

TAICE YAZILIMI İLE KARIŞIK FAZLI BULUT KOŞULLARINDA BUZLANMA TAHMİNİ

Erdem Ayan¹ Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. ANKARA
Serkan Özgen² Orta Doğu Teknik Üniversitesi ANKARA
Murat Canıbek³ Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. ANKARA

ÖZET

Son yıllarda katı ve karışık fazlı bulutlarda bulunan buz kristallerinin yol açtığı buzlanma nedeniyle uçaklarda uçuş emniyetini tehdit eden birçok durum yaşanmış ve bunların bir kısmı kazaya sebebiyet vererek can ve mal kaybına yol açmıştır. Buz kristalleri özellikle yüksek irtifalarda bulunan konvektif bulutların yakınında uçarken uçak motorları ve pitot tüpü gibi ısıtılan sensörler için risk oluşturmaktadır. Artan olaylar sebebiyle uçak üreticileri, sertifikasyon otoriteleri, bilim insanları ve araştırmacılar buz kristallerinin uçaklar için oluşturduğu riski araştırmak amacıyla son yıllarda birçok çalışma başlatmışlardır. HAIC (High Altitude Ice Crystals - Yüksek İrtifa Buz Kristalleri) projesi de bu amaçla başlatılmış AIRBUS firması tarafından yürütülen bir Avrupa Birliği 7. Çerçeve Programı projesidir. Avrupa'nın önde gelen endüstriyel ve akademik kuruluşlarıyla beraber TUSAŞ da projenin ortağıdır. Proje ile birlikte TUSAŞ sıvı damlacıklardan dolayı oluşan buzlanma hesaplama kabiliyetinin yanında katı buz kristallerinden dolayı oluşan buzlanma tahmini kabiliyetini de eklemek amacındadır. Bu sayede mevcut TAICE yazılımı, buz kristallerinden dolayı güncellenen sertifikasyon gereksinimlerine yönelik uyum gösterimi aşamasında kullanılabilir. Proje süresince buz kristalleri için geliştirilmiş yörünge, ısı transferi-faz değişimi, çarpma ve buz birikimi modelleri TAICE yazılımına eklenmiştir. Bu bildiriye kullanılan modeller ve TAICE yazılımıyla yapılmış olan buzlanma birikimi tahminleri sunulmaktadır. Doğrulama çalışması olarak NRC ve COX bünyesinde yapılmış buzlanma testleri sonuçları kullanılmıştır.

GİRİŞ

Havanın sıvı fazda su içermediği durumda bile buz kristalleri uçakların çeşitli kısımları için tehdit oluşturabilmektedir. Artan irtifa ve düşen sıcaklık ile birlikte su buharının önce yoğunlaşip ardından katı faza geçmesi sebebiyle bulut içerisindeki buz kristal miktarı özellikle konvektif bulutlarda ani artış göstermektedir. Ayrıca buz kristallerinin sıvı fazdaki parçacıklara göre radar sistemlerinde tespit edilebilmesi daha zordur. Tüm bu sebeplerden ötürü hava araçları buz kristallerinin yoğun olarak buldukları bulutlara farkında olmadan girebilirler [Mason, Strapp ve Chow 2006]. Son yıllarda sıvı parçacıklardan dolayı oluşan buzlanmanın tahmini konusunda oldukça ilerleme sağlanmış fakat buz kristalleri konusunda yeterince çalışma yapılmamıştır.

Buz kristalleri, çok düşük sıcaklıklardaki katı yapılarından dolayı, bir yüzeye temas ettiklerinde yüzeyden sekerek buz birikimine sebep olmamaktadırlar. Fakat nispeten daha yüksek sıcaklıktaki bölgelere yaklaştıklarında kristaller kısmen ya da tamamen eriyebilirler ve bünyelerindeki sıvı kısım sayesinde yüzeye yapışarak yüzey üzerinde su tabakası oluşmasına sebep olabilirler. Oluşan bu

¹ Uzman, E-posta: eayan@tai.com.tr

² Prof. Dr., E-posta: serkan.ozgen@ae.metu.edu.tr

³ Uzman, E-posta: mcanibek@tai.com.tr

su tabakası daha çok buz kristalinin yüzeye yapışmasına yol açabilir ve yüzey üzerindeki biriken buz miktarının artmasına yol açabilir. Yapışan kristal miktarının artması ayrıca yüzeyin daha çok soğumasına sebep olarak yüzey üzerindeki su tabakasının da donmasına neden olabilir. Bu tip buz oluşumları motor hava alğını tıkayarak motorun performansının düşmesine yol açabilir.

Buz birikiminin doğru olarak hesaplanabilmesi için buz kristalinin yörüngesinin, çevresiyle yapmış olduğu ısı ve kütle alışverişinin, faz değişiminin, yüzeye çarpma fiziğinin ve çarpmış olduğu yüzeydeki buz oluşumunun doğru tahmin edilmesi gerekmektedir.

YÖNTEM

Bu kısımda TAICE yazılımına eklenen buz kristaline özgü modellerin açıklamaları yapılacaktır. Bu modeller temelde damlacık ya da kristallerin yörüngelerinin, damlacık ya da kristallerin ısı transferi & faz değişiminin, parçacıkların çarpma ve buz birikimlerinin hesaplandığı dört ana kısma ayrılabilir. Modellerin detaylarına geçmeden önce buz kristalinin geometrik özelliklerine değinmek faydalı olacaktır.

Buz Kristali Parçacığı Geometrik Özellikleri

Buz kristalinin küreye yakın olan şeklini tanımlamakta, açıklık oranı (E) önemli bir parametredir. Açıklık oranına göre kristalin şekli basık kutuplu (oblate $E < 1$) veya şişik kutuplu (prolate $E > 1$) olabilir. Küresellik ise parçacığın yörüngesini etkileyen başka bir önemli parametredir ve hesaplama şekli parçacığın basık veya şişik kutuplu olmasına bağlı olarak değişiklik gösterir [Villedieu, Trontin ve Chauvin, 2014]:

$$\Phi = \frac{\pi d_p^2}{A} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde A kristalin yüzey alanını, d_p eşdeğer hacim çapını ifade eder ve aşağıda belirtilen şekilde hesaplanır:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6v_p}{\pi}} \quad (2)$$

Yukarıdaki ifadede v_p parçacığın hacmidir.

Parçacığın akış içerisindeki oryantasyonu enlemesine küresellik parametresi ile tanımlanır [3]:

$$\Phi_{\perp} = \frac{\pi r_p^2}{A_{\perp}} \quad (3)$$

Bu denklemde A_{\perp} parçacığın akışa dik izdüşüm alanıdır.

Küreselliğin ve enlemesine küreselliğin tanımına geçmeden önce açıklık oranı (E) ve eksentrikliğin (e) tanımları yapılmalıdır:

$$E = \frac{d_1}{d_2}, \quad e = \sqrt{1 - \min\left(\frac{d_1}{d_2}, \frac{d_2}{d_1}\right)^2} \quad (4)$$

Burada d_1 parçacığın dönme eksenine paralel, d_2 ise dik doğrultudaki kesitinin çapıdır. Sırasıyla;

Basık kutuplu kristaller için;

$$\Phi = \frac{4E^{2/3}}{2 + \frac{E^2}{e} \ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right)} \quad (5)$$

ve şişik kutuplu kristaller için belirtilen şekilde hesaplanır.

$$\Phi = \frac{2E^{2/3}}{\left(1 + E \frac{\arcsin(e)}{e}\right)} \quad (6)$$

Parçacığın eğer yörünge boyunca sabit oryantasyonda hareket ettiği varsayılırsa, enlemesine küresellik basık ve şişik kutuplu kristaller için aşağıda belirtilen şekilde hesaplanabilir:

$$\Phi_{\perp} = E^{2/3} \quad (7)$$

$$\Phi_{\perp} = E^{-1/3} \quad (8)$$

Sürüklenme Kuvveti Katsayısı Modelleri

Literatürde küresel ya da küresel olmayan parçacıklar için birçok sürüklenme kuvveti katsayısı modeli bulunmaktadır. Bu modellerin bir kısmı tam olarak küre olmayan parçacıklar için de kullanılabilir.

Haider & Levenspiel küresellik Φ ve kristalin Reynolds sayısına, $Re_p = \rho_a d_p v_{rel} / \mu$ bağlı olarak bir model geliştirmiştir. Denklem (9)'da gösterilen bu modelde ρ_a havanın yoğunluğunu, v_{rel} parçacığın akışa göre hızını, μ ise dinamik viskoziteyi ifade etmektedir. [Haider ve Levenspiel, 1989]:

$$C_d = \left[\frac{24}{Re_p} (1 + a(Re_p^b)) \right] + \frac{cRe_p}{Re_p + d} \quad (9)$$

$$a = \exp(2.4486\Phi^2 - 6.5481\Phi + 2.3288)$$

$$b = (0.5565\Phi + 0.0964)$$

$$c = \exp(-10.2599\Phi^3 + 18.4222\Phi^2 - 13.8944\Phi + 4.905)$$

$$d = \exp(15.8855\Phi^3 - 20.7322\Phi^2 + 12.2584\Phi + 1.4681)$$

Ganser modelinde ise parçacığın küreselliğinin yanısıra enlemesine küresellik, Φ_{\perp} dikkate alınır [Ganser, 1993]:

$$C_d = \left[\frac{24}{Re_p^*} (1 + 0.1118(Re_p^{*0.6567})) \right] + \frac{0.4305Re_p^*}{Re_p^* + 3305} \times 10^{1.8148[-\log(\Phi)]^{0.5743}} \quad (10)$$

$$Re_p^* = \frac{Re_p}{\frac{2}{3}\Phi^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{3}\Phi_{\perp}^{-\frac{1}{2}}} 10^{1.8148[-\log(\Phi)]^{0.5743}} \quad (11)$$

Hölzer ve Sommerfeld modelinde de Ganser modelinde olduğu gibi parçacığın küreselliğinin yanısıra enlemesine küresellik, Φ_{\perp} dikkate alınır [Hölzer ve Sommerfeld, 2008]:

$$C_d = \frac{8}{Re_p} \frac{1}{\sqrt{\Phi_{\perp}}} + \frac{16}{Re_p} \frac{1}{\sqrt{\Phi}} + \frac{3}{\sqrt{Re_p}} \frac{1}{\Phi^{\frac{3}{4}}} + \frac{0.421}{\Phi_{\perp}} 10^{0.4(-\log(\Phi))^{0.2}} \quad (12)$$

Isı Transferi ve Faz Değişimi Modeli

Villedieu [2014] çalışmasında Frössling'in [Frössling, 2008] ısı transferi modelini geliştirerek parçacığın sürükleme katsayısı, C_d ve Nusselt sayısı, Nu arasındaki bağıntıyı küresel olmayan parçacıklar için de kullanılabilir hale getirmiştir.

$$Nu = 2\sqrt{\Phi} + 0.55Pr^{\frac{1}{3}}\Phi^{0.25}Re_p^{0.5} \quad (13)$$

Modelin orijinalinin açıklandığı olan Mason'ın çalışmasında ısı transferi modeli üç kısma ayrılmaktadır. [Mason, 1956]

Parçacığın sıcaklığı donma sıcaklığının altındayken: Parçacığın kütlesinin zamanla değişimini ifade eden denklem aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p \frac{Sh}{\Phi} \rho_a D_{v,a} (y_{v,s} - y_{v,a}) \quad (14)$$

Bu denklemde $y_{v,s}$ parçacığın yüzeyi üzerindeki su buharının kütle oranını, $y_{v,a}$ akış alanındaki su buharının kütle oranını, $D_{v,a}$ su buharının havadaki yayılım değerini ve Sh ise Sherwood sayısını göstermektedir.

$$D_{v,a} = 0.0000226 \left(\frac{T_p}{273.15} \right)^{1.81} \left(\frac{10000}{P_a} \right) \quad (15)$$

$$Sh = 2\sqrt{\Phi} + 0.55 Sc^{1/3} \Phi^{0.25} Re_p^{0.5} \quad (16)$$

$$y_{v,s} = \frac{M_v P_{sat}(T_{p,s})}{M_m P_a} \quad (17)$$

$$y_{v,a} = \frac{M_v P_{sat}(T_a)(RH)}{M_m P_a} \quad (18)$$

Bu denklemlerde M_v ve M_m sırasıyla su buharının ve karışımın molar kütlelerini, RH havadaki nem oranını, P_a statik hava basıncını $P_{sat}(T_{p,s})$ ve $P_{sat}(T_a)$ parçacık yüzeyinin ve havanın buldukları sıcaklıklardaki doymuş hava basıncını ve Sc ise Schmidt sayısını göstermektedir.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{v,a}} \quad (19)$$

Bu denklemde ν kinematik viskoziteyi belirtmektedir ve doymuş hava basıncının hesabı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.

Hava sıcaklığı 273.15 K den küçük olduğu zaman (Pa):

$$p_{sat,i}(T) = \exp \left[\frac{-6024.5282}{T} + 29.32707 + 1.06139 \cdot 10^{-2} * T \right] - 1.31988 \cdot 10^{-5} * T^2 - 0.49383 * \ln(T) \quad (20)$$

Hava sıcaklığı 273.15 K den büyük olduğu zaman (Pa):

$$p_{\text{sat},i}(T) = \exp \left[\frac{-6093.9385}{T} + 21.24096 - 2.71119 \cdot 10^{-2} * T \right] + 1.67395 \cdot 10^{-5} * T^2 + 2.43350 * \ln(T) \quad (21)$$

Ek olarak hava yoğunluğunun sabit olduğu varsayımıyla, ısı transferi denkleminin son hali aşağıda verilmiştir.

$$\pi \rho_p \frac{dp^3}{6} c_i \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p \frac{Nu}{\Phi} k_a (T_a - T_p) - \dot{m}_{\text{sub}} [L_f + L_v] \quad (22)$$

Bu denklemde erime ve buharlaşma gizli ısıları L_f ve L_v ile gösterilmiştir.

Parçacığın sıcaklığı erime sıcaklığına eşit olduğu durumda: Parçacığın kütlesi etrafını sarmış olan su tabakasının buharlaşması ile azalabilir. Bu kısmın sonunda parçacık tamamen küre şeklini alır ve sıvı faza geçer. Bu durum için geçerli olan ısı transferi hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\pi d_p \frac{Nu}{\Phi} k_a (T_a - T_f) = \dot{m}_{\text{ev}} L_v + \dot{m}_f L_f \quad (23)$$

Buharlaşma hızı, \dot{m}_{ev} belirtilen şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{m}_{\text{ev}} = - \frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \frac{Sh}{\Phi} \rho_a D_{v,a} (y_{v,s} - y_{v,a}) \quad (24)$$

Ayrıca erime hızı \dot{m}_f buzun kütlesindeki değişim ile ilişkilendirilebilir:

$$m_{p,i} = \pi \rho_{p,i} \frac{dp_{p,i}^3}{6} \quad (25)$$

$$\dot{m}_f = - \frac{dm_{p,i}}{dt} \quad (26)$$

Parçacığın sıcaklığı erime sıcaklığından yüksek olduğu durumda: Parçacık tamamen sıvı haldedir ve sıcaklığı ısı eklenmesiyle birlikte yükselmektedir. Ayrıca buharlaşma ile parçacığın kütlesinde azalma meydana gelebilir. Bu son durum için geçerli olan denklem aşağıda verilmiştir.

$$\pi \rho_w \frac{dp^3}{6} c_w \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p Nu k_a (T_a - T_p) + \frac{d(\pi \rho_w \frac{dp^3}{6})}{dt} L_v \quad (27)$$

Parçacık Çarpma Modeli

Yapışma olasılığı hesabı: Yüzeye kristal parçacığının çarpması üç farklı durum ile sonuçlanabilir. Bu durumlar sırasıyla yapışma, geri sıçrama ve parçalanma olarak isimlendirilebilir. Bu çarpma durumları ile ilgili detaylı bilgi Villedieu'nün çalışmasında verilmiştir [Villedieu, Trontin ve Chauvin, 2014].

Tamamıyla yapışma ve geri sıçrama durumlarında parçacığın boyutunun ve şeklinin değişmediği varsayılmaktadır. Parçalanma durumunda ise parçacığın daha küçük parçalara ayrıldığı ve bir kısmının yapıştığı kalan kısımlarının ise geri sıçrayıp akışa katıldığı gözlemlenmiştir. Bu farklı çarpma durumlarının sınırlarını belirlemek için eşik değerler hesaplanmıştır. Parçacığın çarpma öncesi sahip olduğu kinetik enerji hesaplanarak çarpma durumunun hangisi olduğuna karar verilecek bir model geliştirilmiştir.

$$\mathcal{L} = \frac{\pi \rho_p d_p^3 (v_{pn})^2}{12 \pi \epsilon_\sigma T_p d_p^2} = \frac{1}{12} \frac{\rho_p d_p v_{pn}^2}{\epsilon_\sigma T_p} \quad (28)$$

Bu denklemde v_{pn} parçacığın çarpma öncesi hızının yüzeye dik bileşenini ve ϵ_σ ise parçacığın birim alandaki yüzey enerjisini göstermektedir.

$$\epsilon_\sigma = \epsilon_{\sigma 0} \exp\left(\frac{Q_s}{RT} - \frac{Q_s}{RT_0}\right) \quad (29)$$

Ek olarak, bu denklemde de Q_s aktivasyon enerjisine karşılık gelmektedir. Villedieu'nün çalışmasında $\epsilon_\sigma(T_0) = \epsilon_{\sigma 0} = 0.12 \text{ J/m}^2$, $T_0 = 253 \text{ K}$ ve $Q_s = 4.82 * 10^{-4} \text{ J/K mol}$ olarak verilmiştir. [Villedieu, Trontin ve Chauvin, 2014]:

Mevcut modele göre 3 farklı durum oluşabilir.

- $\mathcal{L} \geq 90$: Yüksek kinetik enerji kaybı ve yüksek oranda parçalanma,
- $0.5 \leq \mathcal{L} \leq 90$: Elastik olmayan geri sıçrama, nispeten daha az parçalanma ve daha az kinetik enerji kaybı,
- $\mathcal{L} \leq 0.5$: Parçacığın tek parça halinde yüzeye yapışması.

Modele göre yapışma olasılığı (P_D) parçacığın ve duvar yüzeyinin üstündeki su tabakasının yüksekliğine bağlıdır. Bu modelde duvar yüzeyindeki su tabakası yüksekliği h_w ve parçacığın yüzeyindeki su tabakası yüksekliği h_p olarak gösterilmiştir.

$$P_D = 1 - \min\left[1, K_B \xi_n^2 (\delta_p + \delta_w)^{-1/3}\right] \quad (30)$$

Bağıntıda belirtilen boyutsuz su tabakası yükseklikleri ise parçacığın çapı kullanılarak hesaplanabilir.

$$\delta_p = h_p/d_p, \quad \delta_w = h_w/d_p \quad (31)$$

Yukarıdaki denklemlerde K_B kalibrasyon parametresi olarak kullanılmaktadır ve 40 olarak alınmıştır. Ayrıca geri sıçrama katsayısı, ξ_n hesabı aşağıda verilmiştir. [Villedieu, Trontin ve Chauvin, 2014].

$$\xi_n = \begin{cases} \xi_n^B & = 1 & \mathcal{L} \leq 0.5 \\ \xi_n^B & = \left(\frac{0.5}{\mathcal{L}}\right)^{1/3} & 0.5 \leq \mathcal{L} \leq 90 \\ \xi_{nn}^F & = \left(\frac{0.5}{\mathcal{L}}\right)^{1/3} & \mathcal{L} \geq 90 \end{cases} \quad (32)$$

Bu modelde duvar yüzeyine çarpan her bir parçacık için P_D değeri hesaplanır. $P_D = 1$ durumunda parçacığın tamamen duvar yüzeyine yapıştığı, $P_D < 1$ durumunda ise parçacığın kütlelerinin P_D oranında duvar yüzeyine yapıştığı ve $1 - P_D$ kadarının da geri sıçrayarak akışa katıldığı varsayılmaktadır.

Erozyon modeli: Karışık fazdaki akışlarda buz kristal parçacıklarının çarpması sonucu birikmiş olan buz miktarında azalma gözlemlenmiştir [Wright, 2010]. Wright ve arkadaşlarının bu azalma

miktarını hesaplayabilmek için geliştirmiş oldukları model bu çalışmada daha çok test sonucu kullanılarak geliştirilmiştir. Buna rağmen kullanılan test sayısındaki yetersizlikten dolayı modelin doğruluk seviyesi belirsizdir ve ileriki çalışmalarda daha çok geliştirileceği düşünülmektedir.

$$\epsilon_{erosion} = \epsilon_{ct} \left(\frac{d}{d_{ref}} \right)^2 \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^2 \left(\frac{IWC}{IWC_{ref}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\exp\left(14 - \frac{Q}{RT}\right)}{\exp\left(14 - \frac{Q}{RT_{ref}}\right)} \right) \quad (33)$$

Bu denklemde ϵ_{ct} erozyon sabiti, d_{ref} referans parçacık çapı, V_{ref} referans parçacık hızı, IWC_{ref} akışın içerdiği referans buz miktarı ve T_{ref} referans sıcaklık değerini göstermektedir [Wright, 2010]. Doğrulama sonucunda $\epsilon_{ct} = 0.08$, $d_{ref} = 150 \mu m$, $V_{ref} = 100 kts$, $IWC_{ref} = 0.7 g/m^3$ ve $T_{ref} = 267 K$ olarak belirlenmiştir. Ek olarak, Q aktivasyon enerjisini ($Q = 69000 J.mol^{-1}$) ve R gaz sabitini ($R = 8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$) göstermektedir. Orijinal modele göre erozyonun birikme modelinde hesaba katılış şeklinde aşağıda belirtildiği gibi değişiklik yapılmıştır. [Trontin, Blanchard ve Villedieu, 2016]

$$\dot{m}_{er} = \epsilon_{erosion} \dot{m}_{imp,c} \quad (34)$$

Bu denklemde \dot{m}_{er} erozyon hızını ve $\dot{m}_{imp,c}$ duvar yüzeyinde çarpan parçacıkların kütle akım debisini göstermektedir. Buna ek olarak, erozyon hızı aşağıda belirtildiği gibi katı ve sıvı kısımlar için ayrı olarak hesaplanmalı ve $\epsilon_{erosion}$ değeri 0 ile 1 arasında olmalıdır.

$$\dot{m}_{er} = \dot{m}_{er,i} + \dot{m}_{er,w} \quad (35)$$

$$\dot{m}_{er,i} = \dot{m}_{er} \frac{\dot{m}_i}{(\dot{m}_i + \dot{m}_w)} \quad (36)$$

$$\dot{m}_{er,w} = \dot{m}_{er} \frac{\dot{m}_w}{(\dot{m}_i + \dot{m}_w)} \quad (37)$$

Yukarıda $\dot{m}_{er,i}$ ve $\dot{m}_{er,w}$ sırasıyla buz ve sıvı için erozyon hızını göstermektedir. Erozyon hızları hesaplandıktan sonra buz (\dot{m}_i) ve sıvı (\dot{m}_w) birikim hızları da yeniden hesaplanmalıdır.

$$\dot{m}_{i,upd} = \dot{m}_i - \dot{m}_{er,i} \quad (38)$$

$$\dot{m}_{w,upd} = \dot{m}_w - \dot{m}_{er,w} \quad (39)$$

Buz Birikim Modeli

Parçacıkların yörüngeleri, yörünge boyunca gerçekleşen ısı transferi ve çarpma karakteristikleri hesaplandıktan sonra buz birikimi hesabına geçilebilir.

Bu çalışmada karışık faz buzlanma analizleri için klasik Messinger modelinin geliştirilmiş hali kullanılmıştır. Bu sebepten ötürü TAICE yazılımına ilk kısımlarda belirtilen modellere ek olarak bu geliştirilen Messinger modeli de yazılıma eklenmiştir.

Çarpma modelinin anlatıldığı kısımda belirtildiği gibi, yapışma oranı su tabakası yüksekliğine ve su tabakası yüksekliği de yapışma oranına bağlıdır. Ayrıca oluşan artan su kütle debisi ile tabaka yüksekliği arasındaki bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\dot{m}_w \Delta s = - \frac{h_w^3}{3\mu_w} \frac{\partial P_a}{\partial s} \rho_w + \frac{h_w^2}{2\mu_w} \tau_a \rho_w \quad (40)$$

Bu bağıntıda \dot{m}_w artan su kütlesi akış debisini, τ_a duvar yüzeyi üzerinde uygulanan kesme gerilmesini, μ_w dinamik viskozite değerini, ρ_w su yoğunluğunu, Δs panel boyutunu ve $\partial P_a / \partial s$ değeri de statik hava basıncın yüzey boyunca değişimini göstermektedir. Su kütlesi debisi ile tabaka yüksekliği arasındaki bağıntıdan dolayı çözüm için iteratif yöntem gerekmektedir. Buz birikim modeli ile ilgili detay bilgiye Villedieu'nün çalışmasından ulaşılabılır. [Villedieu, Trontin ve Chauvin, 2014]

ANALİZLER VE DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Karışık faz buzlanma analizleri için geliştirilen yazılım için deneysel test sonuçları kullanılarak doğrulama çalışması yapılmıştır. Karışık fazlı bulut problemleri bu alanda yapılmış olan deneyler arasından seçilmiştir.

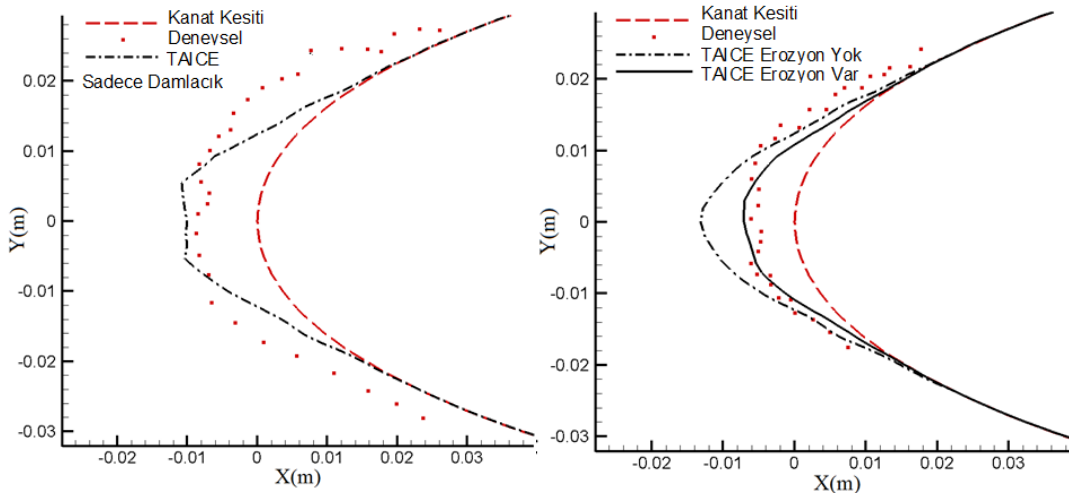
COX Rüzgar Tüneli Buzlanma Deneyleri

COX deneylerinde 0.9144m veter uzunluğuna sahip NACA 0012 kanat kesiti kullanılmıştır. Deneysel test koşulları ile ilgili bilgi ve sonuçlar Al-Khalil'in çalışmasında sunulmuştur. [Al-Khalil, Irani ve Miller, 2003] Deneyler arasından seçilen iki adet camısı ve iki adet karşı buzlanma koşulu Çizelge 1'de verilmiştir. Tablodaki bilgilere ek olarak tüm testlerde hücum açısı 0° ve buzlanma süresi 600 saniyedir.

Çizelge 1: Buzlanma Testi Koşulları [Al-Khalil, Irani ve Miller, 2003]

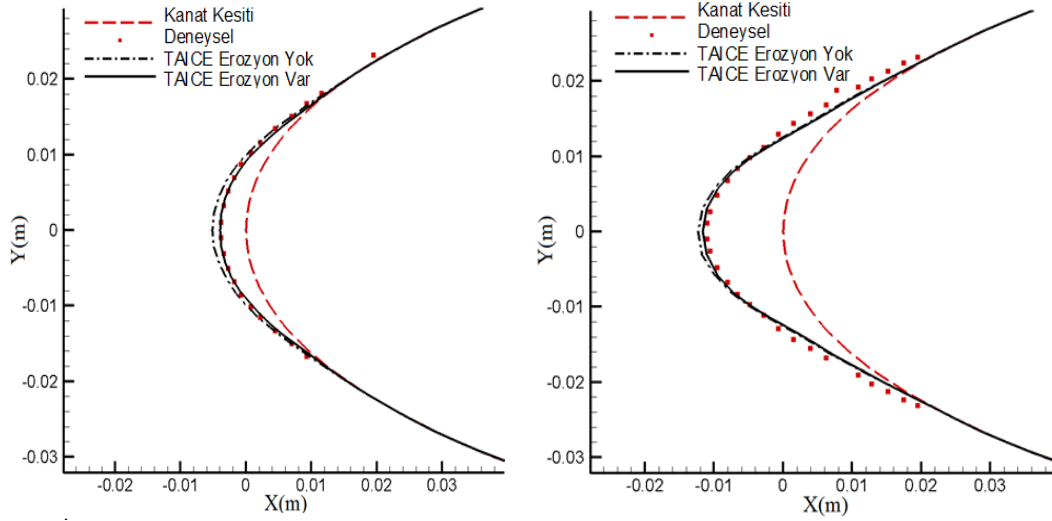
Koşu Numarası	Gerçek Hava Hızı (m/s)	Toplam Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	Toplam Basınç (kPa)	IWC (g/m^3)	LWC (g/m^3)	Kristal Ort. Eşhacim Çapı (μm)	Su Damlacığı Ort. Eşhacim Çapı (μm)
9	53.6	-5.55	100	-	0.7	-	20
10	53.6	-5.55	100	0.7	0.7	200	20
19	53.6	-11.1	100	0.7	0.3	150	20
20	53.6	-11.1	100	0.3	0.7	150	20

Erozyonun buzlanmış kanat kesiti üzerindeki etkisini görmek için iki farklı buzlanma analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerin birinde erozyonun etkisi hesaba katılırken diğerinde ise hesaba katılmamıştır.



a) Koşu 9 buz şekilleri karşılaştırması b) Koşu 10 buz şekilleri karşılaştırması

Şekil 1: Camısı Buzlanma Durumunda Deneysel & TAICE Buz Şekilleri Karşılaştırması ve Erozyon Etkisi



a) Koşu 19 buz şekilleri karşılaştırması b) Koşu 20 buz şekilleri karşılaştırması

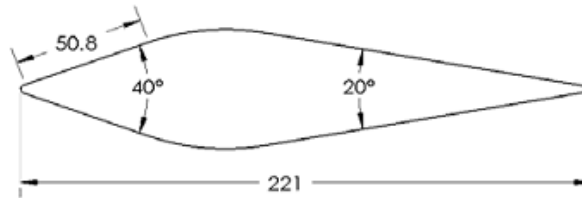
Şekil 2: Karsı Buzlanma Durumunda Deneysel & TAICE Buz Şekilleri Karşılaştırması ve Erozyon Etkisi

Şekil 1 ve Şekil 2’de görüldüğü gibi TAICE buzlanma analizi sonuçları özellikle erozyon etkisi eklendiğinde deneysel sonuçlar ile tutarlı olmaktadır. Erozyon hem camısı hem de karsı buzlanma koşullarındaki oluşan buz şeklinde değişime sebep olmaktadır. Camısı buzlanma koşulunda ise buzun sıcaklığının diğer koşula orana daha yüksek olması sebebiyle bu etkinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi, buz yüzeyi sıcaklığı düştükçe buzun sertliği artmış ve erozyon etkisi bu sebepten ötürü azalmıştır.

Sadece su damlacıklarının bulunduğu 9 numaralı buzlanma koşulunda, kristal parçacıklarının da bulunduğu 10 numaralı buzlanma koşuluna göre erozyon olmadığı için biriken buz miktarının daha çok olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak yine aynı buzlanma koşullarında buz şekillerinin alt ve üst sınırlarının deneysel sonuçlara göre hesaplamalarda hücum kenarına daha yakın tahmin edildiği görülmüştür. Karsı buzlanma koşullarında ise buz kristalinin oluşan buz şekline etkisinin sadece erozyon sebebiyle olduğu, onun da etkisinin az olduğu ve su damlacığı miktarının buz şekillerini belirleyen temel etken olduğu görülmüştür.

NRC/NASA Rüzgar Tüneli Buzlanma Deneyleri

Bu kısımda NRC/NASA rüzgar tünelinde yapılmış olan buzlanma testleri sonuçları kullanılmıştır. [Currie, Struk ve Tsao, 2012] Bu testlerde buz kristalleri ve su damlacıkları ayrı ayrı kanat kesiti üzerine 1.27 m uzaklıktan gönderilmiştir. Testlerde kullanılan kanat kesiti Şekil 3’de gösterilmiştir.



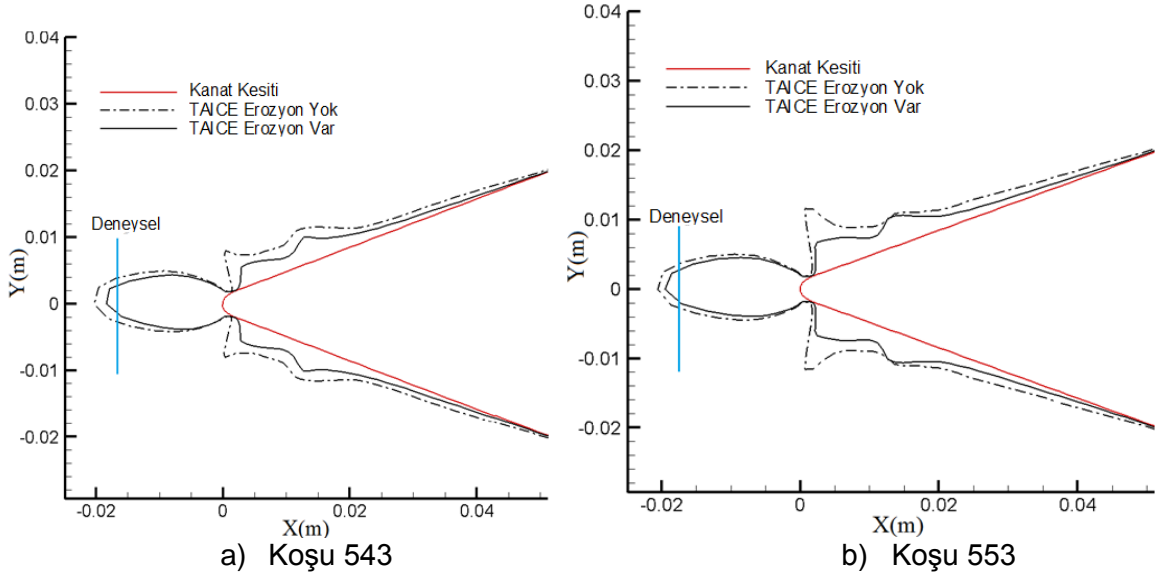
Şekil 3: Buzlanma Testinde kullanılan Kanat Kesiti (mm) [Currie, Struk ve Tsao, 2012]

Seçilen buzlanma koşulları Çizelge 2’de gösterilmektedir. Bu test koşullarında buzlanma şeklinin deneysel sonucu bulunmadığı için sadece analiz sonuçları ile kanat kesiti hücum kenarı üzerindeki

buz kalınlığı karşılaştırılmıştır. İki koşu durumunda da hücum açısı 0° ve buzlanma süresi 3 dakikadır.

Çizelge 2: Buzlanma Testi Koşulları [Al- Khalil, Irani ve Miller, 2003]

Koşu Numarası	Mach Sayısı	Toplam Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	Toplam Basınç (kPa)	Nem Oranı (%)	IWC (g/m^3)	LWC (g/m^3)	Kristal Ort. Eşhacim Çapı (μm)	Su Damlacığı Ort. Eşhacim Çapı (μm)
543	0.25	13	44.8	8	7	2.9	40	20
553	0.25	6	44.8	30	7	2.9	40	20



Şekil 4: 3 Dakikalık Buzlanma Süresi Sırasında Deneysel & TAICE Buz Şekilleri Karşılaştırması

Şekil 4'de gösterildiği gibi, TAICE yazılımıyla elde edilen buz şekli deneysel sonuçlar ile tutarlı bulunmuştur. Erozyon her iki koşu durumunda da hücum kenarındaki buz kalınlığında % 5 civarında bir azalmaya sebep olmuştur ve tahminin doğruluğunun artırılması için yörünge sırasında kristallerin ve damlacıkların hava ile yapmış olduğu ısı transferi de hesaba katılmıştır. Bu ısı transferi sebebiyle parçacıkların sıcaklıkları başlangıçtaki değerleri olan -15°C 'tan yüzeye yapıştıkları anda -8°C 'a kadar yükselmiştir.

SONUÇ

Buz kristallerine özgü sürüklenme kuvveti katsayısı, ısı transferi & faz değişimi, parçacık çarpma ve buz birikimi modelleri TAICE yazılımına eklenmiştir. Ek olarak NASA erozyon modeli test sonuçları da kullanılarak kalibre edilmiş ve yazılıma eklenmiştir. Analizler ve doğrulama kısmında mevcut yazılım ile elde edilmiş NRC ve COX deney test koşullarının sonuçları verilmiştir. Özellikle camı buzlanma koşullarında, kullanılan her iki doğrulama testinde de erozyon modeli buzlanma tahmininin doğruluğunu arttırmıştır. Karsı buzlanma koşullarında da erozyonun etkisi çok olmasa bile kalibre edilmiş değerler ile deneysel sonuçlara daha çok yaklaştığı görülmüştür. Modeller üzerinde iyileştirme ve doğrulama çalışmaları devam etmektedir. Parçacık çarpma modelinde, yapışma katsayısının doğrudan su tabakası kalınlığı ile ilişkilendirilmesinin modelin doğruluğu açısından sorgulanması gerektiği düşünülmektedir. Sayısal sonuçların doğruluğunun yapılacak daha çok deneysel çalışmalar yardımıyla artırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

1. Al-Khalil K., Irani E., Miller D. *Mixed Phase Icing Simulation and Testing at the Cox Icing Wind Tunnel*, 41st Aerospace Sciences meeting & Exhibit, Reno, Nevada, 2003.
2. Currie T.C., Fuleki D., Mahallati A. *Experimental Studies of Mixed-Phase Sticking Efficiency for Ice Crystal Accretion in Jet Engines*, AIAA-2014, Atlanta, 2014.
3. Currie, T.C., Struk, P.M., Tsao, J.-C., Fuleki, D., Knezevici, D.C., *Fundamental Study of Mixed-Phase Icing with Application to Ice Crystal Accretion in Aircraft Jet Engines*, 4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, New Orleans, USA, AIAA 2012-3035, 2012.
4. Ganser, G.H., *A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles*, Powder Technology, Vol. 77, pp. 143-152, 1993.
5. Haider A., Levenspiel O., *Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non-spherical particles*, Powder Technology, Vol. 58, pp. 63-70, 1989.
6. Hölzer A., Sommerfeld M., *New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles*, Powder Technology, Vol. 184, pp. 361-365R-M, 2008.
7. Mason B.J., *On the Melting of Hailstones*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 82, pp. 209-216, 1956.
8. Mason, J.G., Strapp, J.W., Chow, P., *The Ice Particle Threat to Engines in Flight*, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno, AIAA-2006-206, 2006.
9. Trontin P., Blanchard G., and Villedieu P., *A comprehensive numerical model for mixed-phase and glaciated icing conditions*, AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, Washington DC, USA, 2016
10. Villedieu P., Trontin P., Chauvin R., *Glaciated and mixed phase ice accretion modeling using ONERA 2D icing suite*, 6th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, Atlanta, AIAA 2014-2199, 2014.