

KARMAŞIK AERODİNAMİK KAVRAMIN UÇUŞ TESTİ: VİRİL TESTLERİ

Serhan YÜKSEL¹ ve Hüseyin Erman ÖZER²
TUSAŞ, Ankara

Murat KELEŞ³
TUSAŞ, Ankara

ÖZET

Viril, sabit kanatlı bir hava aracının kanatlarının asimetrik olarak perdövite girmesi sonrası oluşan otorotasyon durumudur. Virile istemli olarak eğitim amacıyla ya da istemsiz olarak pilot hatasıyla girilebilir. Part-23 Normal kategorisindeki uçakların sertifikasyon sürecinde uçağın 1 tur ya da 3 saniye süren bir virilden kurtarılabilir olduğunun gösterilmesi istenmektedir. Akrobasi kategorisindeki uçakların ise 6 tura kadar viril gösteriminin yapılması ve kurtarılabilir olduğunun gösterilmesi istenmektedir. Geliştirme aşamasındaki bir uçağın viril testleri tüm uçuş testleri arasında en riskli testlerden biri sayılmaktadır. Özellikle uçuşa çıkmadan bilgisayar ya da rüzgar tüneli ortamlarında yapılan tahminler viril karakteristiği hakkında bilgi vermekle birlikte bu kompleks aerodinamik fenomen uçuşta test edildiğinde pek çok bilinmeyenle karşılaşma riski bulunmaktadır. Bu nedenle viril testleri hem tasarıma yön vermesi sebebiyle önemli, hem de uçuş emniyet riskleri barındırması sebebiyle kritiktir.

GİRİŞ

Viril testleri karmaşık aerodinamik karakteri, yerde tahminin zor ve maliyetli olması, bilinmezlik içermesi ve test sonuçlarının tasarıma yön vermesi nedeniyle geliştirme uçuş testlerinin en önemli aşamalarından biridir. Part-23 kategorisinde mecburi sertifikasyon uçuş testleri arasında yer almaktadır.

Bu testlerin emniyetli bir biçimde icra edilebilmesi için öncelikle virilin ne olduğunun iyi anlaşılması, sertifikasyon gereksinimlerinin iyi bilinmesi, her bir testin iyi tasarlanması, test matrisinin tam ve optimize edilmiş olması ve uçuş test emniyetinin en iyi şekilde sağlanmış olması gerekmektedir.

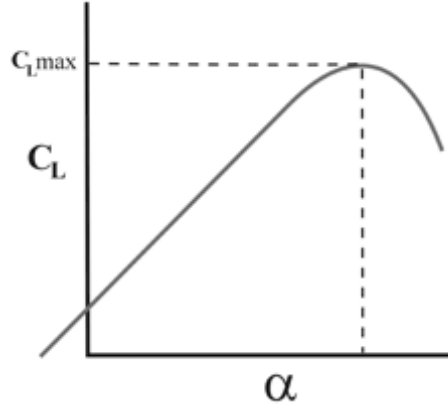
VİRİL NEDİR?

Virili anlamak için önce perdövitesin anlaşılması gerekmektedir. Kanatlarda oluşan kaldırma kuvveti uçak kanat alanına, uçağın süratine, hava yoğunluğuna ve kaldırma katsayısına (C_L) bağlıdır. Kaldırma katsayısı ise hücum açısıyla (α) değişmektedir. Kaldırma katsayısının hücum açısıyla nasıl değiştiği Şekil 1'de verilmiştir.

¹Uçuş Test Mühendisi, Uçuş Başkanlığı, E-posta: seryuksel@tai.com.tr

²Uçuş Test Mühendisi, Uçuş Başkanlığı, E-posta: eozer@tai.com.tr

³Test Pilotu, Uçuş Başkanlığı, E-posta: murat.keles@tai.com.tr



Şekil 1: Örnek $C_L - \alpha$ grafiği

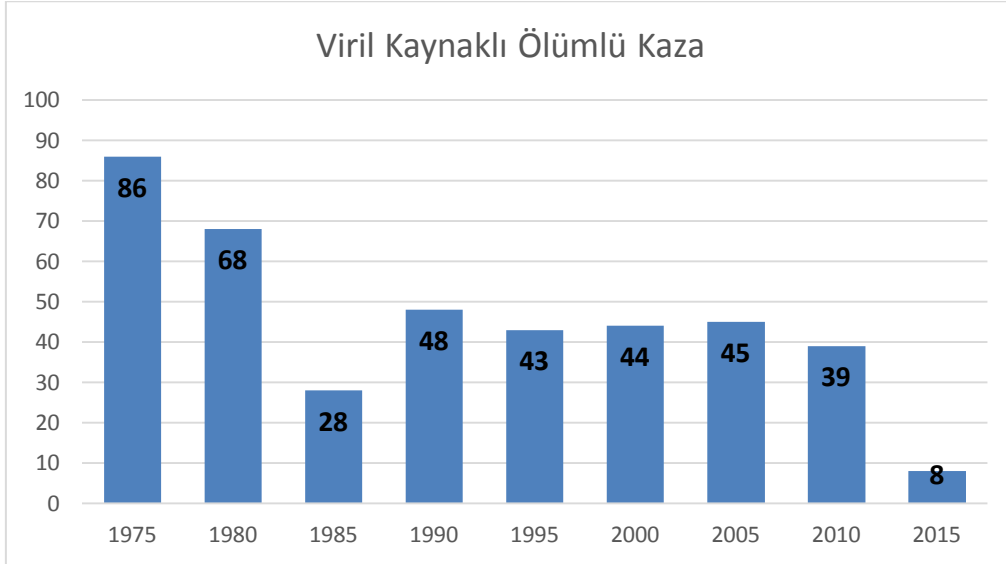
Hücum açısı arttıkça kaldırma katsayısı artmakta ancak maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaktadır. Perdövites, uçak kanatlarındaki hücum açısının maksimum kaldırma kuvveti elde edilen noktanın ötesine geçtiği anda meydana gelir. Başka bir deyişle hücum açısı arttıkça kaldırma kuvveti artar ve maksimum noktaya ulaşır. Maksimum noktada hücum açısı artmaya devam ederse bu kez kaldırma kuvveti azalır ve perdövites meydana gelir.

Viril, sağ ve sol kanatların farklı zamanlarda perdöviteye girmeleriyle olur. Bir kanat diğerinden önce perdövites olduğunda oluşan asimetrik kuvvet dağılımı nedeniyle uçak bir yöne dönmeye başlar. Virilden kurtuluncaya kadar asimetrik kuvvetler devam eder ve uçak 3 ekseninde de dönerek irtifa kaybeder. Standart bir viril, kontrol kaybı (departure) ile başlar, perdövites sonrası dönüş (post stall gyration) ile devam eder, dengeye ulaşma evresi (incipient phase) sonrası olgunlaşmış viril (developed spin) fazına geçer [Kimberlin, Ralph D., 2003]. olgunlaşmış viril fazında uygun kurtarma kumandaları verilmezse virilin devam etmesi beklenir.

VİRİLİN ÖNEMİ

Özellikle eğitim uçaklarında, tecrübesiz pilotun vereceği hatalı kumandalar sonucunda uçağın virile girmesi durumunda uçağın virilden kurtarılabilirliği önem arz etmektedir. Anormal durum eğitimlerinde pilotlara virile giriş ve virilden çıkış teknikleri gösterilmektedir. Bu sayede istenmeden verilen hatalı kumandalarla uçağın virile sokulması durumunda can ya da mal kaybı yaşanmadan uçağın anormal durumdan kurtarılması beklenmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri'nin Ulusal Taşımacılık Emniyet Kurulu (NTSB - National Transportation Safety Board) verilerine göre 1975 – 2015 yılları arasında ABD'de meydana gelen uçak olaylarının 2410'u viril kaynaklıdır. Bu 2410 olayın 1780'i ölümlü sonuçlanmıştır. Yine NTSB'nin yıllara göre kaza raporları incelendiğinde Şekil 1'de görüldüğü gibi son 10 yılda azalma eğilimi göstermekle birlikte viril kaynaklı kazaların hala önemini koruduğu görülmektedir [ntsb.gov, 2016]. Bunun en büyük nedeni bu uçakların virile sertifikasyon olmamaları ve/veya pilotların viril eğitimi almamış olmalarıdır. Viril kaynaklı ölümlü kazaların en aza indirilmesi için uçakların viril karakteristikleri incelenmeli ve pilotlara anormal durumdan kurtulma eğitimleri verilmelidir.



Şekil 2: Yıllara göre viril kaynaklı ölümlü kazaların sayısı [ntsb.gov, 2016]

SERTİFİKASYONDA VIRİLİN YERİ

Yeni tasarlanan uçakların viril karakteristiklerinin bilgisayar ortamında belirlenmesi güvenilir sonuçlar vermemektedir. Rüzgâr tüneli gerçeğe daha yakın sonuç üretmesine rağmen, gerçek uçuş şartları tam olarak benzetilememektedir. Bu nedenle sertifikasyon testlerinde viril gösteriminin uçuş testiyle yapılması önem arz etmektedir. Hem Amerika Birleşik Devletleri'ne ait FAR (Federal Aviation Regulations) standardında hem de Avrupa Havacılık Emniyet Kurulu'na ait CS (Certification Standards) dokümanında Part-23 sınıfında eğitim, taşımacılık ve akrobasi uçaklarında uçağın virile girebildiği ve virilden çıkabildiğinin gösterilmesi istenmektedir. Eğitim ve taşımacılık kategorisinde uçağın 1 tur ya da 3 saniye süren (hangisi daha uzunsa) bir spinden çıkabilmesi beklenmektedir. Akrobasi kategorisinde ise 6 tura kadar viril gösteriminin yapılması gerekmektedir. Gösterimler yapıldıktan sonra eğer bu sınıflarda viril sertifikasyonu isteniyorsa virile giriş ve çıkış kumandalarının net bir şekilde tanımlanması beklenmektedir.

Viril sertifikasyonu yapılması istenmiyorsa da uçağın virile girmediğinin gösterilmesi gerekmektedir. Uçağın virile girmesini engellemek için perdöviteye girişi engelleyen lövyeye itici (stick pusher) gibi sistemler uçağa entegre edilebilir.

AKROBASİ KATEGORİSİNDE VIRİL UÇUŞ TESTLERİ

Uçuş testleri planlanırken, öncelikle testlerin icra edileceği test noktalarına ait irtifa, sürat, ağırlık gibi test koşulları belirlenerek test matrisinin oluşturulması gerekmektedir. Akrobasi kategorisinde viril uçuş testleri de planlanırken testlerin icra edileceği koşullar belirlenmeli, her bir sortide neler yapılacağı uygun bir şekilde tasarlanmalı, test emniyetini artırıcı önlemler alınmalıdır. Testler sonrasında değerlendirilmesi gereken parametreler seçilmelidir.

Test Matrisinin Oluşturulması:

Uçağın viril karakteristiğini belirleyen pek çok parametre vardır. Test matrisi bunların her birinin tek tek etkisi görülecek şekilde tasarlanmalıdır. Ağırlık, boylamsal ağırlık merkezi, yanal ağırlık merkezi, itki, flap pozisyonu, iniş takımı pozisyonu, yatış açısı, viril yönü gibi pek çok değişken uçağın viril karakteristiğini etkileyebilir. CS 23 dokümanının 221 numaralı paragrafı virile ayrılmıştır. Bu paragrafta uyum gösterimi için hangi testlerin yapılması gerektiği yine aynı dokümanın ikinci bölümünde verilmektedir (Bkz. Şekil 2). Bu matrise göre uçağın farklı ağırlık merkezi koşullarında, farklı ağırlık koşullarında, gazlı/gazsız, iniş takımı aşağıda/yukarıda, farklı flap koşullarında, (varsa) cowl flap ile testlerin yapılması ve sağdan/soldan tekrar edilmesi gerekmektedir. Normal giriş/çıkış ve spin esnasında normal kumandanın yanı sıra anormal koşullar da tarif edilmiş ve bunlarında emniyetli olduğunun gösterilmesi istenmiştir.

Flight Condition Spins from Wing Level Altitude	Slow Elevator Release	Lateral C.G.	Aft C.G.	Forward C.G.	Power On	Power Off	Cowl Flaps As Required	Cowl Flaps Closed	Gear Down	Gear Up	Flaps Landing	Flaps Appch. (As Approp.)	Flaps Up	Spin Number
Test with Normal Spin Controls Left Spin 1 Thru 6	1	X						X		X			X	1
	2		X			X			X			X		2
	3		X						X				X	3
	4		X				X							4
	5		X						X			X		5
	6		X						X		X			6
Repeat 1 Through 6 from a right spin.														
Repeat 1 Through 6 from left and right turning flight														
Tests with Abnormal Spin Controls Left Spin Alleron Against 7 Thru 12	7		X			X		X		X				7
	8			X			X		X			X		8
	9							X						9
	10								X		X		X	10
	11									X				11
	12										X			12
Repeat 7 Thru 12 From a Right Spin														
Left Spin Alleron with 12 Thru 18	13		X			X		X		X		X		13
	14			X			X		X					14
	15						X				X			15
	16			X				X				X		16
	17								X	X				17
	18							X			X			18
Repeat 12 Through 18 From a Right Spin Repeat 17 Through 18 From Left & Right Turning Flight														

Şekil 3: Spin Test Matrisi [Certification Specifications, 2012]

Testlerin Tasarlanması:

Bir önceki paragrafta bahsedildiği üzere test matrisi oluşturulduktan sonra test noktalarının test sortilerine dağıtılması gerekmektedir. Bu aşamada eğer havada ağırlık / ağırlık merkezi değiştirilemiyorsa aynı ağırlıkta ve aynı ağırlık merkezindeki test noktalarının aynı sortiye konulmaları gerekmektedir. Her bir testin başlayacağı irtifa, her virilde kaybedilecek irtifa ve yeniden tırmanış süresi, alınabilecek maksimum yakıt, virillerin pilot üzerindeki yorucu etkileri dikkate alınarak bir testte yapılacak maksimum test noktası sayısı kestirilmeye çalışılmalıdır.

Eğer rüzgar tüneli sonuçları varsa uçağın viril modları önceden kabaca tahmin edilebiliyor demektir. Önceden saptanmış konfigürasyonlarda uçağın viril modunun olmadığı tespit edilmişse de bu modların gerçekten olmadığı uçuş testinde görülmelidir.

Virilin kararlılığı arttıkça virile giriş ve girilen virilden çıkış zorlaşır. Test risklerini en aza indirmek için testlere daha az kararlı olan düşük hücum açılı viriller (dik viriller) ile başlanmalıdır. Literatürde net bir ayırım olamamakla birlikte 50 derece hücum açısı altındaki viriller dik viril olarak tanımlanabilir. Genel bir kural olarak ön ağırlık merkezinde yapılan viriller geri ağırlık merkezine göre daha diktir.

İtkinin varlığı özellikle pervaneli uçaklarda jirokobik etki ve asimetric hava akışı nedeniyle yük dağılımını daha da karmaşık hale getirdiği için ilk testlerin rölantide ya da mümkünse sıfır itkiyle yapılması tercih edilebilir. Daha sonra itkinin etkisinin görülebilmesi için virile girişler daha yüksek itki seviyelerinde gerçekleştirilir. Pilot adaylarının ya da tecrübesiz pilotların olası bir viril durumunda hatalı kumanda vereceği senaryolar arasında hatalı gaz kolu manipölasyonu da bulunmaktadır. Bu kapsamda virilin içindeyken motor gücünün artırılması da yapılabilecek testler arasındadır.

Uçağın harici konfigürasyonunun viril karakteristiğine etkisi de araştırılmalıdır. Öncelikli olarak aerodinamik açıdan mümkün olan en temiz konfigürasyon test edilmelidir. Diğer bir deyişle iniş takımı, hücum/firar kenarı flap yüzeyleri, slat, hava freni, harici yakıt tankları gibi aerodinamik sürüklenme kuvveti oluşturacak ve uçağın etrafındaki hava akışını ve basınç dağılımını değiştirecek her şey kapalı, toplanmış ya da uçaktan alınmış olmalıdır. Temiz konfigürasyon testleri tamamlanıp uçağın karakteristiği çözüldükten sonra diğer konfigürasyonlar da tek tek ve beraberce test edilerek virile etkileri tespit edilmelidir.

Yanal ağırlık merkezi değişiklikleri de viril karakteristiklerini değiştirebilir. Bu testlerin planlanması sırasında uçağın operasyonel olarak olası ve izin verilen en yüksek dengesizlik durumu dikkate alınmalıdır. Örneğin harici yük taşımayan bir uçağın yanal dengesizlik kaynağı kanatlar arasındaki yakıt farkı olabilir. Uçak el kitabına göre izin verilen en yüksek yakıt farkı durumu oluşturulup virile etkileri görülmelidir.

Virile giriş şekli de incelenmesi gereken bir diğer faktördür. Standart yöntem yatış açısı olmadan perdöviteye girip ardından pedal (direksiyon) kumandası ile istenen tarafa virile girmektir. Dönüş sırasında hatalı kumanda ve süratin takip edilememesi nedeniyle virile girme durumunun test edilmesi için 30 derece sağa ya da sola yatış yapıp perdöviteye girilmesi ve ardından sağa ya da sola pedal kumandasıyla virile girişin incelenmesi gerekmektedir.

Kanatçık kumandasının viril karakteristiğine etkileri bir diğer önemli husustur. Virile girdikten sonra kanatçığın nötr tutulması, dönüş yönüne ya da dönüş yönünün tersine açılması ve bu durumların doğurduğu sonuçlar görülmelidir.

Tüm bu test noktaları basitten karmaşığa ya da başka bir deyişle sonuçları en tahmin edilebilir olanından en az tahmin edilebilir olanına doğru sıralanmalıdır.

Uçuş Test Emniyeti:

Viril testleri bilinmeyenleri içerdiği için test kampanyalarının en riskli testleri arasındadır. Bu testlerde uçakta en az sayıda uçuş ekibi hazır bulunmalıdır. Testler meskûn mahal üzerinde yapılmamalıdır. Mümkünse testler için özel olarak belirlenmiş ve hava trafiğine de kapalı olan bir bölgede gerçekleştirilmelidir. Teste çıkmadan önce ilgili tüm birimler testin riskine ilişkin bilgilendirilmeli ve arama kurtarma ekipleri bölgeye müdahale edebilecek şekilde hazır olmalıdır.

Testlerin emniyetini arttırmak için yerde yapılabilecek tüm çalışmalar yapılmalıdır. Uçağın detaylı CFD analizi, perdövites sonrası ve yüksek hücum açısı eğilimleri, rüzgâr tüneli çalışmaları tamamlanmalıdır. Bu çalışmalara göre uçağın olası viril modları saptanmalı ve emniyetli görülen konfigürasyonda virillere başlanmalıdır. Genel eğilim ön ağırlık merkezinde ve hafif ağırlıkta viril testlerine başlamaktır. Ancak her uçakta hafif ağırlık ve ön ağırlık merkezi aynı anda sağlanamayabilir. Böyle bir durumda kritiklik seviyesine göre konfigürasyon belirlenmelidir.

Viril öncesi perdövites testleri tamamlanmalı, uçağın perdövites karakteristiğine ilişkin bilinmeyen kalmamalıdır. Kararlılık ve kontrol testleri sonuçları pozitif olmalı, uçağın normal ağırlık ve denge zarfında kontrol edilebilirlik problemi bulunmamalıdır. Virile giriş ve çıkış sırasında kontrol yüzeylerinde yüksek kuvvetler görölme ihtimaline karşın ilgili uçuş kontrol sistemi elemanları uçuştan önce detaylı bir şekilde muayene edilmelidir.

Meteorolojik şartlar teste elverişli olmalıdır. Tüm test boyunca pilot yerle pozitif temasa sahip olmalı ve testin sağlıklı yapılmasını etkileyecek türbülans, yağış veya düşük görüş şartları olmamalıdır.

Takip uçağı testlerin hemen öncesinde meteorolojik şartların değerlendirilmesi için kullanılabilir. Ayrıca test esnasında yapısal hasar, uçaktan kopan bir parça, akan bir sıvı ya da benzeri anormal bir durum olmadığını görsel olarak takip edebilir.

Eğer uçakta uçuş test enstrümantasyonu varsa pilotun görebileceği bir noktaya bir ekran konarak önemli parametrelerin pilot tarafından da takip edilmesi sağlanabilir. Yine uçuş test enstrümantasyonuna entegre edilmiş bir telemetri sisteminin varlığı ve önemli parametrelerin yerden gerçek zamanlı olarak takip edilmesi uçuş test emniyetini artırıcı faktörlerdir.

Havada uçağın virilden kurtulamama senaryosu iyi değerlendirilmelidir. Mümkünse virilden çıkışı kolaylaştıracak viril paraşütü, roket sistemi gibi emniyet ekipmanları kullanılmalıdır. Uçuş test emniyetine ilişkin literatür iyi taranmalı, NASA'nın "Flight Test Safety Database" kütüphanesindeki güncel riskler değerlendirilmelidir [NASA, 2016]. Uçuş öncesi briefingler kapsamlı yapılmalı ve acil durum senaryoları önceden belirlenmiş ve uçuş test ekibi tarafından iyi anlaşılmış olmalıdır.

Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

Toplanması gereken parametreler bunlarla sınırlı olmamak üzere aşağıda verilmiştir:

- Yalpalama / yunuslama / yatış oranı
- Dümen / yatay kuyruk / kanatçık kumandaları
- Yunuslama açısı, yatış açısı, yalpalama açısı
- Hücüm açısı, kayış açısı
- Manyetik baş
- Pedal kuvveti, lövyeye kuvvetleri
- Boylamsal / yanal / yönel ivme
- İrtifa
- Hava hızı

Mümkün olan durumlarda yukarıda verilen parametreler gerçek zamanlı olarak takip edilmeli ve virilin durumuyla ilgili anlık bilgi edinilmelidir. Önceden belirlenmiş olan limitlere ulaşıldığı durumda test kesilmelidir.

Test sonrasında toplanan parametrelerden virilin karakteristiğine ilişkin aşağıdaki bilgiler edinilebilir:

- Virile giriş kaç tur sürüyor?
- Viril dik mi, düz mü?
- Virilde hücum açısı nasıl değişiyor? Sabit mi kalıyor dalgalanıyor mu?
- Virilde yalpalama oranı nasıl değişiyor? Giderek artan bir eğilimi mi var yoksa belli bir noktada sabit mi kalıyor?
- Tur başına irtifa kaybı ne kadar? Toplam irtifa kaybı ne kadar?
- Viril sırasındaki titreşim ve salınımlar pilotu rahatsız edecek seviyeye çıkıyor mu? (Pilot yorumu alınır)
- Bu salınımları kanatçık kumandaları nasıl etkiliyor? Dönüş yönüne / tersine verilen kanatçık kumandalarının yalpalama oranına ve titreşime etkisi nedir?
- Pedal ve lövyeye kuvvetleri nasıl değişiyor? Giderek artıyor mu, sabit mi kalıyor, salınım mı yapıyor?
- Virilden çıkış için pilot çıkış kumandası vermek zorunda kalıyor mu yoksa eller / pedallar serbest bırakıldığında uçak kendisi virilden çıkıyor mu?
- Çıkış kumandası verildikten sonra virilden çıkış kaç tur sürüyor? Bu sırada ne kadar irtifa kaybı oluyor?
- Viril çıkışında en yüksek sürat aşımı ya da en yüksek boylamsal ivme aşımı riski bulunuyor mu?
- Viril pilot için ne kadar yorucu bir manevra? (Pilot yorumu alınır)
- Viril niyetiyle başlayan manevranın spirale dönme eğilimi var mıdır?

Test verileri incelenip ilgili değerlendirmeler yapıldıktan ve bu sorular cevaplandıktan sonra uçağın viril karakteristiği net bir şekilde tanımlanır. Eğer uçağın viril sertifikasyonu olması isteniyorsa virile giriş ve çıkış teknikleri pilot el kitabına girer ve son kullanıcı için hazır hale getirilir.

SONUÇ

Perdövites sırasında verilen hatalı kumandalar sonucu oluşabilecek anormal durumlardan biri virildir. Sertifikasyon kuralları gereği Part-23 kategorisindeki uçakların virile girdiğinde kurtarılabilir olması beklenmektedir. Geliştirme uçuş testlerinde sertifikasyon gereksinimleri doğrultusunda viril testi yapılması gerekiyorsa bu testler öncesi hazırlıklar iyi yapılmalıdır. Analizler ya da rüzgar tüneli sonuçları uçuş testleri ile doğrulanmalı ve uçağın viril karakteristiği belirlenmelidir. Bu testler bünyesinde barındırdığı kompleks yapı ve bilinmezlik nedeniyle iyi

tasarlanmalı, emniyet tedbirleri alınmalıdır. Sonuçların değerlendirilmesi sırasında uçağın 3 eksenindeki ölçülebilen karakteristiği test pilotunun yorumlarıyla harmanlanmalı, virile giriş – çıkış teknikleri belirlenmelidir. Son kullanıcıya yönelik uçak el kitabında viril karakteristiği tanımlanmalı, uçağa ait onaylanmış ya da onaylanmayan viril zarfı belirlenmelidir.

Kaynaklar

Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes (2012, July). <http://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/agency-measures-docs-certification-specifications-CS-23-CS-23-Amdt-3.pdf> adresinden alınmıştır.

NASA Flight Test Safety Database. <https://ftsdb.grc.nasa.gov/TestHazardAnalysis/Search> adresinden alınmıştır.

NTSB, 2016. http://www.nts.gov/investigations/data/Pages/Data_Stats.aspx adresinden alınmıştır.

Kimberlin, Ralph D., 2003. *Flight Testing of Fixed-Wing Aircraft*, AIAA, s.383-415