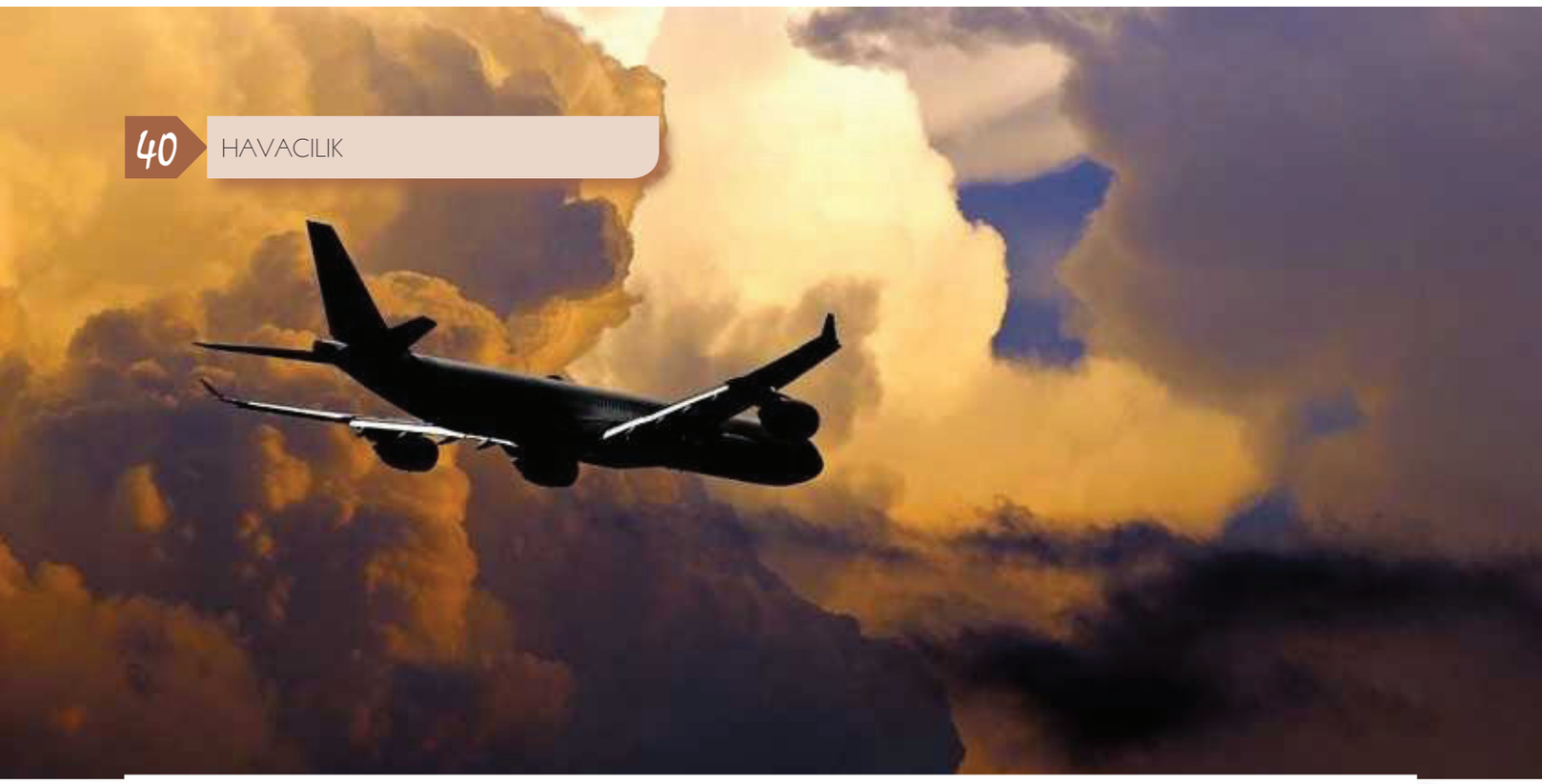


HAVA ARACI TASARIMINDA TÜRBÜLANSIN ÖNEMİ

Hediye Atik[1]

1. GİRİŞ: TÜRBÜLANSIN DOĞASI

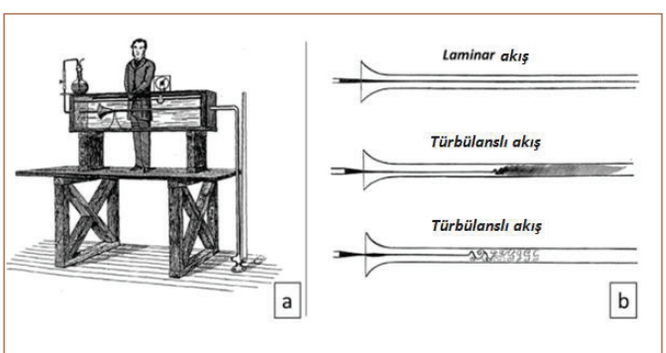
Akışkanlarda görülen türbülans günlük hayatımızda bir çok farklı durumlarda karşımıza çıkmaktadır. Doğum günü mumları söndürüldüğünde çıkan dumanın hareketini, sonbaharda yere düşen yaprakların rüzgarda savruluşunu, su dolu lavaboyu boşaltırken suyun hareketini bir çoğumuz gözlemlemiştir. Türbülans, birçok farklı şekillerde hayatımızı kolaylaştırmakta ve zenginleştirmektedir. Bu sebeple türbülans, uzun yıllardır üzerinde düşünülen ve halen çalışılan araştırma konuları arasında bulunmaktadır. İtalyan Rönesans bilim insanı ve sanatçı Leonardo da Vinci'nin suyun havuza dökülmesi sırasında sudaki türbülansı, eskizinde yorumlayışı Şekil 1'de görülmektedir.

Şekil 1. Leonorda da Vinci'nin Eskizi, Kare Şeklindeki Açıklıktan Suyun Havuza Dökülüşü [1]

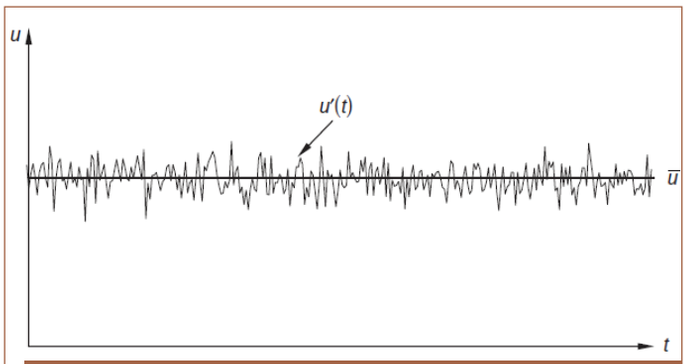
[1] Dr., Doktor Öğretim Üyesi, Atılım Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü - *hediye.atik@atilim.edu.tr*

Bir çok mühendislik problemini ilgilendiren akış rejimi, türbülanslı akıştır. Bu sebeple, araştırıcıların teorik ilgisinin yanı sıra mühendisler için türbülanslı akışı anlamak ve etkilerini yakalamak, birçok günlük problemlerin çözümünde kritik öneme sahiptir. Türbülanslı akışın tersi olan laminar akış, serbest akış özelliklerine veya akışın üzerinden geçtiği yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı olarak türbülanslı akışa geçmekte, karışık ve rastlantısal davranışlar göstermektedir. İrlandalı bilim insanı Osborne Reynolds, 1883'te yaptığı deneysel çalışmada, akışın laminar veya türbülanslı olmasını etkileyen değişkenleri belirlemiş ve tüm bu değişkenleri içeren birimsiz bir sayı tanımlamıştır. Reynolds sayısı olarak isimlendirilen bu sayı, akıştaki atalet kuvvetleri ("inertia forces") ile akışmazlık kuvvetleri ("viscous forces") arasındaki oranı göstermektedir. Düşük Reynolds sayısında akışmazlık kuvvetleri büyük olurken, yüksek Reynolds sayısında ataletsel kuvvetler büyük olmaktadır. Gerçekleştirilen bu deneyde, laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin Reynolds sayısının belli bir değerin üzerine çıkması ile olduğu gösterilmiştir. Şekil 2'de Osborne Reynolds tarafından yapılan test düzeneği ve farklı Reynolds sayılarında yapılan gözlemler görülmektedir. Düşük Reynolds sayılarında akışta doğal olarak oluşan bozuntular akışmazlık kuvvetlerinin büyük olmasından dolayı yok olurken, yüksek Reynolds sayılarında ataletsel kuvvetler bu bozuntuları büyüterek türbülanslı akışa geçilmesine neden olmaktadır.

Türbülans, akışkanın hareketi sırasında görülen rastlantısal, düzensiz, karmaşık üç boyutlu girdap hareketleriyle tanımlanabilir. Akış içerisindeki rastlantısal bu davranışlar, türbülanslı akış içerisinde herhangi bir noktada yapılan hız ölçümlerinde (bkz. Şekil 4) görülebilmektedir. Türbülanslı akış gözlemleri, dönen akış yapılarının ("eddies") varlığına işaret etmektedir. Bu yapılar, farklı boyut

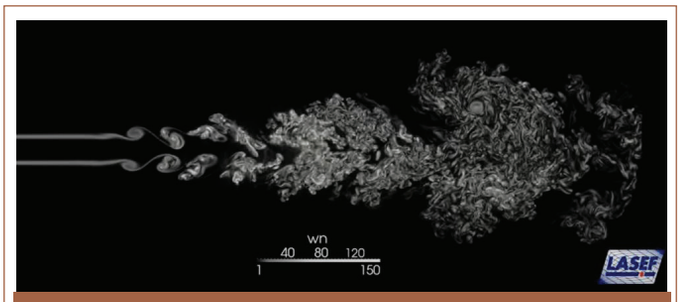


Şekil 2. Osborne Reynolds Tarafından Yapılan Türbülanslı Akış Deneyi



Şekil 3. Türbülanslı Akış İçerisinde Bulunan Bir Noktada Hız Dalgalanması [2]

ve hız büyüklüklerine sahip olmaktadır. Büyük yapılar, serbest akışla benzer hız ve boyut büyüklüğüne sahiptir. Bu özellik ile, büyük yapılarda atalet kuvvetleri akışmazlık kuvvetlerine göre baskın olmaktadır. Serbest akış içerisinde bulunan hız değişimleri, akışkanın kesme ve doğrusal gerilim ("shear and linear strain") ve dönme gibi hareketlerinden dolayı uzamasına, türbülans yapılarının serbest akıştaki enerjiyi alarak akış içerisindeki hareketini sürdürmesini sağlar. Bu olay girdap uzaması ("vortex streching") olarak adlandırılır. Girdap uzaması olayı esnasında, açısal momentum korunur ve uzama işi serbest akıştaki büyük yapıların enerjilerinden sağlanır. Büyük türbülans yapıları yeni kararsızlıklar yaratarak daha küçük türbülans yapılarının yaratılmasına sebep olurlar. Böylece akıştaki enerji, büyük yapılardan küçük yapılara aktarılır. Bu işlem, türbülans yapılarının çok küçülerek akışmazlık etkilerinin daha önemli olduğu zamana kadar devam eder. En sonunda da türbülans yapılarının hareketi ısı enerjisine dönüşerek ortadan kayabolur. Büyük türbülans yapılarından küçük türbülans yapılarına olan sürekli enerji aktarımına "energy cascade" denilmektedir. Büyük türbülans yapılarından küçük türbülans yapılarına geçiş Şekil 4'te verilen sayısal bir çalışmada örnek olarak gösterilmiştir.

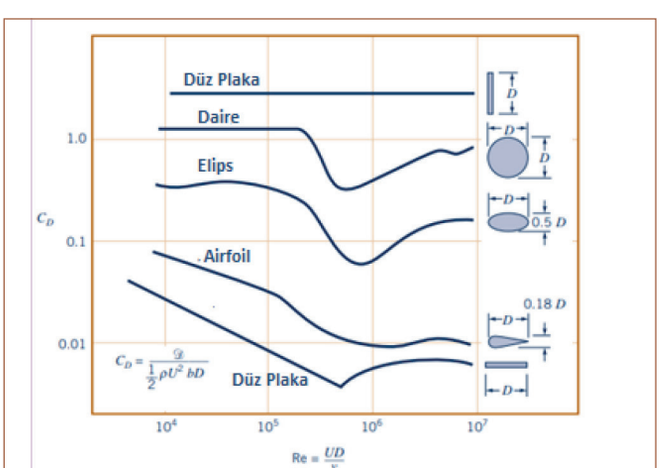


Şekil 4. Türbülanslı Jet Akışı ve Türbülans Yapılarının Hareketi [3]

2. TÜRBÜLANS TAHİMİNİN ÖNEMİ

Türbülans genellikle akıştaki diğer olaylar üzerinde baskın olmakta, enerji yayılımını, karışımını, ısı taşınımını, ve sürüklenmeyi arttırmaktadır. Bu sebeple, türbülansın iyi anlaşılması ve mühendislik analizlerinde dahil edilerek doğru kullanılması önemli olmaktadır. Türbülansın gözardı edilmesi, hava tahminlerinin yanlış yapılması, akışanısı sistemlerinin tasarımlarının hatalı olması ve dolayısıyla kullanıcı maliyetinin artması, hipersonik araçların tasarımlarında yüksek güvenlik katsayılarının kullanılması, tasarımların test ve prototipler kullanılmadan tamamlanamaması ve yüksek tasarım maliyetleri yaratması gibi sonuçlara yol açacaktır.

Hava ve su araçları tasarımında sürükleme kuvvet katsayısının yeteri doğrulukta tahmin edilmesi önemlidir. Bu sebeple türbülansın akışa dahil edilmesi gerekmektedir. Türbülanslı akışta, içerisinde bulunan türbülans yapıları sebebiyle yüzey ile akışkan arasında sürtünme katsayısında laminar akışa göre artış görülmekte ve sürükleme kuvveti katsayısında sürtünmeden gelen payı arttırmaktadır. Şekil 5'te basit geometriler üzerindeki sürükleme kuvveti katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi görülmektedir. Reynolds sayısının artmasıyla akışın tamamıyla türbülanslı rejime geçmesiyle sürükleme katsayısında önemli değişiklikler görülmektedir. Sürükleme kuvvetinin tahmini ve azaltımı, hava ve su araçlarında kritik öneme sahiptir. Ticari bir uçağın sürüklemesinin %10 azaltımı hava yolu işletmelerinin kar marjininde %30-40'a varan artış yaratması, tasarlanan füze sistemlerinin menzil analizlerinin hassas tahmin edilerek hedefe başarı ile ulaşması gibi sonuçlar yaratacaktır. Bu sebeple, mühendislerin türbülansı anlaması ve doğru şekilde tahmin etmesi, geliştirdikleri sistemlerin verimliliğini arttırmasında kritik öneme sahiptir.



Şekil 5. Reynolds Sayısı ile Sürüklenme Katsayısının Değişimi [4]

3. TÜRBÜLANSLI AKIŞ ANALİZLERİ

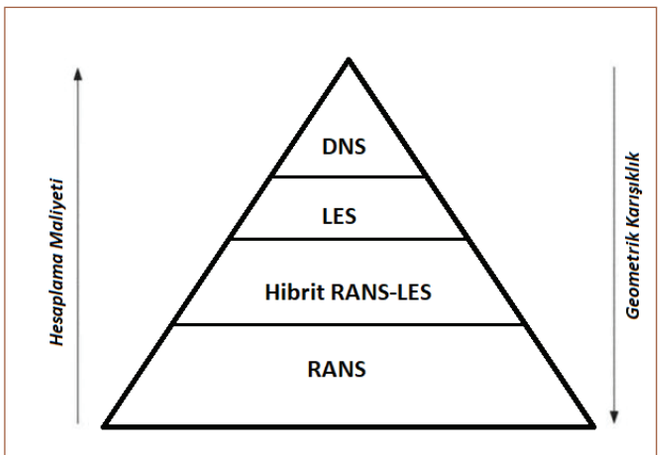
Hava aracı tasarımının ilk safhası olan kavramsal tasarım aşamasında, aerodinamik parametreleri belirlemek için genellikle doğruluk seviyesi daha düşük, analiz sonuçlarının kısa zamanda alındığı analitik, panel/yarı ampirik metodlar kullanılmaktadır. Kavramsal tasarım tamamlandıktan sonraki ön tasarım ve ayrıntılı tasarım aşamalarında akış analizleri, doğruluk seviyesi daha yüksek Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodları ile yapılmaktadır.

Akışkan dinamiğini tarif eden ve yöneten matematiksel denklemler fiziğin korunum yasalarına dayanmaktadır. Kütlenin korunumu, Newton'un ikinci yasası ve termodinamiğin birinci yasası olan kısmi diferansiyel denklemlerin toplamı, Navier-Sokes Denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Laminar akış için bu denklemler, sayısal metodlar kullanılarak çözülmektedir. Türbülanslı akış durumunda bu denklemler halen geçerlidir. Fakat türbülansın doğası gereği 3-boyutlu ve zamana bağlı olması, çok küçük ve büyük türbülans yapılarının bir arada bulunması, yine zamanda bu yapıların çok farklı hızlarda hareket etmesi; sayısal metodları oldukça pahalı yapmaktadır. 0,1x0,1 m kesitinde yüksek Reynods sayısında tipik bir akış hacmi düşünüldüğünde 10 ila 100 μm büyüklüğünde türbülans yapıları içermesi beklenilir. Tüm yapıların hassas bir şekilde hesaplanabilmesi için 10^9 ila 10^{12} sayılarında çözüm ağı noktası kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, en hızlı hareketin 10 kHz olabileceği düşünüldüğünde sayısal çözümlemeler, 100μs zaman adımına ihtiyaç duyacaktır [2]. Mühendislik uygulamalarında geometrilerin karmaşık olması ve Reynolds sayılarının oldukça yüksek olması, bu çözümlerin günümüz teknolojisinde bile gerçekleştirilmesini mümkün kılmamaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin tüm türbülans yapılarını çözecek şekilde yapılması, Doğrudan Sayısal Simülasyon ("Direct Numerical Simulation" (DNS)) yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Pahalı ve uygulanması güç olan DNS yöntemi, endüstrideki mühendisler tarafından kullanılmaktan çok araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır.

Mühendisler, genelde akıştaki tüm türbülans yapılarının davranışını belirlemekten daha çok türbülansın etkilerini

tahmin etmekle ilgilenirler. Akışın zaman ortalamalı özelliklerinin (ortalama hız, ortalama basınç, ortalama gerilim gibi) belirlenmesi, mühendislik uygulamalarında yeterli olmaktadır. Bu nedenle, mühendisler trarafından doğrudan türbülansın çözülmesi yerine türbülansın modellenmesinin yapıldığı analizler gerçekleştirilmektedir.

Şekil 6'da, akış analizlerine türbülansın dahil edilme yöntemleri görülmektedir. Piramitin en tepesinde bulunan DNS yöntemi tüm türbülans yapılarını hassas bir şekilde çözebilirken, hesaplama maliyeti oldukça yüksektir. Türbülans yapılarının büyük olanlarının hesaplandığı ve küçüklerinin modellendiği "Large Eddy Simulation" (LES) yöntemi, DNS yöntemine göre hesaplama maliyeti daha az olsa da karışık geometriler için halen gerçekleştirmesi güç bir yöntemdir. Piramidin en altında ise, hesaplama maliyeti düşük, karmaşık geometrilerde uygulaması en kolay olan ve tüm türbülans yapılarının modellendiği "Reynolds Average Navier-Stokes" (RANS) yöntemi bulunmaktadır.



Şekil 6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizlerinde Türbülansın Hesaplanma Yöntemleri

Türbülanslı akışı doğru bir şekilde hesaplayabilmek için türbülans modellerinin RANS denklemlerine dahil edilmesi gerekmektedir. Genel amaçlı kullanılan akış çözücü yazılımlarının kullandığı türbülans modellerinin, bir çok farklı akış olayında geçerli, ekonomik, basit ve yeteri doğrulukta olması gerekmektedir. En yaygın kullanılan RANS türbülans modelleri, ek olarak çözülmesi gereken taşınım denklem sayısına göre Tablo 1'de görüldüğü şekilde sınıflandırılmaktadır.

"Mixing-length" modelde ek taşınım denklemi çözülmesine gerek olmadığından, bu yöntem, uygulaması kolay ve

Tablo 1. RANS Türbülans Modelleri

Türbülans Modeli	Ek Taşınım Denklem Sayısı
Mixing Length Model	Sıfır (0)
Spalart Almaras Model	Bir (1)
k-e Model	İki (2)
k-ω Model	İki (2)
Reynolds Stress Model	Yedi (7)

hesaplama bütçesi bakımından en ucuz olandır. Bu model, akış yönünün çok değişmediği 2-boyutlu akışlarda iyi tahminler vermektedir. Fakat sınır tabaka ayrılması ve dönünün fazla olduğu akışları iyi tahmin edememektedir.

"Spalart-Allmaras" modeli de kinematik türbülans akışmazlığı ("kinematic eddy viscosity") parametresi için taşınım denkleminin çözüldüğü, göreceli basit, 1-denklemli türbülans modelidir. Bu model özellikle havacılık uygulamaları için tasarlanmış ve basınç değişimin arttığı duvar üzeri akışlarda sınır tabaka tahminlerinde oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu model turbomakina uygulamalarında da kullanılan modeller arasındadır. Fakat Spalart-Allmaras modeli, serbest jet akış analizlerinde büyük hatalar vermektedir.

"Standart k-ε" modeli, türbülans kinetik enerji ("Turbulent kinetic energy – k") ve türbülans kinetik enerji yayılım hızı ("kinetic energy dissipation rate - ε") taşınım denklemlerinin çözüldüğü 2-denklemli türbülans modelidir. Bu denklemlerde deneylere dayalı bir çok katsayı bulunmaktadır. Modelin bir çok farklı türbülanslı akışta yeteri doğrulukta çalışması, bu modeli endüstriyel akış ve ısı transferi problemlerinde popüler yapmıştır. Bu modelin zayıf tarafı ise negatif basınç değişimlerinin ve sınır tabaka ayrılmasının olduğu akışlar için duyarsız olmasıdır. Bir başka deyişle, bu model sınır tabaka ayrılmasını daha geç ve daha zayıf tahmin etmektedir. Bu sebeple, dış akış problemlerinde çok fazla kullanılmamaktadır. Standart k-ε modelinin güçlü ve zayıf yönleri tespit edildikçe bu modelin "Renormalization-group" (RNG), "Relizable k-ε" gibi yeni sürümleri çıkartılmıştır.

"Standart k-ω" modeli, türbülans kinetik enerji (k) ve özgül yayılım hızı (ω) taşınım denklemlerine dayalı ampirik bir modeldir. Bu model, negatif basınç değişimlerini ve sınır tabaka ayrılmasını daha iyi tahmin etmektedir. Dezavantajı ise akış çözümünün serbest akış k ve ω değerlerine hassas olamasıdır. Bu sebeple, bu modelin serbest

akışa duyarsız "Baseline" (BSL) ve "Shear Stress Transport" (SST) isimli sürümleri geliştirilmiştir.

"Reynolds Stress" modeli, klasik türbülans modelleri arasında en karışık ve genel olan modeldir. Bu modelde ilk koşul ve sınır koşulların tanımlanması ile birlikte, Reynolds Stress taşınım denklemleri bire bir çözümlenmektedir. RANS denklemlerine ek olarak yedi adet taşınım denkleminin çözülmesi, hesaplama zamanında önemli artışa sebep olmaktadır. Fakat hesaplama zamanındaki ek çaba analizlerde her zaman yüksek hassasiyeti yakalamayı sağlayamamaktadır. Bu nedenle modelin, doğrulaması yapılmamış akış durumları için kullanılması önerilmemektedir.

4. SONUÇ

Hava aracı aerodinamik hesaplamalarında kullanılan geometrilerde bir çok ayrıntı bulunmakta ve geometri üzerinde oluşan karmaşık akış olaylarında farklı büyüklüklerde türbülans yapıları oluşmaktadır. Geometri etrafındaki akışın büyük kısmının ağdasız ("inviscid") olmasına karşın, cisim etrafındaki ağdalı ("viscous") akış, sınır tabaka katmanı dışındaki ve uçağın iz bölgesindeki akışı etkilemektedir.

Hava aracı etrafında oluşan karışık hava olaylarını, Reynolds Stress modelinin özellikle iyi tahmin etmesi beklenilir. Fakat bu modelin, karışık dış akış sayısal analizleri için gerektirdiği zaman düşünüldüğünde, rutin aerodinamik analizlerde kullanımı güç olmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) konusunda çalışan araştırmacılar, havacılık uygulamalarında daha ekonomik metodlar geliştirilmesi üzerine uzun yıllardır çalışmaktadır. Spalart-Allmaras, SST k-ω gibi modeller bu çalışmaların ürünüdür. Günümüzde türbülans modellemesi halen yoğun araştırmaların yapıldığı bir alandır. Farklı kategorilere özel akışlar için türbülans modeli geliştirilmesi ve optimizasyonu için, farklı akış olaylarını çözebilecek ve genel amaçlı türbülans modellerinin geliştirilmesi konularında çalışmalar yürütülmektedir. Bu alanda diğer bir araştıma konusu da laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin modellenmesidir. Aerodinamik parametrelerin bu geçiş sırasında oldukça büyük değişimler gösterdiği düşünüldüğünde laminar-türbülans geçiş modelleri de önemli olmaktadır.

Mühendisler endüstride bir çok farklı akış problemini çalışmaktadırlar. Türbülansın direkt çözümlenmesi oldukça pahalı olduğundan türbülans modellerinin kullanımı zorunlu olmaktadır. Türbülans modellerinin, model olduğu ve belli akış durumları için doğrulandığı unutulmamalıdır. Literatürde bu modellerin başarımı ve kullanımı ile ilgili bir çok çalışma mevcuttur. Uygun model seçimi yapılmadan önce yapılan çalışmaların kontrol edilmesi yararlı olacaktır. Doğru model seçiminin yanı sıra modelin doğru çalışması için kullanıcılar tarafından dikkat edilmesi gereken hususlar da bulunmaktadır. Örneğin, sınır tabaka içerisindeki çözüm ağı özellikleri, türbülans modellerinde kullanılan parametreler, sınır koşulları özellikle hava girişinin ("inlet") olduğu sınır için tanımlanan türbülans değerleri gibi. İlgilenilen akış tümüyle türbülanslı rejimde değilse bir başka deyişle laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin tahmin edilmesi gerekiyorsa, uygun geçiş modelinin ("transition model") kullanılması da önemli olmaktadır.

Türbülans modelleri ve teorisi hakkında ayrıntılı bilgilere ulaşmak için bir çok kaynak bulunmaktadır. Kaynakçada bu kitaplardan bazıları [5-7] verilmiştir. Türbülans konusunda uygulamaya yönelik faydalı olabilecek güncel çalışmalar, Journal of Fluids Engineering, AIAA Journal, International Journal of Heat and Mass Transfer, International Journal of Heat and Fluid Flow, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power gibi dergilerinden takip edilebilir.

KAYNAKÇA

1. **Kemp, M.** 2019. "Leonardo da Vinci's Laboratory: Studies in Flow", Nature 571, 322-323.
2. **Tu J., Yeoh, G. H., Liu C.** 2018. "Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach", ISBN:9780080982779, Butterworth-Heinemann.
3. Lasefist Research Group, "DNS of Planar Jets", https://www.youtube.com/watch?v=HyifY0v9bJQ, 2012
4. **Munson, B. R., Rothmayer, A. P., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W.** 2013. "Fundamentals of Fluid Mechanics", ISBN: 978-1-118-11613-5, John Wiley & Sons, Inc.
5. **Versteeg, H.K., Malalasekera, W.** 2007. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method", ISBN: 978-0-13-127498-3, Pearson Education **Limited.**
6. **Blazek, J.** 2001. "Computational Fluid Dynamics: Principles and Application", ISBN: 008-0432093, Elsevier Science Ltd.
7. **Hoffmann, K.A., Chiang, S.T.** 2000. "Computational Fluid Dynamics, Volume III", ISBN: 0-9623731-6-8, A Publication of Engineering Education System, USA.