

AKIŞ KAYNAKLI RÜZGAR TÜRBİNİ GÜRÜLTÜSÜ HESAPLAMALARI İÇİN YÜKSEK MERTEBELİ DURAĞAN OLMAYAN NAVIER-STOKES ÇÖZÜCÜSÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

Özgür Yalçın*
ODTÜ, Ankara

Yusuf Özyörük†
ODTÜ, Ankara

ÖZET

Geniş frekanslı aerodinamik gürültü, rüzgar türbini gürültü bileşenleri içinde çok önemli yer teşkil eder. Bu gürültüye türbin palleri etrafındaki 3 boyutlu, karmaşık ve durağan olmayan akışlar sebep olur. Bu nedenle paller etrafındaki gürültü oluşma ve yayılma benzetimi yüksek doğruluk dereceli, zamana bağlı hesaplamalar gerektirir. Türbülanslı akış ve türbin yüzeylerinin etkileşiminden oluşan akustik dalgaların kayıpsız ve dağılmadan ilerlemesini benzetmek için bu hesaplamalar yüksek mertebeli çözüm şemaları kullanılarak yapılmalıdır. Bu amaç doğrultusunda yüksek mertebeli, 'dağılma-korunumu-prensibi'ne uygun, sonlu farklar yöntemi ile oluşturulan bir Navier-Stokes çözücüsünün geliştirilmesi sırasında kullanılan sayısal yöntemler ve ilk aşamada elde edilen sonuçlar bu makalede sunulmaktadır.

GİRİŞ

Günümüzde yenilenebilir enerjiye olan ilgiyle beraber rüzgar enerjisiyle ilgili araştırmalar da artmıştır. Dünyanın birçok bölgesinde rüzgar kaynaklı enerji üretimini artırmak için rüzgar türbinlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Ancak rüzgar türbinlerinin inşası gürültü sorununu da beraberinde getirmiştir. Yapılan çalışmalar modern türbinlerde akış kaynaklı gürültünün mekanik aksamı gürültüden daha ciddi bir sorun olduğunu ortaya koymaktadır [Oerlemans, 2009; Rogers ve Manwell, 2002]. Genel olarak gürültü; dönen pallerin hareketinden dolayı pal hacminin yer değiştirmesiyle oluşan monopol, pal üzerindeki aerodinamik yüklemelerden oluşan dipol ve de türbülanslı akıştan kaynaklanan geniş frekanslı quadrupol olarak adlandırılan kaynaklardan oluşmaktadır. Rüzgar türbinlerinin yavaş dönmesinden dolayı monopol ve dipol kaynaklar daha az etkilidir. Geniş frekanslı quadrupol gürültü kaynakları; türbülanslı sınır tabakanın ve palin firar kenarının etkileşmesi, gelen türbülanslı akışın hücum kenarıyla etkileşmesi ve de pal ucu girdapları şeklinde özetlenebilir. Deneysel olarak gürültü analizi yapmak genellikle zor olduğu için nümerik hesaplamalar yapmak gerekmektedir. Sonuç olarak türbülanslı akıştan doğan gürültü kaynaklarını

*Araştırma Görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: oyalcin@ae.metu.edu.tr

†Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: yusuf.ozyoruk@ae.metu.edu.tr

doğru analiz edebilmek için yüksek doğruluk dereceli Navier-Stokes akış denklemlerini nümerik olarak çözmek gerekir.

Türbülanslı akışlar 3 boyutlu, karmaşık ve geniş frekans aralıklarına sahip akışlardır. RANS yöntemi büyük enerji kapasiteli çevrıntilerin modellenmesinde yeterli sonuçlar verse de geniş frekanslı akışlarda yeterli değildir [Kamruzzaman ve ark., 2012; Parchen, 2002]. Her büyüklükteki çevrıntileri hesaplamaya katan DNS yöntemini kullanmak daha doğru gözükmesine rağmen gerçekçi yaklaşımlar için yapılan hesaplamalar bilgisayar özkaynakları kullanımı açısından pahalıya mal olmaktadır. Bunun yerine, az enerjili çevrıntileri modelleyebilen LES yöntemi çok daha iyi sonuçlar vermektedir [Zha ve Im, 2011]. Ancak duvar etrafındaki büyük çevrıntilerin doğrudan çözümü yine hesaplama açısından pahalı olmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için duvar kenarında RANS yöntemini ve uzak bölgelerde LES'i kullanan DES yöntemi hem doğruluk açısından hem de bilgisayar özkaynakları pahası açısından daha idealdir; bu yöntem ise deneysel verilere göre Spalart-Allmaras tek-denklemler türbülans modeli ile iyi sonuç vermektedir [Spalart, 2009].

Yüksek hassasiyet gerektiren çözümler için yüksek mertebeli sonlu farklar, sonlu hacimler veya sonlu elemanlar metodları kullanılmalıdır [Tam, 1995]. Akustik dalgalar akış ortamında kayıpsız ve dağılmadan ilerler. Bu nedenle, bu dalgaları gerçekçi bir şekilde analiz etmek için yüksek mertebeli yöntemlerle birlikte dağılma-korunumu-prensibine uygun (DRP) sonlu farklar metodu kullanımı Tam ve Webb tarafından önerilmektedir [Tam ve Webb, 1993]. DRP metodu; elde edilen gerçek diferansiyel denklemler ile onların sayısal olarak ayrıştırılmış hallerinin dağılma ilişkilerinin hemen hemen aynı olmasını sağlar. Böylece akustik dalgaların daha gerçekçi şekilde dağılmadan ilerleyişi benzetilebilmektedir. Yüksek mertebede algoritmalar kullanmak ise aynı zamanda akustik dalgaların kayıpsız ilerleyişini benzetmeye yarar.

Bu bildiride, yukarıdaki bilgiler ışığında doğrusal (lineer) olmayan Navier-Stokes denklemlerini DES ile Spalart-Allmaras türbülans modeli uygulanarak 4. dereceden, DRP katsayılarıyla oluşturulmuş sonlu farklar yöntemi ile benzeten bir çözücünün geliştirilmesi anlatılmaktadır.

YÖNTEM

Viskoz ve viskoz olmayan terimleri içeren üç boyutlu Navier-Stokes (NS) denklemlerinin genel matematiksel ifadesi (kartezyen koordinatlar için) aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilir:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{E} - \mathbf{E}_{vis})}{\partial x} + \frac{\partial (\mathbf{F} - \mathbf{F}_{vis})}{\partial y} + \frac{\partial (\mathbf{G} - \mathbf{G}_{vis})}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

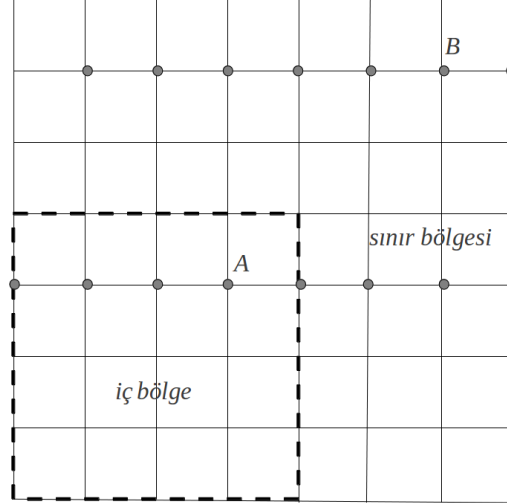
Burada \mathbf{Q} , çözüm değişken vektörünü; $(\mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{G})$, bu değişken vektöre bağlı taşınım sal akı tensör bileşenlerini (kolonlarını) ve $(\mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{G})_{vis}$, viskoz akı tensör bileşenlerini göstermektedir. Bu terimlerin detayları herhangi bir akışkanlar mekaniği kitabında bulunabilir ve yer tutmaması açısından burada verilmeyecektir. Yukarıdaki denklemde yer alan türevler sonlu farklar ayrıştırması ile hesaplanmaktadır. Kullanılan sonlu farklar metodunun detayları aşağıdaki bölümlerde anlatılmaktadır.

Sonlu Farklar Ayrıştırması

Nümerik hesaplamalar sırasında kullanılan ayrıştırma algoritmalarının katsayıları (DRP katsayıları); elde edilen diferansiyel denklemlere Fourier-Laplace dönüşümleri uygulanarak dalga sayısı (veya frekansa) göre en iyileştirme uygulanmasıyla (dönüşümler ile oluşan hata payını bu parametrelerle sıfıra yakınsatarak) elde edilmiştir [Tam ve Webb, 1993]. Böylece gerçek denklemler ile onların sonlu farklar ile ayrıştırılmış hallerinin dağılma prensibi akustik dalgalar açısından yeterince yakınlık göstermektedir.

Ayrıca dalgaların sönmüleme (kayıpsız ilerleme) prensibini benzetmek için gereken yüksek mertebeli ayrıştırma 4. dereceden bir algoritmayla sağlanmıştır.

Uzaysal Ayrıştırma: Dalga sayısı farkını minimize etme amacıyla oluşturulan 4. mertebeli uzaysal ayrıştırma sırasında 7 düğüm noktası ile merkezi sonlu farklar algoritması kullanılmaktadır. Ancak hesaplama alanının sınır bölgelerindeki ihtiyaca göre 7 düğümlü tek yönlü veya asimetrik sonlu farklar algoritmaları yine DRP katsayıları ile uygulanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1: Hesaplama alanının iç ve sınır bölgesi düğüm noktaları

Zamansal Ayrıştırma: Dalgaların açıl frekans farklarını minimize etme amacıyla oluşturulan 4. mertebeli zamansal ayrıştırma 4 adımdan oluşmaktadır ve önceki 4 zaman diliminde bulunan akı sonuçlarının DRP katsayılarıyla çarpılmış değerleriyle bir sonraki akış parametrelerinin bulunmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu zaman integrasyonu durağan olmayan akış problemleri için gereklidir ve her hücre için sabit bir zaman adımı kullanır. Durağan problemler için 4. mertebeden kompakt Runge-Kutta zaman integrasyonu kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen DRP katsayılarından yola çıkarak NS denklemlerinin optimize edilmiş 4. mertebeli sonlu farklar çözümünün kodlamada kullanılan genel algoritması ise şu şekildedir:

Uzaysal ayrıştırma ile oluşan akı:

$$\mathbf{A}(x, y, z, t) = -\frac{1}{\Delta x} \sum_{j=-3}^3 a_j \mathbf{E}(x + j\Delta x, y, z, t) - \frac{1}{\Delta y} \sum_{j=-3}^3 a_j \mathbf{F}(x, y + j\Delta y, z, t) - \frac{1}{\Delta z} \sum_{j=-3}^3 a_j \mathbf{G}(x, y, z + j\Delta z, t) \quad (2)$$

Akı değerleriyle birlikte zamansal ayrıştırma ile bir sonraki zamanda (Δt kadar sonra) oluşacak akış değerleri:

$$\mathbf{Q}(x, y, z, t + \Delta t) = \mathbf{Q}(x, y, z, t) + \Delta t \sum_{j=0}^3 b_j \mathbf{A}(x, y, z, t - j\Delta t) \quad (3)$$

Merkezi ve merkezi olmayan a_j ve b_j DRP katsayıları Tam'in yayınlarında verilmektedir [Tam ve Webb, 1993; Tam ve Dong, 1994].

Sınır Koşulları

Nümerik hesaplamaların belki de en dikkat edilmesi gereken kısmı sınır şartlarıdır. Bu şartlar, çözülmek istenen akış probleminin fiziksel doğasına uygun olmakla birlikte matematiksel olarak iterasyonun sonuca yakınsama sürecini de etkilemeyecek şekilde olmalıdır.

Duvar Sınır Şartları: Sıkışabilir ve viskoz olmayan akış denklemlerinin (Euler) katı bir cisim yüzeyinde çözümünü sırasında dikkat edilmesi gereken fiziksel şart; akışın yüzeyden kayarak geçmesidir.

Matematiksel olarak yüzey noktası şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\vec{V} \cdot \hat{n} = 0 \quad (4)$$

Burada \hat{n} sınır şartının uygulandığı yüzeyin normal vektörünü göstermektedir. Basınç, momentum denkleminde; hava yoğunluğu ise hal denklemi sayesinde ısı alışverişsiz veya ısı alışverişli yüzeye göre bulunabilmektedir.

Sıkışabilir ve viskoz akış denklemlerinin (Navier-Stokes) duvar yüzeyinde çözümünü ise fiziksel olarak akışın yüzeyden kaymadan geçmesi ile tanımlanmaktadır. Ayrıca ince sınır tabaka teorisi sonucu olarak basıncın sınır tabaka içinde akışa dik gradyanının sıfır olması da duvar koşulu için fiziksel bir ifadedir. Yine aynı şekilde hal denklemi yardımı ile ısı alışverişsiz ortam olması veya olmaması ile hava yoğunluğu yüzeyde tanımlanabilmektedir. Matematiksel ifadesi şudur:

$$\vec{V} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} p \cdot \hat{n} = 0 \quad (6)$$

Tam ve Dong'un çalışması her iki durumda da duvarda fiziksel gereksinimden dolayı tanımlanan her denklem kadar duvar içerisinde hayalet düğüm noktası oluşturularak o denklemlere neden olan akış parametrelerinin (örn. p, τ_w) hayalet düğüm noktalarında merkezi olmayan DRP sonlu farklar algoritmasıyla ayrıştırılarak çözümlenmesini önermektedir [Tam ve Dong, 1994]. Lineer denklemler için sınırda tek taraflı ayrıştırmanın kullanılması sonlu farklar ayrıştırılmadan kaynaklanan nümerik parazit dalgaların sönümlendirilmesini de sağlamaktadır. Ancak lineer olmayan denklemler için bu yöntem karmaşık hale gelmektedir ve bazı nümerik kararsızlıklara yol açmaktadır [Tam, 2004]. En ideal method; merkezi ayrıştırılmayı sınırda da devam ettirerek yapay sönümleme akı terimlerini fiziksel akıya ekleyerek bu parazit dalgalardan kurtulmaktır. Yapay sönümlemenin algoritması daha sonra anlatılacaktır.

Sonuç olarak, geliştirilen bu kodda fiziksel duvar bölgelerinde 3'er hayalet düğüm noktası kullanılarak iç noktalarda uygulanan merkezi ayrıştırma algoritması korunmuştur. Dirichlet ve Neumann tipi sınır şartlarıyla hayalet düğümlerdeki akış parametrelerinin değerleri yukarıda bahsedilen fiziksel koşulları yerine getirecek şekilde oluşturulmuştur.

Uzak Alan Sınır Şartları: Akustik problemlerde kaynağın oluşturduğu dalgaların yansıma yapmadan çıkıp gitmesi gerekir. Doğrusallaştırılmış Euler denklemleri bu dalgaların akustik, entropi ve girdap olarak üçe ayrılan karakteristiklerini içermektedir. Bu nedenle uzak alan sınır şartlarının doğrusallaştırılmış Euler denklemlerinin asimptotik (kavuşmaz) çözümlerine göre tanımlanması önerilmiş ve böylece oluşan dalgaları geri yansıtmayacak şekilde algoritması oluşturulmuştur [Tam ve Dong, 1996]. Sınırda uygulanan doğrusallaştırılmış Euler denklemlerinin iç bölgelerde uygulanan Navier-Stokes denklemleriyle birlikte uygulanabildiğini Bogey ve Bailly göstermiştir [Bogey ve Bailly, 2002].

Akış yönüne göre hesap alanından içe-giren (yayınım) ve dışa-giden şeklinde uzak alan sınır şartları iki farklı denklemler kümesiyle çözülür (denklemlerde çözülmek istenen değerler akış değişkenlerinin pertürbasyon değerleridir ($q' = q - q_\infty$)).

Üç boyutlu içe-giden akış sınır şartları denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} \rho' \\ \vec{u}' \\ p' \end{Bmatrix} + V(\theta) \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \begin{Bmatrix} \rho' \\ \vec{u}' \\ p' \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Üç boyutlu dışa-giden akış sınır şartları denklemleri ise şu şekildedir:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \vec{u}_\infty \cdot \nabla \rho' = \frac{1}{(c_\infty)^2} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + \vec{u}_\infty \cdot \nabla p' \right) \quad (8a)$$

$$\frac{\partial \vec{u}'}{\partial t} + \vec{u}_\infty \cdot \nabla \vec{u}' = -\frac{1}{\rho_\infty} \nabla p' \quad (8b)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + V(\theta) \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) p' = 0 \quad (8c)$$

Denklemlerdeki $V(\theta)$ ise;

$$V(\theta) = \vec{V} \cdot \hat{e}_r + \left(a^2 - (\vec{V} \cdot \hat{e}_\theta)^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

Uzak alan sınır şartlarının kodlamadaki algoritması diğer sınır şartlarına göre farklılık göstermektedir. Burada uygulanan yöntem; her bir hayalet düğüm noktasında geriye doğru DRP katsayıları ile uzaysal ayrıştırma yapılarak doğrusallaştırılmış Euler denklemlerinin çözülmesidir. Ayrıca asimptotik sınır şartı uygularken uzak alan sınırının çözülen geometriden görece uzak olması gerekmektedir, çünkü denklemlerdeki $(1/r)$ çarpanları geometrinin her noktasından değil merkezinden alınmaktadır.

Yapay Sönümleme

Akış denklemlerinin DRP prensibine uygun nümerik çözümüyle gerçek çözümü kısa dalgalar (yüksek dalga-sayısına sahip) için tamamen örtüşmemektedir. Bunun nedeni büyük dalgalara göre uzayda farklı ilerleme karakteristiğine sahip olmalarıdır. Bu farklılık nümerik çözüm sırasında sönümleme hatalarına sebebiyet vermektedir.

Hesap alanını bu kısa dalgalardan arındırmak için Tam, Webb ve Dong'un önerdiği DRP prensibine dayanarak oluşturulan yapay sönümleme terimleri ilave edilmiştir [Tam, Webb ve Dong, 1993]. Bu terimler çözüm ağının her yerinde aynı katsayıları kullanacak şekilde oluşturulmuştur.

Fiziksel akıya eklenen 4. mertebeden yapay sönümleme akısının algoritması (hesaplama alanında bulunan herhangi bir 'm' düğüm noktası için) şöyle ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}_m}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}_m}{\partial x} + \dots = -\mu \sum_{j=-3}^3 c_j \mathbf{Q}_{m+j} \quad (10)$$

Burada μ yapay sönümleme katsayısıdır.

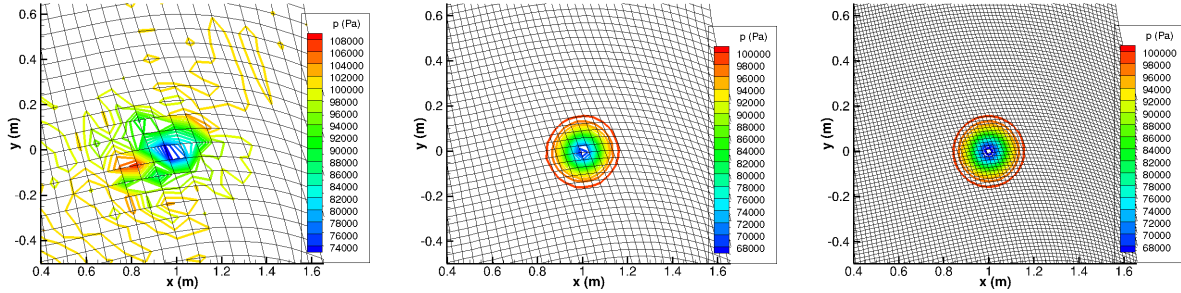
UYGULAMALAR

İzantropik Girdap Taşınımı

Uzaysal ve zamansal ayrıştırmaların doğru uygulanıp uygulanmadığını görmek için teorik çözümü verilen, zaman ve hızla tüm özellikleriyle olduğu gibi taşınmasını gerektiren 2 boyutlu bir izantropik girdap problemini incelemek uygundur.

50×50 , 100×100 ve 200×200 hücre yapısına sahip düzgün olmayan 3 farklı kartezyen ağ kullanılmıştır. Gauss dağılımıyla oluşturulmuş ve $V_{ref} = 200$ m/s hıza sahip girdap $x = 0$ m'den $x = 1$ m'ye kadar taşınmıştır.

Sıkışabilen Euler denklemleri kullanılarak 3 farklı hücre yapısı için girdapların basınç değerlerinin taşınmış halinin 2 boyutlu kesiti Şekil 2 içinde gösterilmiştir. Çözünün kaçınıcı mertebede olduğu hataların ortalama kareköküne (RMS) bakılarak tespit edilebilir ve Şekil 3'te hata eğimleri 2. ve 4. merteye eğrileriyle kıyaslanarak verilmiştir.

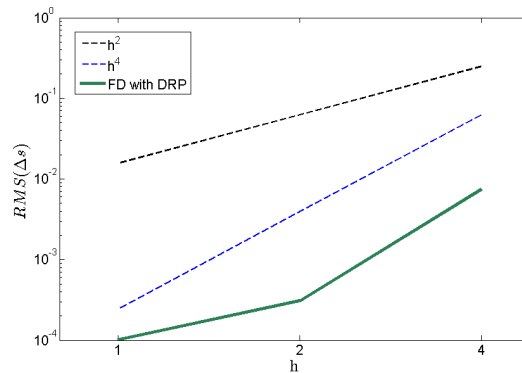


(a) 50×50 ağ yapısı

(b) 100×100 ağ yapısı

(c) 200×200 ağ yapısı

Şekil 2: İzantropik vortex taşınımının DRP korunumlu 4. mertebeden elde edilen basınç konturları

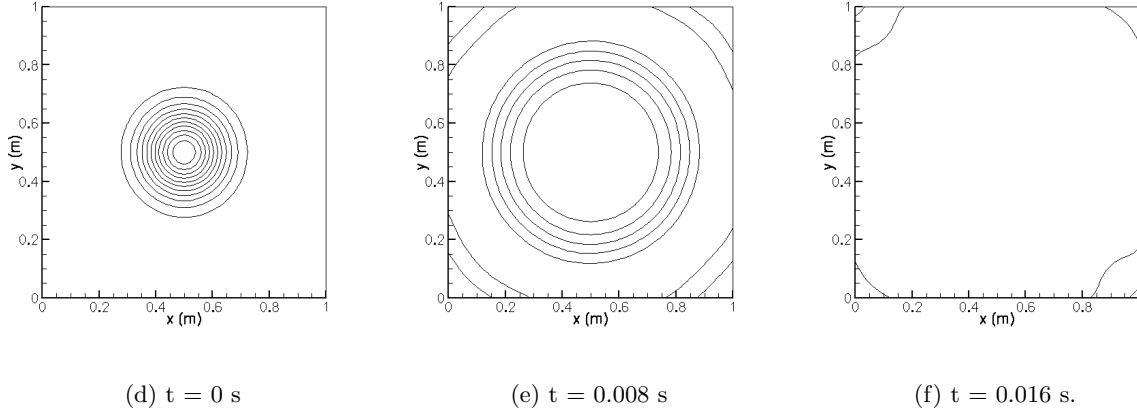


Şekil 3: Boyutsuz entropi değerlerinin analitik çözümlerle farklarının RMS değerlerinin logaritmik ölçekte çizimi

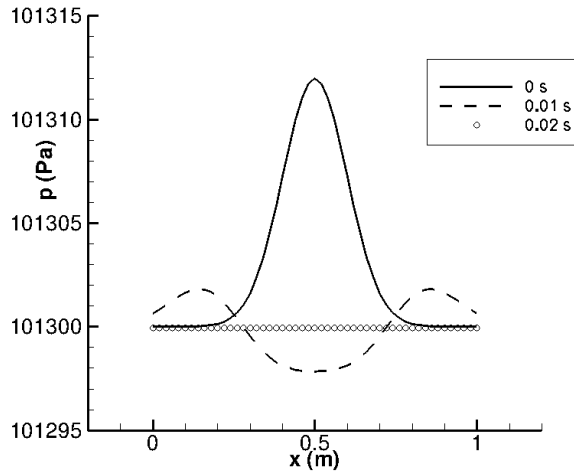
Uzak Alan Sınır Şartlarının Testi

Akustik problemlerin simülasyonlarında dalgaların hesaplama alanından yansıma yapmadan çıkmasının öneminden bahsedilmiştir. Bu bölümde yöntem kısmında anlatılan uzak alan sınır

şartlarının geliştirilen koddaki testi anlatılmaktadır. Hesaplama alanı merkezinde gauss dağılımıyla oluşturulan bir basınç sinyalinin, akış hızının sıfır olduğu bir ortamda büyüerek alandan yansımadan çıkartılması test edilmiştir. Serbest akış basınç değeri 101300 Pa'dır. Şekil 4'te sinyalin zamanda ilerleyişi görülmektedir. Şekil 5'te ise sinyalin 0 (oluştugu andaki), 0.01 ve 0.02 saniye sonraki merkezden ($y=0.5m$) alınan kesitteki dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 4: Basınç sinyalinin farklı zamanlardaki hesaplama alanı içerisindeki görünümü



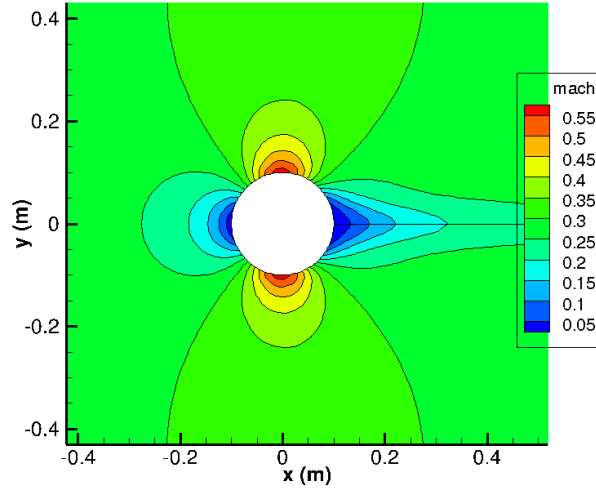
Şekil 5: $y=0.5$ m'deki basınç sinyalinin farklı zamanlardaki dağılımı

Şekil 4'te görüldüğü üzere sinyal kabul edilebilir derecede yansıma yapmadan alandan çıkmaktadır ve hesaplama alanı tamamen serbest akış değerine ulaşmaktadır (Şekil 5). Bu gösteriyor ki; kullanılan asimptotik sınır şartı denklemleri akustik problemler için yeterince uygundur ve bundan sonraki testlerde bu sınır şartı kullanılacaktır.

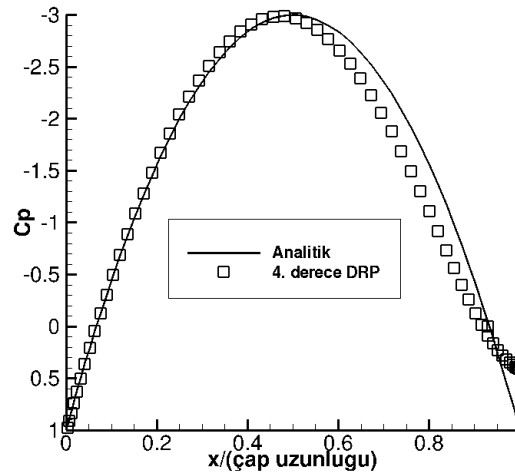
Silindir Etrafında Viskoz Olmayan Akış Problemi

Doğrusal olmayan Euler denklemlerinin testi için silindir etrafında sıfır derece hücum açısıyla 0.3 mach'lık bir akış test edilmiştir. Elde edilen mach konturları Şekil 6'da gösterilmektedir. Buradaki hız yaklaşık olarak sıkıştırılamayan akış koşullarına denk gelmektedir ve Euler denklemleri çözüldüğü için silindirin ön ve arka tarafında yaklaşık simetrik kontur dağılımlar beklenmelidir. Mevcut çözümlerde simetrinin fihar noktasına doğru bozulduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 7'de

gösterilen yüzey basınç dağılımı grafiğinde daha iyi gözlenmektedir. Bu şekilde silindir yüzeyi üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımı analitik sonuçla (potansiyel akış sonucu) karşılaştırılmıştır ve sayısal sonuçlarda bazı sapmalar olduğu görülmüştür. Bu sonuç; yüksek mertebeli ve durağan olmayan bir algoritmayla elde edilen çözümün stabil yapılması için kullanılan yapay yitimin sınır tabakaya benzer etki yarattığı kanısını oluşturmuştur.

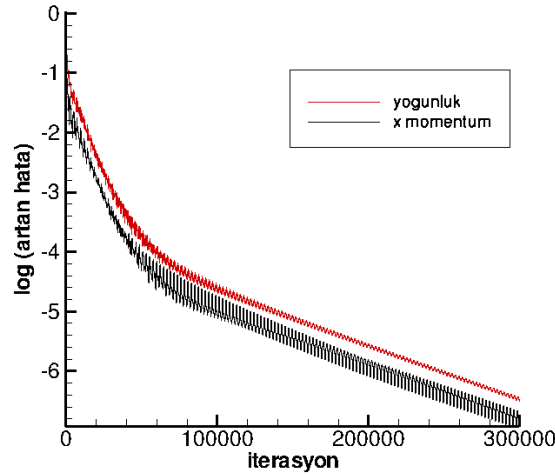


Şekil 6: Sıfır derece hücum açısı ve 0.3 mach'a sahip viskoz olmayan akışın silindir etrafında oluşturduğu mach konturları



Şekil 7: Silindir yüzeyindeki C_p dağılımının analitik sonuçla kıyaslanması

Yakınsamış nümerik çözümün iterasyon sayısına göre yoğunluk ve x momentum artık hata değerlerinin kaç mertebe düştüğü Şekil 8'de gösterilmiştir. Yüksek iterasyon sayısı gerekliliği, geliştirilmiş bulunan algoritmanın yüksek mertebeli ve dolayısıyla durağan akışlara uygun olmamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8: Akış yoğunluk ve x momentum değerleri için iterasyon sayısı ile artık hata değerlerinin logaritmik düşüşü

Gösterilen tüm viskoz olmayan sonuçlarda çözüm açısından bağımsız ve sabit katsayılı bir yapay yitim algoritması kullanılmıştır. Ancak, çözüm ağı yoğunluklarına ve akış değişkenlerinin yüksek veya düşük gradyan değerlerine göre değişen bir seçici yapay sönümlleme algoritması [Kim ve Lee, 2001], viskoz ve türbülanslı problemlerde kullanmak adına önemli görülmüştür.

SONUÇ

Bu makalede rüzgar türbin palleri etrafındaki türbülans akış kaynaklı gürültü kaynaklarını doğrudan tespit edebilmek amacıyla 'dağılma-korunumu-prensibi'ne dayalı yüksek mertebeli bir Navier Stokes çözücüsünün geliştirilmesi sırasında uygulanan yöntemler ve elde edilen başlangıç test sonuçları anlatılmıştır. Akustik problemlerde neden DRP ve yüksek mertebeli bir nümerik ayrıştırılmaya gereksinim duyulduğu ve rüzgar türbinleri için türbülans çözümü ihtiyacı açıklanarak, bununla ilgili literatürdeki gelişmeler aktarılmıştır. Başlangıç olarak viskoz olmayan denklemler ve sınır şartları test edilmiştir. Esas amaç durağan olmayan problemleri çözmek olduğu için kullanılan yapay yitim, elde edilen silindir etrafındaki viskoz olmayan sonuçlarda bazı hatalara sebebiyet vermiştir. Asimptotik denklemler ile istenilen yansız uzak alan sınır koşulu sağlanabilmiş, uygulanan merkezi duvar sınır şartları ve yapay filtre ile yakınsar çözümler elde edilebilmiştir. Viskoz denklemlerin testlerine başlanılmış, ancak doğrulanması henüz yapılmamıştır. Laminar problemlerin (seçici yapay sönümlleme algoritması eklenerek) doğrulanmasından sonraki süreçte Spalart-Allmaras denklemi eklenmesiyle DES simülasyonu yapılarak gürültü kaynağı tespit edilip oluşan ses dalgalarının daha uzak alanlara ilerleyişi Ffowcs-Williams-Hawkings benzeşim denklemleriyle analiz edilecek ve sonuçlar tekrar aktarılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 112M106 no'lu TÜBİTAK 1001 Projesi desteği ile yürütülmüş ve yürütülmeye devam etmektedir.

Kaynaklar

- Bogey, C. ve Bailly, C., 2002. *Three-dimensional non-reflective boundary conditions for acoustic simulations: far field formulation and validation test cases*, Acta Acustica United with Acustica, s. 463-471
- Kamruzzaman, M., Lutz, T., Würz, W., Shen, W., Zhu, W., Hansen, M., Bertagnolio, F. ve Madsen, H., 2012. *Validations and improvements of airfoil trailing-edge noise prediction models using detailed experimental data*, Wind Energy, Wiley Online Library, s. 45-61
- Kim, J. W. ve Lee, D. J., 2001. *Adaptive nonlinear artificial dissipation model for computational aeroacoustics*, AIAA Journal 39(5), s. 810-818
- Oerlemans, S., 2009. *Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines*, University of Twente
- Parchen, R., 1998. *Progress Report DRAW: A Prediction Scheme for Trailing-Edge Noise Based on Detailed Boundary-Layer Characteristics*, TNO Institute of Applied Physics, The Netherlands
- Rogers, A. L. ve Manwell, J. F., 2002. *Wind turbine noise issues*, Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts Amherst MA
- Spalart, A. ve Philippe, R., 2009. *Detached-eddy simulation*, Annual Review of Fluid Mechanics, s. 181-202
- Tam, C., 1995. *Computational aeroacoustics-Issues and methods*, AIAA Journal, Vol.33
- Tam, C., 2004. *Computational aeroacoustics: an overview of computational challenges and applications*, International Journal of Computational Fluid Dynamics, s. 547-567
- Tam, C. ve Dong, Z., 1994. *Wall boundary conditions for high-order finite-difference schemes in computational aeroacoustics*, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, s. 303-322
- Tam, C. ve Dong, Z., 1996. *Radiation and outflow boundary conditions for direct computation of acoustic and flow disturbances in a nonuniform mean flow*, Journal of Computational Acoustics, s. 175-201
- Tam, C., Webb, J. ve Dong, Z., 1993. *A study of the short wave components in computational acoustics*, Journal of Computational Acoustics, s. 1-30
- Tam, C. ve Webb, J., 1993. *Dispersion-relation-preserving finite difference schemes for computational acoustics*, Journal of Computational Physics, Department of Mathematics, Florida State University, Tallahassee, Florida
- Zha, G. ve Im, H., 2011. *Delayed Detached Eddy Simulation of a Stall Flow Over NACA0012 Airfoil Using High Order Schemes*, AIAA Aerospace Sciences Meeting, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami, Florida