

DÜZ PLAKA ŞEKLİNDEKİ BİR KANAT ÜZERİNDE GİRDAP TİPİ TEKİL SAĞANAK ETKİLERİNİN DENEY KARŞILAŞTIRMALI HESAPLAMALI İNCELEMESİ

Arif Cem Gözükara¹
Aselsan, Ankara

Elif Acar², Kübra Soy³, Okşan Çetiner⁴
İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada, düz plaka tipi bir kanat yapısı üzerinde, girdap tipi tekil sağanak etkileri sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiş, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 1×10^4 Re sayısında, düz plaka tipi kanat yapısı üzerinde 0° hücum açısı için, farklı şiddetteki girdap tipi tekil sağanakların, taşıma katsayısının zamanla değişimine ve akışa ait yapılara etkileri değerlendirilmiştir. Referans alınan deneysel çalışmalar İstanbul Teknik Üniversitesi Trisonik Laboratuvarında bulunan su kanalında gerçekleştirilmiştir. Sayısal benzetim çalışmalarında iki farklı yöntem/yaklaşım kullanılmıştır: geciktirilmiş ayrık çevrinti benzetimi (DDES) ve daimi-olmayan Reynolds ortalama Navier-Stokes yöntemi (URANS). Sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar, deneylerden elde edilen sonuçlar ile hem taşıma katsayısının zamanla değişimi, hem de girdaplılık dağılımı ve akış çizgilerinin farklı kesitlerdeki anlık görüntüleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneylerle tanımlı koşullar altında, sayısal çözümlerden elde edilen sonuçların ve deneysel sonuçlar ile belirli bir uyum içerisinde olduğu değerlendirilmiştir. Kullanım kolaylığı, görece düşük hesaplama kapasitesi ihtiyacı gibi avantajları sebebiyle, endüstriyel uygulamalarda, sıkça kullanılan URANS modelinin de bu tanımlı koşullar altında büyük oranda ayrılmış, tutunma kaybının ön planda olduğu akış benzetiminde, deney sonuçlarından çok büyük sapmalar göstermediği söylenebilmektedir. İncelenen durumlarda DDES yöntemi ile elde edilen sonuçların beklendiği gibi URANS yöntemi ile elde edilen sonuçlara kıyasla, deney sonuçları ile uyumunun daha üst seviyede olduğu görülmüştür. Ayrıca, DDES yöntemiyle gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen sonuçlar akışa ait yapıların daha detaylı olarak benzetimini mümkün kılmıştır.

GİRİŞ

DDES yöntemi, türbülans yapılarının modellendiği Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) yöntemine göre, türbülansın belirli ölçekte doğrudan çözümlendiği, büyük çevrinti benzetimi (LES) yöntemiyle elde edilen sonuçlara daha yakın sonuçlar vermektedir. Buna ek olarak, LES yöntemine göre daha az ağ eleman sayısına ihtiyaç duymaktadır. Özetle DDES yöntemi, hesaplama kaynakları ve ağ eleman sayısı gereksinimine ek olarak akış fiziğine dair detayları yakalaması açısından değerlendirildiğinde LES ve daimi-olmayan Reynolds ortalama Navier-Stokes (URANS) yöntemlerinin bir melezi olarak tanımlanabilir [Nishino vd., 2008; Zhang vd., 2019; Yang vd., 2016; Hodara vd., 2016]. Belirtildiği üzere RANS/URANS yöntemlerinde türbülans yapılarının tamamı modellenirken; LES yönteminde ağ yapısının çözünürlüğü çerçevesinde, belirli büyüklüğün üzerindeki türbülans yapıları doğrudan çözümlenmektedir. Ağ ölçeğinin altındaki çevrintiler ise

¹ Kd. Lider Mühendis, E-posta: cgozucar@aselsan.com.tr

² Yüksek Lisans öğrencisi, E-posta: acare17@itu.edu.tr

³ Araştırma görevlisi, Uzay Müh. Böl., E-posta: soy15@itu.edu.tr

⁴ Prof. Dr., Uzay Müh. Böl. E-posta: cetiner@itu.edu.tr

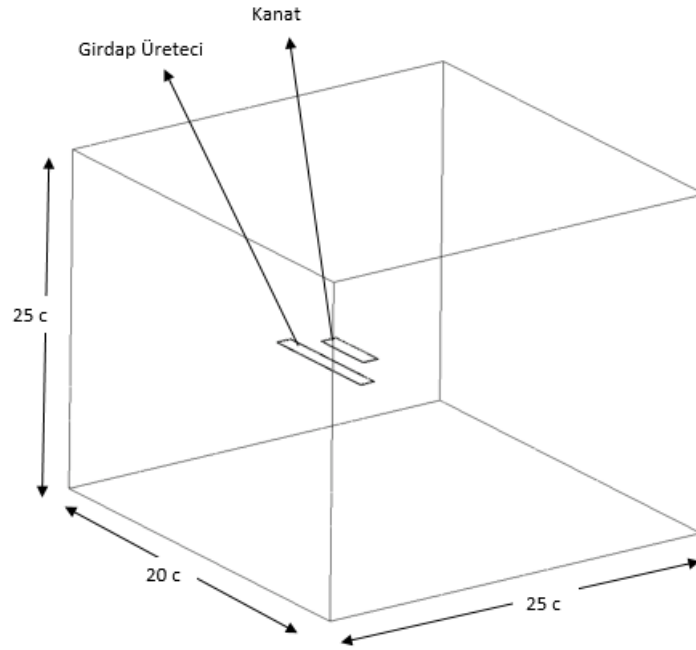
modellenmektedir. DDES yönteminde ise, duvar-sınırlı türbülanslı bir akış probleminde, duvar yakınlığında, URANS benzetim yaklaşımı kullanırken, sınır tabaka dışarısında ise ağ yapısının çözünürlüğünü temel alarak LES yöntemindeki gibi doğrudan çözümleme ve modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır [Yalçın vd., 2020; Gritskevich vd., 2012]. Kullanım kolaylığı ve düşük hesaplama kapasitesi ihtiyacı sebebiyle endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmesine rağmen, yüksek sadakat seviyesine ve akış yapılarının ayrıntılı benzetimine ihtiyaç duyulan durumlarda RANS yöntemleri yetersiz kalabilmektedir [Nishino vd., 2008; Zhang vd., 2019; Visbal vd., 2018]. Buna ek olarak farklı çalışmalarda URANS yönteminin inceleme konusu olan büyük oranda ayrılmış akışların benzetiminde yeterli doğrulukta sonuçlar vermediği de belirtilmiştir [Zhang vd., 2019; Rezaeiha vd., 2019; Visbal vd., 2018]. Sağanak etkileri, dinamik tutunma kaybı gibi ayrılanın baskın olarak gözlemlendiği durumların sayısal benzetiminde, akışın daimi olmayan karakteri sebebiyle genel olarak RANS-LES melez modeller [Hodara vd., 2016; Grubb vd., 2020] sıklıkla kullanılmaktadır. Bunların yanında, daha yüksek sadakat seviyesine ihtiyaç duyulan ayrık akış benzetimlerinde ise LES [Visbal vd., 2018] yöntemine başvurulabilmektedir. Burada yer alan sayısal benzetim çalışmalarında, URANS ve DDES yaklaşımlarının, incelenen tekil girdap tipi sağanak etkilerinin modellenmesindeki etkinliğinin avantaj ve dezavantajları ile birlikte değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

SAYISAL YÖNTEM

Sayısal benzetim çalışmalarının gerçekleştirilmesinde Ansys-Fluent® ticari paket yazılımı kullanılmıştır. Deney ortamı temel basitleştirmeler dışında bir basitleştirme kullanılmadan doğrudan benzetimlenmiştir. 3-Boyutlu olarak gerçekleştirilen analizlerde kullanılan prizmatik akış hacmi ve bu akış hacmi içerisinde konumlandırılmış girdap üretici ve düz plaka tipi kanat Şekil 1'de görülebilmektedir. Sayısal çözümlerde kullanılan prizmatik hacim, duvar ve sınır şartı koşullarının çözümü etkilememesi için yeterli büyüklükte oluşturulmuştur. Bu amaçla hazırlanan akış hacmi 20 veter genişliğinde, 25 veter yüksekliğinde ve 25 veter derinliğindedir. Benzetimlerde, hareketli olan girdap üretici silindirik ayrı bir hacim ağı içerisine alınmış ve bu silindirik hacmin hareketli ve sabit çözüm ağı tarafında kalan yüzeyleri birbirine eşlenerek, birbiri üzerinde kayacak şekilde tanımlanmıştır. Kayar ağ yapısı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözümlerde, girdap üreticinin hareketi açısız hız değerinin zamanla değişimi kullanılarak tanımlanmıştır. Açısız hız değerlerinin zaman ile değişiminde herhangi bir süreksizlik oluşmaması ve gerçek koşulların daha iyi yansıtılması amacıyla, hız değişimi ivmeyi sınırlandıracak şekilde [Eldredge vd., 2009] bir yumuşatma fonksiyonu kullanılarak tanımlanmıştır. Sayısal model içerisinde, açısız hız değerinin zamanla değişiminin tanımlanmasında kullanılan matematiksel ifade, Denklem 1'de verilmiştir.

$$\alpha(t) = A \ln \left[\frac{\cosh(a(t-t_1)) \cosh(a(t-t_4))}{\cosh(a(t-t_2)) \cosh(a(t-t_3))} \right] \quad (1)$$

Denklemden yer alan t_1 değeri, yumuşatma uygulanmamış durumda, açısız hız değerinin artmaya başladığı anı tanımlamaktadır. t_2 değeri, yumuşatma uygulanmadan önce, açısız hız artışının son bularak, sabit kalacağı zaman aralığının başlangıcını ifade etmektedir. Yumuşatma uygulanmamış hız değişim tanımlamasında t_2 ile t_3 anları arasında sabit kalan açısız hız değeri t_3 anından itibaren azalmaya başlamaktadır. Yumuşatma uygulanmamış tanıma göre t_3 anından itibaren azalmaya başlayan açısız hız değeri, t_4 anında sıfır değerine ulaşmaktadır. Denklemden yer alan A ve a sabitleri, açısız hız profilindeki değişimlerin hızını dolayısıyla açısız ivme değerlerini belirlemektedir. Bu çalışmada, girdap üreticinin 2 farklı hareketi sonucunda elde edilen girdap tipi tekil sağanakların incelenmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple, girdap üreticinin yarım turunu 6 boyutsuz zamanda tamamladığı ve girdap üreticinin yarım turunu 4 boyutsuz zamanda tamamladığı iki farklı durum için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



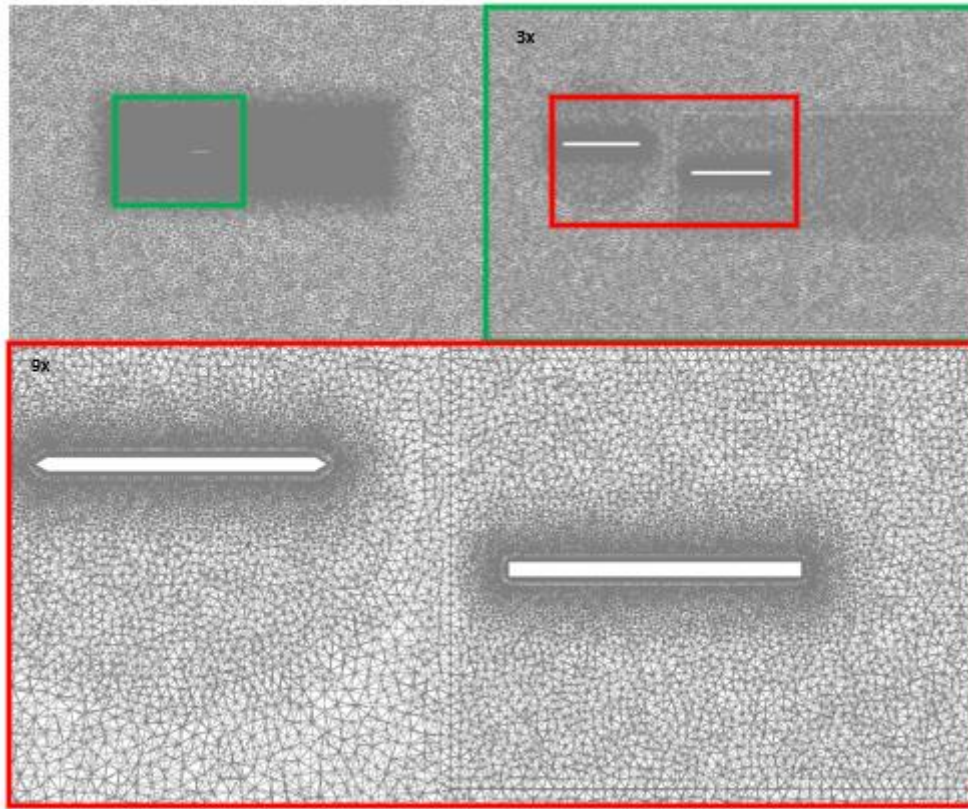
Şekil 1: Akış hacmi içerisinde konumlandırılmış girdap üretici ve kanat

Sayısal çözümlerde, bölgesel olarak yoğunlaştırılmış yapısal olmayan bir çözüm ağı kullanılmıştır. Çözüm ağı oluştururken viskoz etkilerin daha iyi modellenebilmesi amacıyla duvar sınırları üzerinde y^+ değerlerinin 1 mertebesinde olmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Ağ yapısı dört yüzlü (tetrahedral) ve 5 yüzlü üçgen prizmatik elemanlardan oluşmaktadır. Sınır tabaka bölgesinde kontrollü büyüme sağlamak amacı ile 5 yüzlü prizmatik elemanlar kullanılmış olup daha sonra sınır tabaka üzerinden akış hacmi dış yüzeylerine kadar 4 yüzlü hacim elemanları ile uzamsal ayırıklaştırma yapılmıştır. Değişkenlerin uzamsal ve zamansal ayrıştırılmasında ikinci mertebeden şemalar kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarının çözüm ağı yoğunluğu ve zaman çözünürlüğünden bağımsız hale getirilmesi için, farklı yoğunlukta 3 ağ yapısı ile benzetim çalışmaları tekrarlanarak, taşıma katsayılarının değişimleri karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak, elde edilen sonuçların zaman adımından bağımsızlığının değerlendirilebilmesi amacıyla iki farklı zaman adımı değeri ile benzetim çalışmaları tekrarlanmıştır. Mevcut hesaplama altyapısı imkânları ve zaman kısıtları nedeniyle, zaman adımı etkilerinin değerlendirilmesinde iki farklı değer ile deneme yapılabilmektedir. İlerleyen süreçte hesaplamaların zaman adımından bağımsız hale getirilmesi konusundaki çalışmalara devam edilmesi planlanmaktadır. URANS ve DDES çözümlerinde, türbülansın modellenmesi amacıyla $k-\omega$ -SST yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem ile çözülmekte olan Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine ek olarak 2 türbülans denklemi çözülmektedir [Menter, 1994; Gritskevich vd., 2012]. DDES ile gerçekleştirilen benzetimlerde, LES ve URANS modlarının aktif olduğu bölgeler arası geçişin sağlanması ve LES modunun sınır tabaka içerisinde grid yoğunluğuna bağlı olarak, aktifleşmesinin önlenmesi amacıyla bazı geçiş fonksiyonları kullanılmaktadır [Menter vd., 2003; Gritskevich vd., 2012; Spalart vd., 2006]. Mevcut yazılım versiyonunda DDES- $k-\omega$ -SST yöntemi için LES modu ile URANS modlarının aktif olduğu bölgelerin belirlenmesi ve bölgeler arası geçişin tanımlanmasında DDES-Spalart Allmaras [Spalart vd., 2006] modelinden farklı sabit değerler kullanılmaktadır. DDES-Spalart Allmaras yönteminde yer alan geçiş fonksiyonu sabitleri yapısal ağlar üzerinde gerçekleştirilen çözümlerde kullanılmak üzere belirlenmiş olup, yapısal olmayan çözüm ağlarında görece düşük doğrulukta çözümler elde edilmesine sebep olmaktadır. Öte yandan, DDES- $k-\omega$ -SST yönteminde kullanılmakta olan geçiş fonksiyonu katsayıları ise yapısal olmayan çözüm ağları ile görece daha yüksek doğrulukta çözüm elde edilmesini mümkün kılmaktadır [Gritskevich vd., 2012]. DDES yöntemiyle gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, çözümün doğruluğu açısından dezavantajları olsa da, karmaşık geometriler üzerinde daha az işgücü kullanılarak oluşturulabilmeleri nedeniyle, yapısal olmayan ağlar endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Mevcut çalışmada geometrik açıdan karmaşık bir model ile çalışılmamış olsa da,

endüstriyel uygulamalarda DDES yönteminin uygulanabilirliği ile ilgili bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, yapısal olmayan çözüm ağı kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere oluşturulan sayısal modelin sınır şartları, deneysel çalışmalarda kullanılan düzencek ile uyumlu olacak şekilde tanımlanmıştır. Benzetim çalışmaları sıkıştırılmaz akış kabulüne dayanarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümün ihtiyaç ve gereklilikleri sebebiyle, sınır şartları deney düzeneğini birebir yansıtabilecek şekilde tanımlanamamıştır. Örneğin, deney düzeneğinde duvar olan çözüm hacminin yan duvarları, sayısal benzetim modelinde, akış hızı ile aynı hızda kayan duvar olarak tanımlanmıştır. Bu sayede, hacmin yan duvarları üzerinde sınır tabakası oluşumunun önüne geçilmiş ve bu bölgede ağ yoğunluğunun artırılmasına gerek kalmamıştır. Çözüm hacmi ön duvarı, giriş sınırı olarak tanımlanmıştır. Bu sınır şartına URANS yöntemi ile gerçekleştirilen benzetimlerde, deney düzeneği ile uyumlu olacak şekilde türbülans yoğunluğu değeri %0,1 olarak tanımlanmış olup, 1×10^4 Re değerini sağlayacak sabit hız değeri atanmıştır. Benzer şekilde DDES yöntemi ile gerçekleştirilen benzetimlerde de giriş sınırındaki türbülans yoğunluğu ve ortalama hız değeri tanımlanmıştır. URANS yönteminden farklı olarak bu benzetimlerde giriş sınırındaki hız bileşenlerinin çalkantılarının zaman ve uzayda rastgele değişimi türbülans yoğunluğuna uygun olacak şekilde yazılım içerisinde gömülü olan girdap yöntemi [Mathey vd. 2003.] kullanılarak tanımlanmıştır. Çözüm hacminin arka yüzeyi ise çıkış sınırı olarak tanımlanmıştır. Bu sınırdaki, hem URANS hem DDES yöntemiyle gerçekleştirilen benzetimlerde, sabit basınç değeri tanımlanmıştır. Girdap üretici ve kanat yüzeyleri kaymasız duvar olarak tanımlanmıştır. URANS ve DDES yöntemi ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, sonuçlar, girdap üreticinin hareketine başladığı andan itibaren değerlendirilmiştir. Benzetimlerin ilk aşamasında, girdap üreticinin başlangıç konumunda olduğu durum zamandan bağımsız olarak çözülmektedir. Zamandan bağımsız olarak elde edilen bu çözüm, zamana bağlı benzetimler için başlangıç koşulu olarak kullanılmaktadır. Benzetimlerde girdap üretici hareketi, akış giriş sınırı ile kanat firar kenarı arasındaki mesafeyi kat ettikten sonra başlatılmaktadır.

Sayısal Çözüm Ağı Bağımlılığı Çalışması

Gerçekleştirilen çalışmada, çözümün ağ yapısı ile bağımlılığının gösterilmesi amacıyla 3 farklı toplam ağ eleman sayısına sahip çözüm ağı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda kullanılan farklı eleman sayılarına sahip hacim ağları, duvar sınırlarından başlayarak, sabit büyüme oranları ile oluşturulmuş olup, kaba, orta yoğunlukta ve yoğun olarak adlandırılmıştır. Kaba olarak adlandırılan çözüm ağı yaklaşık 30 milyon, orta yoğunlukta olarak adlandırılan çözüm ağı yaklaşık 50 milyon, yoğun olarak adlandırılan çözüm ağı ise yaklaşık 80 milyon toplam hücre sayısına sahiptir. Oluşturulan çözüm ağları için en yüksek eleman sayısı mevcut bilgisayar ve yazılım kapasitesi dâhilinde belirlenmiştir. Çözüm ağlarında hem kanat yapısı hem de girdap üretici yüzeylerindeki ağ boyutu değerleri oransal olarak değiştirilmiştir. Sınır tabaka içerisinde yer alan, prizmatik hücre elemanlarının yüzeyden ilk yüksekliği ve büyüme oranları ise y^+ değerlerinin sabit tutulabilmesi adına, değiştirilmemiştir. Girdap üretici ve kanat yapısı üzerinde yer alan hacim elemanlarının sınırdan ilk yüksekliği girdap üreticinin hareketi boyunca $y^+ \sim 1$ değerini sağlayacak şekilde seçilmiştir. Sınır tabaka içerisindeki hücrelerin büyüme oranı ise bütün ağ yapıları için 1,2 olarak sabit tutulmuştur. Yoğun olarak adlandırılmış en yüksek eleman sayısına sahip çözüm ağının kanat simetri ekseninden alınan kesitin yakınlaştırılmış görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.



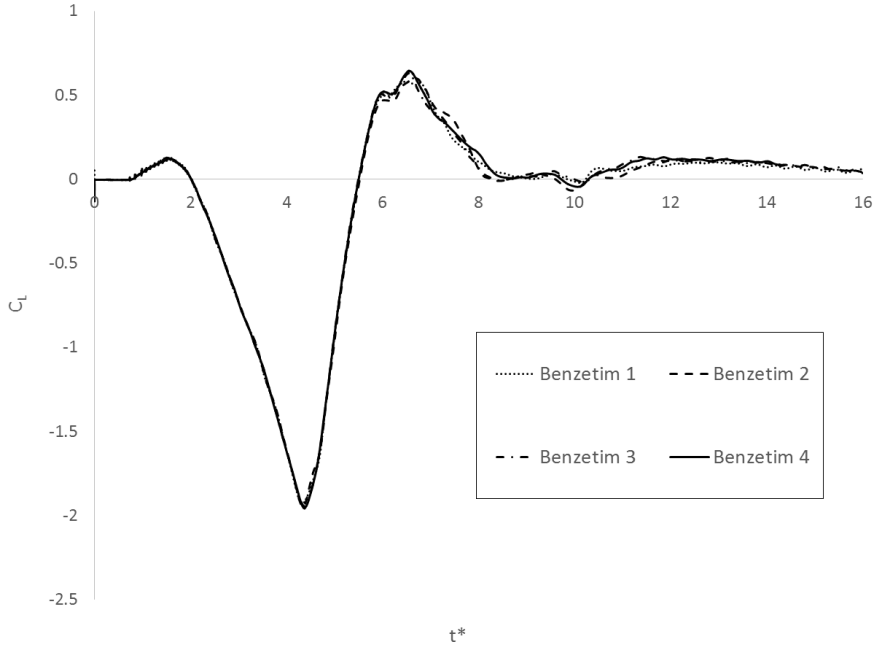
Şekil 2: Yoğun ağ yapısı için, kanat simetri ekseninden alınan kesit üzerinde farklı yakınlıklardan çözüm ağı görünümü

Benzetim çalışmalarında kullanılan ağ yapıları ile birlikte kullanılan maksimum zaman adımı değerinin taşıma katsayısı değişimine olan etkisi de ayrıca değerlendirilmiştir. Zaman adımı değeri çözüm boyunca değişkenlik gösterse de zaman adımı maksimum değeri girdap üretici ve kanat yapısı etrafında Courant sayısının en fazla 1 olmasına izin verecek şekilde sınırlandırılmıştır. Elde edilen çözümlerde Courant sayısı dağılımları farklı anlarda birden fazla kesit üzerinde kontrol edilmiştir. Buna ek olarak, sonuçlara etkisinin anlaşılabilmesi için zaman adımı maksimum değeri, en yüksek ağ yoğunluğuna sahip çözüm ağı için, yarıya düşürülerek, bu değişikliğin taşıma katsayısı üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Farklı yoğunluktaki ağ yapıları ve farklı zaman adımı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen taşıma katsayısı değişimleri Şekil 3'te görülebilir. Ağ yoğunluğu ve boyutlarına URANS yöntemine göre daha duyarlı olması nedeniyle karşılaştırmalarda DDES yöntemi sonuçları kullanılmıştır. Benzetimlerde kullanılan ağ yapısı ve zaman adımlarının taşıma katsayısına olan etkisi, toplam hücre sayısının en yüksek olduğu, maksimum zaman adımı değerinin de en düşük olduğu benzetimin sonuçları referans alınarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda akış süresi boyunca elde edilen en yüksek taşıma katsayısı fark değeri verilmiştir. Benzetimlerde kullanılan ağ yapıları ve zaman adımları ile ilgili bilgiler ile taşıma katsayısında gözlenen maksimum fark değeri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Çözüm ağı bağımlılığı çalışmalarında kullanılan ağ yapısı ve zaman adımı bilgileri ile maksimum taşıma katsayısı farkı.

	Benzetim 1	Benzetim 2	Benzetim 3	Benzetim 4
Toplam hücre sayısı	30 Milyon	50 Milyon	80 Milyon	80 Milyon
Kanat yapısı üzerinde y^+ değeri	~1	~1	~1	~1
Veter boyunca yer alan düğüm sayısı	100	150	200	200
Δt^* (boyutsuz zaman adımı maksimum değeri)	1/500	1/500	1/500	1/1000
Maksimum ΔC_L	0,08	0,10	0,09	-

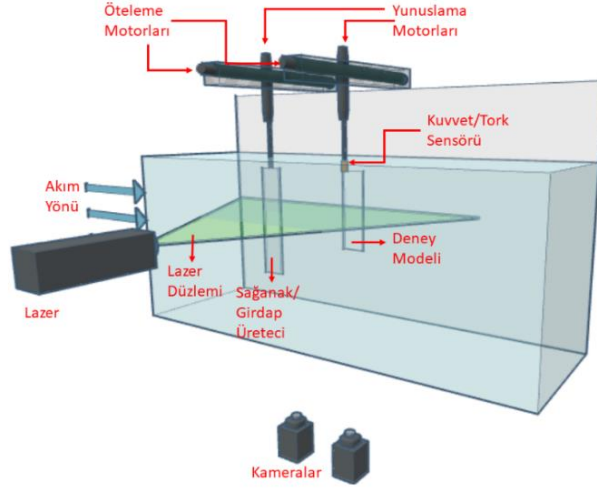
Farklı benzetim çalışmalarından elde edilen, taşıma katsayılarının boyutsuz zamanla değişimine ait grafik Şekil 3'te verilmiştir. Nihai olarak hem DDES hem de URANS yöntemi ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, toplam hücre sayısının 50 milyon civarında olduğu ağ yapısı kullanılmış ve boyutsuz zaman adımı maksimum değeri 1/500 olarak seçilmiştir.



Şekil 3: Farklı yoğunlukta ve ağ eleman sayıları ve farklı zaman adımı maksimum değerleri ile elde edilen taşıma katsayısının zamanla değişimlerinin karşılaştırmalı görünümü

DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada karşılaştırma yapılan deneyler, [Soy vd., 2022] çalışmasından alınmıştır ve İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Trisonik Laboratuvarı'nda bulunan büyük ölçekli, serbest yüzeyli su kanalında gerçekleştirilmiştir. Deney odası kesitleri 1010mm × 790 mm'dir ve deney odasındaki serbest akım hızı 0,1 m/s olarak ayarlanarak Reynolds sayısının 10 000 olması sağlanmıştır. Sağanak üretici ve kanat profili ince dikdörtgen düz plakadır ve su yüzeyine dik olarak yunuslama için kullanılan servo motorlara bağlanmıştır (Bkz. Şekil 4). Servo motorlar modellere yunuslama ile birlikte ötelenme hareketini de sağlamaktadır. Sağanak üretici olan düz plaka, servo motora orta ekseninden bağlı olup, istenilen tekil girdap türü sağanak sayısı kadar saat yönünde yarım tur atırılmaktadır. Bu sağanak üretimini sağlayan plakanın 5 mm kalınlığı, 100 mm veter uzunluğunu ve 500 mm açıklığı vardır ve hücum ve firar kenarları sivriltilmiştir. Kanat profili için kullanılan plakaya ise hücum kenarından bağlı olduğu servo motor ile hücum açısı ayarlamaları yapılabilmektedir ve bu plaka 5mm kalınlığa, 100 mm veter uzunluğuna ve 200 mm açıklığa sahiptir. Bu iki plaka da kullanılan deneysel metodun (Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Sistemi) işlevselliği için ışık geçiren pleksiglastan üretilmiştir. Kanat modelinin orta kesit düzlemi 120 mJ/vuruş maksimum enerjiye sahip Nd-Yag lazeri ile aydınlatılmaktadır. Bu çalışmadaki tohumlama için ortalama 10µm çapında gümüş kaplı cam kürecikler tercih edilmiştir. Lazer ile aydınlatılan kesit alanının görüntü alımı için alana dik, 35 mm odak uzaklığına sahip lensler ile iki adet 10-bit ve 1600 × 1200 piksel çözünürlüğe sahip kamera yerleştirilmiştir. Sonuçlar, akım üstü tarafta olan tek kamera görüntülerine 32 × 32 piksellik pencere ve Dantec Adaptif PIV algoritması kullanılarak çapraz korelasyon uygulanması ile elde edilmiştir. Görüntülerin kaydı sırasında eş zamanlı olarak 6 eksenli ATI NANO-25 IP68 kuvvet/tork sensöründen 1000 Hz'de veri alınmaktadır. Sensör kanadın servo motor bağlantı çubuğu üzerindedir. Deneyler incelenen her bir durumun 5 kez tekrarı ile gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla sunulan sonuçlar için öncelikle ortalama alınmış, sonrasında 1 Hz alt geçiren Butterworth filtre kullanılmıştır. Sonuç olarak kuvvet katsayısındaki belirsizlik ± 0,2083 olarak belirlenmiştir.

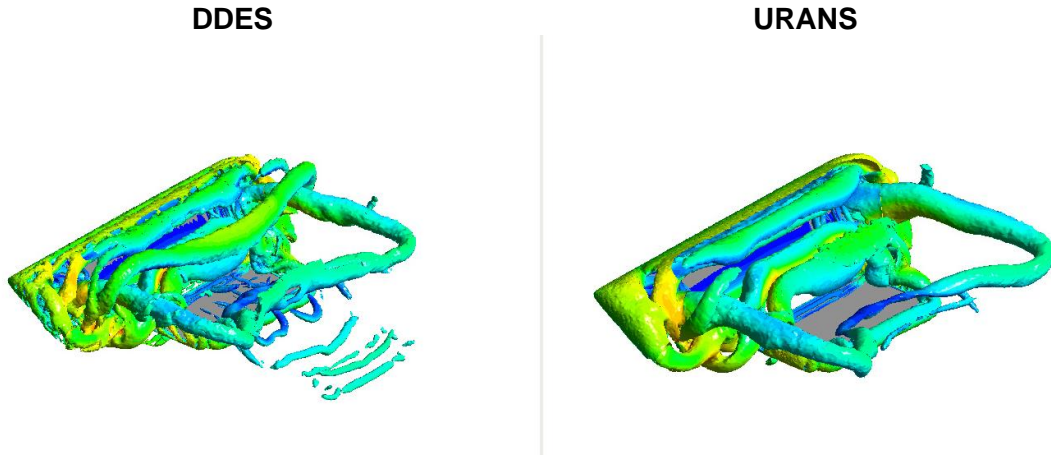


Şekil 4: Deneysel düzenek [Soy vd., 2022]

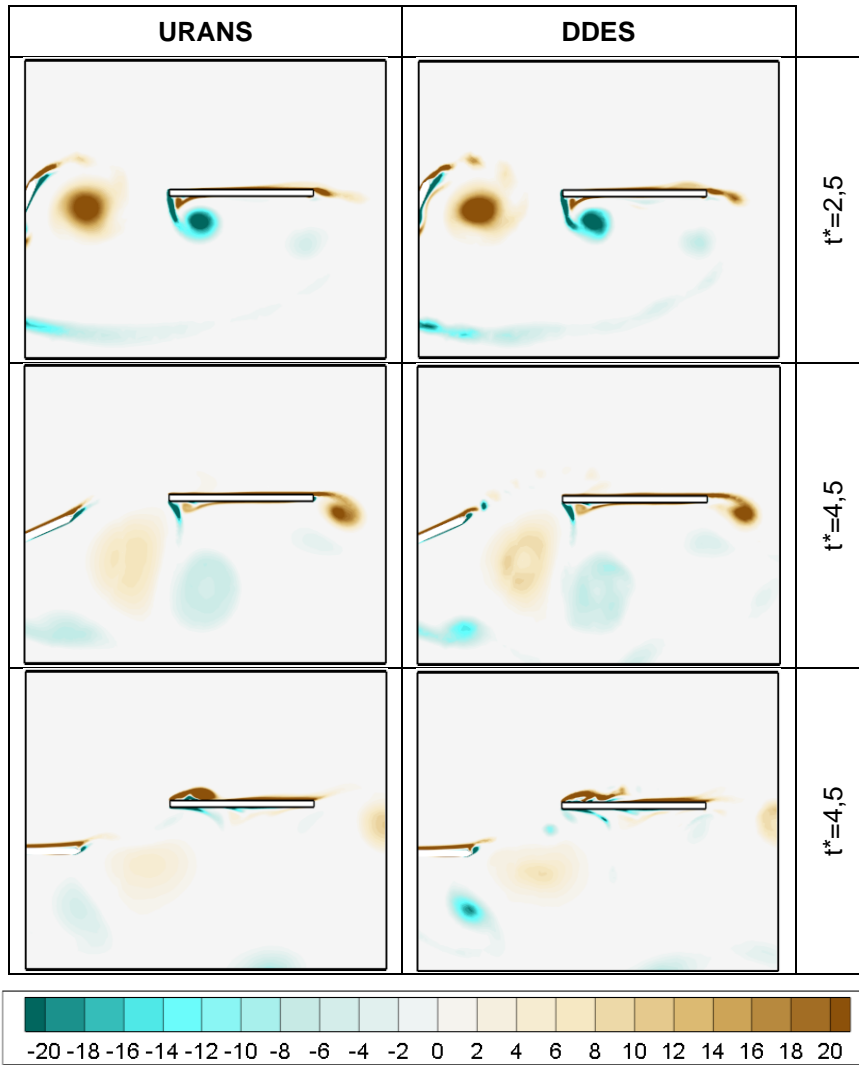
Bu çalışmanın kapsamında, [Soy vd., 2022] çalışmasından alınan deneylerin değişken parametresi, üretilen sağanağın şiddetidir. Sağanak şiddeti, sağanak üreticinin saat yönünde attığı yarım turu tamamlama süresi ile kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu değerler $T(1/2 \text{ tur})=4\text{s}$ ve 6s olarak seçilmiştir. Bu deney durumlarında sağanak üreticinin konumu sabittir ve veterler arası uzaklık kanat profiline göre dikey ekseninde -36 mm 'dir. Bu konumda, oluşan girdap ve kanat arasındaki dikey uzaklığın kanat veterine oranı $h/c=0$ olarak tanımlanır.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

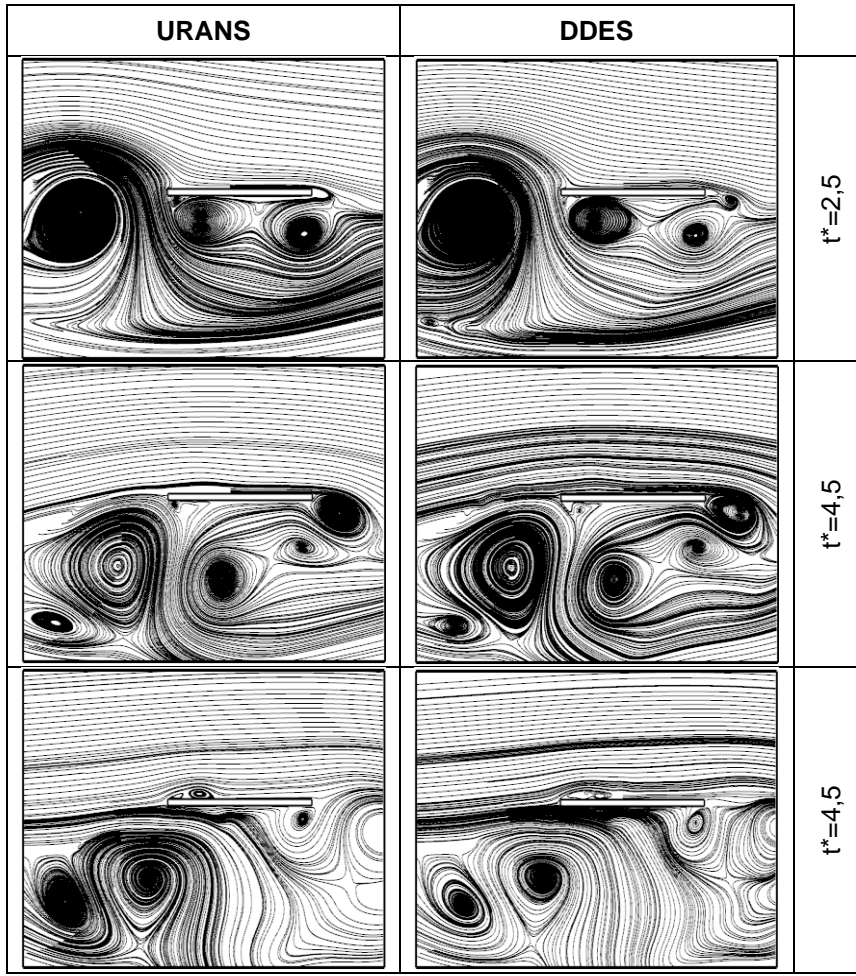
Bahsedildiği üzere, bu çalışma kapsamında girdap üreticinin yarım turunun 6 boyutsuz zamanda ($T(1/2 \text{ tur})=6$) ve 4 boyutsuz zamanda ($T(1/2 \text{ tur})=4$) tamamladığı iki farklı durum ele alınmıştır. Bu iki farklı durumun incelenmesinde hem deneysel çalışmalardan hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği benzetimlerinden faydalanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği benzetimleri DDES- $k-\omega$ -SST ve URANS $k-\omega$ -SST yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Detayları önceki bölümlerde belirtildiği üzere, hesaplama yaklaşımlarındaki farklılıklar sonucunda, DDES yöntemi kullanılarak elde edilen akış çözümleri, URANS yöntemi ile elde edilen çözümlere göre, akışa ait daha yapıları daha detaylı çözümlenebilmektedir. Her iki yöntem ile elde edilen girdap özü eş yüzeylerinin belirli bir andaki görseli Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, DDES yöntemi akış içerisindeki girdap özü eş yüzeylerini daha yüksek çözünürlük ile benzetimlerken, URANS yönteminin çözünürlüğü görece düşük kalmaktadır. Şekil 6'da, girdap üreticinin yarım turunu 4 boyutsuz zamanda tamamladığı durum $T(1/2 \text{ tur})=4$ için kanat yapısı simetri ekseninden alınan kesit üzerinde URANS ve DDES yöntemleri ile elde edilen düzleme dik eksenindeki girdaplılık dağılımları verilmiştir. Buradaki dağılımlara bakıldığında, DDES yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile URANS ile elde edilenler arasında hem girdaplılık büyüklüğü, hem girdap yapılarının sayıları ve konumları açısından farklar olduğu görülebilmektedir. Akışın aynı anlarında yine simetri eksen kesitindeki düzlem üzerinden alınan akış çizgilerine bakıldığında (Bkz. Şekil 7), DDES yöntemi ile gerçekleştirilen benzetimden elde edilen sonuçların URANS ile elde edilenlere göre, daha fazla detay içerdiği görülebilmektedir.



Şekil 5: DDES ve URANS yöntemleri ile $T(1/2 \text{ tur})=4$ için elde edilen çözümlere ait $t^*=3,5$ anından alınmış, hız büyüklüğüne göre renklendirilmiş, Q kriteri eş yüzeyleri

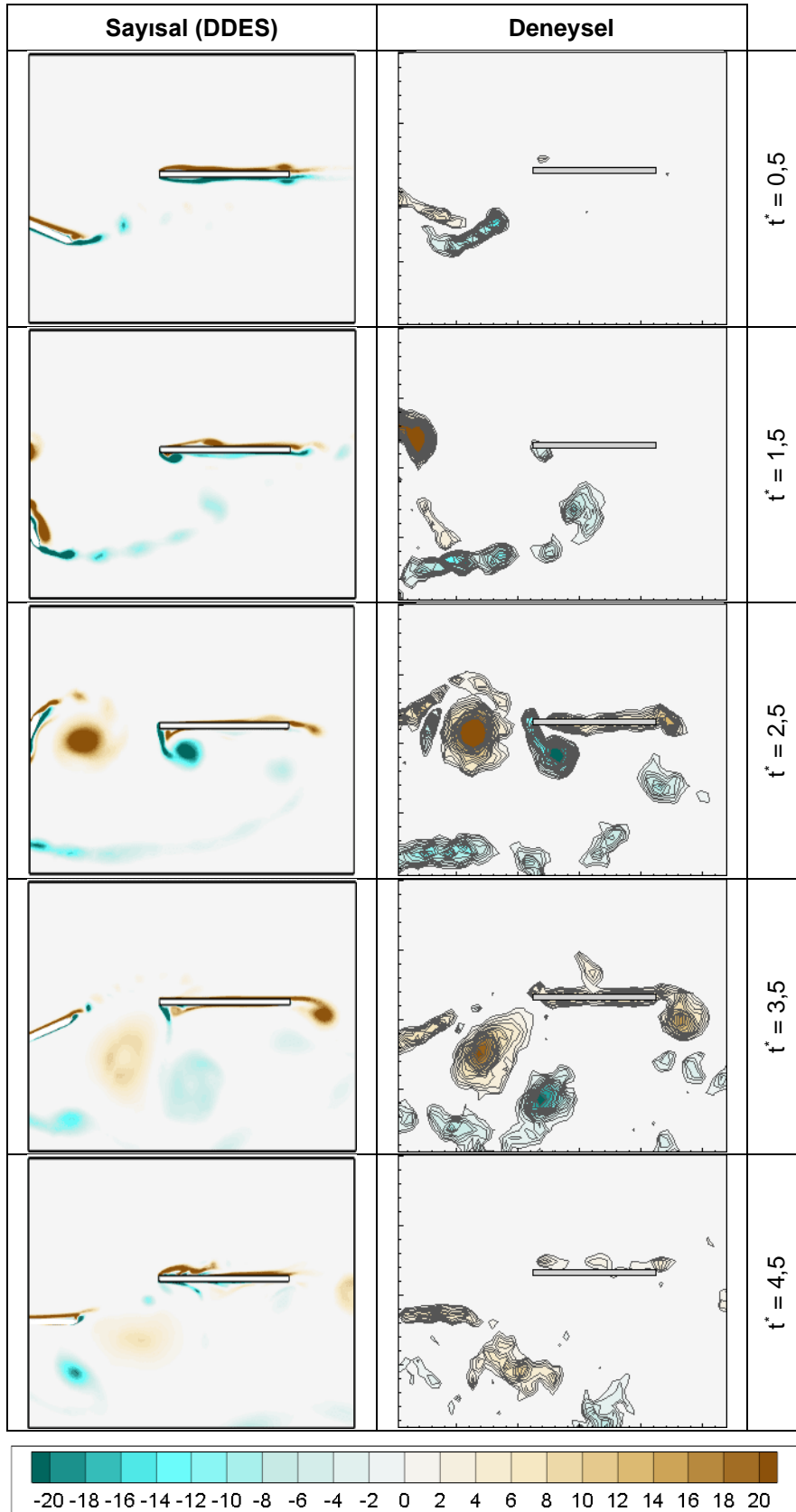


Şekil 6: URANS ve DDES yöntemleri ile $T(1/2 \text{ tur})=4$ için elde edilen çözümlere farklı anlarından alınmış, simetri eksen kesiti girdaplılık(1/s) dağılımları.

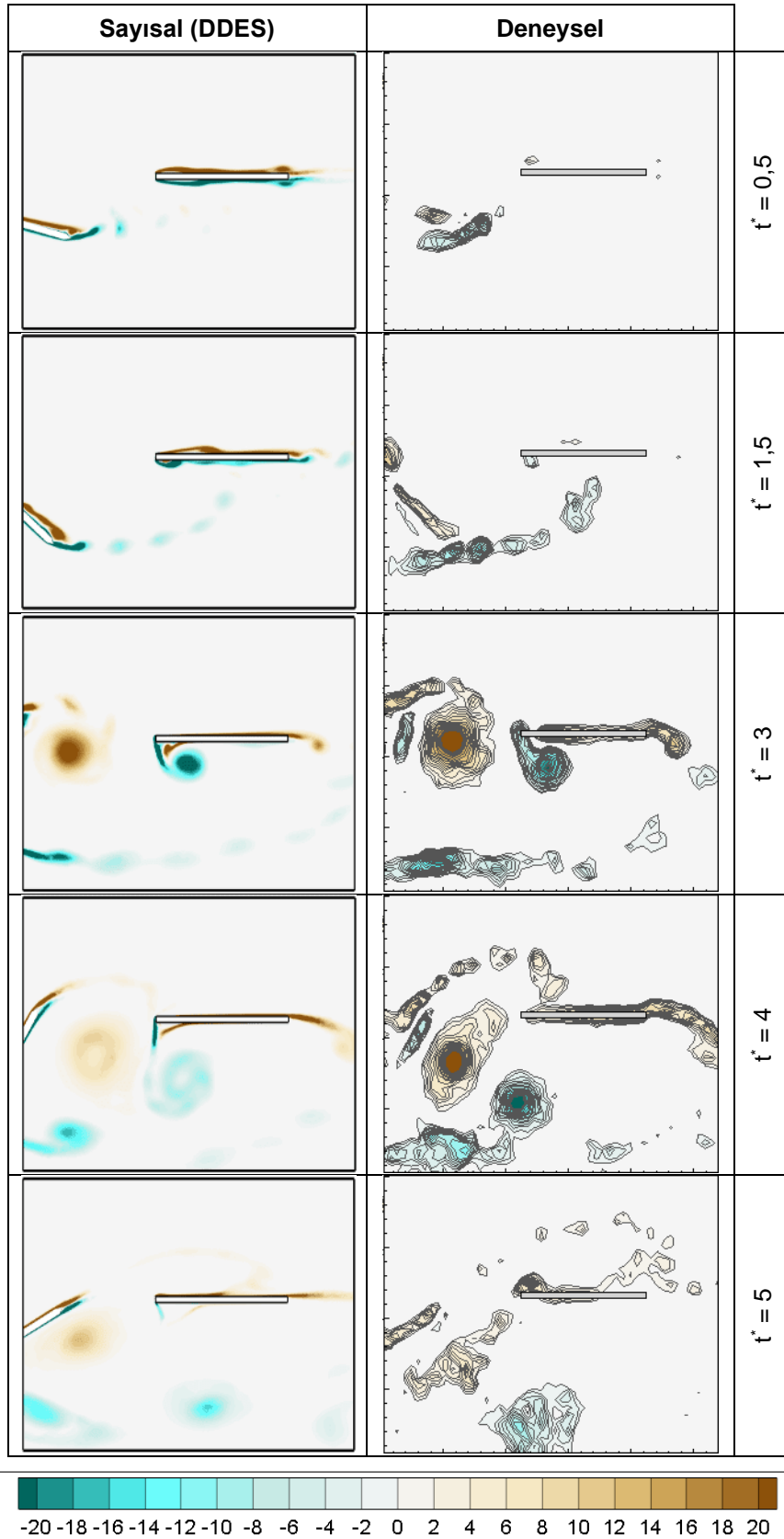


Şekil 7: URANS ve DDES yöntemleri ile $T(1/2 \text{ tur})=4$ için elde edilen çözümlerin farklı anlarından alınmış, simetri eksen kesiti üzerindeki akış çizgileri

Deneyel çalışma ve sayısal (DDES) benzetimin simetri eksen kesiti girdaplılık($1/s$) dağılımlarının karşılaştırması $T(1/2 \text{ tur})=4$ için, Şekil 8'de, $T(1/2 \text{ tur})=6$ için Şekil 9'da verilmiştir. Yaklaşan girdap türü sağanağın başarılı şekilde modellendiği görülmekte, girdap kanat etkileşiminin de tüm detayları ile yakalanabildiği anlaşılmaktadır. Nitekim negatif girdabın etkisi ile oluşan hücum kenarı girdabının gelişimi deney sonuçları ile son derece uyumludur. Benzer olarak kanat firar kenarında oluşan girdabın gelişimi de sayısal çalışmada başarılı şekilde yakalanmıştır. Ele alınan iki değişik girdap oluşum süresi ve karşılaştırma yapılan değişik anlar için de deneysel ve sayısal sonuçlar uyumludur. Sadece girdapların şiddeti iyice azaldığında birebir uyum her an için görülememektedir. Yine de örneklemek gerekirse $T(1/2 \text{ tur})=4$ için $t^*=1,5$ ve $t^*=2,5$ anlarında veya benzer şekilde $T(1/2 \text{ tur})=6$ için $t^*=1,5$ ve $t^*=3$ anlarında, görüntü alt bölgesinde girdap üreticinin oluşturduğu düşük şiddetteki negatif girdap zinciri son derece başarılı şekilde yakalanabilmiştir.



Şekil 8: Deneysel çalışma ve sayısal (DDES) benzetimin $T(1/2 \text{ tur})=4$ farklı anlarından alınmış, simetri eksen kesiti girdaplılık($1/s$) dağılımlarının karşılaştırması



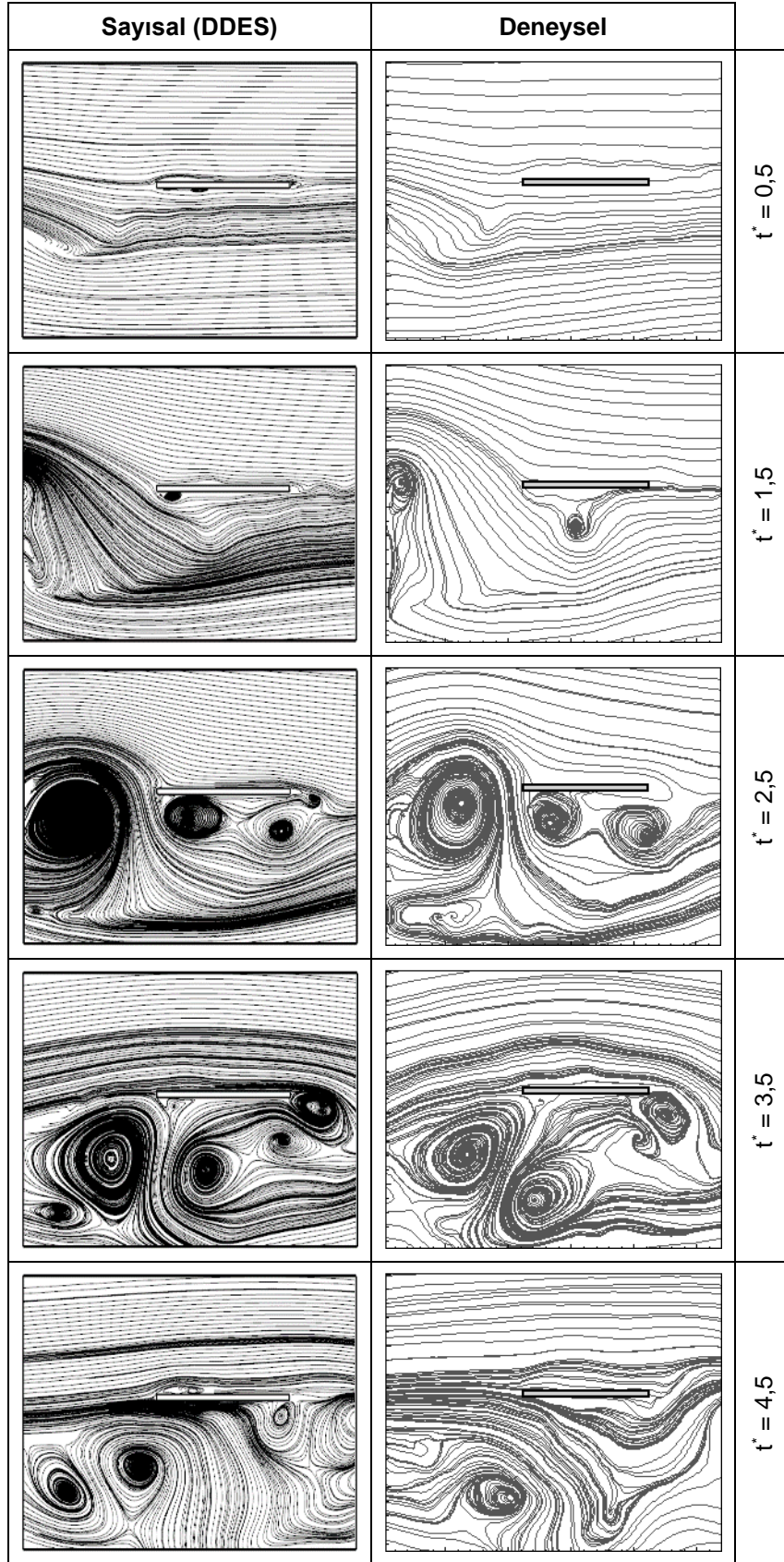
Şekil 9: Deneysel çalışma ve sayısal (DDES) benzetimin $T(1/2 \text{ tur})=6$ farklı anlarından alınmış, simetri eksen kesiti girdaplılık($1/s$) dağılımlarının karşılaştırması

DeneySEL çalışma ve sayısal (DDES) benzetimin simetri eksen kesiti üzerindeki akış çizgileri karşılaştırması $T(1/2 \text{ tur})=4$ için Şekil 10'da, $T(1/2 \text{ tur})=6$ için Şekil 11'de verilmiştir. Büyük ve şiddetli yapıların deneySEL ve sayısal çalışmada son derece uyumlu şekilde görüldüğü, ancak deneySEL verinin çözünürlüğünün sayısal benzetime göre düşük olması ve belirsizlik miktarı sebebiyle küçük ve zayıf yapıların deneySEL sonuçlarda yakalanamadığı açıktır. Bu duruma örnek olarak $T(1/2 \text{ tur})=6$ için $t^*=3$ ve $t^*=4$ anlarında sayısal çalışmanın kanat hücum kenarında büyük iki girdap çifti arasında bir girdap yapısı yakaladığı görülmektedir. DeneySEL olarak bu boyutta bir yapının kullanılan ölçekte görsellenebilmesi mümkün değildir. Bu nokta da başarılı bir sayısal benzetimin getirdiği avantajlara bir örnek olarak gösterilebilir.

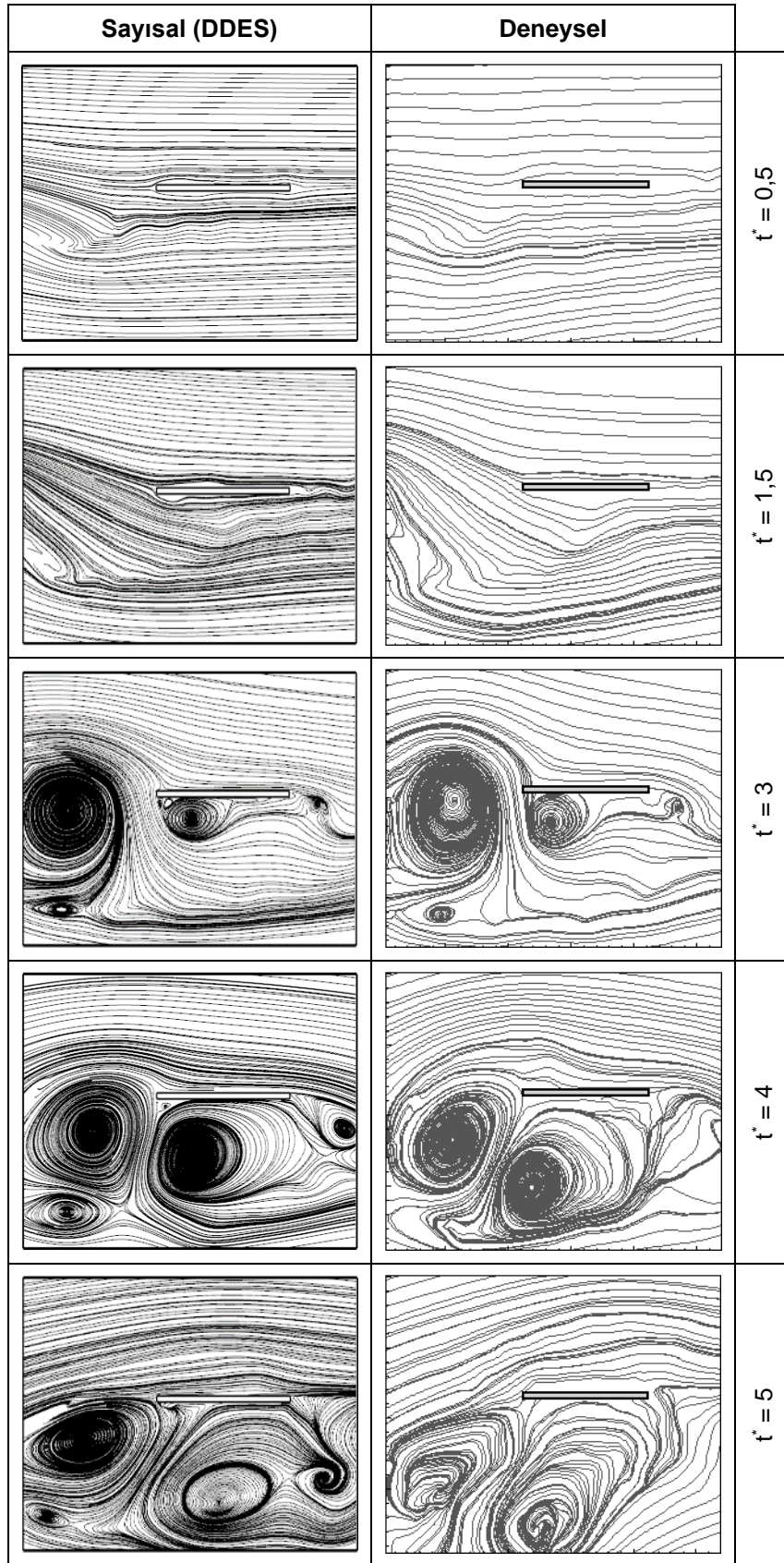
DeneySEL çalışma, URANS ve DDES yöntemleri ile sayısal olarak elde edilen taşıma katsayısı değerlerinin boyutsuz zamanla değişimleri $T(1/2 \text{ tur})=4$ için Şekil 12'de, $T(1/2 \text{ tur})=6$ için Şekil 13'de verilmiştir. Daha önce sunulan akış yapılarında yakalan uyum, kanat yapısına etki eden taşıma kuvveti değişiminde de görülmektedir. Her iki girdap oluşum süresi için de deneySEL ve sayısal sonuçlar arasında gittikçe artan bir zamanda kayma görülmektedir. Bunun girdap üreticinin harekete başlangıç anındaki hareket hız profillerinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kanadın sağanak etkisinden kurtulduğu anlardaki sayısal ve deneySEL sonuçlar arasında çalkantılı ve farklılık gösteren taşıma kuvveti değişimlerinin ise deney sonuçlarının her bir denemesinde farklılık göstermesine (deney sonuçlarının 5 tekrar ortalaması olduğu belirtilmelidir) bağlı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca farklılıkların kuvvet duyargasının belirsizlik limitleri dahilinde olduğu da belirtilmelidir.

Deney sonuçlarından bağımsız olarak, farklı sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçların birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Özellikle taşıma katsayısının hızlı değişimler gösterdiği sağanak etkisinin en çok hissedildiği zaman aralığında URANS ve DDES ile elde edilen taşıma katsayılarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Sağanak etkisi ile kanat yapısı üst ve alt yüzeyinde oluşan bağlı girdapların baskın yapılar olması nedeniyle, akış içerisindeki diğer yapıların taşıma katsayısı üzerindeki etkileri görece düşük kalmaktadır. Bu durumda da akış içerisindeki girdap yapılarını daha detaylı benzetimleme kapasitesine rağmen DDES yöntemi ile elde edilen sonuçlar URANS yöntemi ile elde edilenlerden çok farklı olmamaktadır.

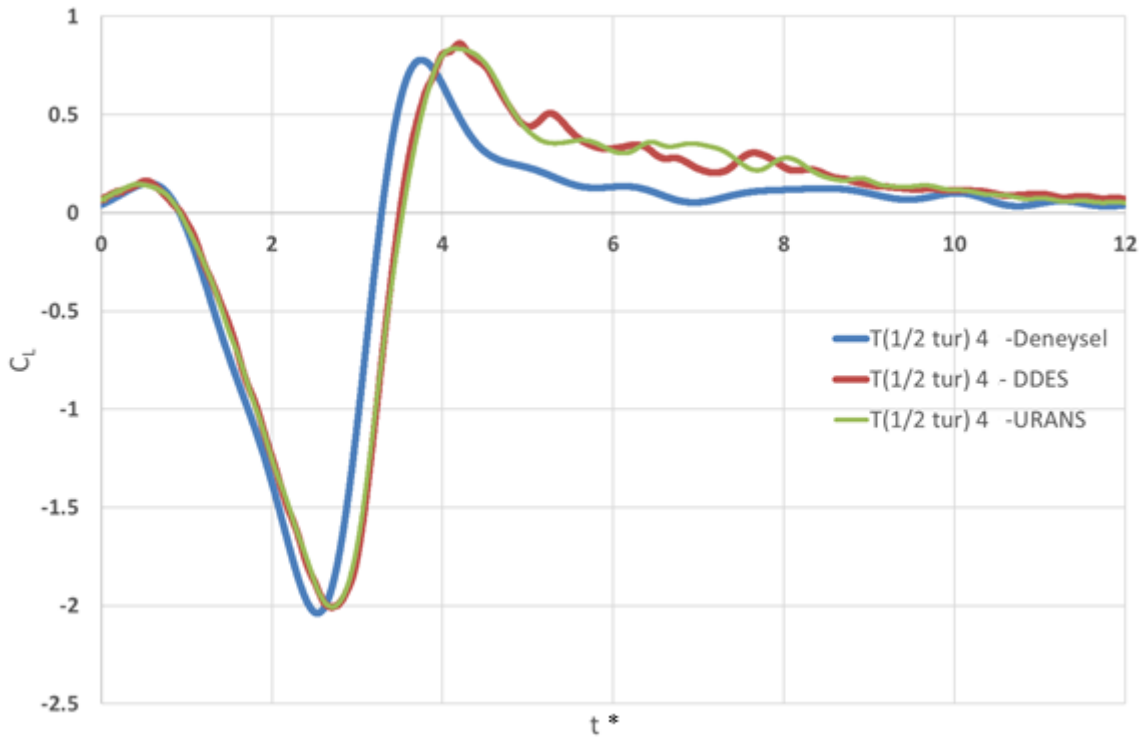
Öte yandan kanat yapısı ile girdap etkileşiminin daha azalmış olduğu taşıma katsayısı grafiğinin pozitif tepe noktasına karşılık gelen andan sonra, DDES ve URANS ile elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar gözlenmektedir. Özellikle sağanak etkisinin ilk aşamalarında oluşan görece büyük bağlı girdapların ayrıldığı ve yerlerini daha küçük girdap yapılarına bıraktığı zaman aralığında DDES ve URANS yöntemleri ile elde edilen sonuçlar arasında düşük seviyede de olsa farklılıklar görülebilmektedir. Ayrılmış girdap yapılarının etkin olduğu zaman aralığında DDES yöntemi ile elde edilen sonuçların URANS yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlardan farklı olması, benzetim yöntemlerinin özellikleri gereği beklenen bir durumdur.



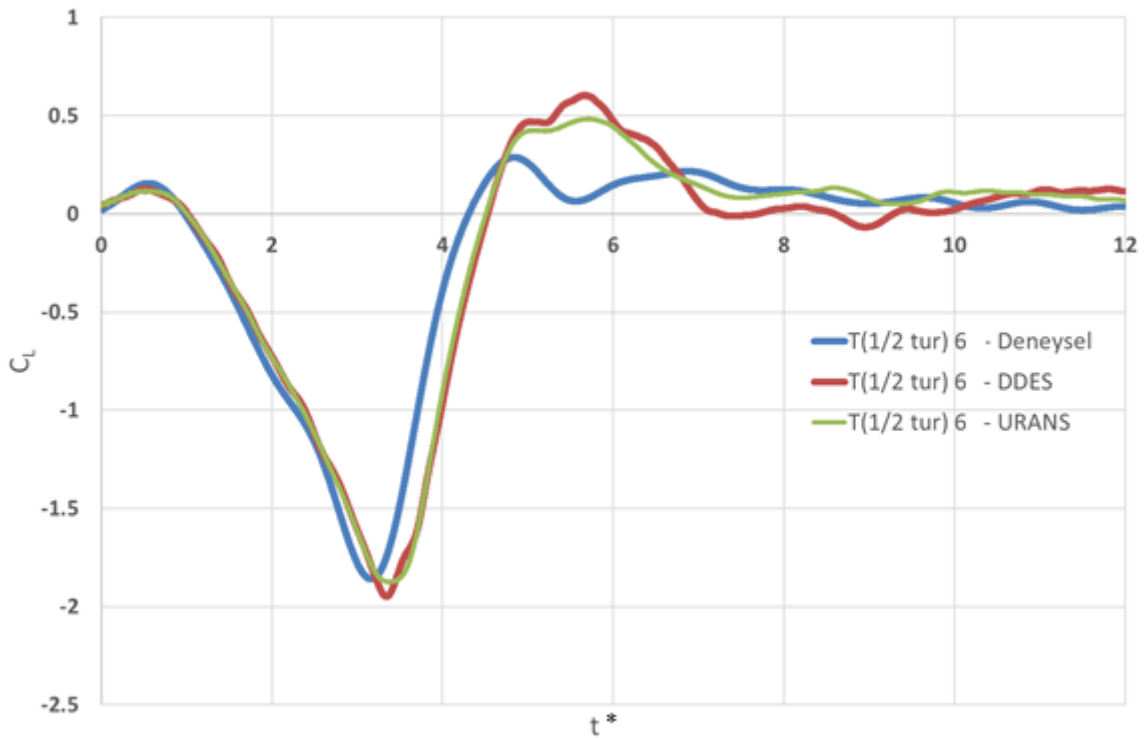
Şekil 10: Deneysel çalışma ve sayısal (DDES) benzetimin $T(1/2 \text{ tur})=4$ farklı anlarından alınmış, simetri eksen kesiti üzerindeki akış çizgileri



Şekil 11: Deneysel çalışma ve sayısal (DDES) benzetimin $T(1/2 \text{ tur})=6$ farklı anlarından alınmış, simetri eksen kesiti üzerindeki akış çizgileri



Şekil 12: Deneysel çalışma URANS ve DDES yöntemleri ile sayısal olarak $T(1/2 \text{ tur})=4$ için elde edilen taşıma katsayısı değerlerinin boyutsuz zamanla değişimleri



Şekil 13: Deneysel çalışma URANS ve DDES yöntemleri ile sayısal olarak $T(1/2 \text{ tur})=6$ için elde edilen taşıma katsayısı değerlerinin boyutsuz zamanla değişimleri

SONUÇ

Tekil girdap tipi sağanak etkilerinin incelenmesinde deneysel ve sayısal yöntemler oldukça önemli verilerin elde edilmesine imkân tanımaktadır. Deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak akış yapılarının incelenmesinde yakalan uyum, kanat yapısına etki eden taşıma kuvveti değişiminde de gözlenmiştir. Büyük ve şiddetli girdap yapılarının deneysel ve sayısal çalışmada son derece uyumlu şekilde gözleendiği, ancak deneysel verinin çözünürlüğünün sayısal yöntemlere göre düşük olması ve belirsizlik miktarından dolayı küçük ve zayıf yapıların deneysel sonuçlarda yakalanamadığı açıktır. Bu özelliği, başarılı sayısal benzetim çalışmalarının avantajlarına bir örnek olarak gösterilebilir. Taşıma katsayısının sağanak etkisi ile değişiminin DDES ve URANS yöntemleri ile benzetiminden elde edilen sonuçlar birbirinden çok farklı değildir. Akış içerisindeki yapıları daha detaylı çözümlemesine rağmen, incelenen durumlarda, akış yapısının detay seviyesinin kanat yapısı üzerindeki basınç ve kayma gerilimi dağılımına etkileri görece düşük olduğundan, DDES ve URANS yöntemleri ile elde edilen sonuçların hem birbirileri ile hem de deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu ve benzeri çalışmalarda akış içerisindeki yapıların daha detaylı çözümlenmesi amacıyla DDES gibi melez yöntemlerin kullanılması daha uygun olmakla birlikte, aerodinamik katsayıların kestirimi için belirli şartlar altında URANS yönteminin de yeterli doğrulukta sonuç verdiği görülmektedir.

Kaynaklar

- Eldredge J.D., Wang C. ve Ol M.V., 2009. *A computational study of a canonical pitch-up, pitch-down wing maneuver*, 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Antonio, Texas.
- Gritskevich M.S., Garbaruk A.V., Schutze J. ve Menter F. R., 2012. *Development of DDES and IDDES formulations for the k- ω shear stress transport model*, Flow, Turbulence and Combustion. Vol 88 No.3., pp.431–449.
- Grubb A., Moushegian A., Heathcote D.J. ve Smith M.J., 2020. *Physics and computational modeling of nonlinear transverse gust encounters* AIAA SciTech Forum, Orlando, Florida.
- Hodara J., Lind A.H., Jones A.R. ve Smith M.J., 2016. *Collaorative investigation of the aerodynamic behavior of airfoils in reverse flows*, Journal of the American Helicopter Society, Vol 61, 032001.
- Mathey, F., Cokljat, D., Bertoglio, J.P. and Sergent, E., 2003. *Specification of LES inlet boundary condition using vortex method*, 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya.
- Menter, F. R., 1994. *Two-equation Eddy-Viscosity turbulence models for engineering applications*, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
- Menter F. R., Kuntz M., and Langtry R., 2003. *Ten years of experience with the SST turbulence model*. In K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, editors Turbulence, Heat and Mass Transfer.4. Begell House Inc. pp 625–632.
- Nishino T., Roberts G.T. ve Zhang X., 2008. *Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect*, Journal of Fluids and Structures, Vol 24, pp.18-33.
- Rezaeiha A., Montazeri H. ve Blocken B., 2019. *CFD analysis of dynamic stall on vertical axis wind turbines using Scale-Adaptive Simulation (SAS): Comparison against URANS and hybrid RANS/LES*, Energy Conversion and Management, Vol 196, pp.1282-1298.
- Soy, K., Tugan, E., Acar, E. ve Çetiner, O., 2022. *Tekil sağanak karşılaşmasından sürekli sağanak karşılaşmasına geçiş: kanat etrafında oluşan akım yapılarına etkiler*, 9. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Bildiri no. UHUK-2022-115, 14-16 Eylül 2022, İzmir, Türkiye.
- Spalart P. R., Deck S., Shur M. L., Squires K. D., Strelets M. K., and Travin A., 2006. *A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities*. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 20, pp181–195
- Visbal M.R. ve Garmann D.J., 2018. *Analysis of dynamic stall on a pitching airfoil using high-fidelity Large-Eddy Simulations*, AIAA Journal, Vol 56 No.1, pp 47-63.
- Yalçın Ö., Cengiz K. ve Özyörük Y., 2020. *Gelişmiş DDES yöntemleri ile türbülansa geçişçli akış problemi benzetimi*, 8. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Ankara.

- Yang T., Yonghong L., Zhao Z., Zhongliang Z. ve Zhiyong L., 2016. *Transonic wing stall of a blended flying wing common research model based on DDES method*, Chinese Journal of Aeronautics, Vol 29 No.6, pp. 1506-1516.
- Zhang Y., Deng S. ve Wang X., 2019. *RANS and DDES simulations of a horizontal-axis wind turbine under stalled flow conditions using OpenFOAM*, Energy, Vol 167, pp.1155-1163.