



XVIII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
26 - 30 Ağustos 2013, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

GAZ TÜRBİNİ PALLERİNDEKİ AKIŞ AYRILMASINA İZ VE PÜRÜZLÜLÜK ETKİLERİNİN DNS YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Süleyman Karaca ve Ayşe G. Güngör

İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 34469 Maslak, İstanbul

ABSTRACT

In this study, the combined effects of surface roughness and wake passing frequency to the laminar separated region in a flat plate, similar to the suction side of the low pressure turbine blade, are investigated using Direct Numerical Simulation approach with adverse pressure gradient. For the case of the combined effects of surface roughness and wake passing frequency a decrease is observed in the size of the laminar separated bubble. However, the combined effects of the surface roughness and wake passing frequency to the development of the boundary layer is negligible compared to the individual effects of surface roughness and wake passing frequency.

Keywords: Direct Numerical Simulation, Adverse Pressure Gradient, Flow Control, Turbulence

ÖZETÇE

Bu çalışmada, düşük-basınçlı gaz türbini pallerinin emme yüzeyindeki akışa benzer, düz bir levhada ters-basınç etkisiyle oluşan laminer ayrılma bölgesine, yüzey pürüzlülüğünün ve bir önceki kanadın ardizinin etkisi direk sayısal çözümlene yöntemi ile incelenmiştir. İz ve pürüzlülük etkilerinin birlikte incelendiği durum için alınan sonuçlara göre laminar ayrılma baloncuklarının boyutlarında düşüş olduğu görülmektedir. Fakat, bu iki etkinin sınır tabaka gelişimine etkisi iz ve pürüzlülüğün ayrı ayrı etkilerinin yanında ihmal edilecek kadar düşük kaldığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler : Direk Sayısal Benzetim, Ters Basınç Gradyeni, Akış Kontrol, Türbülans

1. GİRİŞ

Birçok alanda olduğu gibi, havacılık alanında da geliştirilen araçların enerji verimliliğinin en üst seviyeye çıkarılması ve bu süreçte çevreye salınan zararlı gazların miktarının en az seviyede tutulması büyük önem taşımaktadır. Sivil veya askeri amaçlı hava araçlarında

kullanılan düşük basınçlı gaz türbinlerin verimliliği de bu kapsamda değerlendirilebilir. Bu tip türbinlerin verimliliğinde belirleyici olan ana etken, türbin palasında yüksek-taşıma (high-lift) profilinin emme bölgesinde ters basınç gradyanı sebebiyle oluşan laminar ayrılma baloncuklarıdır (laminar separation bubbles).

Laminar ayrılma baloncuklarının oluşumu ve ayrılma noktasının yeri gibi sınır tabaka ile ilgili bir çok olay, akım alanı ve cismin geometrisiyle ilgili birçok faktörden önemli ölçüde etkilenir. Bu etkenlerden en önemlileri Reynolds sayısı (atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı), basınç gradyanı ve serbest akım türbülansıdır. Ayrıca düşük basınçlı gaz türbinlerinde bu tip akış olaylarına etki eden diğer parametreler; bir önceki kanadın ardizi ve yüzey pürüzlülüğüdür. Gaz türbini pallerinde yüzey pürüzlülüğü kullanım süresince çeşitli nedenlerden dolayı değişmektedir. Bu zamana bağlı etkilerin belirli durumlar için yüksek-taşıma profillerinin aerodinamik verimliliğini artırdığı görülmektedir. Aerodinamik verimliliğin artmasının ana nedeni, unsteady etkiler sebebiyle laminar ayrılma baloncuklarının boyutlarının daralmasıdır [1], [2]. Dolayısıyla her bir parametrenin etkisinin detaylı olarak incelenmesi, türbin verimini artırmak için gereklidir.

Bilindiği gibi türbülanslı akışları incelemek için deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle bilgisayarların hesaplama hacimlerindeki artış ve paralel çözdürme yeteneği sayesinde sayısal çözümlere yönelik ilgi artmış bulunmaktadır. Türbülanslı akışların sayısal hesaplamaları için kullanılan yöntemler: direk sayısal benzetim (Direct Numerical Simulations, DNS), büyük eddy benzetimi (Large Eddy Simulations, LES), Reynolds-ortalama Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier- Stokes, RANS) çözümleri ve hibrit metodlardır (RANS/LES ve Detached Eddy Simulations, DES) [3]. Türbülanslı akışların çözümü için gereken çözüm ağı nokta/hücre sayısının ve dolayısıyla hesaplama maliyetinin Reynolds sayısı ile artış oranı kullanılan benzetim metoduna bağlıdır. Uzayda ve zamanda bütün türbülans ölçeklerini çözen DNS, hesaplama açısından oldukça pahalıdır çünkü çözüm ağının en küçük uzunluğu ve zaman adımının en küçük değeri en küçük türbülans yapısı büyüklüğündedir [4]. LES hesaplamalarında, büyük ölçekler hesaplanırken, küçük ölçeklerin etkisi modellenir, RANS yönteminde ise tüm türbülans yapıları modellenir. Dolayısıyla problemin fiziğiyle ilgilenirken RANS çözümleri türbülans yapılarıyla ilgili birçok parametreyi modellediğinden dolayı problemin doğası hakkında bir fikir vermez. Fakat probleme endüstriyel uygulama esnasından bakılırsa; hızlı çözümler ve göreceli olarak yeterli bir hatayla birçok uygulamacı tarafından RANS yöntemi pratik olduğu için tercih edilebilmektedir. LES ve RANS yöntemleri DNS'e kıyasla daha az ağ nokta sayısı ve daha az hesaplama maliyeti gerektirir, fakat ihmal edilen küçük yapıların doğru bir yöntemle modellenmesi sonucun doğruluğu üzerinde çok önemli bir rol oynar [3], [5]. Dolayısıyla, bu çalışmada problemin fiziğiyle ilgilenildiği için, hesaplama açısından pahalı olmasına rağmen DNS sayısal yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntem kullanılarak elde edilen veri hem üç-boyutlu uzayda hem de zamanda tanımlı olduğu için, deney yapılarak elde edilen veriden daha kapsamlı ve detaylıdır. Bu nedenle sayısal deney olarak adlandırılır.

Özellikle düşük Reynolds sayılı yüksek-taşıma profillerinin dizayn sürecinde ele alınan en önemli problem; laminar ayrılma baloncuklarının aktif veya pasif yöntemlerle kontrol edilmesi ve dolayısıyla ayrılmadan kaynaklanan basınç kaybının düşürülmesidir. Yapılan bu çalışmanın amacı, belirli kontrol yöntemlerini kullanarak palaların üzerinde oluşan laminar ayrılma baloncuklarının boyutlarını küçülterek, palaların aerodinamik verimini artırmaktır [6].

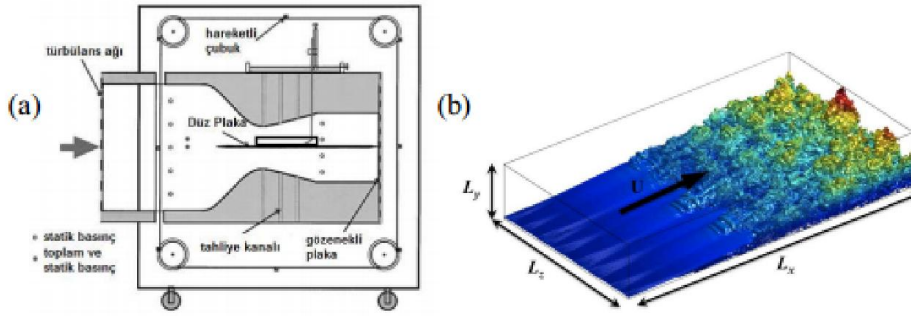
Bu alanda yapılmış olan sayısal bir çalışmada [7], iz bölgesinin sınır tabaka ayrılmasına etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, iz-geçiş frekansının ayrılma bölgesinin ve dolayısıyla türbin verimliliğinin kontrolü için en önemli parametre olduğunu göstermiştir. Başka bir çalışmada ise düşük-basınçlı türbin palalarının emme yüzeyindeki akışa benzer, düz bir levhada ters-basınç etkisiyle oluşan laminer ayrılma bölgesinde, yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemiştir [8]. Sonuçlar laminer ayrılma noktasının ve türbülansa geçiş karakteristiğinin, pürüzlülük elemanının yüksekliğine, tipine ve konumuna bağlı olarak değiştiğini ve ayrılma bölgesinin kontrol edilebilmesi için pürüzlülük elemanının ayrılma bölgesinden uzağa konulması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca, iz bölgesi etkisiyle ayrılmalı sınır tabakadaki türbülansa geçişin, üç-boyutlu pürüzlülük elemanı etkisiyle türbülansa geçiş ile hemen hemen aynı yerde gerçekleştiği görülmüştür. Bu çalışmada pürüzlülük ve iz etkilerinin aynı anda ele alındığı durumda laminer ayrılma bölgesi ve dolayısıyla türbindeki kayıpların nasıl değişeceği incelenecektir.

Türbin üzerindeki sınır tabaka gelişiminin (fiziğinin) anlaşılması, yüksek-taşıma profili dizaynı için büyük bir önem arz etmektedir. Çalışmadaki amaç bu zamana bağlı etkilerin (iz bölgesi ve pürüzlülük gibi) incelenmesi ve bu mekanizmaların başarılı bir şekilde düşük basınçlı türbin palası tasarımında kullanılacak hale gelmesini sağlamaktır. Dolayısıyla çalışmanın hedefi türbin palası tasarımı konusunda yeni bilgiler ortaya koymak ve bu konuda bir veri bankası oluşturmaktır.

2. SAYISAL DÜZENEK

Bu çalışmada, düşük basınçlı türbinlerde ters-basınç gradyanının, yüzey pürüzlülüğünün ve iz bölgesi çalkantılarının sınır tabaka akışı üzerindeki etkisi DNS yöntemi ile sayısal olarak incelenecektir. Bu yöntem, bir önceki kısımda belirtildiği gibi, türbülanslı akışlarda Navier-Stokes denklemlerini herhangi bir türbülans modeli kullanmadan çözümlenmesini sağlamaktadır ve literatürde sayısal deney olarak geçmektedir.

Bu sayısal çalışma, Zhang ve Hodson [9] tarafından yapılan ve Şekil 1a'da gösterilen deneysel çalışma baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmada düz bir plaka, daralan ve genişleyen bir test düzeneği içine yerleştirilerek, plaka üzerinde T106C türbin palası üzerindeki basınç gradyanı dağılımı elde edilmiştir. Düşük basınçlı türbinlerde kayıpların en fazla olduğu bölge ters-basınç gradyanının olduğu bölgedir. Dolayısıyla bu çalışmada, şekil 1a'da siyah kutucuk ile gösterilen akım ayrılmasının olduğu ters-basınç gradyanı altındaki bölge incelenecektir. Üç boyutlu sayısal çözüm alanı ve ters-basınç etkisi altında düz bir plaka üzerinde oluşan sınır tabaka akışı için girdap yapıları Şekil 1b'de gösterilmiştir. Sayısal çalışmada kullanılan basınç dağılımı kaynak [9] tarafından yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler yardımıyla DNS koduna eklenmiştir. Düşük-basınçlı T106C türbin palasını düz bir plaka şeklinde modelleyebilmek için çözüm alanının üst sınır kısmına neredeyse sabit bir emme hız profili tanımlanmıştır dolayısıyla basınç gradyanı dağılımı bu şekilde probleme eklenmiştir. Kaymamazlık (no-slip) sınır şartı duvar bölgesine ve açıklık boyunca (spanwise) periyodik sınır koşulu uygulanmıştır. Çıkış kısmında ise konvektif sınır şartı uygulanmıştır. Akım doğrultusu (streamwise), duvar-normali (wall-normal) doğrultusu ve açıklık boyunca yön ve hız komponentleri x , y , z ve u , v , w olarak tanımlanmıştır. Ters basınç gradyanına sahip sınır tabaka simülasyonları için akış parametreleri ve ortalama sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1: a) Deneysel düzeneği [15], b) Sayısal düzenek. Girdap kontürleri girdap yapılarının duvardan olan uzaklıklarına göre renklendirilmiştir. Mavi: duvara yakın, Kırmızı: duvardan uzak.

DNS akış çözücüsü; sıkıştırılmaz, viskoz akışlar için Navier-Stokes denklemlerini zamanda üçüncü dereceden Runge-Kutta integrasyonu ile, uzayda konvektif ve viskoz terimler için dördüncü dereceden kompakt sonlu-farklar yöntemiyle ve basınç terimleri için ise ikinci dereceden ayrıklaştırma uygulayarak çözmektedir. Akışa dik doğrultuda ise spektral yöntemler kullanılmıştır. Yapılan nümerik ayrıklaştırma için detaylı bilgi kaynak [10] dan elde edilebilir.

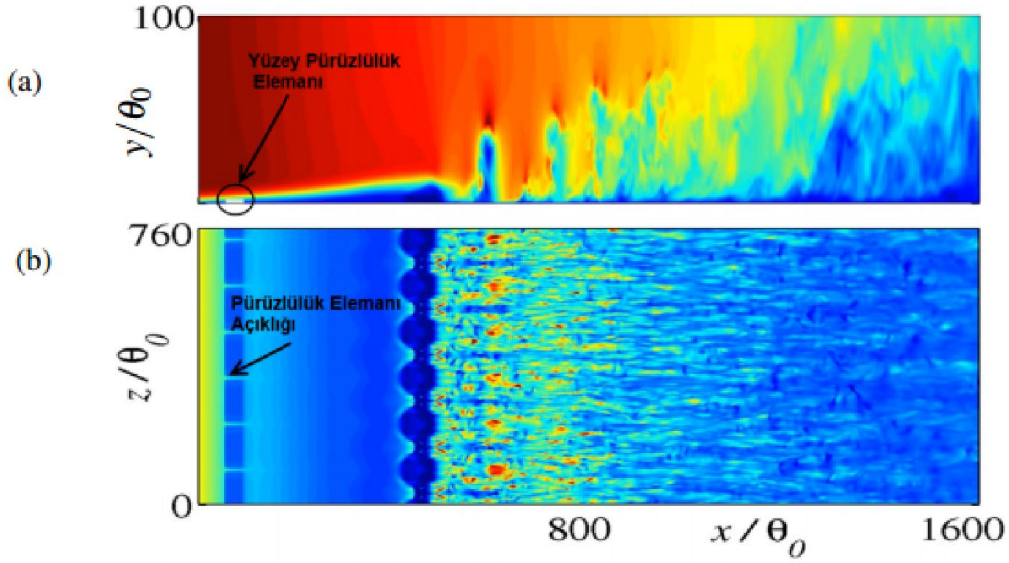
Üç-boyutlu ayrık (discrete) pürüzlülük elemanları açıklık boyunca değişken yükseklikte olup gömülü sınır yöntemi (immersed boundary method) yardımıyla modellenmiştir [11], [12]. Ayrıca pürüzlülük elemanları Şekil 2’de görüldüğü gibi ayrılma noktasından önceye konumlandırılmıştır. Düşük basınçlı türbinlerin stator kısmından gelen iz bölgesi etkisi, lineer bir şekilde sıralanmış dairesel silindirlerin, boyutsuz iz geçiş frekansı diye tabir edilen Strouhal sayısı iz geçiş frekansı ($St=1.55$), için y yönünde hareket ettirilerek ve giriş koşulları için kullanılan hız profilleri iz bölgesine süperpose edilerek modellenmiştir.

Gelen akışın momentum kalınlığına $\theta_0 = 0.268$ mm ve serbest akım hızına $U_{ref} = 6.3$ m/s bağlı olarak tanımlanan Reynolds sayısı $Re_{\theta_0} = U_{(ref)}\theta_0/\nu \sim 110$ 'dır. Türbülanslı akışların hesaplama maliyeti Reynolds sayısı arttıkça artmaktadır. Üç boyutlu bir DNS çözümü için hesaplama maliyeti ile Reynolds sayısı arasındaki bağıntı yaklaşık olarak Re^9 dür. Bizim çözümümüz için Reynolds sayısı $Re_{\theta_0} = U_{(ref)}L_x/\nu = 170000$ değerine tekabül etmektedir ve bu Reynolds sayısı DNS çözümü için makul bir değerdedir.

Şekil 1b de gösterilen çözüm alanının boyutları gelen akımın momentum kalınlığı cinsinden $(L_x \times L_y \times L_z)/\theta_0 = 1640 \times 468 \times 123$ olup $(N_x \times N_y \times N_z = 1537 \times 301 \times 768)$ noktaya ayrıklaştırılmış ve yaklaşık 330 milyon ağ noktasına sahiptir. Akıştaki zamansal ve uzaysal bütün yapılar, en küçük ölçekten (Kolmogorov ölçeği) en büyük ölçeğe kadar (integral ölçeği) çözümlenmiştir. Dolayısıyla türbülanslı bölgede, duvardaki ağ çözünürlüğü $\Delta y^+ \sim 0.4$ ve y yönünde duvardan uzaklaştıkça ağ çözünürlüğü $\Delta y^+ \sim 2$ ye kadar çıkmaktadır [7]. Zaman adımı değişken, CFL sayısı ise 0.6 olup sabittir.

Tablo 1: Ters basınç gradyantına sahip sınır tabaka simülasyonları için akış parametreleri. İz parametresi, Strouhal sayısı, $St = \frac{fL_x}{U_{ref}}$; iz geçiş frekansı, plakanın uzunluğu ve girişteki referans hıza göre tanımlanmıştır. Pürüzlülük parametreleri, h_r , x_r ve k_r yükseklik, pürüzlülüğün plaka üzerinde bulunduğu yer ve dalga sayısıdır. Ayrılma noktasındaki basınç gradyanti parametresi, $\Lambda_s = \frac{\theta_s^2}{\nu} \frac{dU_x}{dx} |_s$. L_b/L_{b0} oranı ayrılma bölgesinin uzunluğunun akışı zorlayıcı etkilerin bulunmadığı durumdaki ayrılma bölgesine oranını temsil etmektedir. Momentum kalınlığı, θ_0 girişteki akış için hesaplanmıştır.

Durum	St	$k_r \theta_0$	h_r / θ_0	x_r / θ_0	Re_θ	Λ_s	L_b / L_{b0}
$RW0$	0	0	0	0	110-1600	-0.089	1.0
$R3d$	0	0.008	0.70	50	110-1022	-0.11	0.512
$W St 155$	1.55	0	0	0	110-980	-0.118	0.3810
$R3d W St 1.55$	1.55	0.008	0.70	50	110-895	-0.1168	0.3619



Şekil 2 Akım doğrultusundaki anlık hız kontürleri ve pürüzlülük elemanı. Referans hıza göre boyutsuzlaştırılmış hız kontür değerleri [-0.1:0.4] aralığındadır. (a) duvara dik bir düzlem, $z/\theta_0 = 380$; (b) duvara paralel bir düzlem, $y/\theta_0 = 3.5$

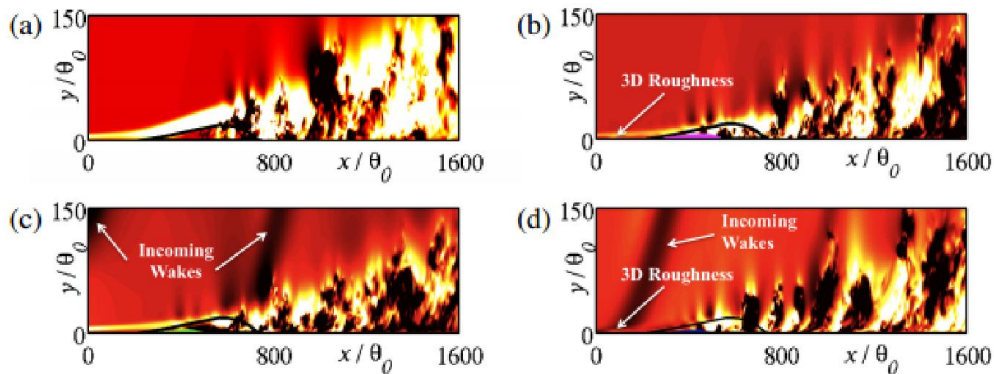
3. SAYISAL SONUÇLAR

Şekil 3' de akım yönündeki ani hız dalgalanmalarının, düz bir plaka üzerinde ters basınç gradyantına maruz bırakılarak (bu durumda akışı zorlayıcı başka bir etki bulunmamaktadır) ve iz, pürüzlülük gibi akışı zorlayıcı etkilerin ayrı ayrı ve birleştirilmiş durumları için, etkileri gösterilmektedir Şekil 3b-d. Şekil 3a' da düz bir plaka üzerindeki akış ($RW0$ durumu) incelenmiştir, burada akışı kontrol edici (iz ve pürüzlülük gibi) hiçbir etki bulunmamaktadır [13]. Şekil 1a' da görüldüğü üzere akış ilk önce laminar davranış sergiler, sonrasında ayrılma, ayrılmadan sonra geçiş akabinde ise akım yeniden birleşir ve bu noktadan sonra türbülanslı akış gelişimine devam eder. $RW0$ durumunda ters basınç gradyantından dolayı büyük, zamana bağlı ayrılma baloncuğu oluşmaktadır. Tablo 1'de tüm simülasyonlar için akış parametreleri gösterilmiş olup, ayrılma bölgesinin uzunluğu $RW0$ durumu temel alınarak ifade edilmiştir.

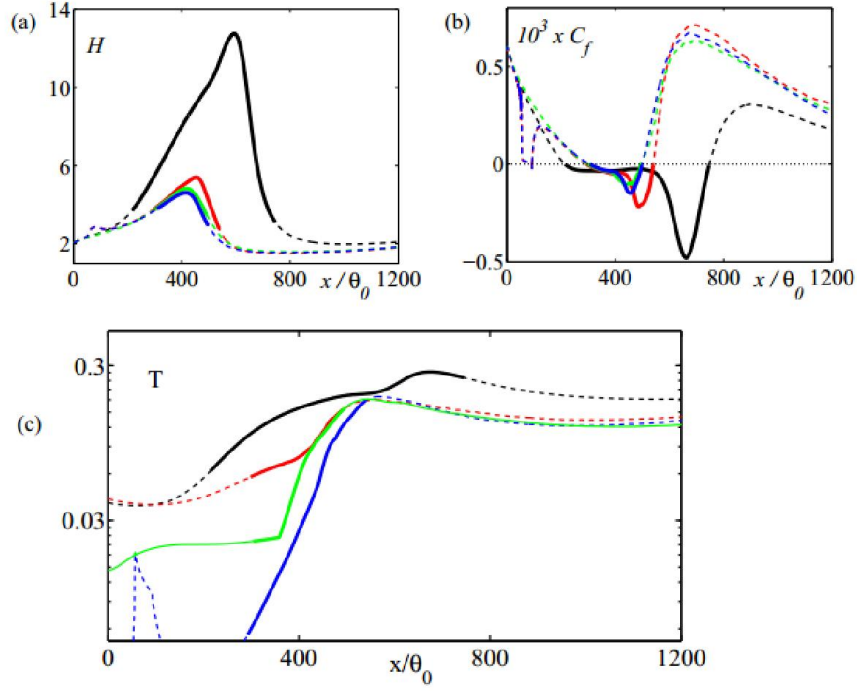
Üç-boyutlu pürüzlülük elemanının olduğu durumda (Şekil 2 ve Şekil 3b) pürüzlülük elemanları arasındaki açıklık sebebiyle hızlanan akış, ayrılma noktasını akım alanı içinde

ileriye doğru ötelemiştir. Ayrılma baloncuğunun yüksekliği azalırken, yeniden birleşme noktası akım yönünde öne doğru çekilmiştir. Kaynak [8]'den elde edilen sonuçlar, laminar ayrılma noktasının ve türbülansa geçiş karakteristiğinin, pürüzlülük elemanının tipine (2D/3D) bağlı olarak değiştiğini ve pürüzlülük elemanının ayrılma bölgesi nedeniyle oluşan basınç kayıplarının azaltılmasında çok önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

Şekil 4'de ortalama akış istatistikleri verilmiştir, burada kalın düz çizgiler akımın ayrılmış olduğu bölgeyi göstermektedir ki bu bölge yüzey sürüklenme katsayısının negatif olduğu yerlere tekabül etmektedir. Şekil 4a'da biçim faktörünün Şekil 4b'de ise yüzey sürüklenme katsayısının akım doğrultusuna göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 4a'da görülen pozitif doğrultudaki zirve noktaları ve Şekil 4b'de görülen negatif doğrultudaki zirve noktaları yaklaşık olarak akımın türbülansa geçtiği bölgeyi gösterir. Şekil 4c maksimum türbülans yoğunluğunun akım doğrultusundaki değişimini göstermektedir, burada y eksenini grafiğin daha iyi okunabilmesi için logaritmik olarak çizilmiştir. İz ve pürüzlülük gibi akışı zorlayıcı etkilerin bulunmadığı Re_{10} durumu için Şekil 4c'de görüldüğü üzere (siyah çizgi) maksimum türbülanslı kinetik enerji ilk önce iki boyutlu etkilerle lineer bir şekilde artış yaşamakta ardından ise üç boyutlu lineer olmayan bir davranış sergileyerek akışın türbülansa geçtiği görülmektedir. Probleme iz geçiş frekansı ve yüzey pürüzlülüğü gibi akışı bozuntuya uğratabilecek kontrol mekanizmaları eklendiğinde ise yukarıda bahsettiğimiz laminardan türbülansa geçiş prosedürü artık geçerliliğini yitirmektedir. Kontrolsüz akışta görülen kinetik enerjideki iki boyutlu lineer artış burada kontrol elemanlarından gelen bozuntular sebebiyle yok edilmiş, akış direkt üç boyutlu lineer olmayan bir duruma dönüşmüştür. Re_{10} , $USd.55$ ve Re_{10} , $USd.55$ durumları için laminar ayrılma baloncuğunun yüzeye birleşmesinin yaşandığı noktadan itibaren aynı basınç gradyanına maruz kaldıklarından ötürü aynı akış karakteristiklerini göstermektedirler. Dolayısıyla akış kontrol elemanları (iz ve pürüzlülük) türbülans dalgalanmalarını artırmış ve laminardan türbülansa geçiş noktası plakanın önüne doğru kaymıştır [7], [8]. Akım ayrılması plakanın daha gerisinde meydana gelmiş ve akımın birleşmesi ise plakanın ön kısmına doğru kayarak laminar ayrılma baloncuklarının boyutu ve yüksekliği (Şekil 5) büyük miktarda düşürülmüştür. Bunun sebebi ise duvara yakın bölgedeki ortalama momentumun duvara uzak bölgelere unsteady etkilerle (iz ve pürüzlülük) transfer edilerek akışın deformasyona uğratılmasıdır.

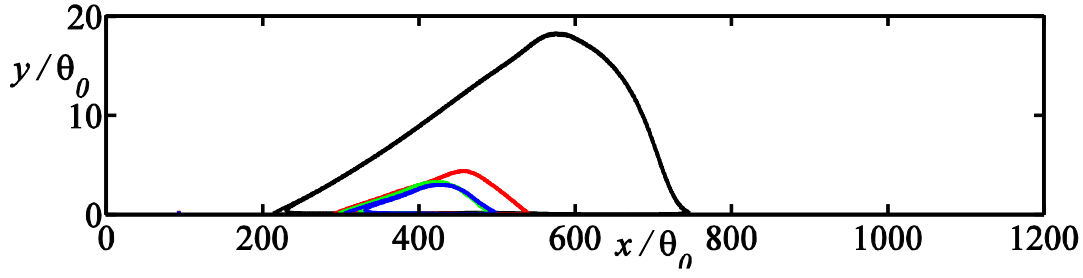


Şekil 1 Akım doğrultusunda hız dalgalanmaları, u'/U_{ref} (gölgeli kontürler, [-0.05:0.1]) ve akım doğrultusundaki hız bileşeninin, U sıfır kontürü. (a) Re_{10} ; (b) 3D pürüzlülük, Re_{3d} ; (c) İz, $USd.55$; (d) 3D pürüzlülük ve İz, $Re_{3dUSd.55}$.



Şekil 2 Ortalama akış istatistikleri üzerinde pürüzlülük ve iz geçiş frekansının ayrı ayrı ve birleştirilmiş etkileri. (a) Biçim Faktörü; (b) Yüzey Sürükleme Katsayısı; (c) Maksimum Türbülans Yoğunluğu; Siyah: R_{200} , Kırmızı: R_{3d} , Yeşil: R_{55} , Mavi: $R_{3d} \text{ ve } R_{55}$ düz çizgi: ayrılmış akış, $C_f < 0$, ve ---- : yapışık akış, $C_f > 0$.

İz (R_{55}) ve pürüzlülük etkisi (R_{3d}) kendi aralarında incelendiğinde ise (Şekil 5) ilginç olarak iki etki de hemen hemen aynı yerde akım ayrılmasını gerçekleştirmiş fakat pürüzlülük etkisinin olduğu durumda yeniden birleşme noktasının diğerine göre biraz geride olduğu görülmektedir. Bu iki etki birleştirildiğinde ise (Şekil 5) ve (Şekil 3d) de gösterildiği üzere $R_{3d} \text{ ve } R_{55}$ durumu için ayrılma baloncuğunun boyutu, akımın ayrıldığı-birleştiği yerler R_{55} durumu ile hemen hemen aynıdır, (R_{3d}) durumu içinse (aynı şekil, kırmızı çizgi) akımın ayrıldığı nokta neredeyse aynı kalmış birleştiği nokta ise plakadan daha geriye doğru kaymıştır. Görüldüğü gibi bir önceki kanadın ardizinden gelen bozuntunun büyüklüğü, yüzey pürüzlülüğü elemanından gelen bozuntuya oranla fazladır ve bir önceki kanadın ardizinin etkisi yüzey pürüzlülüğünün etkisini yok ettiği görülmektedir. Dolayısıyla, bu çalışma türbin benzeri düşük Reynolds sayılı akışlarda ardizi etkisinin yüzey pürüzlülük etkisine göre çok daha önemli olduğunu göstermiştir. Bu sonucu belirleyen etken yüzey pürüzlülüğünün tipi (3D) ve yüksekliğidir [14].



Şekil 3 Ortalama akış istatistikleri üzerinde pürüzlülük ve iz geçiş frekansının ayrı ayrı ve birleştirilmiş etkileri. Akım yönündeki hızın sıfır kontürü ayrılma baloncuğunun plaka üzerindeki yerleşimini göstermektedir. Siyah: Re_{100} , Kırmızı: Re_d , Yeşil: $USd.55$, Mavi: $Re_{USd.55}$.

4. SONUÇ

Ters basınç gradyantına maruz bırakılmış düz bir plakada düşük basınçlı gaz türbini pallerinin yüzeyindeki akışa benzer bir akış için yüzey pürüzlülüğü ve iz geçiş frekansının sınır tabaka akışına etkisi Direk Sayısal Benzetim metoduyla incelenmiştir. Çıkan sonuçlara göre; laminar ayrılma bölgesinin ve laminardan türbülansa geçiş bölgesinin iz geçiş frekansından ve yüzey pürüzlülüğünden önemli miktarda etkilendiği görülmüş, ayrıca laminar ayrılma baloncuklarının boyutlarında önemli miktarlarda düşüş olduğu görülmektedir. Fakat, yüzey pürüzlülük ve iz geçiş frekansı etkilerinin ayrı ayrı ve birlikte incelendiği durumlarda laminar ayrılma baloncuğunun boyutlarında önemli bir değişim görülmemiş, bu durumlar için akış karakteristikleri büyük ölçüde benzerlikler göstermiştir. Bu çalışmada iz geçiş frekansı etkisinin yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan etkilere göre daha önemli olduğu görülmüştür.

5. TEŞEKKÜR

Hesaplamlarda kullanılan hesaplama kaynakları Barselona Yüksek Hesaplama Merkezi (BSc) ve Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM) 1002222012 numaralı desteğiyle sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] R. J. Volino, Effect of unsteady wakes on boundary layer separation on a very high lift low pressure turbine airfoil, *ASME J. Turbomach.*, 2012.
- [2] Montomoli, F., Hodson, H. and Haselbach, F., Effect of roughness and unsteadiness on the performance of a new low pressure turbine blade at low Reynolds numbers, *ASME J. Turbomach.*, pp. 1-9, 2010.
- [3] S. B. Pope, *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, 2000.
- [4] J. Jiménez, Computing high-Reynolds-number turbulence: will simulations ever replace experiments?, *Journal of Turbulence*, 2003.

- [5] Gungor, A.G. and Menon S., A new two-scale model for large eddy simulation of wall-bounded flows, *Progress in Aerospace Sciences*, pp. 28-45, 2010.
- [6] Hodson, H.P., and Howell, R.J., Bladerow interactions, transition and high-lift aerofoils in low-pressure turbine, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, cilt 37, 2005.
- [7] Gungor, A.G., Simens, M.P. and Jiménez, J., Direct numerical simulations of wake-perturbed separated boundary layers, *ASME J. Turbomach.*, cilt 134, pp. 1-9, 2012.
- [8] Simens, M.P. and Gungor, A.G., Effect of surface roughness on laminar separated boundary layers, *ASME J. Turbomach.*, 2013.
- [9] Zhang, X.F. and Hodson, H., Combined effects of surface trips and unsteady wakes on the boundary layer development of and ultra-high-lift turbine blade, *ASME J. Turbomach.*, cilt 127, pp. 479-488, 2005.
- [10] M. Simens, The study and control of wall bounded flows, Ph.D. Thesis, Universidad Politecnica de Madrid, Spain, 2009.
- [11] Fadlun, E.A., Verzicco, R., Orlandi, P., and Mohd-Yusof, J., Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations, *J. Comp. Physics*, cilt 161, pp. 35-60, 2000.
- [12] M. Uhlman, An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flow, *J. Comp. Physics*, cilt 209, pp. 448-476, 2005.
- [13] Simens, M.P., Jiménez, J., Hoyas, S., and Mizuno, Y., A high-resolution code for turbulent boundary layers", *J. Comput. Phys.*, cilt 228, pp. 4218-4231, 2009.
- [14] Gungor, A. G., Simens, M. P. and Karaca, S., Direct Numerical Simulation of Roughness and Unsteady Wake Effect on Separated Boundary Layers, *In Proceedings, 14th European Turbulence Conference, Lyon, France, 2013.*