

MONTAJ SORUNLARI

Mounting Troubles*

Lee S. Langston**

İlk jumbo jet bir mühendislik harikasıydı. Ancak uçakları havada tutmak, zekice planlanmış bazı tasarım işleriyle mümkün olmuştu.



Motor bölmesi içindeki bir Pratt & Whitney Aircraft JT9D jet motorunun No. 1 Boeing 747'nin sol kanat pilonu üzerine monte edilmesi, 4 Eylül 1968.

İkon haline gelen bir ürün -öyle iyi bir şekilde tasarlanmış ve öylesine ticari başarı sağlamış bir ürün ki sınıfındaki her şeyin kendisiyle kıyaslandığı bir standart haline gelmiş- tasarlamak her mühendisin rüyasıdır. Örneğin küçük ve pahalı olmayan otomobiller Volkswagen Beetle ile; her akıllı telefon, iPhone'un

biçim ve özellikleriyle kıyaslanmaktadır.

Belki de en büyük çapta toplu üretimi yapılmış olan ikon, ilk gerçek jumbo jet olan Boeing 747'dir. İlk uçuşunu 9 Şubat 1969'da yapmış olan "Numara 1" uçağından bu yana 747, geliştirilmiş en başarılı geniş gövdeli yolcu uçağı olma

sıfatına sahiptir. Kargo ve yolcu uçağı formundaki çeşitli modelleri 40 yıl sonrasında, şu an hâlâ, üretilmektedir. Washington, Everett'deki Boeing 747 tesisinde 1.400 adet uçağın montajı yapılmakta ve sonrasında uçurulmaktadır.

Buna rağmen, mühendisler bu modern başyapıtı 1960'larda üretirken bazı aşılması güç problemlerle karşılaşmışlardır. Aslında ilk uçuştan sonraki altı aydan kısa süre içerisinde uçak, Boeing ve onun East Hartford, Connecticut'daki jet motor üreticisi olan Pratt & Whitney Aircraft için ızdırıp kaynağı olmuştur. Eylül 1969 tarihli Times dergisi bu durumu şu şekilde rapor etmiştir:

"Boeing'in Washington, Everett'deki tesisinin dışındaki apronda bekleyen 15 muazzam 747 jeti, havacılıkta yeni bir dönemin müjdeleyicisi olarak sessiz ve heybetli bir şekilde durmaktaydı. Birçok uluslararası havayolu şirketinin renkleriyle boyanmışlardı: TWA, Pan Am, Lufthansa, Air France. Şimdilik bu uçaklar dünyanın en büyük planörleri konumundadırlar; çünkü motorları yoktur. Pan Am Kasım ayının sonunda her biri 362 yolcu kapasitesine sahip ilk

* Mechanical Engineering (The Magazine of ASME) dergisinin Mart 2011 sayısında yayımlanan bu yazı Yeliz Demir tarafından dilimize çevrilmiştir. Yazının orijinaline http://memagazine.asme.org/Articles/2011/March/Mounting_Troubles.cfm bağlantısından ulaşılabilir.

** Bir ASME dostu olan Lee S. Langston, Storrs'daki Connecticut Üniversitesi'nde emeritus profesör olarak görev yapmaktadır. ASME'nin Uluslararası Gaz Türbini Enstitüsü'nün üyesi ve eski başkanıdır.

üç adet ticari devini satın almak üzere plan yapmıştır. Geçen hafta mahcup durumdaki Boeing yetkilileri Pratt & Whitney JT9D motorlarındaki performans güçlükleri nedeniyle teslimatı en fazla sekiz hafta kadar geciktireceklerini bildirmişlerdir.”

Hem Boeing hem de Pratt & Whitney temelde net sermayelerini ilk ticari jumbo jet olan 747'ye yatırmışlardı. Everett pistinde motorsuz olarak bekletilen 15 adet dört motorlu 747 jeti 360 milyon doların kaybı anlamına gelmekteydi. Bu rakam 2010 doları ile 2 milyar doların üzerinde bir değerdir.

Bu uçakları uçacak duruma getirmek hem mühendislik açısından hem de ticari açıdan zorunluuydu.

Her sırada 10 koltuğun bulunduğu çift koridorlu geniş gövdeli bir uçak olan jumbo jet, 1960'larda yolcu uçağının gelişim sürecinde atılabilecek mantıklı bir sonraki adımdı. Boeing'in yanı sıra Douglas Aircraft DC-10'u üretmekte, Lockheed ise daha sonra L-1011 TriStar halini alacak uçak üzerinde çalışmaktaydı. Ancak böylesine büyük bir uçağın mühendisliği zordu ve motor üreticilerini sıkıntıya sokmuştu.

Örneğin Rolls-Royce, üç motorlu Lockheed L-1011 için RB211'yi geliştiriyordu. Ağırlıktan tasarruf sağlamak için RB211'in fanı o dönemde yeni bir malzeme olan Hyfil adındaki bir karbon fiber kullanılarak üretilmişti. Sertifikasyon gerektiren kuş çarpması testleri esnasında Hyfil fan arıza yaparak parçalara ayrılmıştır. Bu arıza 1971'de şirketin iflas ederek kapanmasına neden olmuştur.

747'deki sorunun kaynağı Pratt & Whitney JT9D'e gelince, kalkış esnasında en fazla 43,500 pound olabilen tepki kuvveti yüklemesine bağlı olarak motor kaplamaları hem bükülüyor hem de ovalleşiyordu ve dairesel olmayan deformasyonlar gösteriyordu. Oval biçimli deformasyonlar türbin ve kompresör kanadının, motor kutusunun iç kısmına

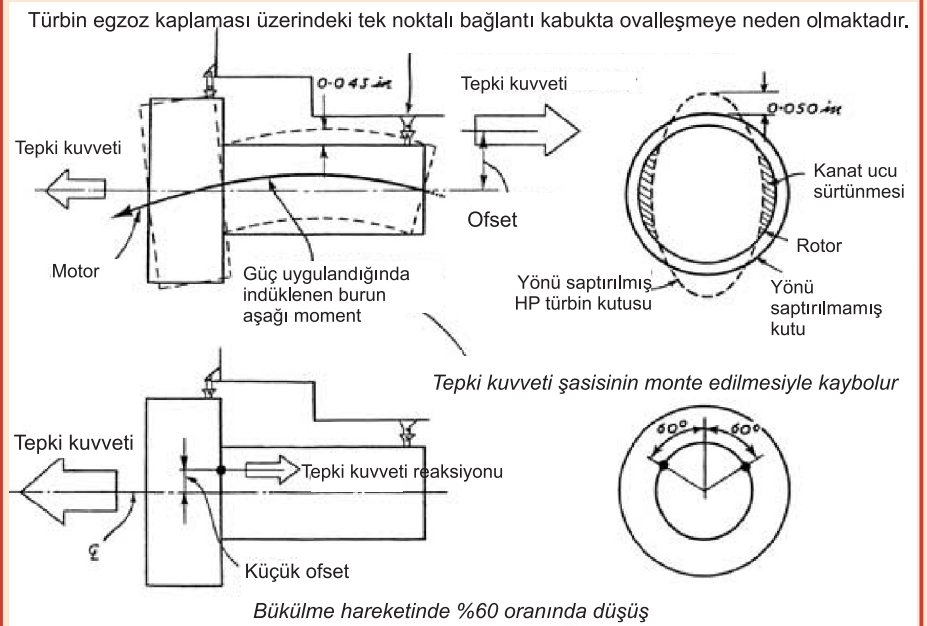
sürtünmesine yol açmakta ve kanat ucu açıklık aralıklarında güç kaybı artışı gerektirmekteydi. Sonuç ise tepki kuvvetinde ciddi bir düşüş ve garantilenen oranların yüzde 7 üzerinde yakıt tüketim artışıydı.

Bu tip problemlerin ortaya çıkması beklenmemekteydi. Pratt & Whitney Aircraft şirketi on yıllardır başarılı bir jet motoru üreticisiydi. 1950 ve 60'larda şirket ticari uçaklarda kullanılan

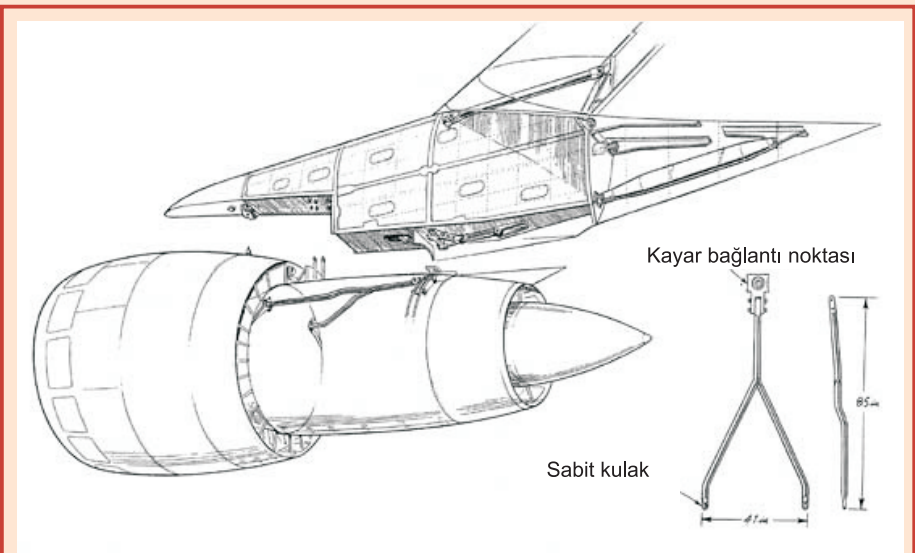
motorların yüzde 90'ından fazlasını üretir konumdaydı. Bunlar arasında Boeing 720 ve 707'de kullanılan JT3D ve 727 ile 737'de kullanılan JT8D motorları sayılabilmektedir.

Peki JT9D'nin farkı neydi?

Daha önceki motorların kaplamaları silindirik ve tüp şeklindeydi. Motordan gelen tepki kuvvetleri, uçak çatısına, pürüzlü kompresörün ara kaplaması üzerindeki sadece tek bir tepki kuvveti



Flight International'in, başlangıçtaki ovalleşme problemini ve ana tepki kuvveti yükünün tekrar dağıtım yoluyla nihai çözümünü gösteren diyagramları.



Flight International'in Y şeklindeki tepki kuvveti şasisini ve bunun P&W JT9D'ye monte edilmesini gösteren çiziminden bir kesit.



Oregon McMinnville'deki Evergreen Havacılık ve Uzay Müzesi tepki kuvveti şasisine sahip JT9D motorunu sergilemektedir. Motor, Hughes'un Spruce Goose (H-4) adı verilen (sekiz adet P&WA R-4360 4000 hp 28 silindirli radyal piston motorları ile çalıştırılan) deniz uçağının geniş kanadı altında gösterime sunulmaktadır.



Y şeklindeki tepki kuvveti şasisi Evergreen JT9D motoru üzerine monte edilmiş şekilde gösterilmektedir.

montajı ile transfer edilmektedir. Diğer yüzer montajlar, motor ağırlığının taşınmasına yardım etmek ve diğer manevra yüklerinin desteklenmesine olanak tanımak için türbin kutusu üzerinde geriye doğru konumlandırılmıştır. Bu montaj sistemi ile motor kutusu tam tepki kuvveti yükleri altında dairesel şekle yakın enine kesitini koruyacaktır.

Mevcut ticari havacılık turbo fan motorları 1:1 ile 1:2 arasındaki bypass oranlarına sahiptirler. Buna karşılık JT9D motoru, 5:1 oranında bypass oranına sahip önden montajlı geniş bir fanı bünyesinde barındıran yeni bir kaplama tasarımına ihtiyaç

duymaktaydı. Önden montajlı borulu fan tarafından JT9D içine alınan havanın bir kısmı fanın dışına çıkıp jet motorunun içine girerken, beş ayrı kısmı motoru bypass etmektedir.

Düşük hızdaki bypass edilen hava, daha yüksek sevk verimi sağlamak amacıyla daha yüksek hızla sahip motor egzozu ile aşağı akış yönünde birleşerek yüksek kütle akışına sahip tepki kuvveti üretmiştir (ancak bunu yüksek hızdaki jet akışından daha düşük olan ortalama bir hızda üretmiştir).

Bu bypass düzenlemesi, verilen bir tepki kuvveti seviyesinde daha az gürültü üretilmesine ve daha az yakıt tüketilmesine olanak tanımaktadır. Bu konsept hâlâ gelişim aşamasındadır. Günümüzün bypass oranları 8.4:1'e kadar yükselmiş durumdadır ve Pratt & Whitney tarafından geliştirilen dişi fan teknolojisiyle gelecekte 11:1'e kadar yükselecektir.

Ön fan çapının geniş olması nedeniyle JT9D, daha önceki tüm jet motorlarında kullanılan bir tasarım olan tüp biçiminden çok daha değişik bir geometriye sahip bir kaplamaya ihtiyaç duymaktaydı. Pratt & Whitney mühendisleri kalın gövdeli bir ayçiçeği şeklinde bir kaplama tasarlamışlardır. Ön fan ve onu çevreleyen kaplamanın borusu ayçiçeğini, jet motorunun geri kalan kısmı da gövdesini oluşturmaktaydı.

Boeing, JT9D motorlarını, 747'nin

kanat ön kenarlarının oldukça önüne monte etmeyi tercih etmiştir. Bunu yapmalarının bir nedeni acil iniş durumunda güvenlik gereksinimini sağlamaktır. Bu tip bir durum göz önüne alınarak öne monte edilen motorlar ayrılabilir olarak konumlandırılmıştır; böylelikle yıkıcı yangınlara sebebiyet verebilecek şekilde kanat yakıt depolarına çarpmak yerine kanatlar üzerine savrulacaklardır. *Flight International*'da yayımlanan 1969 tarihli bir makaleye göre Boeing mühendisleri, iyice öne doğru olan motor konumunun motor bölmesi ve kanat arasındaki etkileşimden doğan sürüklenme kuvvetlerini azalttığını ve potansiyel kanat dalgalanma problemlerini en aza indirdiğini tespit etmişlerdir.

Pilonun yapısal ağırlığından tasarruf etmek için Boeing, daha önce uygulanan yöntem olan kompresör aracılı kaplama montajını takip etmek yerine, pilonla JT9D tek tepki kuvveti bağlantısının türbin kutusu bazlı olması gerektiğini belirlemiştir. Bu eski yöntem, türbin kutusu ovalleşme problemine neden olan temel faktördür.

JT9D motor kutusundaki bozulma gün ışığına çıktığında, East Hartford'daki Pratt & Whitney Aircraft şirketinde genç bir mühendis olarak görev yapmaktaydım. Bunun gibi önemli bir problem ortaya çıktığında bir motor şirketi sorunun nedenini ve çözümünü bulmak için birçok yol deneyecektir. Benim deneyimlediğim durumda, türbin kutusundaki bozulmaya sebebiyet verecek olası termal etkileri araştırmak için bir grup mühendisle çalıştım. Bu çok yönlü yaklaşım, bozulmanın türbin kutusu üzerindeki ana tepki kuvveti montajının konumundan kaynaklanan yapısal bir problem olduğu ortaya çıktığında son buldu.

Uçuş tepki kuvveti yüklemesi esnasında motor kutusu bükülmekte ve ovalleşmekteydi. Ovalleşme, motor kutusunun dairesel konumdan eliptik konuma doğru kesitsel sapması sonucu oluşmaktadır. Bu durumda elipsin büyük eksenini, türbin kutusu tepki



1969'da Washington Everett'teki Paine Field Havaalanı'nda birçok Boeing 747 uçağı jet motoru bekler konumda.

kuvveti montajı ile motorun merkez eksenini içinden geçmektedir. Motor testleri, yüksek basınçlı türbin kutusunun 50 inçlik dış çapında 0.05 inç kadar ovalleşme ortaya koymuştur. Bu oran, şiddetli kanat sürtünmelerine ve sonrasında ciddi performans kaybına neden olan kanat ucu açıklığına yol açmak için yeterlidir.

Pratt & Whitney'dan emekli bir yapı mühendisi olan Heinz Lenkeit son dönemde bana yapısal bozulmanın nedeninin tepki kuvveti bükülme momenti olduğunu bildirmiştir. Bükülme momenti kolu türbin kutusu montaj yarıçapına eşitti ve buna yine eşit ve karşıt bir güç çifti olan uçuş yönünde motor eksenini boyunca etkili bir güç olarak görev yapan motor tepki kuvveti ve türbin kutusunun dış çapı üzerindeki tepki kuvveti eşlik ediyordu.

Bu bükülme momenti JT9D motor kutusunun hem bükülmesine (motor eksenini boyunca bir kirişin bükülebileceği gibi) hem de ovalleşmesine neden olmuştur. Kaplama güçlendirici halkalar ve aşınma kapasitesine sahip ovalleşme öncesi türbin kaplamaları gibi çeşitli modifikasyonlar denenmiştir ancak çabalar sonuçsuz kalmıştır.

Lenkeit ve beraberindeki yapı

mühendisleri kapsamlı statik JT9D kaplama defleksiyon testi yapmışlar ve asimetric kaplama yüklemesini ele almak için Fourier analizini kullanmışlardır. İncelemelerinin sonunda bir yerine iki adet tepki kuvveti montaj noktasının, motor kutusu üzerindeki herhangi bir aksenel konumda 90 derecelik açıklıkta dairesel olarak konumlandırıldıklarını tespit etmişlerdir. Bu durumda her birinde ortaya çıkan ovalleşme bir diğerini devreden çıkaracak ve toplamdaki kaplama bozulmasını büyük oranda azaltacaktır. Bu iki noktalı bozulma iptali yöntemi oldukça etkili olmuştur. Hatta öyle etkilidir ki, bu iki montaj noktası 120 dereceye kadar birbirlerinden ayrılabilir, buna rağmen kabul edilebilir bir ovalleşme azalmasına olanak tanımaktadır.

Pratt ekibi daha sonra Y şeklinde, boru biçimli bir titanyum tepki kuvveti şasisi geliştirip tasarlamışlardır. Bu şasisin kolları kompresör ara kaplamasına iki sabit montaj ile yaklaşık 120 derecelik açıklıkta bağlanmaktadır. Tepki kuvveti şasisinin ayağı daha sonra aksenel olarak kayan bir bağlantı noktası vasıtasıyla (motor aksenel uzunluk değişimine uyum sağlaması amacıyla) arka türbin kutusu montajına eklenmiştir. Bu bağlantı noktasının

kendisi de pilona sıkıca tutturulmuştur. 1972 tarihli Birleşik Devletler Patent no 3,675,418'de detaylı olarak tanımlanan bu Y biçimli tepki kuvveti şasisi böylelikle motor kompresör kaplaması üzerinde iki noktalı tepki kuvveti montajı kullanmıştır. Bu şekilde tepki kuvvetinin motorun arkasındaki pilona transfer edilmesi amacı güdülerek Boeing'in gereksinimleri karşılanmıştır. Bu arada, bunun bir tepki kuvveti transfer cihazı olduğu ve motor kutusu "omurga" güçlendiricisi olmadığı akılda bulundurulmalıdır.

Daha sonraki motor testleri yeni tepki kuvveti şasisinin ovalleşmeyi önemli oranda düşürdüğünü göstermiştir. Kaplamadaki az oranda bozulma ile maksimum tepki kuvvetine ulaşılabilmiş, motor performansı artık yakıt tüketim şartnamelerine uyum sağlayabilmiştir. Yeni tepki kuvveti (P&WA'da "yoke" adıyla anılmaktadır) 8,600 librelik JT9D'nin ağırlığına yaklaşık 163 libre daha eklenmiş ve birçok motor dış bileşenlerinin yerlerini değiştirmeyi gerektirmiştir. Ancak, hâlihazırda FAA sertifikalı motora eklenen bir bileşen olarak, Boeing ve Pratt & Whitney'in finansal geleceğini tehdit eden ovalleşme problemini çözmüştür.

JT9D'nin ilk Boeing 747'lere monte edilmesiyle ortaya çıkan ovalleşme problemlerinin başarıyla çözümü gelecekte geniş fanlı ticari jet motorlarının montajı konusunda rehber görevi görmüştür. Örneğin, ovalleşmeyi ortadan kaldıran iki noktalı montaj tasarımı hem General Electric GE 90'ın, hem de Boeing 777'yi çalıştıran Rolls-Royce Trent 800 turbo fan motorlarının montajında kullanılmaktadır.

R.R. Whyte vaktiyle şöyle söylemiştir: "İlerleme, ilerliyor olmasaydınız içinde bulunmayacak olduğunuz sorunlardan sıyrılma sanatıdır." Mühendislerin bir teknoloji harikası -Boeing 747 ikonunun ta kendisi- yaratma istekleri olmasaydı motor kutusu ovalleşme problemi hiçbir zaman ortaya çıkmazdı. Pratt & Whitney Aircraft'daki mühendislerin ortaya çıkardıkları yenilikçi motor montaj çözümü sayesinde tüm jumbo jet sınıfı canlılık kazanmıştır. ■