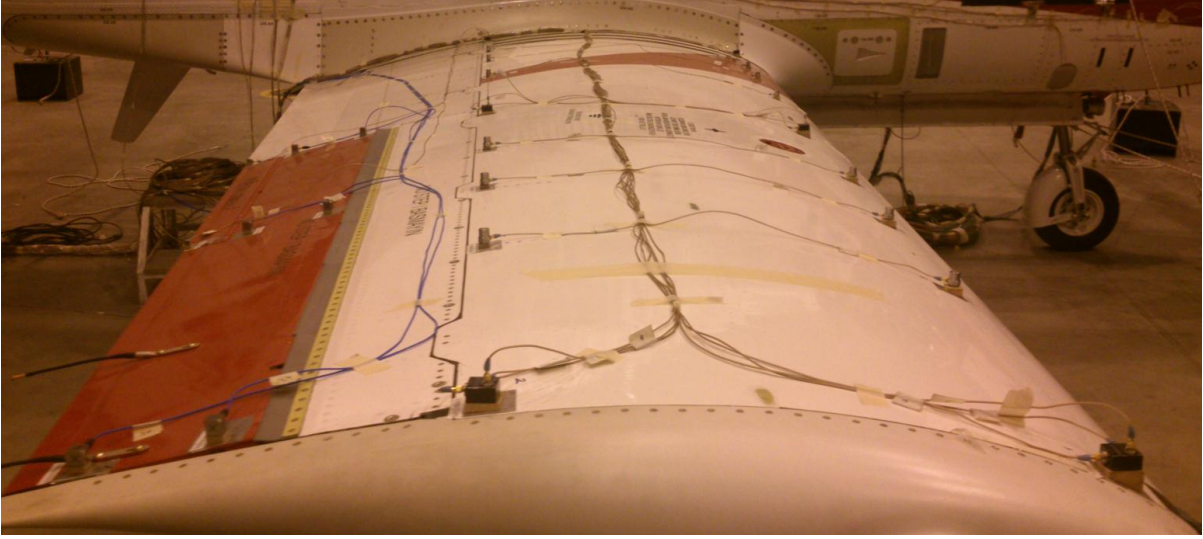


Şekil 11: Askılama Destek Yapısı

Tasarım aşaması tamamlandıktan sonra üretim aşamasına geçilmesi için test düzeneği parçalarının teknik resim çalışmaları ve üretim planlamaları yapılır. Bu parçaların test icrasından önce test alanında hazır bulunması gerekmektedir.

- **Test Düzeneği Montaj Planının Hazırlanması:** Test düzeneğinin test alanına kurulmasını ve test uçağı ile ara yüzünün anlatıldığı bir montaj planı dokümanı hazırlanır.
- **Test Uçağının Hazırlanması:** Yer titreşim testi ilk uçuştan önceki prototip üzerinde yapılması gerektiğinden test uçağı uçuş konfigürasyona gelecek şekilde hazırlanmalıdır. Gerekli durumlarda, mühimmat ve ekipman gibi bazı yapıların taklitleri tasarlanıp test icrasından önce üretilmelidir.
- **Ölçüm ve Uyarım Noktalarının Belirlenmesi:** Test sürecinin verimliliğinin artırılmasında ölçüm ve uyarım noktalarının belirlenmesi önemli bir yere sahiptir. Test öncesi sanal ortamda yapılan çalışmalarla ölçüm ve uyarım noktalarının yerlerinin ve yönlerinin optimizasyonu yapılabilmektedir. Optimizasyon sonucu elde edilen noktalara sensörler yerleştirildiğinde; test sonucunda beklenen mod biçimlerinin doğru bir şekilde en az test tarama sayısı ile ve en uygun sayıda sensör kullanarak elde edilmesi sağlanabilir. Böylece test süresinde ve ekipman maliyetinde önemli ölçüde kazanç sağlanabilir. Bunlara ek olarak, kaliteli ölçüm yapabilmek ve uçak üzerinde hasara neden olmamak için ölçüm ve uyarım noktaları belirlenirken uygulama yapılacak bölgenin yapısal olarak güçlü olması gerekmektedir. Bu sebeple uyarım noktalarının kanat ve kuyrukta, kiriş veya kaburga üstlerine ya da kiriş-kaburga kesişim noktalarına; gövdede çerçeve üzerine gelmesi sağlanmalıdır.
- **Sensörlerin Montajı ve Kablolaması:** Sensör yerleri test uçağı üzerine hazırlanmış resimlere göre işaretlenip yerleşimi yapılacaktır. Daha sonra veri toplama sisteminin bağlantısının yapılacağı kablolama işlemi yapılacaktır. Şekil 12 ve Şekil 13'te örnek sensör montajı ve kablolaması görülmektedir.



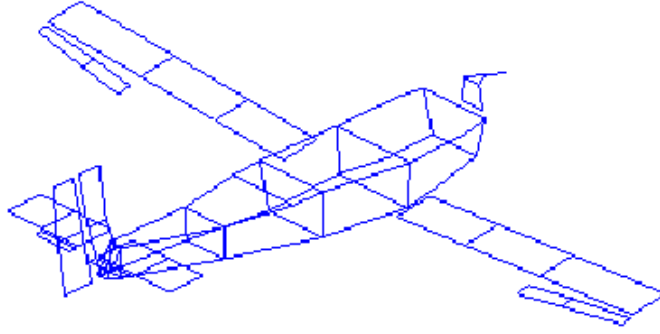


Şekil 12: Örnek Sensör Montajı ve Kablolaması



Şekil 13: Örnek Sensör Montajı ve Kablolaması

- **Test Uçağının Ağırlık ve Ağırlık Merkezinin Ölçümünün Yapılması:** Test edilecek uçağın testlere başlamadan önceki ağırlık ve ağırlık merkezi ölçümlerinin yapılması test sonrası yapılacak doğrulama çalışmalarında kullanılacağından gereklidir.
- **Test Modelinin Oluşturulması:** Yer titreşim testleri için test uçağının sonlu elemanlar modelinden farklı olarak bir test modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu model, sonlu elemanlar modeline göre oldukça basit olup sadece ölçüm noktalarını ve bu noktaları birbirine bağlayan çizgilerden oluşmaktadır. Şekil 14'te örnek bir yer titreşim test modeli görülmektedir.



Şekil 13: Yer Titreşim Test Modeli [Peeters, 2008]

- **Ekipman ve Sensörlerin Fonksiyonel Kontrolü:** Veri toplama sisteminin fonksiyonel kontrolü ve sensörlerin ölçüm yönlerinin kontrolü için bir adet sarsıcının test uçağına bağlı olduğu konfigürasyonda test istek dokümanında belirtilen frekansa aralığında frekans yanıt fonksiyonlarının (FYF) elde edildiği genel görünüm testi yapılır. FYF'ler temel olarak yer titreşim testleri esnasında toplanan yük ve ivme verileri arasındaki ilişkiyi tanımlayan fonksiyonlardır. Toplanan veri işlenerek ölçüm yönlerinin ve veri toplama sisteminin fonksiyonel kontrolü yapılır.
- **Kaliteli Veri Alındığının Kontrolü:** Çoklu girdi çoklu çıktı ölçümlerinin kalitesini doğrulamak amacıyla aşağıdaki kontroller iki adet sarsıcının test uçağına bağlı olduğu konfigürasyonda yapılır.

#### i. Sarsıcı Noktalarında FYF Kontrol

Bu FYF'ler sistemin yanıt sinyali (ivme) ve referans sinyalinin (yük) aynı noktadan ölçülmesiyle elde edilir. Bu FYF sistemin o noktadaki birinci dereceden modeli hakkında bilgi vermektedir. Elde edilen FYF'nin faz değerlerinin işareti (negatif ya da pozitif) bütün frekans aralığında aynı olmalıdır. Elde edilen FYF'ler hazırlanan modal modelin ve seçilen sarsıcı noktalarının doğruluğu ve kalitesini belirlemede yardımcı olmaktadır. Bu yüzden testlere başlamadan önce bu FYF'lerden düzgün sonuçlar alınması önemlidir.

#### ii. Doğrusallık Kontrolü

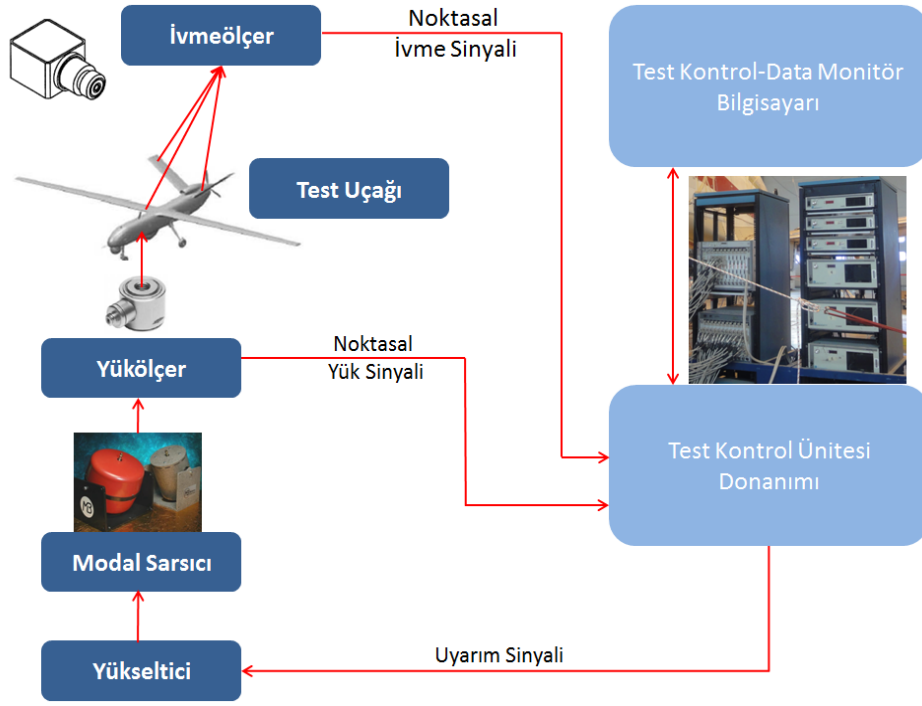
Test edilen yapının doğrusallığının kontrolü testlere başlamadan yapılması gereken bir diğer önemli adımdır. Bu amaçla test uçağına sarsıcılardan 3 farklı uyarım seviyesi uygulanıp elde edilen FYF'ler incelenir. Doğrusal bir yapı için, elde edilen FYF'ler uyarım seviyesinden bağımsız olmalı yani benzer olmalıdır.

#### iii. Karşılıklılık Kontrolü

Karşılıklılık kontrolü ile seçilen sarsıcı ve ölçüm çiftinin konumları karşılıklı değiştirilerek yapının doğrusallığı incelenecektir. Bunun için "i" noktasında "j" noktasındaki sarsıcıdan dolayı oluşan ivme; "j" noktasında "i" noktasındaki sarsıcıdan dolayı oluşan ivmeye benzer olmalıdır ( $FYF_{ij}=FYF_{ji}$ ). Elde edilen FYF'ler aynı grafik üzerinde çizdirilip kontrol edilir.

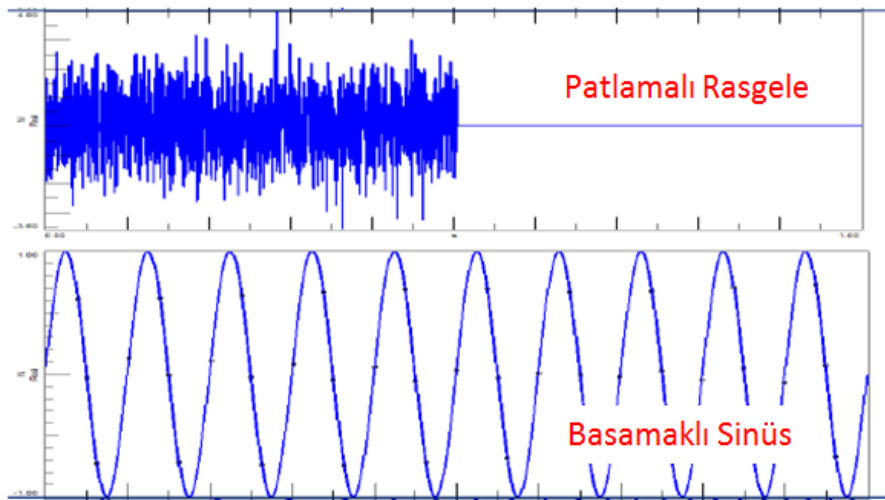
- **Askılama Sisteminin Kontrolü:** Belirlenen askılama sisteminin serbest-serbest sınır koşullarını sağlayıp sağlamadığının kontrolü bir önceki adımlarda toplanan verinin işlenmesi sonucu test uçağının ilk adım katı cisim titreşim frekansının bulunması ile yapılır. Bulunan frekanslar test uçağının elde edilen ilk elastik titreşim frekansıyla karşılaştırılır.

**Modal Veri Toplama:** Test öncesi kontrolleri başarıyla tamamlandıktan sonra modal veri toplama adımına geçilir. Bu adım, farklı hava aracı konfigürasyonları (yakıtlı/yakıtsız), farklı sarsıcı yerleşimleri veya farklı harici yük konfigürasyonları için tekrar edilir. Modal veri toplama sisteminin genel görünümü Şekil 15'te verilmiştir.



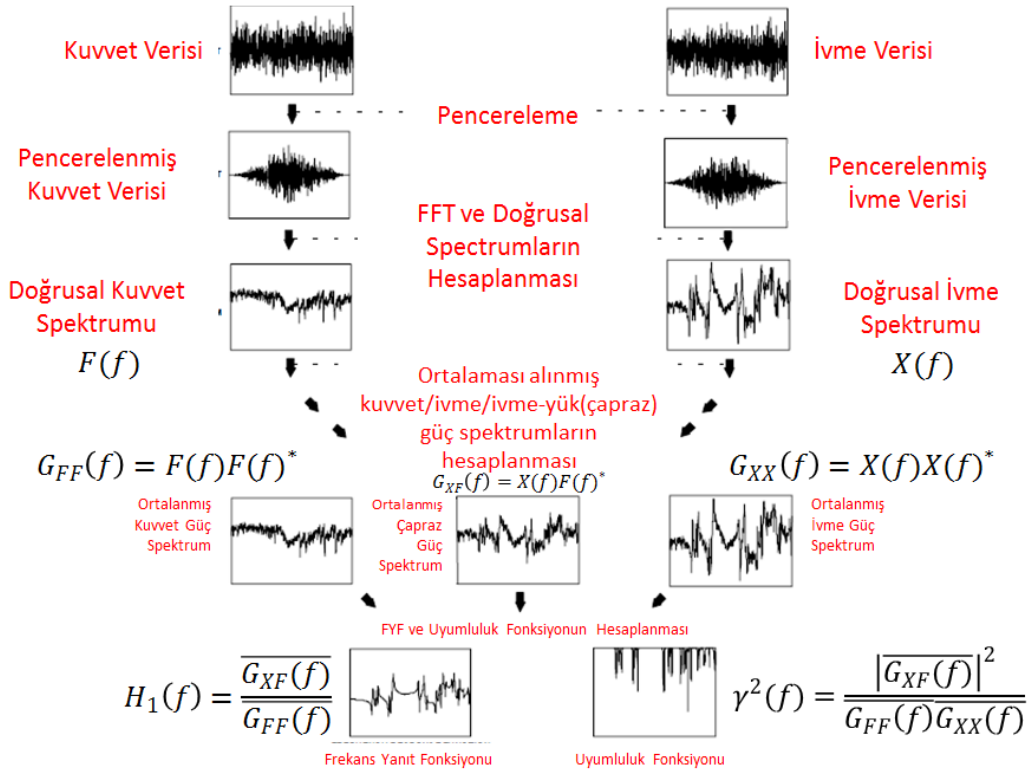
Şekil 15: Modal Veri Toplama Sistemi Genel Görünümü

- **Sarsıcıların Konumlandırılması:** Yer titreşim testlerinde farklı titreşim biçimlerini (kanat eğilme/kuyruk eğilme) uyarabilmek farklı sarsıcı yerleşimleri kullanmak gerekir. Veri toplama adımına başlangıcında sarsıcılar belirlenen noktalara yerleştirilir. Sarsıcıların bağlandığı yapıların kolay hareket edebilir ve ayarlanabilir olması bu adım için harcanan süreyi oldukça azaltmaktadır.
- **Belirlenen Uyarım Yöntemiyle Seçilen Frekans Aralığının Taranması:** Sarsıcılar içinde bulunan test adımı için belirlenen konumlarına yerleştirildikten sonra test istek dokümanında belirtilen frekans aralığında belirlenen uyarım yöntemiyle frekans taraması yapılır. Bu adım uygun uyarım yöntemini ve büyüklüğünü bulana kadar tekrar edilebilir. Genel olarak, ilk taramada patlamalı rasgele (burst random) uyarım yönetimi ile belirlenen frekans aralığı taranır. Daha sonra, veri çözünürlüğünün yeterli olmadığı durumlarda istenen frekans aralıkları basamaklı sinüs (stepped sine) uyarım yönetimiyle taranır. En son olarak, kritik olduğu düşünülen titreşim frekansları için gerekliyse sabit frekans uyarımlı taramalar (normal mode tuning) yapılarak modal parametreler elde edilir. Ancak, bu yöntem zaman alıcı olduğu için gerekmedikçe kullanımından kaçınılmalıdır. Şekil 16'da patlamalı rasgele ve basamaklı sinüs uyarım sinyalleri gösterilmiştir.



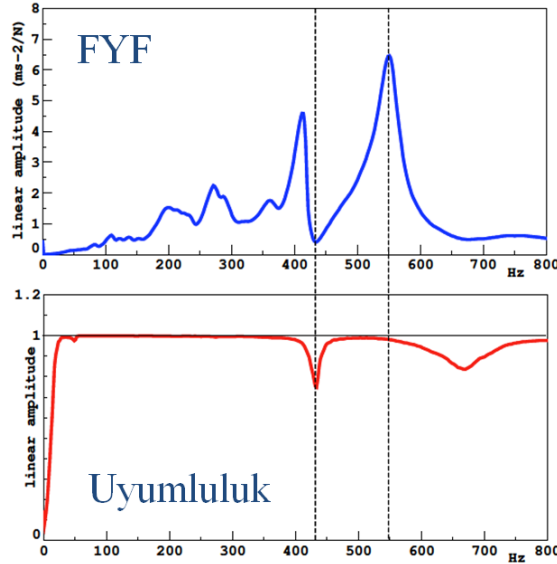
Şekil 16: Örnek Uyarım Sinyalleri [Peeters, 2008]

- **Toplanan Verilerden Frekans Yanıt ve Uyumluluk Fonksiyonlarının Elde Edilmesi:** Zamana bağlı olarak toplanan ivme ve yük verilerinden frekans değerine bağlı fonksiyonlar edilmesi için bir takım matematiksel işlemlerden geçirilir. İlk olarak, eğer zamana bağlı olan veriler periyodik değilse Hızlı Fourier Çevrimi (Fast Fourier Transform, FFT) kullanılarak frekans alanında tanımlı spektrumlara çevrilme esnasında oluşabilecek kayıpları azaltmak amacıyla pencerelebilir. Örneğin, rasgele uyarım ya da darbe uyarım yöntemleri kullanıldıysa pencereleme yapılması gereklidir ama patlamalı rasgele ya da basamaklı sinüs uyarım yöntemleri kullanıldıysa pencerelemeye gerek yoktur [Agilent Technologies, 2000]. Pencereleme adımından sonra FFT kullanılarak doğrusal ivme ve yük spektrumları elde edilir. Daha sonra bu spektrumların ortalamaları alınarak FYF ve uyumluluk fonksiyonları elde edilir. Hesaplama adımları detaylı olarak Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17: FYF ve Uyumluluk Fonksiyonu Elde Etme [Avitabile, 2003]

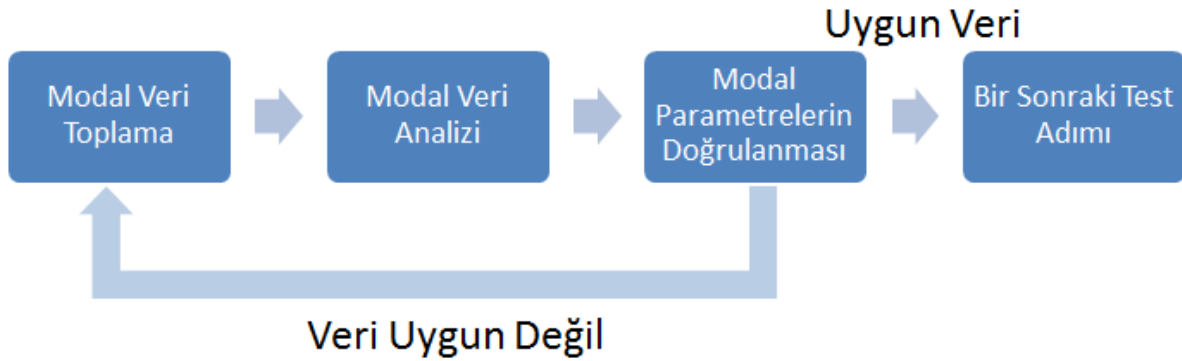
- **Eş Zamanlı Olarak Toplanan Verilerin Kontrolü:** Test öncesi aşamalarda doğru çalıştığı belirlenen sensör ve ekipmanlar test süresince çeşitli dış etkiler nedeniyle arızalanabilir. Frekans taraması esnasında ölçüm ve uyarım noktalarında zamana bağlı toplanan verilerin gözlenmesi gerekir. Zamana bağlı ölçümlerin yanında eğer veri toplama sistemi destekliyorsa eş zamanlı olarak sarsıcı noktalarındaki frekans yanıt fonksiyonları (FYF) ve uyumluluk (coherence) fonksiyonları da incelenmelidir. Örnek FYF ve uyumluluk grafikleri Şekil 18’de verilmiştir. Düzgün bir ölçüm için FYF grafiğinin zirve yaptığı noktalarda uyumluluk değerinin 1’e yakın olması gerekmektedir. Uyumluluk değerinin 1’den küçük olmasının nedenleri ölçümde gürültü olması, test uçağının doğrusal olmayışının etkileri veya zamana bağlı toplanan verilerin frekans alanında tanımlanırken oluşan hesaplama kayıplarıdır. Bu sorunun önüne geçmek için daha fazla sayıda ölçüm yapıp ortalaması alınan ölçüm sayısı artırılabilir.



Şekil 18: FYF ve Uyumluluk Grafikleri [Peeters, 2008]

- **FYF'ların Modal Analiz için Saklanması:** Yer titreşim testi süresince farklı test adımları için birçok kez veri toplama işlemi tekrarlanabileceği için toplanan verilerden elde edilen FYF'ların düzenli bir şekilde saklanması önemlidir. Toplanan verinin boyut olarak büyük olması ve eş zamanlı olarak başka birimlerle paylaşılması gerekliliği nedenleri de veri yönetiminin dikkatli yapılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, frekans tarama işlemi bazı test adımlarında oldukça fazla zaman alabildiğinden verilen düzgün saklanmamasından kaynaklı sorunlar zaten kısıtlı olan test süresine negatif yönde etki edebilir.

**Modal Veri Analizi:** Üzerinde çalışılan test adımı için modal veri toplama işlemi tamamlandıktan sonra modal parametrelerin ve mod şekillerinin elde edildiği modal veri analizi işlemine geçilir. Elde edilen modal parametrelerin ve mod şekillerinin uygunluğu doğrulandıktan sonra diğer test adımına geçilir. Eğer gerekli veri uygunluğu sağlanamazsa modal veri toplama işlemi üzerinde çalışılan test adımı için tekrarlanır. Gerekli veri uygunluğu elde edilene kadar Şekil 19'de verilen döngü devam eder.



Şekil 19: Yer Titreşim Testleri için Test Adımı Döngüsü

- **Toplanan FYF'larından Modal Parametrelerin ve Mod Şekillerinin Elde Edilmesi:** Doğal frekans, modal sönümlenme, modal kütle gibi modal parametreler ve mod şekilleri; toplanan FYF'larını kullanarak elde edilen modal analiz yazılımındaki eğri uydurma yöntemleri ile elde edilir. Bu yöntemlerinin temel amacı deneysel olarak elde edilen FYF'larına modal parametre ve mod şekillerinin bilgilerini içeren terimlerden oluşan eğriler uydurmaktır. Günümüzde birçok modal analiz yazılımında PolyMax, PolyTime, PolyTime+, PolyFreq gibi isimlerle zamana ve frekansa bağlı olarak çözümler bulan çoklu referans (polyreference) yöntemleri bu amaçla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle ilgili detaylı bilgi [Heylen, Lammens, Sas, 1997], [Maia, Silva, 1997], [Ewins, 2000] ve [Guillaume, 2003]'de bulunmaktadır.

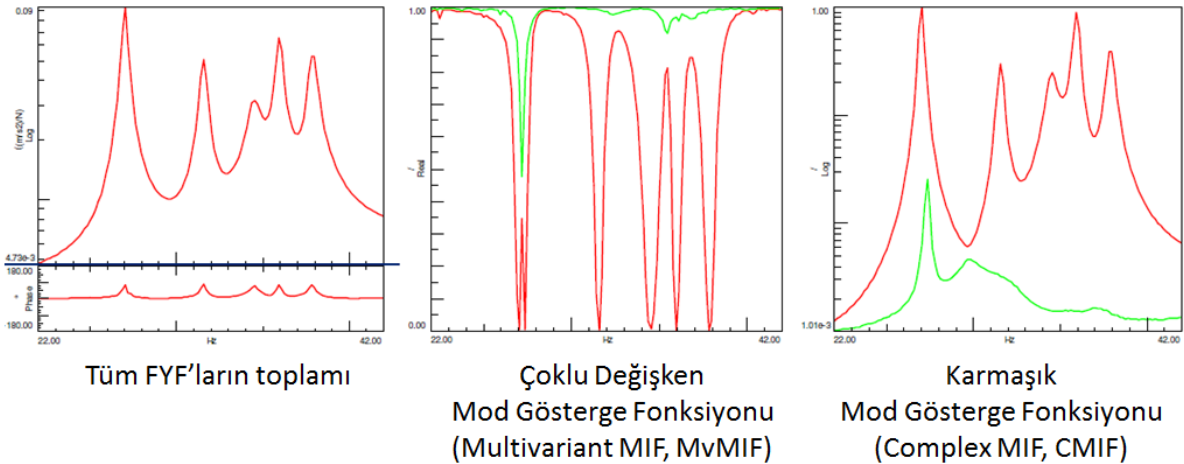
Modal parametrelerin elde edilmesi problemi üst belirlenmiş (overdetermined) bir problem olduğu için tek bir çözümü bulunmamaktadır. Bu nedenle farklı eğri uydurma yöntemleri farklı sonuçlar bulabilir. Bununla birlikte aynı eğri uydurma yöntemi kullanılsa dahi eğri uydurma yönteminin girdi olarak istediği bazı parametreler (beklenen mod sayısı, analiz edilmek istenen frekans aralığı, vb.) farklı seçildiğinde farklı çözümler elde edilebilir. Bu nedenle her test adımında farklı yöntemler ile elde edilen sonuçları karşılaştırmak daha faydalı olur. Yukarıda bahsedilen eğri uydurma yöntemlerinin hepsi temel olarak aşağıdaki adımlardan oluşur:

### i. Analiz Edilecek Frekans Aralığının Seçilmesi

Toplanan FYF'lerinin tanımlandığı frekans aralığı ile analiz edilecek frekans aralığı aynı olmak zorunda değildir. Toplanan FYF'lerinin uygunluğuna (veri kalitesine) göre analiz aralığı farklı seçilebilir veya özellikle bir frekans aralığının analizinin yapılması istenebilir.

### ii. Mod Gösterge Fonksiyonlarının Oluşturulması

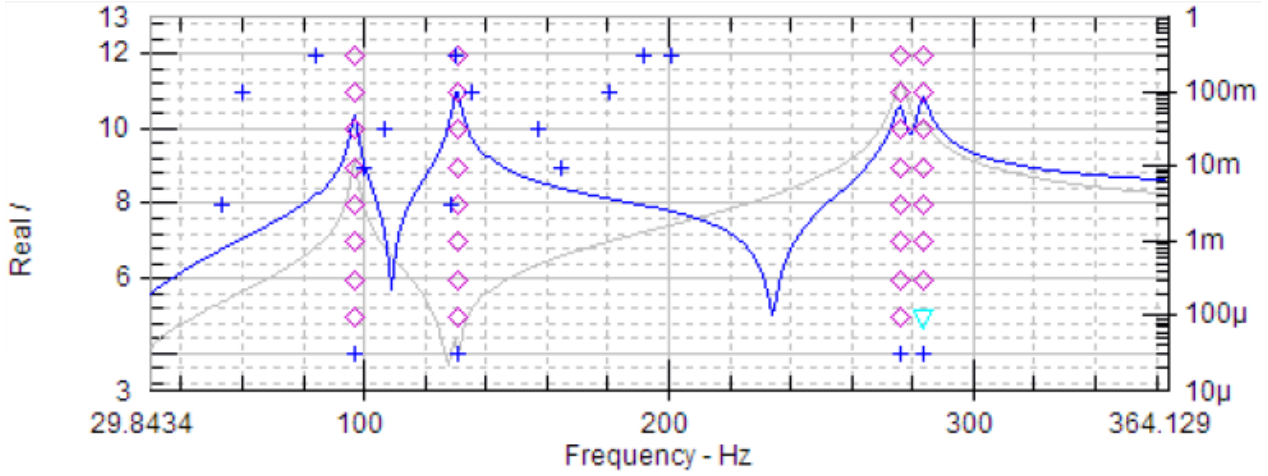
Eğri uydurma yöntemleri, toplanan FYF'lerine kaçınıcı dereceden bir eğri uyduracağını kullanacağı terim sayısı ile belirlemektedir. Bu terim sayısı da beklenen minimum mod sayısından büyük olmalıdır. Bu nedenle, bu yöntemlere girdi olarak minimum mod sayısı sağlanmalıdır. Sadece FYF'lerinden bir ya da birkaçındaki zirve noktalarını sayarak minimum mod sayısını belirlemek her zaman doğru sonuçlar vermeyebilir. Bu nedenle, tüm FYF'lerin hesaba katıldığı mod gösterge fonksiyonları (mode indicator function, MIF) oluşturulur. Farklı yöntemlerle elde edilen mod gösterge fonksiyonları Şekil 20'de verilmiştir. Bu yöntemler arasında çoklu değişken mod gösterge fonksiyonunun (multivariant mod indicator function, MvMIF) kullanımı daha yaygın ve kolaydır. Çoklu değişken mod gösterge fonksiyonu için fonksiyonun dip yaptığı noktalar beklenen minimum mod sayısını vermektedir.



Şekil 20: Mod Gösterge Fonksiyonları [Peeters, 2008]

### iii. Kararlılık Diyagramının Oluşturulması

Seçilen eğri uydurma yöntemi toplanan FYF ve minimum mod sayısı bilgilerini kullanarak modal parametreleri içeren birçok çözüm bulur. Bulunan çözümlerden daha önceden frekans, sönümlenme gibi parametrelere atanan kararlılık eşik değerlerine göre uygun olanlar X eksenine frekans değerleri olan kararlılık diyagramında gösterilir. Bu diyagramda çözümler sağladığı kararlılık kriterlerine göre farklı sembollerle gösterilir ve bu sembollerin tanımları kullanılan modal analiz yazılımına göre farklılık gösterebilir. Şekil 21'de örnek bir kararlılık diyagramı gösterilmektedir.



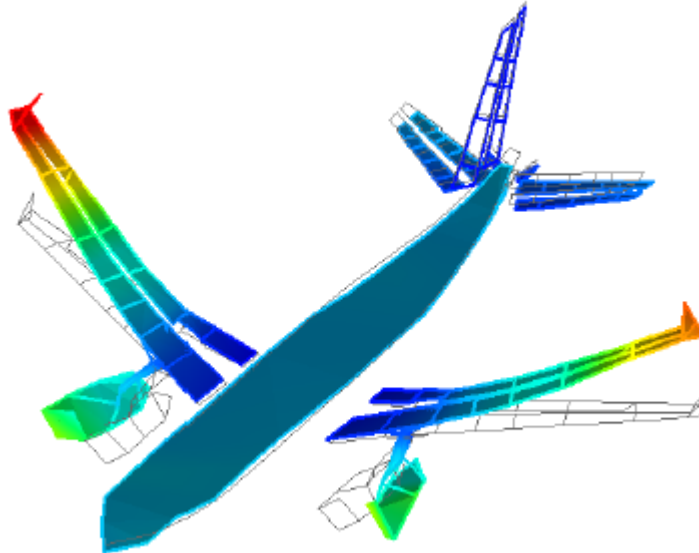
Şekil 21: Kararlılık Diyagramı [M+P International, 2013]

#### iv. Kararlılık Diyagramında Çözümlerin Seçilmesi

Günümüzde kullanılan modal analiz yazılımları analiz işlemini olabildiğince kullanıcı bağımsız hale getirmiş olsa da kararlılık diyagramında çözümlerin seçilmesi halen kullanıcı deneyim ve bilgisi gerektirmektedir. Seçim yapılırken kullanılan mod gösterge fonksiyonun dip yaptığı frekanslardaki, tüm kararlılık kriterlerini sağlamış çözümler arasından X eksenine yakın olanlar tercih edilmelidir. Toplanan FYF kalitesi düzgün olmadığında eğri uydurma yönetimi kararlılık kriterlerini sağlayan çözümler bulamayabilir. Bu durumda veri toplama işlemi yeniden yapılmalıdır. Kararlılık diyagramında çözümler seçildiğinde doğal frekans, modal sönümlenme değerleri ve modal katılım vektörleri belirlenmiş olur. Bir sonraki adımda titreşim mod şekilleri oluşturulur.

#### v. Mod Şekillerinin Oluşturulması

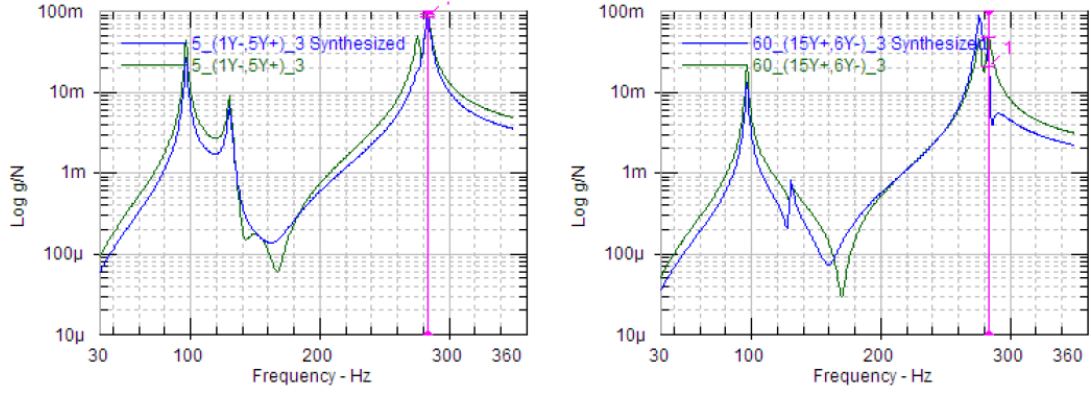
Modal frekans, sönümlenme ve katılım vektörleri seçilen çözümler için belirlendikten sonra en küçük kareler karmaşık üstel yöntem (LSCE) kullanılarak modal öz vektörleri ve modal kütle değerleri hesaplanır ve hareket ettirebilir mod şekilleri elde edilir. Şekil 22'de Airbus A310 için hesaplanan örnek bir mod şekli gösterilmiştir.



Şekil 22: Birincil Kanat Eğilmesi Mod Şekli [Peeters, 2008]

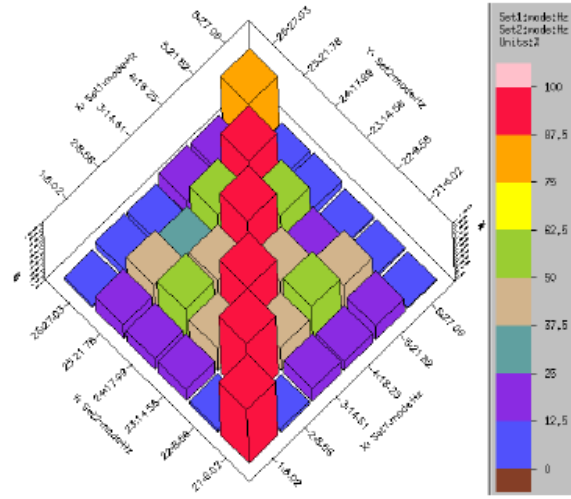
- **Modal Parametrelerin Doğrulanması:** Elde edilen modal parametrelerin doğrulanması için farklı yöntem ve kriterler kullanılmaktadır. İlk olarak elde edilen modal parametrelerle oluşturulan sentezlenmiş FYF'larıyla deneysel FYF'ları karşılaştırılır. Özellikle sarsıcı noktalarındaki sentezlenmiş FYF'larla deneysel FYF'lar arasındaki hata göz önünde

bulundurulmalıdır. Şekil 23'te sentezlenmiş FYF'larıyla deneysel FYF'larının karşılaştırıldığı örnek grafikler verilmiştir.



Şekil 23: Sentezlenmiş FYF ile Deneysel FYF'nun Karşılaştırılması [M+P International, 2013]

Doğrulama için kullanılan bir diğer yöntem de modal güvence kriteri (Modal Assurance Criteria, MAC) matrisinin oluşturulmasıdır. Modal güvence kriteri matrisinde iki farklı mod şekli vektörünün birbirine olan diklikleri incelenir. Bu matriste deneysel mod şekilleriyle sonlu elemanlar analiziyle elde edilen mod şekilleri karşılaştırılabileceği gibi farklı eğri uydurma yöntemleriyle elde edilen iki farklı mod şekli vektörü de karşılaştırılabilir. Şekil 24'te örnek bir modal güvence kriteri matrisi verilmiştir.



Şekil 24: Modal Güvence Kriteri Matrisi [Peeters, 2008]

Karşılaştırılan iki farklı mod şekli vektörü birbiriyle uyumlu ise modal güvence matrisinin diyagonal terimlerinin 1, diğer terimlerinin 0 olması gerekmektedir. Diyagonal terimlerden bazılarının 1 değerinden oldukça düşük değerler alması, o terimle kesişen modların birbirinden çok farklı olduğunun göstergesi olup elde edilen mod şekil vektörlerinin yeniden gözden geçirilmesi gerekliliğini göstermektedir. Bu iki yöntem dışında, elde edilen modal parametrelerin ve mod şekil vektörlerinin kalitesi ve doğruluğu hakkında bilgi veren çeşitli karşılaştırma değerleri bulunmaktadır. Bunlar ortalama faz sapması (mean phase deviation, MPD), modal faz bağlantımlığı (modal phase collinearity, MPC) ve mod gösterge fonksiyonudur (mode indicator function, MIF). Kıstaslar hakkında formülasyon ve detaylı bilgi [Heylen, Lammens, Sas, 1997]'da verilmiştir. Bu kıstaslar arasında mod gösterge fonksiyonu, elde edilen titreşim modunun doğruluğu ve kalitesi hakkında daha net bilgi vermesi nedeniyle dikkatle incelenmelidir.



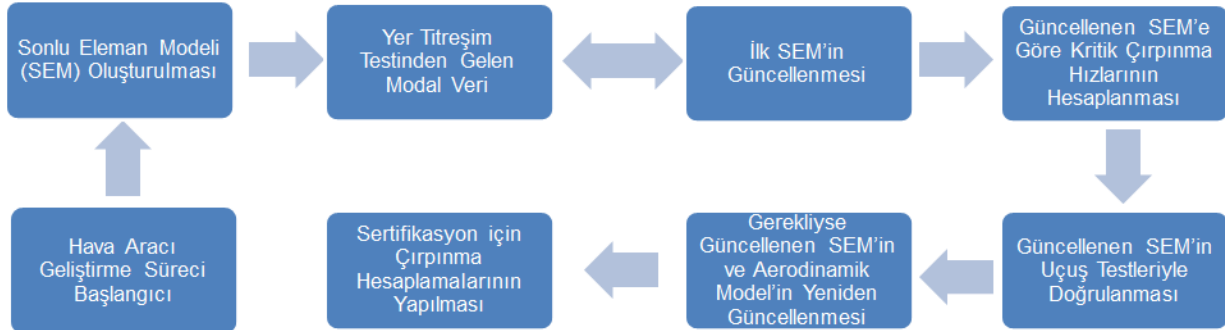
- **Doğrulan Modal Parametrelerin Raporlama için Saklanması:** FYF'lerinin saklanmasıyla ilgili maddede vurgulanan nedenlerden dolayı elde edilen modal parametrelerin saklanmasında da çok dikkatli ve düzenli olmak gerekmektedir.

**Raporlama:** Tüm test adımları için modal veri toplama ve veri analizi işlemleri başarıyla tamamlanıp elde edilen modal parametreler doğrulandıktan sonra raporlama adımına geçilebilir.

- **Test Sonuç Raporunun Yazılması:** Test sonuç raporu aşağıda belirtilen maddelerdeki bilgileri içermelidir:
  - i. Test hakkında genel bilgi
  - ii. Test edilen hava aracının konfigürasyonlarının tanımları
  - iii. Askılama sistemi, uyarım sistemi, sensör yerleşimleri, veri toplama sistemi ve örnek test icrası için fotoğraf, video ve şekiller
  - iv. Modal veri toplama için kullanılan yöntemler
  - v. Modal veri analizi için kullanılan yöntemler
  - vi. Gerekli formatlarda modal parametreler ve modal parametrelerin doğrulama sonuçları

### YER TİTREŞİM TESTLERİNİN ÖNEMİ

Yer titreşim testlerinden elde edilen test sonuçları, hava aracının çarpınma analizlerinde kullanılan analitik dinamik modelinin doğrulanmasında ve güncellenmesinde, uçuş çarpınma testlerinin planlanmasında ve uçuş test sonuçlarının yorumlanmasında kullanılmaktadır. Şekil 25'te hava araçları için örnek bir aeroelastik doğrulama süreci verilmiştir.



Şekil 25: Hava Aracı Aeroelastik Doğrulama Süreci [Böswald, Füllekrug, Göge, Lubrina, 2007]

Yeni geliştirilen hava aracı projeleri için sertifikasyon sürecinde yer titreşim testleri önemli bir yer sahibidir. Örneğin, akrobatik hava araçları için, hava aracının ana yapısal bileşenlerinin doğal frekanslarının belirlenmesi gereksiniminin karşılanmasında yer titreşim test sonuçları kullanılabilir [CS-23, 2012]. Ayrıca, hava aracı modifikasyon projelerinde de yapılan modifikasyonun hava aracı yapısına etkileri göz önünde bulundurularak sertifikasyonu için yer titreşim testi gereksinimi ortaya çıkabilir. Örneğin, hava aracına yeni bir mühimmat eklenmesi harici yük sertifikasyonu kapsamında yer titreşim testini gerektirebilir [MIL-HDBK-1763, 2005].

### SONUÇ

Bu çalışmada, yer titreşim testlerinin hava aracı geliştirme projelerindeki süreç ve önemi incelenmiştir. Çalışma bünyesinde, yer titreşim testlerinin hazırlık aşamasından test sonuçlarının raporlanmasına kadar geçen süreç detaylandırılmış ve elde edilen test sonuçlarının geliştirme projesine sağladığı girdilerin önemi belirtilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler TUSAŞ tarafından gerçekleştirilmiş yer titreşim testlerinden kazanılan deneyimlerle birleştirilip ileride yapılması planlanan yer titreşim testlerinde kullanılacaktır.

**Kaynaklar**

- Agilent Technologies., 2000. *The Fundamentals of Modal Testing.*, Application Note 243-3, ABD.
- Avitabile, P., 2003. *Basics of Modal Analysis*, IMAC XXI Int. Modal Analysis Conf . Young Engineer Program.
- Böswald, M., Füllekrug, U., Göge, D. ve Lubrina, P., 2000. *Ground Vibration Testing of Large Aircraft – State of the Art and Future Perspectives.*, IMAC 25 Int. Modal Analysis Conf., Orlando, FL.
- CS-23, 2012. *Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes.* European Aviation Safety Agency.
- Ewins, D. J., 2000. *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire (UK).
- Giacomin, A. A., Moreira, C. A. R., 2005. *Development of Soft Suspension System for Aircraft GVT.*, IMAC XXIII Int. Modal Analysis Conf., ABD.
- Guillaume, P., ve diğer., 2003. *A Polyreference Implementation of the Least-Squares Complex Frequency Domain Estimator.*, IMAC XXI Int. Modal Analysis Conf.
- Heylen, W., Lammens, S., Sas, P., 1997. *Modal Analysis Theory and Testing*, Leuven.
- Maia, M., Silva, J., 1997. *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, John Wiley & Sons, New York.
- MIL-HDBK-1763, 1992. *Aircraft/Stores Compatibility: Systems Engineering Data Requirements and Test Procedures*, Department of Defense Handbook, ABD.
- M+P International, 2013. *m+p SO Analyzer Operating Manual*, Revision 4.3, Hannover, Almanya.
- Peeters, B., 2008. *Introduction to Ground Vibration Testing.*, LMS GVT Master Class., Belçika.
- Peeters, B., ve diğer., 2008. *Modern Solution for Ground Vibration Testing of Large Aircraft*, IMAC XXVI Int. Modal Analysis Conf., Orlando, FL.