

ANKARA RÜZGÂR TÜNELİ MODERNİZASYONU VE YETENEK ARTIRIM FAALİYETLERİ

Ferdi BESNİ¹
TÜBİTAK SAGE,
Ankara

Harun GÖKÇE²
TÜBİTAK SAGE,
Ankara

Gökay GÜNACAR³
TÜBİTAK SAGE,
Ankara

Hasan BAŞCI⁴
TÜBİTAK SAGE,
Ankara

Umut Can KÜÇÜK⁵
TÜBİTAK SAGE,
Ankara

Burak ERTÜRK⁶
TÜBİTAK SAGE,
Ankara

Süleyman KURUN⁷
TÜBİTAK SAGE,
Ankara

ÖZET

Ankara Rüzgâr Tüneli (ART) düşük ses altı hızlarda çalışan, kapalı devre, yatay döngülü, atmosferik ve kapalı test odasına sahip bir rüzgâr tünelidir. Test odası genişliği 3.05 metre, yüksekliği 2.44 metre ve uzunluğu 6.10 metredir. Test odası içerisinde blokaj olmadığı durumda 80 m/s (288 km/saat) üstü hıza ulaşılabilmektedir. 1941 yılında yapımına karar verilen ART'nin inşaatına 1947 yılında başlanmış ve 1950 yılında inşaat tamamlanarak tünel kısmen işler hale getirilmiştir. Sonrasında ART test yapabilir hale getirilemeden 40 yıldan fazla beklenerek atıl durumda kalmıştır. 1993 yılında ART'nin işletimi TÜBİTAK SAGE'ye verilmiş, faal hale gelmesi için gerekli çalışmalar yapılarak tünel 1996 yılında tamamen işler hale getirilmiştir. ART 2000 yılında akış kalitesi ve teknik donanımı ile Ses Altı Aerodinamik Test Topluluğu (İng. Subsonic Aerodynamic Testing Association (SATA)) grubuna üye olmaya hak kazanmıştır. ART'nin modernize edilmesi amacıyla TÜBİTAK SAGE'nin başlattığı Ankara Ses Altı Rüzgâr Tüneli Altyapı Geliştirme (ASARTA) Projesi kapsamında model hareketlendirme sistemi, iç ve dış balans ölçüm sistemi, sabit sıcak tel anemometresi, minyatür çoklu basınçölçer ve basınca duyarlı boya sistemi ile farklı tiplerde açılma ölçer teminleri gerçekleştirilmiş ve akım düzenleyici perdeler değiştirilmiştir. Bu çalışmada ART'de modernizasyon ve yetenek artırımı kapsamında gerçekleştirilen faaliyetlerin detaylarıyla birlikte aktarılması hedeflenip, teknik kabiliyet ve test performansı açısından tünelin güncel ve eski durumunun karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

GİRİŞ

Rüzgâr tünelleri cisimlerin hava akışı ile olan etkileşiminin test edilmesi amacıyla kullanılan deneysel çalışma ortamları olarak tanımlanırlar. Deneysel çalışmalar yapılan tasarımların uygunluğunun görülebilmesi ve bunların geliştirilebilmesi amacıyla gereklidir. Bir hava aracının aerodinamik tasarımı sırasıyla sayısal modelleme, rüzgâr tüneli testi ve uçuş denemesi olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Hava akışının sayısal modelleme ile yapılan analizlerinin uzun sürmesi, doğrulanmaya gereksinim duyması ve yüksek uçuş açıları gibi zorlayıcı koşullarda analiz yükünün artması, uçuş denemelerinin ise karmaşık, pahalı, tehlikeli olabilmesi ve yan rüzgâr,

¹Araştırmacı, E-posta: ferdi.besni@tubitak.gov.tr

²Uzman, E-posta: harun.gokce@tubitak.gov.tr

³Uzman Araştırmacı, E-posta: gokay.gunacar@tubitak.gov.tr

⁴Başuzman Araştırmacı, E-posta: hasan.basci@tubitak.gov.tr

⁵Başuzman Araştırmacı, E-posta: umut.kucuk@tubitak.gov.tr

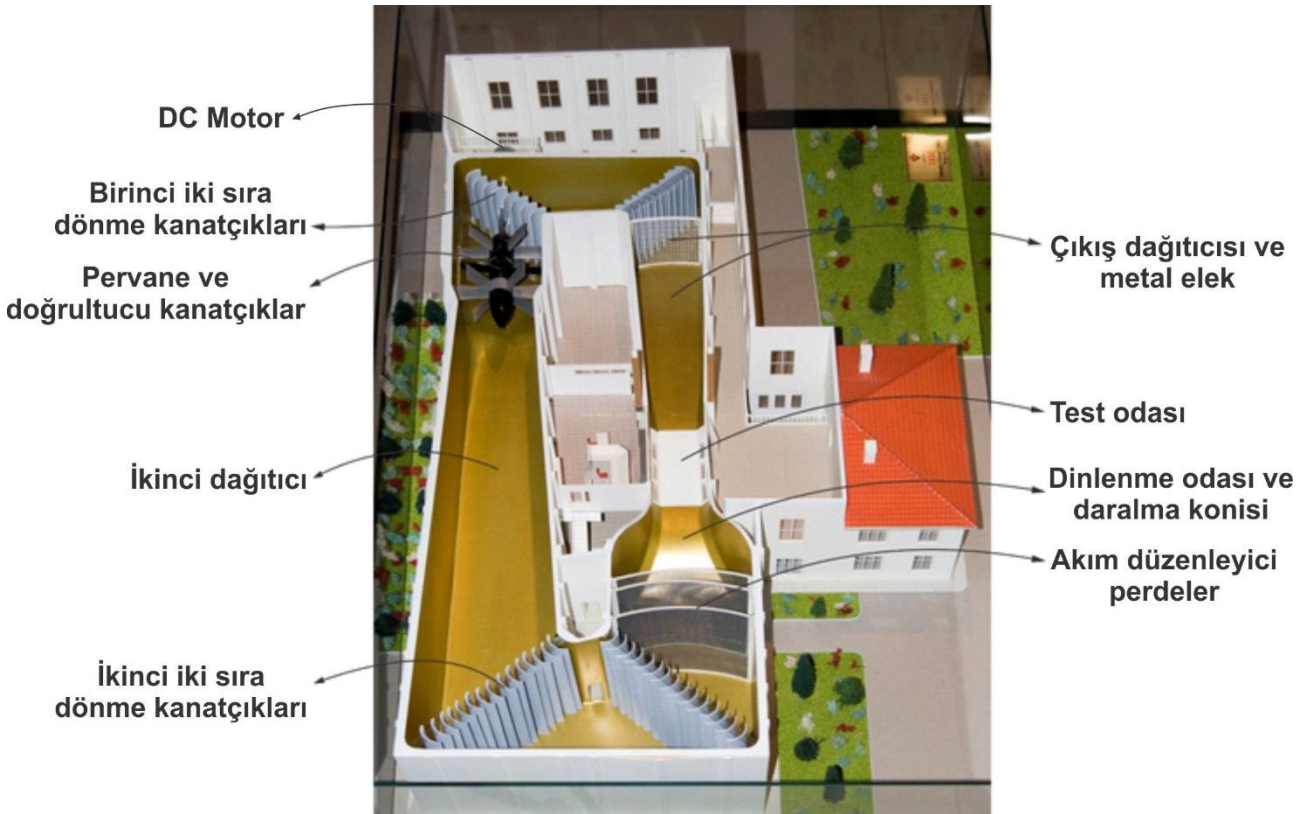
⁶Uzman Araştırmacı, E-posta: burak.erturk@tubitak.gov.tr

⁷Başuzman Araştırmacı, E-posta: suleyman.kurun@tubitak.gov.tr

türbülans seviyesi gibi sebeplerle kontrollü test ortamının sağlanamaması nedenlerinden dolayı rüzgâr tüneli testleri oldukça önem arz etmektedir. Güvenli, hızlı ve ucuz bir şekilde tasarımların uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla kullanılan rüzgâr tünellerinde hava ile etkileşimde olan tüm cisimlerin aerodinamik karakteristiği ortaya çıkarılabilmektedir. Rüzgâr tüneli denemeleri sayısal çözümlerle doğrulanması ile uçuş denemelerinin maliyet etkin ve güvenli yapılabilmesi için mutlaka yürütülmesi gereken önemli süreçlerden biridir.

Ankara Rüzgâr Tüneli'nde uçak, helikopter, insansız hava aracı, mühimmat, paraşüt gibi hava araçları ile otomobil, kamyon, otobüs ve motosiklet gibi kara taşıtlarının aerodinamik özelliklerinin incelenmesi, siren, radar, anten ve paratoner gibi cisimlerin hava ile etkileşimlerinin belirlenmesi ve fırtına ortamında dayanımlarının incelenmesi gibi farklı özelliklerde pek çok test gerçekleştirilebilmektedir. Genç cumhuriyetin muasır medeniyet seviyesine ulaşma hedefinin, kendi teknolojisini üretme ve kendi üretimini de gerçekleştirme faaliyetlerinin bir simgesi olan Ankara Rüzgâr Tüneli'nin yapımına 1941 yılında karar verilmiş ve 1944 yılında İngiliz HOLST firmasıyla anlaşılmıştır. Tünelin inşaatına 1947 yılında Milli Eğitim Bakanlığı tarafından başlanmış, 1949 yılında motor aksamı tünele monte edilmiş ve 1950 yılında tünel kısmen işler duruma getirilmiştir. 1993 yılına kadar atıl durumda kalan ART bu yıldan sonra TÜBİTAK SAGE'nin kullanımına verilmiştir. Aynı yıl ART'nin tekrar çalıştırılması amacıyla pervane, motor ve elektrik donanımları gözden geçirilerek tünel tekrar çalışır duruma getirilmiştir. Bu kapsamda tünelin 1993 yılından bugüne düzenli olarak bakım ve onarım faaliyetleri yürütülmekte ve günümüz teknolojik ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yeteneklerinin artırılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmektedir. 1996 yılından itibaren aktif bir şekilde faaliyet göstermeye başlayan Ankara Rüzgâr Tüneli 2000 yılında dünyadaki önemli düşük ses altı rüzgâr tünellerinin oluşturduğu bir grup olan Ses Altı Aerodinamik Test Topluluğu (İng. Subsonic Aerodynamic Testing Association (SATA)) grubuna üye olmaya hak kazanmıştır.

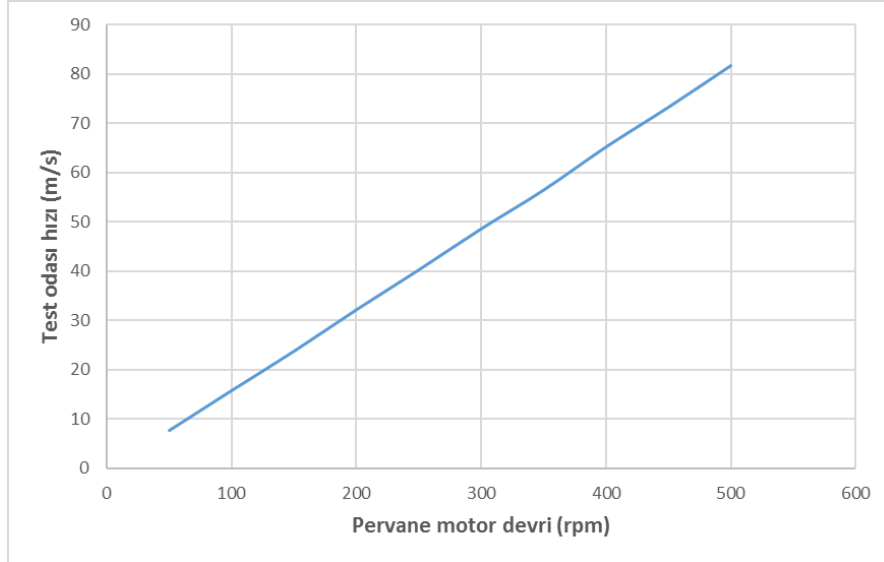
ART düşük ses altı hızlarda çalışan, kapalı devre, yatay döngülü, atmosferik ve kapalı test odasına sahip bir rüzgâr tünelidir. Tünel döngüsü betonarme olup test odası ahşaptır. Tünelin sahip olduğu eksenel türbülans seviyesi yaklaşık 0.15%, toplam türbülans seviyesi yaklaşık 0.60%'dır. Şekil 1'de 1:50 ölçekli maketi üzerinden Ankara Rüzgâr Tüneli'nin bölmeleri verilmektedir.



Şekil 1. Ankara Rüzgâr Tüneli 1/50 Ölçekli Maket Görüntüsü

ART'nin 3.05 m genişliğe, 2.44 m yüksekliğe ve 6.10 m uzunluğa sahip olan test odası tamamen ahşap malzemeden oluşmuştur. Test odası sekizgen bir kesite sahiptir ve kesit alanı girişten çıkışa

doğru köşelerin küçülmesiyle genişlemektedir. Bu sayede test odasında sınır tabaka etkilerinden dolayı oluşabilecek basınç farklılıkları dengelenmeye çalışılmıştır. Test odasından sonra akım yönünde ilerleyerek çıkış dağıtıcısına (*Ing.* Diffusor) ulaşılmaktadır. Dağıtıcı sayesinde tünel kesiti kademeli olarak artırılarak akımın yavaşlaması sağlanmaktadır. Dağıtıcının genişleme açısı yatayda 5° , dikeyde 6.3° ve uzunluğu 15 metre'dir. Genişleme açısının küçük olması dağıtıcıda meydana gelecek akım ayrılmalarını önlemektedir. Dağıtıcının sonunda bulunan güvenlik perdesi test esnasında modelden kopabilecek parçaları tutarak tünelin diğer bölümlerine zarar vermesini engellemektedir. Akım yönünde devam edildiğinde birinci iki sıra dönme kanatçıklarına ulaşılmaktadır ve airfoil kesitine sahip bu kanatçıklar hava akımının köşelerden düzgün bir şekilde dönüşüne olanak sağlayarak oluşacak kayıpları azaltmaktadır. Hava akımının oluşmasını sağlayan pervane 5.18 metre çapa sahiptir ve her biri üzerinde iki pal bulunduran iki parçadan oluşmaktadır. Pervane beş adet yatak üzerine yerleştirilmiş 220 mm çapındaki mil vasıtasıyla 1000 beygir gücündeki (750 kW) doğru akım motoru tarafından döndürülmektedir. Pervanenin en yüksek dönme hızı 600 devir/dakikadır. Doğrultucu kanatçıklar pervanenin önünde ve arkasında olmak üzere yedişer adettir. Sabit yapılı olan bu kanatçıklar pervaneye giren ve çıkan akımın daha düzenli hale gelmesini sağlamaktadır. Pervaneden hemen sonra yer alan ikinci dağıtıcı ile akış alanı genişletilerek daha düzgün bir akış karakteristiği elde edilmektedir. İkinci dağıtıcı her iki yönde 6.4° genişleme açısına ve 24.5 m uzunluğa sahiptir. Özellikle bina aerodinamiğinin yapısal testlerinde bu kısım test odası olarak kullanılmaya elverişlidir. İkinci dağıtıcıdan sonra 22'şer adet dönme kanatçığından oluşan ikinci iki sıra dönme kanatçıkları yer almaktadır. Kanatçıkların uç bölümleri profil yapısının oluşturulabilmesi amacıyla ahşap malzemeden, geri kalan kısımları ise betondan yapılmıştır. Sonraki bölümde 1 metre aralıklarla yerleştirilmiş 3 adet akım düzenleyici perde bulunmaktadır. Bu perdeler akım içindeki girdapları kırarak türbülans seviyesinin azalmasını sağlamaktadır. Perdelerden sonra tünel içerisindeki en büyük kesitli bölge olan dinlenme odası bulunmaktadır. Bu bölgede düzgünlüğü sağlanarak yavaşlatılan akış sonraki kısımda daralma konisine geçerek deney odasında istenen hıza ulaşmaktadır. Koninin daralma oranı 7.5'tir. ART kapalı devre bir rüzgâr tüneli olduğundan dolayı sistem içerisinde dolanan hava uzun süreli çalışmalarda ısınmaktadır. Bu ısınmanın akış özelliklerini etkilememesi amacıyla daralma konisi üstünde üç kapaktan oluşan bir havalandırma sistemi bulunmaktadır. Bu sistem açıldığında duman ile akış görselleştirme testi sonucunda kirlenen havanın değişimi sağlanabilmektedir. ART'nin test odasındaki akış hızı test odasında pervane dönüş hızı ile Şekil 2'de görüldüğü gibi doğrusal olarak değişmektedir. Grafik test odası içerisinde herhangi bir modelin olmadığı durumda elde edilmiştir.



Şekil 2. Pervane Motor Devri İle Test Odası Hızı Değişimi

Bu çalışmada ASARTA Projesi kapsamında temin edilen model hareketlendirme sistemi, iç ve dış balans ölçüm sistemi, sabit sıcak tel anemometresi, minyatür çoklu basınçölçer ve basınca duyarlı boya sisteminin özellikleri aktarılacaktır. Ayrıca Şekil 1'de görülen akım düzenleyici perdelerde yapılan iyileştirmeler, kurulum ve kullanılabilir hale getirilme süreçleri hakkında detaylı bilgiler sunulacaktır. Bunun yanı sıra tünele entegrasyonu gerçekleştirilen model hareketlendirme sistemi, iç balans ölçüm sistemleri, minyatür çoklu basınçölçer gibi bileşenlerin bir arada uyumlu çalışması

ve idaresinden sorumlu veri toplama sistemi (VTS) yazılımında yapılan iyileştirmeler aktarılabilecek olup, bu yazılıma günümüz ihtiyaçlarını karşılama ve zaman açısından verimli test yapabilmek adına kazandırılan yeteneklerden bahsedilecektir. Bu yatırımların sonucunda elde edilen teknolojik kabiliyetler, test veri kalitesi ve gerçekleştirilebilen günlük test koşu sayısı açısından tünelin güncel ve eski durumuyla karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

YÖNTEM

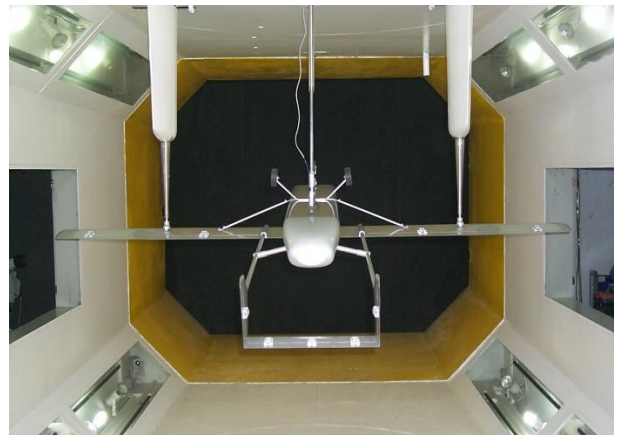
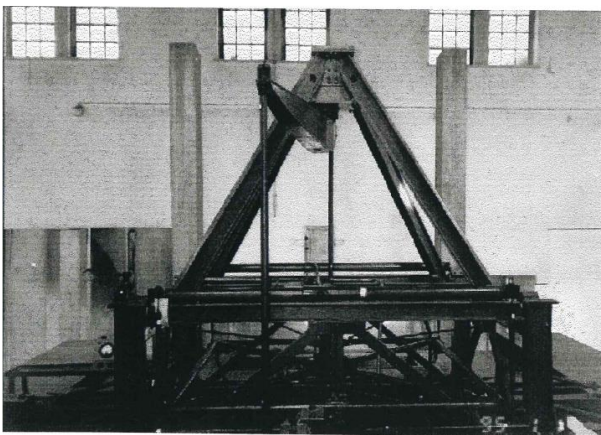
Ankara Rüzgâr Tüneli'nde aerodinamik yük ölçüm testleri, yapısal dayanım ve fonksiyonel işlevlik testleri, akış ölçümü testleri ve akış görüntüleme testleri olmak üzere 4 farklı tip test gerçekleştirilebilmektedir. Yük ölçüm testleri dış balans, iç balans ve model hareketlendirme sistemi kullanılarak, akış ölçümü testleri sabit sıcak tel anemometresi ve minyatür çoklu basınçölçer kullanılarak, akış görüntüleme testleri ise basınca duyarlı boya sistemi, iplikçik, yağ ve duman kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Basınca duyarlı boya sistemi hem bir akış görüntüleme hem de bir akış ölçüm testi olarak değerlendirilebilmektedir. ASARTA projesi ile tünelin model hareketlendirme sistemi, dış balans sistemi ve çoklu basınçölçeri yenilenmiş, iki adet bulunan iç balans sayısı üçe çıkartılmış ve proje öncesinde bulunmayan sabit sıcak tel anemometresi ile basınca duyarlı boya yöntemi temin edilerek tünel bünyesine kazandırılmıştır.

UYGULAMA

Bu bölümde ASARTA projesi kapsamında elde edilen yeteneklerin kurulum aşamalarından ve veri toplama sistemine yapılan entegrasyonlardan bahsedilecektir. Çalışmanın ilk aşamasında tünelin eski kabiliyetleri üzerinde durulacak, ardından yukarıda aktarılan kazanımların özellikleri ve tünelin yeteneklerinde meydana getirdiği iyileştirmeler karşılaştırmalı bir şekilde ortaya konacaktır.

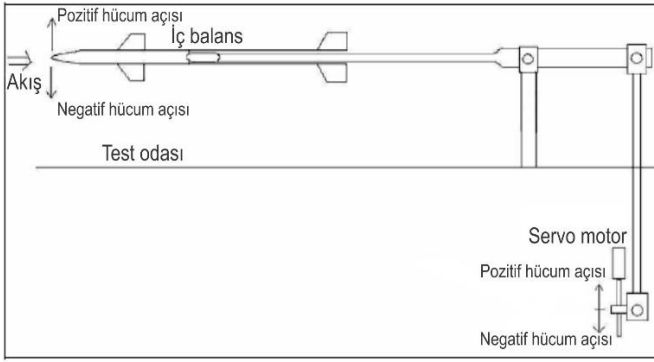
Model Hareketlendirme, İç Balans ve Dış Balans Sistemi

Aerodinamik yüklerin belirlenmesi amaçlandığında yük ölçüm testleri yapılmaktadır. Farklı hız, açı ve model konfigürasyonlarında modele etkiyen aerodinamik kuvvet ve momentleri bulmak için iç balans ve dış balanslardan, test modelini istenen açıya getirebilmek için ise model hareketlendirme sisteminden faydalanılmaktadır. Şekil 3'te ART'de kullanılan eski dış balans sistemi ve model bağlantı şekli verilmektedir. Balans sistemi ilk olarak mekanik olarak çalıştırılmış, daha sonra yapılan modernizasyon kapsamında yük hücreleri alınarak balans elektromekanik hale getirilmiş ve kalibrasyonu yapılmıştır. Eski balans sistemi deney odasının üstünde olup asma tipindedir. Balans kullanıldığı zaman test modeli balans mekanizmasına ters olarak ve üç adet destek (*İng. Strut*) kullanılarak nokta bağlantı şeklinde bağlanmaktaydı. Destek çubukları akışın bozulmaması amacıyla kanat profili yapısındadır. Sistemde her biri 600 kg yük limitine sahip 7 adet yük hücresi bulunmakta ve bu yük hücreleriyle üç kuvvet ve üç moment ölçülebilmekteydi.



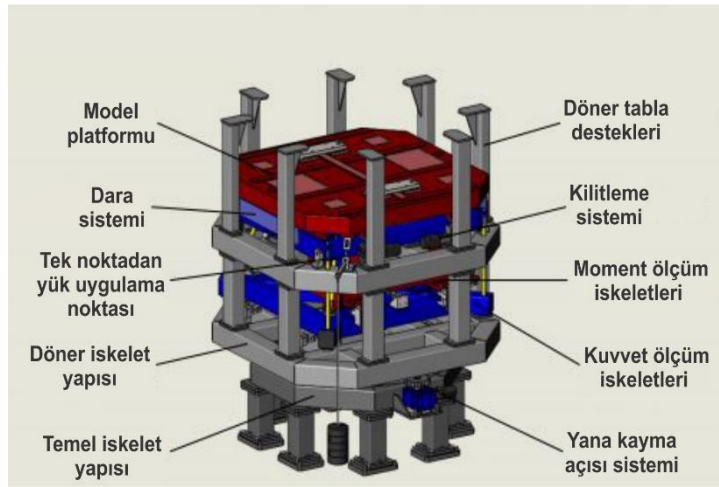
Şekil 3. Eski Dış Balans Sistemi ve Model Bağlantısı

İç balans ile ölçüm yapılırken model test odasına Şekil 4'te verilen model hareketlendirme sistemi kullanılarak tutucu kol aracılığıyla bütünlendirilmekteydi. İç balans ölçüm yapabilmesi amacıyla test odası içerisindeki tutucu kolun uç kısmına bütünlendirilmektedir. Tünelde 22 mm ve 35 mm çaplarında farklı yük limitlerine sahip 2 adet 6 bileşenli tutucu kol tipi (*İng. Sting*) iç balanslar kullanılmaktadır. Hücum açısı bir servo motor tarafından tahrik edilen vida mekanizması yardımıyla modele verilmekteydi. Servo motorun vidalı mekanizmayı harekete geçirmesiyle tutucu kol yukarı ve aşağı hareket etmekte ve model pozitif veya negatif hücum açısı almaktaydı.



Şekil 4. Eski Model Hareketlendirme Sistemi ve İç Balans

ASARTA projesi kapsamında test odasının altında yer alan, 6 bileşenli ve elektromekanik olarak çalışan bir dış balans sistemi temin edilmiştir. Karmaşık bir ölçüm mekanizmasına sahip olan dış balans sistemi Şekil 5'te görüldüğü gibi birçok yük hücresi ve farklı tipte çelik iskelet yapıları içermektedir.



Şekil 5. Yeni Dış Balans Sistemi

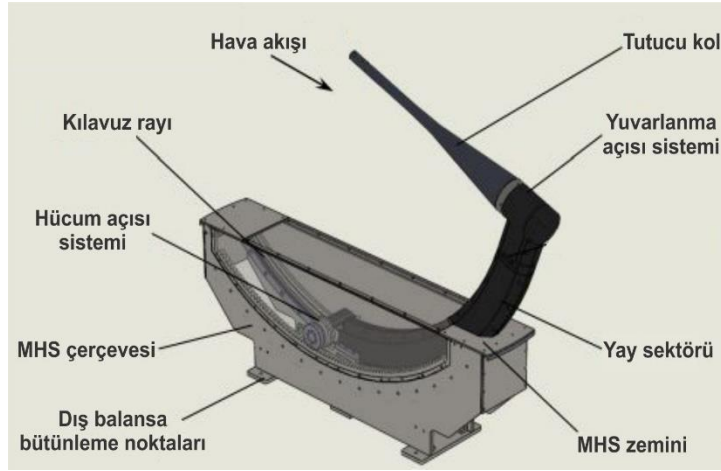
Yeni dış balans sistemi kullanılarak Tablo 1'de verilen yük değeri aralıklarında testlerin yapılması mümkün hale getirilmiştir. Kalibrasyonu tamamlanan dış balans sisteminin aktif olarak kullanılabilmesi amacıyla test odası içerisindeki model bağlantı desteklerinin tasarım çalışmaları devam etmektedir.

Proje kapsamında tünel bünyesinde hali hazırda bulunan 22 mm ve 35 mm çaplarındaki balanslara ek olarak 44 mm çapında yüksek limitlere sahip bir iç balans temin edilmiştir. Kullanımda olan iç balanslar %0.2'den küçük kalibrasyon hassasiyetine sahiptirler. Temin edilen 44 mm çaplı iç balansın kalibrasyon hassasiyeti farklı bileşenler için %0.03 ile %0.15 arasında değişmektedir. 22 mm'lik iç balans ile maksimum 10 kg, 35 mm'lik ile maksimum 30 kg ve 44 mm'lik iç balans ile maksimum 50 kg ağırlığa sahip modeller test edilebilmektedir. Tablo 1'de yer alan normal kuvvet değerleri model ağırlığını da içermektedir.

Tablo 1. İç ve Dış Balans Sistemleriyle Model Hareketlendirme Sistemi Yük Limitleri

Dış Balans			İç Balans			MHS
BİLEŞEN	± Aralık	Hassasiyet (0.02%)	Ø22mm	Ø35mm	Ø44mm	
Eksenel Kuvvet (N)	3560	1.42	±80	±375	-500/+200	±850
Yanal Kuvvet (N)	8900	3.56	±225	±1000	±1250	±2500
Normal Kuvvet (N)	8900	3.56	±225	±1000	±2500	±5000
Yuvarlanma (İng. Roll) Momenti (Nm)	1900	0.76	±10	±150	±200	±250
Yunuslama (İng. Pitch) Momenti (Nm)	3500	1.40	±15	±150	±400	±500
Yalpalama (İng. Yaw) Momenti (Nm)	1100	0.44	±15	±100	±200	±250

Şekil 6'daki yeni temin edilen model hareketlendirme sistemi kurulum ve devreye alma işlemlerinden sonra kullanıma hazır hale getirilmiş ve birçok testte kullanılmıştır. Model hareketlendirme sistemi hem dış balans sistemiyle hem de tutucu kol tipi iç balanslar ile uyumlu şekilde çalışabilmektedir. Bu sistem sayesinde yüksek pozisyonlama hassasiyeti, hızlı ve hassas kuvvet ölçümü mümkün hale gelmiştir. Bu sistem ile farklı hücum, yana kayma ve yuvarlanma açılarında otomatik bir şekilde testler gerçekleştirilebilmektedir. Test modeline yay sektörünün kılavuz rayı üzerinde hareket etmesiyle hücum açısı, tutucu kolun arka kısmında bulunan dairesel kısmın dönmesiyle yuvarlanma açısı ve dış balans üzerinde bulunan döner tabla ile yana kayma açısı verilmektedir.



Şekil 6. Model Hareketlendirme Sistemi

Model hareketlendirme sisteminin yük limitleri Tablo 1'de, teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Yeni model hareketlendirme sistemine uygun bir şekilde veri toplama yazılımının güncellenmesi sayesinde devamlı süpürme (İng. Continuous sweep) ve durarak süpürme (İng. Pitch/pause) gibi zaman açısından çok verimli test senaryolarıyla test yapabilmeye kabiliyeti kazanılarak modern rüzgâr tünellerinin günlük test sayılarına ulaşılmıştır.

Tablo 2. MHS Teknik Özellikleri

Eksen	Kapasite	Hassasiyet	Hız
Hücum Açısı	-20°→+50°	0.015°	0.1-2 °/s
Yana Kayma Açısı	-30°→+30°	0.025°	0.1-2 °/s
Yuvarlanma Açısı	-90°→+270°	0.025°	0.1-6 °/s

Veri Toplama Sistemi

Tünelde yapılan iyileştirmelerin ardından hem mevcut hem de yeni temin edilecek ekipmanlarla uyum içinde çalışabilecek ve testlerin icra edilmesini sağlayacak test yazılımına ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla daha önce yazılmış olan veri toplama sisteminde (VTS) iyileştirmelere gidilmeye karar verilmiştir. Tünelde icra edilen bir test sırasında elektronik ölçüm aletlerinden veriler alınmakta ve bu veriler işlenerek hız, basınç, sıcaklık, kuvvet ve moment gibi akış ve balans parametrelerine dönüştürülmektedir. Bu parametrelerin dönüşümlerinin doğru yapılıp eş zamanlı olarak sayısal ve grafiksel göstergelere yansıtılması testin kontrollü ve doğru bir şekilde icrasını kolaylaştırmaktadır. Yazılımı kullanan kişiye kolaylık sağlaması ve test güvenliğini en üst düzeyde tutmak amacıyla sistemin tek bir bilgisayardan ve ekrandan takip edilmesi önem arz etmektedir.

Eski VTS’de hücum açısı verme, motor devri ayarlama ve balans verileri üç ayrı pencereden kontrol edilmekteydi. Hücum açısı verme fonksiyonu adım motoruna sahip olduğundan dolayı modele açı vermek zaman alıcı olmakta ve verimi düşürmekteydi. Modele hücum açısı verme işlemi kademeli olarak yapıldığından sürekli tarama ile ölçüm almak mümkün değildi. Yine aynı sebeple dara alma işlemi uzun süreler almakta ve tünel verimliliği düşmekteydi. Bunların yanı sıra akış koşullarının test şartlarına uygun hale getirilmesi, testi yapılan modelin blokajına bağlı olarak değişkenlik göstermesinden dolayı tünel hızının ölçüm alınırken ayarlanması zaman almaktaydı. Akış parametreleriyle birlikte görüntülenen balans verileri ise tünelin en kritik çıktı parametrelerindendir. Test esnasında alınan balans verilerinden darası alınmış veriler çıkarılarak model üzerindeki kuvvet ve moment değerleri bulunmaktaydı. Ölçümün kalitesi ekrana yansıtılan standart sapma grafiklerinden kontrol edilmekte ve testin tekrarı operatörün inisiyatifine bırakılmaktaydı.

Yukarıda bahsedilen tüm bu zorluklara çözüm bulmak ve daha fazla yetenek kazanmak amacıyla veri toplama kartlarında ve yazılımında güncellemeye gidilmiştir. Yeni VTS yazılımı güncellenen ve yenilenen ekipmanlarıyla beraber testler sırasında aşağıdaki işlemleri yerine getirmeyi amaçlamaktadır.

- NI-4302 veri toplama kartından test odası basınç verilerinin alınması
- NI-4353 veri toplama kartından test odası sıcaklık verilerinin alınması
- NI-4303 veri toplama kartlarını kullanarak iç/dış balans verilerinin toplanması
- NI-4302 veri toplama kartlarını kullanarak tünel pervane devir sayısının okunması
- NI-6513 veri toplama kartından motor devir sayısı komutunun verilmesi
- Scanivalve 64 kanallı basınç tarayıcı ile haberleşilmesi
- ATE Aerotech model hareketlendirme sistemi ile haberleşilmesi
- Jewell marka 2 eksenli açıölçer ile haberleşilmesi

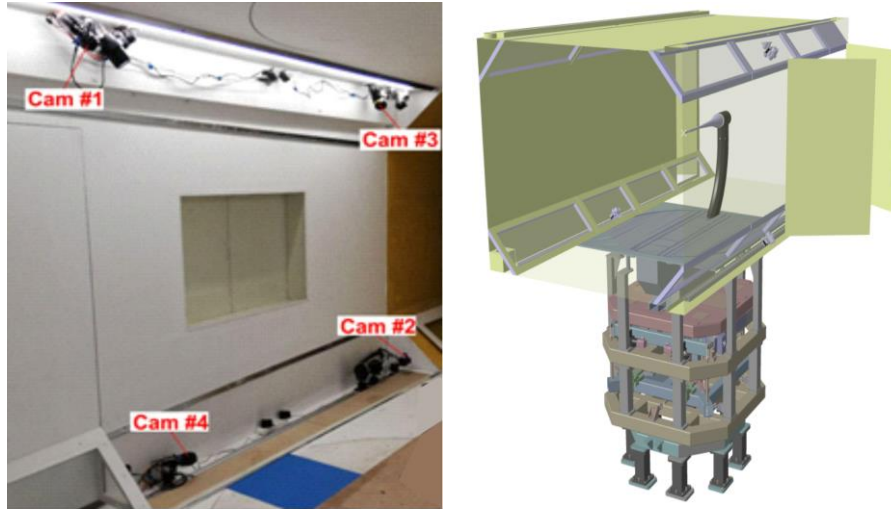
Yukarıda bahsi geçen donanımlarla hem doğrudan hem de haberleşme yolu ile ölçüm sistemlerinden gelen ham veri işlenmekte ve depolanıp istenilen formatta çıktı dosyasına yazdırılmaktadır. Böylelikle insan faktöründen kaynaklı hatalar en aza indirilmiştir. Yenilenen VTS ile birlikte ART altyapısı aşağıda belirtilen yetenekleri kazanmıştır.

- Teste başlamadan önce donanımların fonksiyonel kontrolü,
- Haberleşme sağlanan donanımlara bağlantının otomatik olarak sağlanması,
- Model içine bütünlenen 2 eksenli açıölçer yardımıyla hücum açısı ve yuvarlanma açısı kontrolünde limitlerin artırılması, hassasiyetin 0.01° mertebelerine düşürülmesi,
- Akış parametrelerinde farklı birimlerin görüntülenip yazdırılabilmesi,
- Model hareketlendirme sisteminin tüm fonksiyonlarının yazılım üzerinden kontrol edilebilmesi,
- Farklı süpürme hızlarında hücum açısı ve yana kayma açısı taramalarının hem sürekli hem de dur-kalk şeklinde yapılması,
- Dara alma işleminin otomatikleştirilerek tekrar tekrar kullanılmasının sağlanması,

- Veri toplama sırasında takip edilecek süpürme ya da dur-kalk senaryolarının oluşturulup istenirse sonradan değiştirilebilmesi,
- Veri toplama işleminin histerezis testlerine uygun hale getirilmesi,
- Beklenmeyen ölçüm dalgalanmalarında standart sapma limitlerinin operatör tarafından verilebilmesi, gerektiğinde otomatik olarak ölçümün tekrarlanması,
- Çoklu basınçölçer verilerinin istenilen kanal aralıklarında alınması,
- Tünel motor devrinin hem devir kontrolü, hem de hız kontrolü ile kapalı çevrim olarak yapılması,
- Ölçüm süresinin, ölçüm öncesi veya sonrası beklemlerin testin karakterine bağlı olarak değiştirilebilir olması,
- İç balans ve dış balans limitlerinin sürekli gösterimi, %90'ının aşımı durumunda yazılımın uyarı vermesi, gerektiğinde modelin açısını acil durum (Sıfır) pozisyonuna getirmesi,
- Akış altında rüzgâr yükünden dolayı hücum açısını değiştiren modelin açısının sürekli kontrol edilerek limitler içinde tutulması, gerektiğinde otomatik olarak açısının düzeltilmesi,
- Test sırasında toplanan verilerin kontrolünün yazılım üzerinden istenilen dosya formatında yapılması.

Test Odası

Tünele yeni kazandırılan model hareketlendirme, dış balans ve basınca duyarlı boya sistemleri için test odası içerisinde bazı revizyonların yapılması gerekmiştir. Eski model hareketlendirme sisteminin döner tabla ebatları ile yeni dış balansın döner tabla boyutlarının birbirinden farklı olması, ayrıca mevcut duruma göre tabla pozisyonunun akış doğrultusunda 50 cm ileriye taşınması gereksinimi nedeniyle test odası alt sistemleri yenilenmiştir. Bununla beraber basınca duyarlı boya ölçüm sistemi için kameraların ve LED'lerin yine test odasına uygun yerleşimlerinin yapılabileceği alanların oluşturulması gerekmiştir. Test odasının sekizgen köşelerinde bulunan mevcut ışıklandırma alanları genişletilmiş ve bu kısımlara Şekil 7'de görüldüğü gibi kamera ve LED'lerin akış doğrultusunda kayar hareket edebileceği sigma profil ray mekanizması kurulmuştur. Diğer taraftan yine LED'lerin soğutulması ve kamera kontrolleri için ihtiyaç duyulan diğer ekipmanların test sürecinde kontrol edilebilmeleri için test odası yan duvar kenarında oda oluşturulmuştur.



Şekil 7. Test Odası Genel Görüntüsü

Güvenlik Perdesi

Çıkış dağıtıcısı kısmındaki güvenlik perdesi (*İng.* Foreign object damage screen) değiştirilerek daha fonksiyonel hale getirilmiştir. Akış doğrultusuna dik olarak bütünlenen mevcut güvenlik perdesi 18.36 m² alana, 7 mm tel kalınlığına ve 45 mm hücre boşluğuna sahiptir. Bu noktada oluşan blokajın minimize edilmesi amacıyla perde pozisyonu dönme kanatçıklarına paralel olacak şekilde kanatçıkların 5 cm önüne yerleştirilmiştir. Bu sayede güvenlik perdesinin kapladığı alan 24.68 m² olarak yenilenmiştir. Ayrıca blokajın düşürülebilmesi için 1.5 mm kalınlıkta ve 40 mm hücre boşluğuna sahip tel kafes geometrisi kullanılmıştır. Yan duvar birleşim bölgelerinde gerdirme mekanizması kullanılarak tel kafesin gergin şekilde yüksek dayanımlı olması sağlanmıştır.

Boyutların seçiminde toplam basınç kaybı dikkate alınmıştır. Bütünleme işlemi tamamlanmış yeni güvenlik perdesi Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Yeni Güvenlik Perdesinin Genel Görüntüsü

Akım Düzenleyici Perdeler

Test odasındaki türbülans şiddetinin azaltılması amacıyla dinlenme odasında Şekil 1’de verilen üç adet akım düzenleyici perde (*İng.* Turbulence screen) kullanılmaktadır. Eski perdelerin her biri yaklaşık 2.5 m genişliğinde üç parçadan oluşup birbirine kaynak ile tutturulmuştur. Bu kaynaklar zaman içerisinde deforme olmuş, yırtılmalarından kaynaklı açık kalan bölümlerin akım kalitesini olumsuz yönde etkilediği düşünülmüştür. Ayrıca perdelerin yay şeklindeki bütünleme detayından dolayı akışa dik durmadığı ve akış doğrusallığını kötü etkilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle yekpare olarak paslanmaz çelik malzemeden üretilen yeni perdeler satın alınmış ve mevcut perdeler sökülerek yerine yenileri bütünlenmiştir. Uygun olan perde özelliklerinin seçilebilmesi amacıyla tasarım hesabı yapılmıştır.

Tasarım hesaplamalarında %65.9 ve %60.1 olmak üzere iki farklı açıklık oranına sahip perde kullanılmıştır. Türbülans seviyesini azaltma teorileri göz önünde bulundurulduğunda perde performansına etkiyen en önemli parametrenin K olarak ifade edilen basınç kayıp katsayısı (*İng.* Pressure loss coefficient) olduğu görülmektedir. Perde boyunca olan basınç kaybının dinamik basınca oranı olan K katsayısı aşağıdaki gibi verilmektedir [Scheiman, 1981].

$$K = \frac{\Delta p}{q} \quad (1)$$

Basınç kayıp katsayısını düşük Reynolds sayıları için aşağıdaki gibi tanımlamıştır [Davis, 1964].

$$K = K_0 + \frac{55.2}{Re_w} \quad (2)$$

$$K_0 = \left(\frac{1 - 0.95\beta}{0.95\beta} \right)^2 \quad (3)$$

Burada β katsayısı perdenin açıklık oranını, yani açık alanın toplam alana oranını; Re_w katsayısı ise tel çapına bağlı Reynolds sayısını ifade etmektedir. Tel çapına bağlı Reynolds sayısı oldukça düşük olup genellikle 100 ile 600 arasında değişmektedir.

Perdelerin kullanılmasıyla birlikte eksenel ve yanal türbülansla meydana gelecek azalma da basınç kaybı katsayısı ile ilişkilendirilerek bulunabilmektedir. Scheiman ve Brooks türbülans seviyelerinde meydana gelecek azalma için türbülans azalma faktörünü (f) aşağıdaki gibi ortaya koymuştur.

$$f = \frac{1}{1 + K} \quad (u') \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 + K}} \quad (v') \quad (5)$$

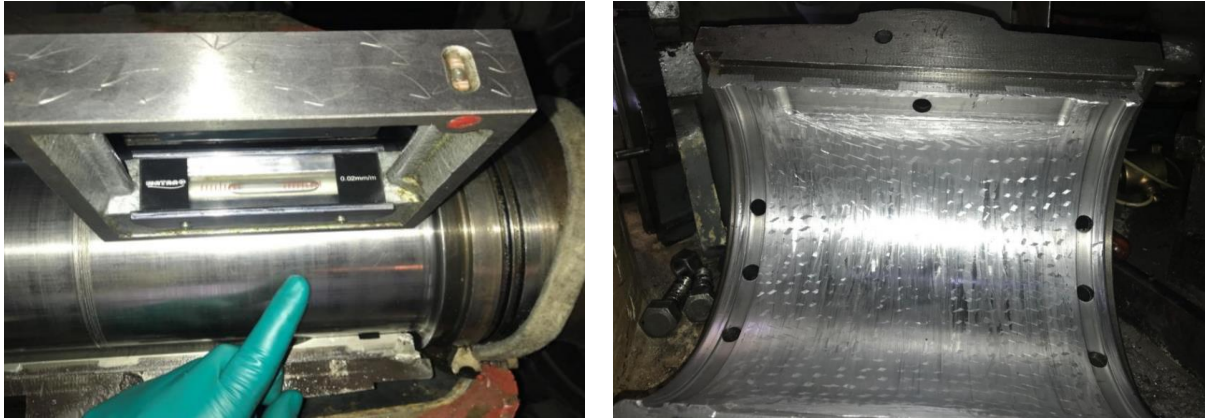
Yapılan hesaplamalar sonucunda %65.9 açıklığa sahip olan perdenin basınç kaybı ve türbülans azaltma faktörü açısından daha uygun olduğuna karar verilmiştir. Her bir perdenin gergin ve tek parçadan oluşması sağlanmıştır. Perdeler 7.75 m x 50 m boyutlarındaki tek parça rulodan 7.5 m x 8 m boyutlarında üç adet perde elde edilecek şekilde kesilmiştir. İstenen teknik gereksinimleri sağlayan üç adet akım düzenleyici perdenin temini gerçekleştirilmiştir. Yüksek rüzgâr hızları altında testler gerçekleştirildiğinde herhangi bir dayanım problemiyle karşılaşılmamıştır.



Şekil 9. Perdelerin Gerdirilmesi ve Montajı

Yağlama ve Yatak Sistemi

Motor mili ikisi tünel dışında üçü tünel içerisinde olmak üzere 5 adet yatak üzerine sabitlenmiştir. Motor mili ile yatakların birbirlerine göre eksenel olması kritik öneme sahiptir. Daha önceki testlerde, yataklar ile mil eksenindeki hizalama farklılıkları nedeniyle yatakların ısınma ve aşınma problemleriyle karşılaşmış, dolayısıyla test süreleri sınırlandırılmak zorunda kalmıştır. Buna ek olarak yağlama sisteminde mevcut kullanılan yağın viskozitesinin yüksek olmasından dolayı yağ devir daim motorunda yağ, yatak içine geçmeden ısınmaya maruz kalmaktaydı. Gerçekleştirilen bakım ve onarım faaliyetleri sonucunda yataklar ile mil arasındaki eksenel farklılık giderilerek birbirine paralel hale getirilmiştir. Düşük viskoziteli bir motor yağı seçilerek ve yağ deposu üzerine soğutma fanı eklenerek yatakların optimum şekilde soğutulması sağlanmıştır. Bu sayede test sürelerindeki sınırlandırmalar minimize edilmiştir.



Şekil 10. Yatak ve Mil Bakımı Genel Görüntüsü

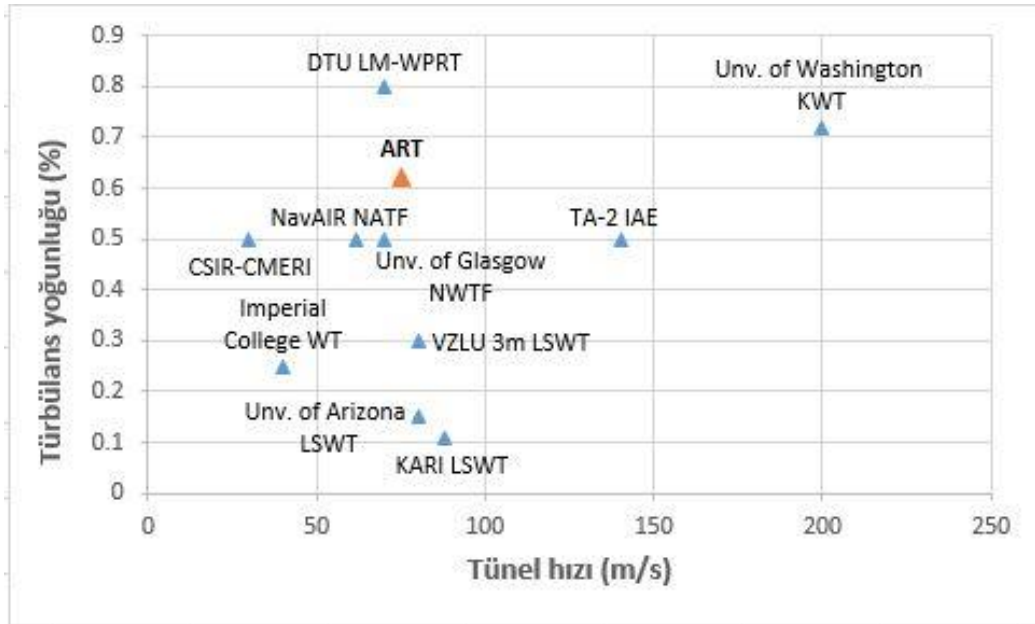
Sabit Sıcak Tel Anemometre Yöntemi

Sabit sıcak tel anemometresi sistemi (*İng.* Constant Temperature Hotwire Anemometry) [Budovsky, 2018] Şekil 11'de görüldüğü gibi tutucu kol uç kısmına yerleştirilerek elektrikle ısıtılan bir ölçerden, ortama taşınım mekanizması ile meydana gelen ısı transferine bağlı olarak hava akım hızının belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Bu sistem kapsamında tünelde 3 adet 3 eksenli sıcak tel ölçeri, 1 adet sıcaklık ölçeri, 3 adet ölçer tutucu, yönelimsel kalibrasyon için açma verme düzeneğini de içeren kalibrasyon cihazı, 1, 6 ve 8 kanallı olmak üzere toplamda 3 adet anemometre cihazı ve veri toplama yazılımı temin edilmiştir. Test düzeneği kurulduktan sonra ilgili yöntem kullanılarak tünelin türbülans seviyesi ölçülmüştür. Ölçüm için sıcak tel ölçerinin her bir telinden 40 kHz örnekleme hızı ile 10 saniye boyunca 3 eksendeki hız verisi toplanmıştır. Ayrıca 10 saniye boyunca sıcaklık ölçerinden de veri alınmış, sıcaklık değişiminin sebep olduğu hatalar giderilmiştir. Veri toplama işlemi her bir hız için 10'ar defa tekrarlanmıştır. Kalibrasyon aşaması da dâhil olmak üzere veri toplanması sırasında çok kanallı CTA cihazında 10 kHz alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Bu sayede 10 kHz üzeri sinyaller toplanan veriden ayıklanarak örtüşme (*İng.* Aliasing) probleminin önüne geçilmiştir.



Şekil 11. Tutucu Kol Ucuna Bütünlenen Sabit Sıcak Tel Anemometre Ölçeri

Yapılan ölçümler sonucunda tünelin ekstenel türbülans seviyesi yaklaşık %0.15 civarında, toplam türbülans seviyesi ise yaklaşık %0.60 bulunmuştur.



Şekil 12. ART'deki Türbülans Seviyesinin Diğer Rüzgâr Tünelleriyle Karşılaştırılması

Şekil 12 incelendiğinde ART'nin çeşitli ülkelerdeki farklı rüzgâr tünelleri ile rekabet edebilecek türbülans şiddetine sahip olduğu görülmektedir. Grafikte görülen tünel hızıyla türbülans şiddetinin ölçüldüğü hız değeri ifade edilmektedir. ART'de türbülans şiddetini azaltmak amacıyla 3 adet akım düzenleyici perde bulunmaktadır.

64 Kanallı Minyatür Basınçölçer

Model yüzeyinden basınç ölçümü yapılabilmesi amacıyla 64 kanallı basınç tarayıcı sistemi temin edilmiştir. Ölçer limiti ± 1 psi olup tünelin çalıştığı tüm hızlarda kullanıma elverişlidir. Temin edilen çok kanallı basınçölçer veri toplama sistemiyle Ethernet bağlantısı aracılığıyla haberleşmektedir. Testler esnasında diğer ölçerler ile eş zamanlı veri toplayabilecek şekilde veri toplama yazılımına entegre edilmiştir. Çok kanallı basınçölçer, yaklaşık olarak 90 mm x 30 mm x 40 mm boyutlara sahip olup test modeli büyüklüğüne bağlı olarak istenmesi durumunda test modeli içerisine entegre edilebilen minyatür bir sistemdir. Basınç ölçümü yapılmak istenen nokta ile basınçölçer üzerindeki ölçüm portları arasındaki hava hattı ise 1.067 mm iç çapındaki standart esnek basınç ölçüm hortumları ile sağlanmaktadır. ± 1 psi aralığında çalışabilen sistemin hassasiyeti tam ölçüm aralığının %0.06'sı mertebesinde. Ölçer 64 kanalın tamamının kullanımı durumunda kanal başına 850 Hz değerinde veri toplama hızına sahipken 16 kanala kadar olan hızlı modda kanal başına 2500 Hz değerinde veri okuyabilmektedir. Yeni sistemin sağladığı teknolojik kazanımlar ile ısınma veya sıfırlama ihtiyacı kaynaklı test kesintileri önemli ölçüde azaltılmış ve tünel

üretkenliğine olumlu katkı sağlanmıştır. Çoklu basınçölçerler Ankara Rüzgâr Tüneli'nde en fazla iç balans ile hava aracının aerodinamik özelliklerinin tespit edilmesi sırasında kavite basıncının ölçülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Kavite basıncı ölçümleri ile ilgili açıklama takip eden bölümlerde verilmiştir. Yeni temin edilen minyatür çoklu basınçölçerin çok düşük basınç farklarını tespit edebilecek yetenekte olması bu gibi düşük basınç farklarının ölçüldüğü testler için önemlidir. Kavite basıncı ölçümü haricinde ise çoklu basınçölçerin Ankara Rüzgâr Tüneli'ndeki ana kullanım alanları modellerin yüzey basınç dağılımının tespiti ve takip eden bölümde anlatılmakta olan basınca duyarlı boya yöntemi uygulamasında filtrelenmiş verinin interpolasyonudur. Tünelde kullanılan minyatür çoklu basınç ölçer sistemi Şekil 13'te gösterilmektedir.



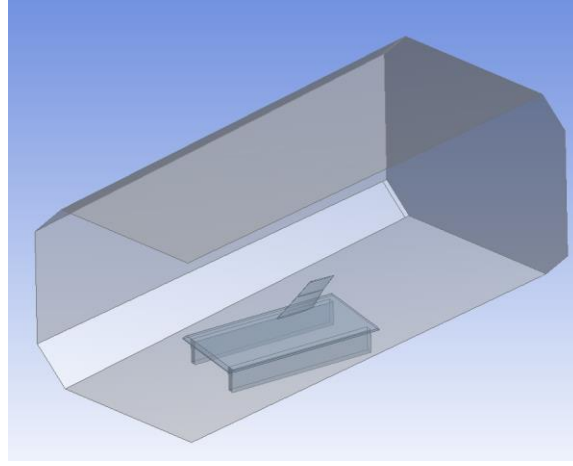
Şekil 13. 64 Kanallı Çoklu Basınçölçer

Basınca Duyarlı Boya Yöntemi

Ankara Rüzgâr Tüneli'nde geleneksel akım görüntüleme yöntemleri olarak sayılabilecek duman, yağ ve iplikçik uygulamaları ile görüntüleme kabiliyetlerine ek olarak basınca duyarlı boya yöntemi (*İng.* Pressure Sensitive Paint) de kullanılabilir. Bu yöntem ile test edilen modelin ilgi duyulan yüzeylerinde veya modelin tamamında basınç bilgisi elde edilebilmektedir. Ancak yöntemin henüz görece olarak yeni ortaya çıkmasından dolayı düşük hızlı rüzgâr tüneli uygulamalarında [Engler vd., 2002] verilerde oluşan gürültü miktarı gibi kısıtlara sahip olduğu bilinmektedir.

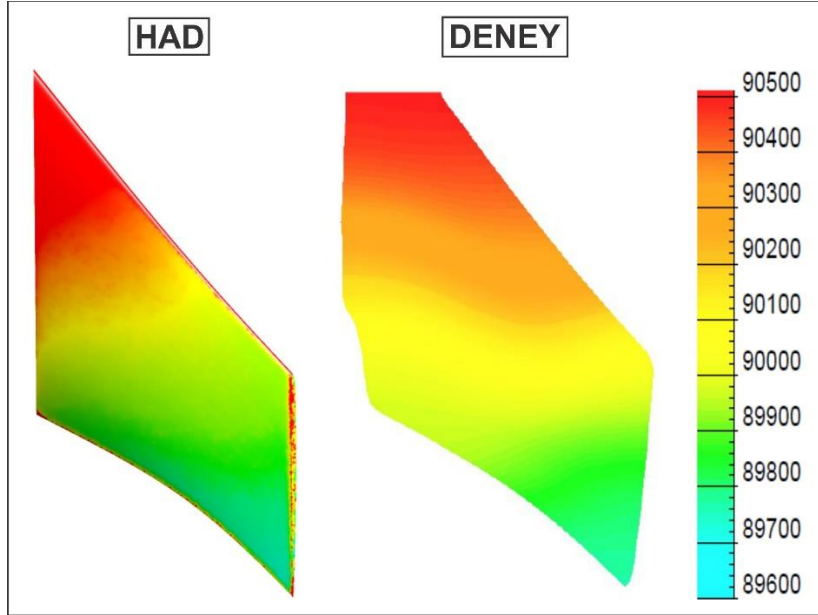
Basınca duyarlı boya [McLachlan & Bell, 1995] yöntemi temel olarak çevresindeki oksijen basıncına duyarlı luminesans moleküllerinin özel olarak üretilmiş polimer yapılı oksijen geçirgen bir boyanın içine gömülmesiyle model yüzeyinin bu boyayla kaplanmasından ve uygun dalga boyundaki bir ışık kaynağıyla aydınlatılarak uyarılmasından oluşmaktadır. Ancak uygulanan boyanın ışığa tepkisi sıcaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Bu etkinin ortadan kaldırılması için ART'de Binary PSP olarak adlandırılan yöntem kullanılmaktadır. Binary PSP oksijene duyarlı luminesans molekülüne ek olarak boya içerisinde oksijene duyarlı olmayan referans molekülü de içerir. Uyarıldıktan sonraki ışık yayma miktarları farklı ancak sıcaklığa duyarlılıkları aynı olan bu iki molekülden (*İng.* Dual luminophore) veri olarak çalışan Binary PSP bu verileri oranlayarak elde edilen basıncın sıcaklıktan bağımsız olmasını sağlamaktadır. Farklı yapıdaki moleküllerden gelen ışık sinyalleri CCD kamera kullanılarak ayırt edilmektedir.

Bu yöntem kullanılarak tünelde basınca duyarlı boya testi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar HAD analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 14. HAD Analizinde Kullanılan Tünel Test Odası ve Model Geometrisi

Test -7° hücum açısında ve 0.2 Mach değerinde bir adet kamera ve 3 adet LED kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testten önce yapılan ayarlamalarda LED ışıkların her fotoğraf için 400 milisaniye boyunca yanması, toplamda 200 fotoğraf alınması ve her 50 fotoğrafın ortalaması alınarak tek bir fotoğraf şeklinde verilmesi kararlaştırılmıştır. Bu nedenle test sonrası işlemlerde 4 fotoğraf kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 15'te gösterilmektedir.



Şekil 15. Test ve HAD Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sonuçlar karşılaştırıldığında basınç konturlarının dağılımının birbirine benzer olduğu görülmektedir. Ancak HAD analizlerinde, test sonuçlarında tespit edilmeyen ve kanadın tüm hücum kenarı boyunca ve kanat ucunda görülen yüksek basınç bölgeleri elde edilmiştir. Kanat ucunun oldukça kavisli ve eğri şeklinde bir yüzeye sahip olmasından dolayı test esnasında LED ışıklarının bu bölgeyi doğru şekilde aydınlatamamasının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Tünelde elde edilen ilk test sonuçları tatmin edici olmakla birlikte geliştirilmeye gereksinim duymaktadır. Bu kapsamda basınç duyarlı boya yönteminin geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Duman, Yağ ve İplikçik Yöntemi

Duman testleri tünelde yer alan duman makinesi kullanılarak test odası içerisinde bulunan yetkili personel tarafından modelin istenilen bölgelerine verilmektedir. Bu nedenle duman testlerinde yüksek rüzgâr hızlarına çıkılmamaktadır. Duman testlerinde akış karakteristiklerinin daha net olarak görülebilmesi amacıyla duman verilen bölgeler lazerle aydınlatılarak da testler yapılabilmektedir. Lazerle aydınlatılarak yapılan testlerde model üzerinde oluşan girdap yapıları net bir şekilde yakalanabilmektedir.

Tünelde gerçekleştirilen yağ ile akış görselleştirme testlerinde 80 numara şanzıman yağı kullanılmaktadır. Yağ kaolin ile karıştırılarak kıvamının tutturulması amaçlanmaktadır. Kaolin ile

karıştırılan yağın istenen kıvama gelip gelmediğinin anlaşılabilmesi amacıyla yağ metal bir yüzeye sürülerek gözlemlenmektedir. Yağın model yüzeyinden akmayacak kadar koyu, akış hareketlerine uyum sağlayabilecek kadar seyrek bir kıvamda olması amaçlanmaktadır. Genelde yağın modelin tüm yüzeyine homojen bir şekilde sürülmesi amaçlansa da tünelde gerçekleştirilen testlerde edinilen tecrübeler kapsamında akışı ilk gören burun ve hücum kenarı gibi kısımlara bir miktar fazla, modelin arka tarafındaki yerlere ise daha az yağ sürülmektedir. Ayrıca yağın yere akmasını önlemek amacıyla modelin alt tarafına daha yoğun kıvama getirilmiş yağ da sürülmektedir.

İplikçikler modelin tamamına veya belirli kısımlarına yapıştırılarak istenilen bölgedeki akış karakteristikleri görünür hale getirilmektedir. Model boyutlarına göre değişmekle birlikte iplikçiklerin boyu ve aralarındaki mesafe genellikle 2 cm olarak ayarlanmaktadır. Tünel aydınlatması ve model rengine göre iplikçikler beyaz veya kırmızı renkte kullanılmaktadır. Test odası içerisine mavi ışık verilerek test yapıldığı durumlarda iplikçikler beyaz renkli, diğer durumlarda kırmızı renkli olarak seçilmektedir. İstenilen bölgelerde kaliteli ve net bir şekilde akış karakteristiklerinin yakalanarak video çekilebilmesi amacıyla test odası içerisinde bulunan üç adet kamera ile kontrol odası penceresine yerleştirilen bir fotoğraf makinesiyle birlikte test yapılmaktadır.



Şekil 16. Tünelde Gerçekleştirilen Duman, Yağ ve İplikçik Testleri

Açıölçerler

Test öncesi hazırlıklar ve test esnasındaki hassas açı ölçümü için iki farklı tip açıölçer kullanılmaktadır. Bunlar Şekil 17’de verilen tek eksenli Wyler marka açıölçer ile iki eksenli Jewell marka açıölçerdir.



Şekil 17. Tek Eksenli (Sol) ve İki Eksenli (Sağ) Açıölçer

Tek eksenli açıölçer genellikle test öncesi hazırlıklar kapsamında test modelinin tutucu kola mekanik olarak doğru şekilde bütünlenmesi ve yunuslama ile yuvarlanma eksenlerinde modelin sıfır konumunun tespit edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Mutlak ve rölatif açı ölçüm modlarında çalışabilen Wyler marka tek eksenli açıölçere ait teknik özellikler Tablo 3’te verilmiştir.

İki eksenli açıölçer ise hava aracı testlerinde model içerisine yerleştirilerek yunuslama ve yuvarlanma eksenlerindeki model oryantasyonunu test sırasında sürekli olarak veri toplama yazılımına bildirmektedir. Veri toplama yazılımı, model hareketlendirme sistemine verilen hareket komutu sonucunda modelin istenen açıya gelip gelmediğini iki eksenli açıölçer cevabına göre değerlendirerek, model hareketlendirme sisteminin hareketine devam etmesi veya hareketini sonlandırması kararını vermektedir. Bu algoritma iki eksenli açıölçerin iç balans ile ölçüm esnasında veri toplama hızıyla uyumlu olacak bir hızda ölçüm yapabilmesini gerektirmektedir. Jewell marka iki eksenli açıölçer bahsedilen bu yeteneğe sahiptir. Ayrıca ölçerdeki termal

genleşmeler sebebiyle doğacak ölçüm hatalarını düzelten entegre sıcaklık ölçerleri mevcuttur. RS-485 bağlantısı kanalıyla veri toplama sistemi ile senkronize çalışabilen ölçer yaklaşık olarak 50 mm x 57 mm x 43 mm boyutlarında olup test modeli içerisine bütünlenebilmektedir. Jewell marka iki eksenli açıölçerin teknik özellikleri de Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Açıölçerlerin Teknik Özellikleri

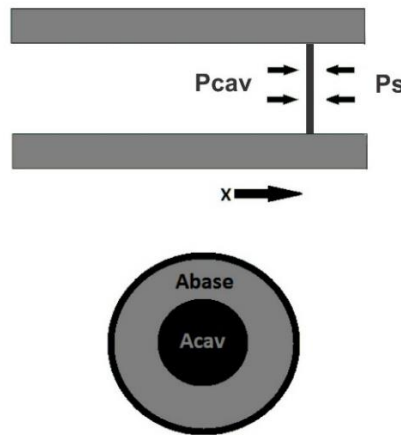
Özellikler	Wyler tek eksenli açıölçer	Jewell iki eksenli açıölçer
Hassasiyet	0.0014°	0.015°
Ölçüm Aralığı	+/- 45°	+/- 60°
Çalışma Sıcaklığı	0/+40 °C	-40/+85 °C

Veri Analizi

Testten sonra uygulanan veri analizi kapsamında tutucu kol düzeltmesi, eksenel kuvvet düzeltmesi ve moment taşıma işlemi yapılmaktadır. Tutucu kol düzeltmesi model hareketlendirme sistemindeki yay sektörünün kuvvet ve moment katsayılarına olan etkisinin çıkarılabilmesi amacıyla, eksenel kuvvet düzeltmesi ise kavite ve taban basıncından dolayı uygulanmaktadır. Aerodinamik moment veriler balans merkezinde ölçüldüğünden dolayı bu veriler model üzerinde müşteri tarafından talep edilen herhangi bir noktaya taşınarak değerler güncellenmektedir.

Şekil 6'da görülen yay sektörünün devreye alınmasından sonra test odası içerisinde yarattığı akış karakteristiklerinin tespit edilebilmesi amacıyla HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Yay sektörünün tutucu kolun alt kısmında basınç alanı oluşturduğu tespit edilmiş ve bunun kuvvet ve moment verilerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamdan yay sektörünün kuvvet ve moment katsayılarına olan etkisinin tespit edilebilmesi ve bu etkinin test sonuçlarından çıkarılabilmesi amacıyla model 0° ve -180° yuvarlanma açısına getirilerek değişen koşullarda testler gerçekleştirilmektedir. Bu testler tünelde yapılan her testten önce uygulanmaktadır. Her iki yuvarlanma açısında elde edilen kuvvet ve moment katsayıları karşılaştırıldığında yunuslama momenti katsayısı ile normal kuvvet katsayısı dışındaki katsayılardaki değişimin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle sadece yunuslama momenti ve normal kuvvet katsayılarına tutucu kol düzeltmesi uygulanmaktadır. 0° ve -180° yuvarlanma açısında elde edilen katsayıların grafikleri birbiriyle karşılaştırıldığında tüm hücum açıları boyunca grafikler arasındaki farkın sabit kaldığı görülmüştür. Her iki katsayı için de bahsedilen ortalama fark hesaplanarak balans ölçümlerine bu fark miktarı eklenmekte ve testler boyunca bu şekilde düzeltme gerçekleştirilmektedir.

Eksenel kuvvet düzeltmesi Şekil 18'de verilen basınç değerleri kullanılarak yapılmaktadır. Modelin arka tarafından ölçülen kavite ve taban basıncı değerleri gösterge basıncıdır. Atmosfer basıncı kontrol odası içerisinde bulunan ve 0-20 psi basınç aralığında ölçüm yapabilen SETRA marka mutlak basınç dönüştürücüsü kullanılarak ölçülmektedir. Test odasının atmosferik ve kapalı olmasından dolayı tünelin çalıştığı hızlarda statik basınç ile atmosfer basıncı arasında kayda değer bir fark olmamaktadır.



Şekil 18. Kavite ve Taban Basıncı Düzeltmesi

SONUÇ

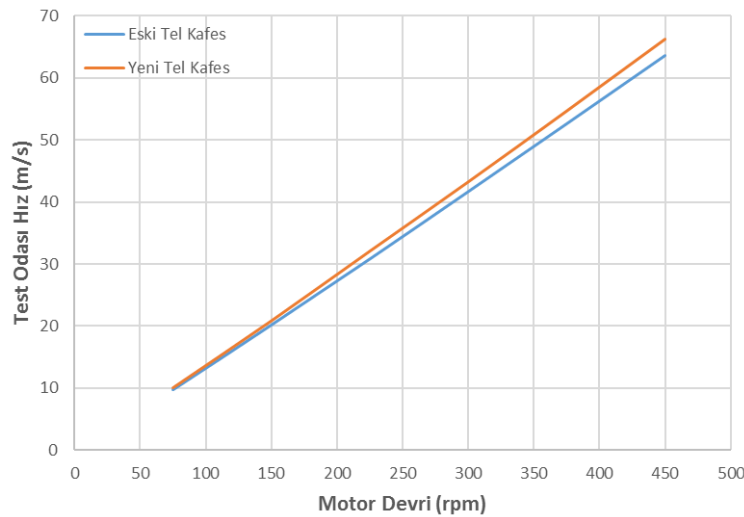
Ankara Rüzgâr Tüneli'nde gerçekleştirilen modernizasyon ve yetenek artırımı faaliyetleri sonucunda eski sistemde açı değişimi ve yataklama sistemindeki sıcaklık sınırlamalarından dolayı

günlük 4-5 civarında gerçekleştirilebilen test koşu sayısı yeni model hareketlendirme sistemi kullanılarak 20-25 seviyelerine çıkarılmıştır. Bu sayede günlük test koşu sayısında ciddi bir artış sağlanmıştır. Eski sistemde modele mekanik olarak verilebilen açı ayarlamaları yeni sistemle birlikte dijital hale getirilerek testler sırasında hücum açısı $\pm 0.015^\circ$, yana kayma açısı ve yuvarlanma açısı ise $\pm 0.025^\circ$ hassasiyetle ölçülebilmektedir. Ayrıca daha önceki durumda yapılması mümkün olmayan sürekli tarama senaryosu yeni sistemle mümkün hale gelmiştir. Tablo 4'te eski ve yeni durumun karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4. Yeni ve Eski VTS Yazılımı Test Süresi Karşılaştırması

Ölçüm Senaryosu	Eski VTS (dk)	Yeni VTS (dk)	Hızlanma (oran)
Hücum Açısı Dur-Kalk Tarama (-10,+30 derece arasında)	20	10	2
Hücum Açısı Sürekli Tarama (-10,+30 derece arasında)	x	3.5	x
Dara Alma İşlemi (-10, +30 derece arasında)	15	3	5

Şekil 19'da sol tarafta eski ve yeni güvenlik perdeleri takılı olduğu durumlarda motor devrine bağlı olarak gerçekleştirilen test odasındaki hız ölçümü karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi yeni tel kafes yüksek motor devirlerinde elde edilen hız miktarını artırmıştır. Yeni güvenlik perdesi özellikle 450 d/d motor devrinde test odası içerisindeki hızda %4'lük bir artış sağlamıştır.



Şekil 19. Eski ve Yeni Güvenlik Perdelerinin Test Odasındaki Hıza Etkisi

Eski türbülans perdelerinin bulunduğu durumda 75 m/s rüzgâr hızında 0.93% olarak ölçülen toplam türbülans seviyesinin perdeler değiştirildikten sonra aynı hızda tekrar ölçüldüğünde 0.6% civarına düştüğü tespit edilmiştir.

Ankara Rüzgâr Tüneli'nde yapılacak gelecek çalışmalarda kalibrasyonu tamamlanan dış balans sisteminin test odasında model bağlantı destekleri tasarlanarak ürettirilecek ve sistem aktif olarak kullanıma hazır hale getirilecektir. Basınca duyarlı boya sisteminin tünelde gerçekleştirilen testlerde endüstriyel olarak kullanılması sağlanacaktır.

Kaynaklar

- Budovsky, A. D., Sidorenko, A. A., Polivanov, P. A., Kornev, E. V., Salenko, S. D., & Obuhovsky, A. D. (2018). Three-component constant temperature anemometer CTA3-2: Calibration and application. *AIP Conference Proceedings* 2027, 3–10.
- Davis, G. D. V. (1964). the Flow of Air Through Wire Screens. In *Hydraulics and Fluid Mechanics* (pp. 191–212). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-010291-7.50017-3>
- Engler, R. H., Mérienne, M. C., Klein, C., & Le Sant, Y. (2002). Application of PSP in low speed flows.

Aerospace Science and Technology, 6(5), 313–322. [https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(02\)01168-9](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(02)01168-9)

McLachlan, B. G., & Bell, J. H. (1995). Pressure-sensitive paint in aerodynamic testing. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10(4), 470–485.

Scheiman, J. (1981). Comparison of Experimental and Theoretical Turbulence Reduction Characteristics for Screens, Honeycomb, and Honeycomb-Screen Combinations. *NASA Technical Paper*, December 1981.