

Cradle CFD ile Parametrik Analiz Otomasyonu

PREPARED BY	EDITED\CHECKED BY
İsmet Çağan Karakurt Stajyer Mühendis	Güven Nergiz CFD Mühendisi

23/03/2023

1.Giriş

Tam ölçekli konvansiyonel uçaklar için pervane performansı, nümerik ve deneysel olarak iyi bir şekilde belgelenmiş olsa da düşük Reynolds sayılarında çalışan ve küçük ölçekli pervaneler için çok az araştırma yapılmıştır. Genel olarak İnsansız Hava Araçları (İHA) için kullanılan pervaneler küçük çaplara sahiplerdir, bu yüzden genelde düşük Reynolds sayısına ve düşük pervane uç hızlarına sahiplerdir. Mevcut çalışmada insansız hava araçlarında kullanılan APC tipi pervaneleri için Cradle CFD programı içindeki scWorkSketch modülünü kullanarak bir itki doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı incelenilen pervaneyi scWorkSketch içerisinde farklı dönüş hızları için itki kuvvetlerini elde etmek üzere parametrik analizini gerçekleştirmek ve bu süreci otomatikleştirmektir.

Bernoulli prensibine göre hava akışının hızlanmasından dolayı kanadın önündeki statik basıncın azalmasına neden olur. Bu arada, pervanenin arkasındaki düşük hız, pervanenin daha yüksek statik basınç yaşamasına neden olur. Böylece öndeki basınç daha düşük olduğu için tepki kuvveti nedeniyle İHA ileri doğru çekilir. Pervanenin ön ve arka kısmı arasındaki basınç farkı, ileri yönlerde itme kuvveti oluşturarak, İHA yaşadığı sürtünmenin üstesinden gelmesini sağlar.[1]

Açık hatveli pervanelerde uç Mach sayısı 0,6 'ya kadar çıkabilmektedir. Bu Mach sayılarında, 2D kanat profil bölümleri Glauert'in Mach düzeltme faktörü tarafından şu şekilde verilen bir artış yaşayacaktır. [2]:

$$C_L = \frac{C_{L,M=0}}{\sqrt{1 - M^2}}$$

Bu çalışmada kullanılan APC pervanesi kanat bölümünün çoğunluğu boyunca sabit bir C_L elde etmek için tasarlanmıştır. Şekil 1'de görülen pervaneler APC 10X5, 10X6 ve 10X7 modelleridir. İlk sayı bıçağın çapını temsil eder. İkinci sayı ise bıçağın bir devirdeki teorik ilerlemesini temsil eder.



Şekil 1. APC 10X5,10X6 ve 10x7 Pervanelerinin Üstten Görünüşleri

1.1 İlerleme Oranı (J)

İlerleme oranı, ileri hareketin ve açısal hızın etkilerini ölçmek için kullanılan boyutsuz bir terimdir:

$$J = \frac{V_{\infty}}{nD}$$

Burada,

J İlerleme oranını temsil eder.

V Uçak hızıdır.

n pervanenin dönme frekansını rev/s cinsinden ifade eder.

D pervane çapıdır.

1.2 İtki, Tork ve Güç Katsayısı

İtki ve güç katsayıları, bir pervanenin itme ve güç üretme kapasitesini dönme hızı ve çapıyla ilişkilendiren boyutsuz niceliklerdir.

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad C_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

Burada,

T pervanenin itki değeridir.

Q pervanenin yarattığı tork değeridir.

P pervanesinin motoru için gereken güçtür.

p serbest akış yoğunluğunu temsil eder.

D pervane çapıdır.

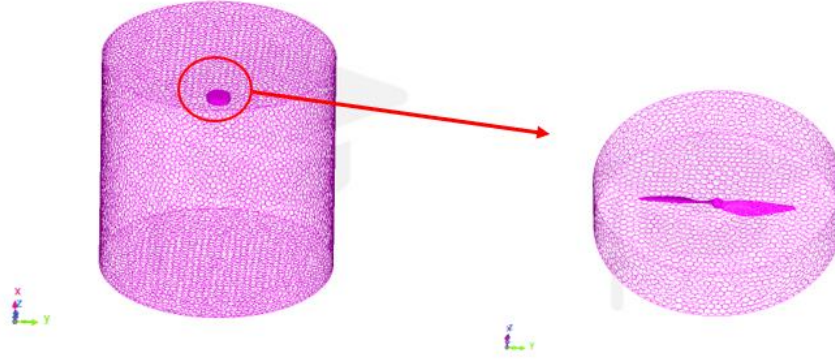
2.Nümerik Model

Bu çalışmada kısıtlı deneysel veri sonuçları sebebiyle APC 10X7 pervanesi incelenmiş ve Şekil2'deki gibi pervane için önemli geometrik parametreler hesaplanmıştır. 0,254 m çapında iki kanatlı bir pervanedir. Üreticinin paylaştığı performans verilerinde, göbek kısmında Eppler E36 ve ucun yanında Clark-Y ile iki farklı kanat profilinden oluşmaktadır. Kullanılan kanat profilinin her ikisi de düşük Reynolds sayılı uygulamalar için uygundur. [3]

Geometrik Parametreler	
Bıçak Sayısı(Nb)	2
Rotor Yarıçapı (R)	127 mm = 0,127 m
Rotor Bıçak Kirişi (c)	23,4 mm = 0,0234 m
En Boy Oranı(R/c)	5,42
Rotor Katılığı (s)	0,10

Şekil 2.APC10X7 Pervanesi İçin Geometrik Parameteler

Döner cisimler için bir akış analizi yapılırken öncelikle katı modelin etrafına bir döner akış hacmi ardından da modelin etrafına bir dış akış hacmi tanımlanması gerekmektedir. Yapılan literatür taraması sonucunda bu hacmin olması gereken ölçüleri belirlenmiştir. Yapılan analizde "Cradle CFD" yazılımı kullanılmıştır. Yazılım içerisinde mesh ağı oluşturmadan önce daha hassas bir şekilde Polyhedral mesh atabilmek için Octree denilen sanal oktant örme fonksiyonu ile akış hacmine ağ(mesh) yapısı Şekil3'teki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3. Akış Hacmine Atılan Ağ(mesh) Yapısı

Doğrulaması yapılması istenilen model için “transient akış” olarak çözümlenmiştir. Düşük Reynolds sayılarında daha uygun sonuçlar sağladığı için analiz boyunca “k-w SST” türbülans modeli kullanılmıştır. Basınç-hız eşleşmesi için, “SIMPLE” (Basınç Bağlantılı Denklemler için Yarı Kapalı Yöntem) algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Pervane dönüş hızı olarak dakikada 3000 devir olarak ayarlanıp analiz sonucunda elde edilen itki değerlerini pervane üreticilerin kendi sitesindeki itki değerleri ile karşılaştırılmıştır. Pervane bilgisayar ortamında modellenirken ilk kalkış anında olduğu düşünülüp sınır koşulları Şekil4’teki gibi belirlenmiştir.

Simülasyon Koşulları		
Hava Yoğunluğu	1,225 kg/m ³	-
Dinamik Viskozite	1,82e ⁻⁵ kg/m*s	-
Ma_{tip}	0,0775	$\omega * R/a$
ω (Açısal Hız)	209,43 rad/s	-
V_{tip} (Pervane Uç Hızı)	26,597 m/s	$\omega * R$
Re(Reynolds Sayısı)	1,46e ⁶	$\omega * R/\mu$

Şekil 4. APC10X7 Pervanesi İçin Simülasyon Koşulları

Simülasyon sırasında pervanenin yapmış olduğu dönme hareketini bilgisayarın doğru bir şekilde çözümlenebilmesi için zaman adımı(ΔT) süresi önemli bir değerdir. İlgilenilen problemde çözmek istenilen değerler çok yavaş değişiyor olabilir (katı gövde üzerindeki sıcaklık) fakat hız ve basınç gibi ufak zaman aralıklarında yüksek dalgalanmaları olan değerleri geniş zaman aralıklarında çözdürmemesi gerekir. Zaman aralıklarını doğru ayarlamak da analizinizin yakınsamasına yardımcı olacaktır.

$$\Delta t = \frac{1}{10} \frac{\text{Pervane bıçak sayısı}}{\text{Dönüş hızı}}$$

Giriş hız koşulu tanımlanırken türbülans yoğunluğu %0,1 olarak tanımlanmıştır. Türbülans yoğunluğunu rüzgâr tünelinden alınan yoğunluk verilerine göre belirlenmiştir.[4] Türbülans yoğunluğu, türbülans seviyesi olarak da tanımlanabilir.

$$I = \frac{u'}{U}$$

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

Burada,

u' ortalama türbülans hız dağılımıdır.

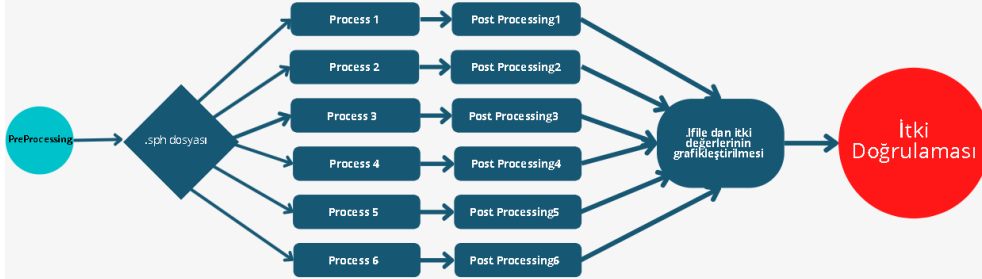
U ortalama hızı temsil eder.

K türbülans enerjisidir.

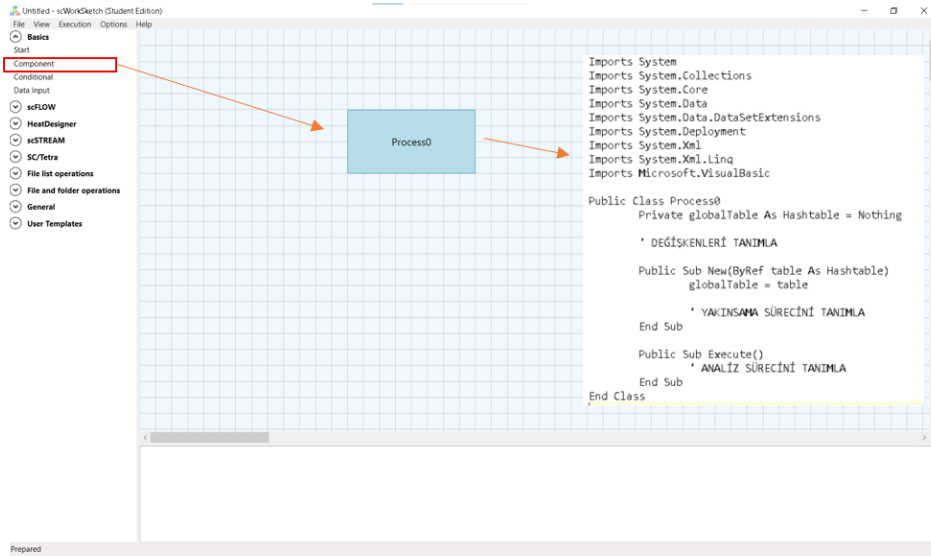
3.scWorkSketch ile Scripting

scWorkSketch (VB interface), Cradle uygulamasının işlevlerini harici bir programlama dilinde metotlar ve değişkenler olarak ele alan bir şemadır. Bu şema, kullanıcıların Excel ve WSH (Windows Komut Dosyası Ana Bilgisayarı) gibi bir program kullanarak Visual Basic'te veya diğer dillerde kendi programlarının bir parçası olarak uygulamaların işlevlerini kullanmalarına olanak tanır. Ayrıca kullanıcıların ticari optimizasyon yazılımları ile iş birliği yaparak optimizasyon analizleri yapmalarına ve Office ürünleri veya CAD ile iş birliği yaparak analiz prosedürlerini otomatikleştirmelerine olanak tanır. [5]. Otomatikleştirilmesi planlanan analizin genel hatları Şekil5'te bahsedildiği gibidir.

WorkSketch Analiz Şeması



Şekil 5. WorkSketch Analiz Şeması Genel Gösterim



Şekil 6. WorkSketch Üzerinde Sınıf Oluşturma

WorkSketch arayüzünü açıldıktan sonra işlemleri tanımlamak için bir dosya açılması gerekmektedir. Cradle üzerinden ön işlemler gerçekleştirilen analiz dosyası “. sph” uzantılı olarak kaydedilmektedir. Visual basic üzerinden yapılacak olan ilk işlemde sph dosyasının içinden ilgili satıra gidip parametrik bir şekilde pervane için dönüş hızının değiştirilmesi gerekiyor daha sonrasında dosya farklı bir şekilde kaydedilip farklı dosyalara gph ve sph uzantılı olarak kaydedilmesi gerekmektedir. Visual Studio Code üzerinde oluşturulan kod Şekil7’deki gibidir.

```

1 Imports System
2 Imports System.Collections
3 Imports System.Core
4 Imports System.Data
5 Imports System.Data.DataSetExtensions
6 Imports System.Deployment
7 Imports System.Xml
8 Imports System.Xml.Linq
9 Imports Microsoft.VisualBasic
10 Imports System.IO

11 Public Class Process3
12     Private globalTable As Hashtable = Nothing
13     ' Please add your variables here.
14     0 başvuru
15     Public Sub New(ByRef table As Hashtable)
16         globalTable = table
17         ' Please add your initializing process here.
18     End Sub
19     0 başvuru
20     Public Sub Execute()
21         Dim RPM_VALS As String() = New String() {" 104.71 0", " 209.44 0"} 'RPM DEĞERLERİNİ GİR!!!!
22         Dim gphkopya As String = "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\apc10x7deneme.gph"
23
24         For iCount As Integer = 0 To UBound(RPM_VALS)
25             Dim sphkopya As String = "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\apc10x7deneme1.sph"
26             Dim lines() As String = IO.File.ReadAllLines("C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\apc10x7deneme1.sph")
27             For i As Integer = 0 To lines.Length - 1
28                 If lines(i).Contains("ALE_MOVE") Then
29                     lines(i + 4) = RPM_VALS(iCount)
30                 End If
31             Next
32             For i As Integer = 0 To lines.Length - 1
33                 If lines(i).Contains("FPH") Then
34                     lines(i + 1) = "apc10x7deneme" & iCount
35                 End If
36             Next
37             IO.File.WriteAllLines(sphkopya, lines) 'assuming you want to write the file
38             My.Computer.FileSystem.CopyFile(sphkopya, "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\apc10x7deneme2.sph")
39             My.Computer.FileSystem.MoveFile("C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\apc10x7deneme2.sph",
40                 "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\denemeLer\apc10x7deneme" & iCount & ".sph")
41         Next
42         My.Computer.FileSystem.CopyFile(gphkopya, "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\denemeLer\apc10x7deneme.gph")
43     End Sub
44 End Class

```

Şekil 7. Visual Studio Code üzerinde scFlow Preprocessing kodu

Kopyalanan sph ve gph dosyalarını VB arayüzünde çözdürmesi gerekmektedir. Bunun için bir önceki aşamada yapılan aşama gibi dosya açıp çözüm için sph uzantısı tanımlanması gerekmektedir. İlk analizi yapıldıktan hemen sonra aynı çözücü üzerinde bir sonraki analiz yapılmaktadır. Çözüm sonunda kaç analiz yapılması istenildiyse o kadar ".l file" dosyası olması gerekmektedir. Visual Studio Code üzerinde hazırlanan kod Şekil8-9-10-11'deki gibidir.

```

1 Imports System
2 Imports System.Collections
3 Imports System.Core
4 Imports System.Data
5 Imports System.Data.DataSetExtensions
6 Imports System.Deployment
7 Imports System.IO
8 Imports System.Xml
9 Imports System.Xml.Linq
10 Imports Microsoft.VisualBasic
11
12 Imports System.Text.RegularExpressions
13
14 '''<summary>
15 '''Calculate with entered SPH file and GPH, then output FPH file and L file.
16 '''</summary>
17 1 başvuru
18 Public Class Process0
19     Private globalTable As Hashtable = Nothing
20
21     '''<summary>
22     '''SPH file path
23     '''</summary>
24     '''<guitype>FilePath</guitype>
25     Public sphFilePath
26     Public sphFilePath2
27     '''<summary>
28     '''GPH file path
29     '''</summary>
30     '''<guitype>FilePath</guitype>
31     Public gphFilePath
32     Public gphFilePath2
33     '''<summary>
34     '''FPH file path
35     '''</summary>
36     '''<guitype>Nothing</guitype>
37     Public fphFilePath
38     Public fphFilePath2
39
40     '''<summary>
41     '''L file path
42     '''</summary>
43     '''<guitype>Nothing</guitype>
44     Public lFilePath
45     Public lFilePath2

```

Şekil 8. Visual Studio Code Üzerinde scFlow Analysis kodu (1.kısım)

```

45 0 başvuru
46 Public Sub New(ByRef table As Hashtable)
47     globalTable = table
48 End Sub
49
50 0 başvuru
51 Public Sub Execute()
52
53     Dim RPM_VALS As String() = New String() {" 104.71 0", " 209.44 0"}
54
55     For iCount As Integer = 0 To UBound(RPM_VALS)
56         ' Confirm SPH file existence.
57         sphFilePath = "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\denemeler\apc18x7deneme" & iCount & ".sph"
58         If Not File.Exists(sphFilePath) Then
59             Console.WriteLine("Error : SPH file does not exist.")
60             Return
61         End If
62
63         'fphFilePath = GetFphFileName(sphFilePath)
64         fphFilePath = "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\denemeler\"
65         'If Not String.IsNullOrEmpty(fphFilePath) Then
66         'Dim parent As DirectoryInfo = Directory.GetParent(sphFilePath)
67         'fphFilePath = parent.FullName & Path.DirectorySeparatorChar & fphFilePath
68         'Else
69         'Console.WriteLine("Error : FPH command does not exist in the SPH file.")
70         'return
71         'End If
72         Dim scMonitor(iCount)
73         scMonitor(iCount) = CreateObject("scFLOW.scMonitor_Bx64net.Application.2022")
74         Dim app(iCount)
75         app(iCount) = scMonitor(iCount).GetInterface("1.0")
76         app(iCount).Visible = True
77
78         Dim job = app(iCount).CreateSolverJob(sphFilePath)
79         Console.WriteLine("Start analysis...")
80         app(iCount).Execute(job)

```

Şekil9. Visual Studio Code Üzerinde scFlow Analysis kodu (2.kısım)


```

84
85     Dim status2(iCount)
86     Dim cycle2 As Integer = -1
87     Dim cycle2Prev As Integer = -1
88     Do While status2(iCount) < 200
89         status2(iCount) = job.GetStatusCode()
90
91         cycle2 = job.GetCycle()
92         If (0 <= cycle2) AndAlso (cycle2 <> cycle2Prev) Then
93             Console.WriteLine(cycle2)
94             cycle2Prev = cycle2
95         End If
96         Threading.Thread.Sleep(200)
97     Loop
98
99     Dim status2Code = job.GetStatusCode()
100    Dim message2 = StatusCodeToMessage(status2Code)
101    Console.WriteLine(message2)
102
103    cycle2 = job.GetCycle()
104
105    fphFilePath = fphFilePath & "-" & cycle2 & ".fph"
106    lFilePath = Regex.Replace(sphFilePath, ".sph$", iCount & ".l", RegexOptions.IgnoreCase)
107
108    If iCount = UBound(RPM_VALS) Then
109        app(UBound(RPM_VALS)).Quit()
110    Else
111        app(iCount).Interrupt(job)
112    End If
113
114
115
116    ' Exit analysis.
117 Next
118
119
120
121 End Sub
122
123

```

Şekil 10. Visual Studio Code Üzerinde scFlow Analysis kodu (3.kısım)

```

119
120
121 End Sub
122
123
124     1 başvuru
125     Private Function StatusCodeToMessage(ByVal statusCode)
126         Dim message = "Unknown status"
127         Select Case statusCode
128             Case 0
129                 message = "Failed to get status"
130             Case 1
131                 message = "Waiting"
132             Case 100
133                 message = "Running"
134             Case 101
135                 message = "Running (calculating View Factor)"
136             Case 200
137                 message = "Finished normally"
138             Case 201
139                 message = "Reached steady state normally"
140             Case 202
141                 message = "Interrupted normally"
142             Case 300
143                 message = "Abnormally termination"
144             Case 301
145                 message = "Process error"
146         End Select
147         Return message
148     End Function
149
150
151
152
153 End Class

```

Şekil11. Visual Studio Code Üzerinde scFlow Analysis kodu (4.kısım)

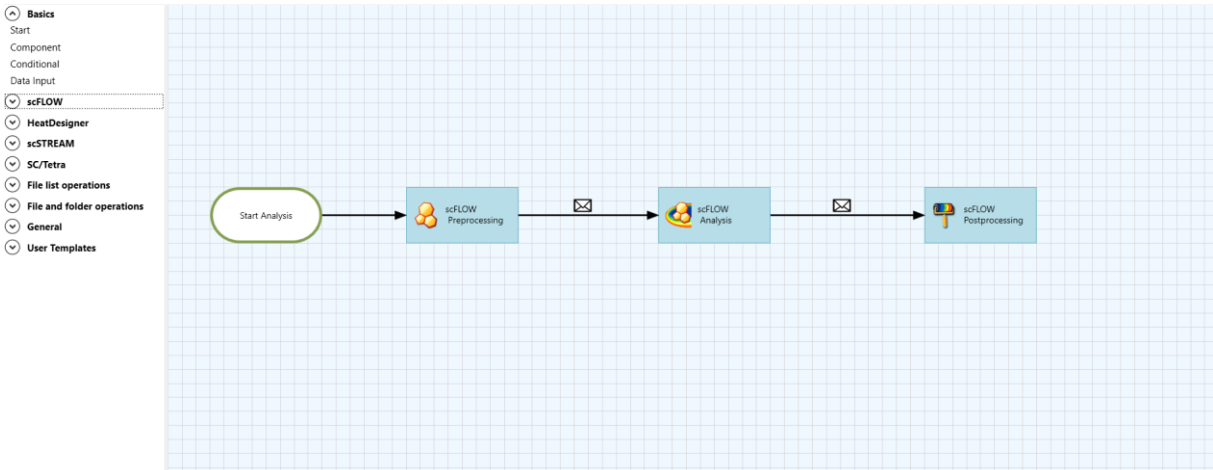
Yapılan analizler sonucunda nümerik hesaplama sonuçlarını içeren bir ".lfile" dosyası yaratılmaktadır. Son kısımda ise bu dosya içinde karşılaştırmak istenilen parametre olan itki değerlerinin olduğu satıra gidilip bunlar .txt dosyasının üzerine yazdırılır. Visual Studio Code üzerinde hazırlanan kod Şekil12'de belirtildiği gibidir.

```

1 Imports System
2 Imports System.Collections
3 Imports System.Core
4 Imports System.Data
5 Imports System.Data.DataSetExtensions
6 Imports System.Deployment
7 Imports System.Xml
8 Imports System.Xml.Linq
9 Imports Microsoft.VisualBasic
10 Imports System.IO
11 Imports Microsoft.VisualBasic.Collection
12 Imports System.Collections.Generic
13
14 Public Class Process1
15     Private globalTable As Hashtable = Nothing
16
17     ' Please add your variables here.
18     Public Sub New(ByRef table As Hashtable)
19         globalTable = table
20     End Sub
21
22     ' Please add your initializing process here.
23     Public Sub Execute()
24         Dim RPM_VALS As String() = New String() {" 184.71 0", " 289.44 0"}
25         For iCount As Integer = 0 To UBound(RPM_VALS)
26             Dim lfile As String = "C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\denemeler\apc10x7deneme" & iCount & ".l"
27             Dim lines() As String = IO.File.ReadAllLines("C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\Virtual basic\denemeler\apc10x7deneme" & iCount & ".l")
28             Dim force_data As List(Of String) = New List(Of String)()
29             Dim force_variables As String
30             Dim file As System.IO.StreamWriter
31             file = My.Computer.FileSystem.OpenTextFileWriter("C:\Users\cagan\OneDrive\Ekler\Masaüstü\BIAS\test.txt", True)
32             For i As Integer = 0 To lines.Length - 1
33                 If lines(i).Contains("***** TIME (TOTAL) *****") Then
34                     'force_data.Add(lines(i - 82))
35                     Console.WriteLine(lines(i - 82))
36                     force_data.Add(lines(i - 82))
37                     file.WriteLine(lines(i - 82))
38                     Console.WriteLine(force_data)
39                 End If
40             Next
41             file.Close()
42         Next
43     End Sub
44 End Class

```

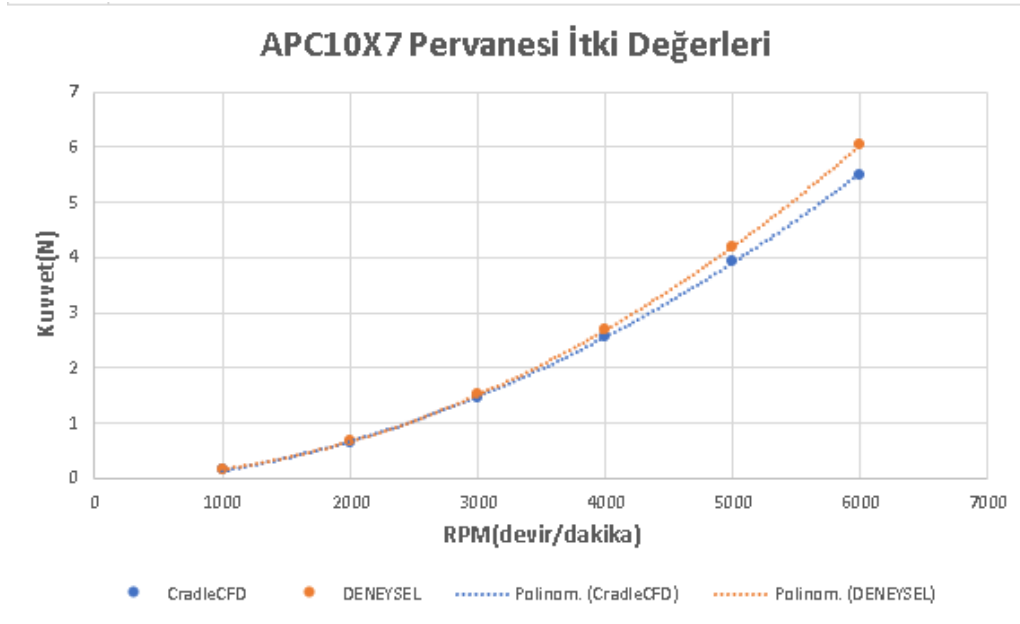
Şekil 12. Visual Studio Code Üzerinde scFlow PostProcessing kodu



Şekil 13. scWorkSketch Analiz Şeması

4. Deneysel Verilerle Karşılaştırma

ScWorkSketch üzerinde Visual Basic programlama diliyle hazırlanan kod aracılığıyla 3000 devirde pervane için doğrulanan itki değerleri 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 ve 6000 devirler için de çözdürüldü. Bulunan değerler apcprop.com sitesinde APC10x7 pervanesi için bulunan performans verilerine bakılarak karşılaştırıldı. [6] Şekil14'te görüldüğü üzere pervanemizin dönüş hızı arttıkça deneysel verilerle olan hata oranı artmaktadır. 6000 devirde hata payı yaklaşık olarak yüzde 9 olarak hesaplandı. Yüksek devirlerde analizimizde farklı çözüm metotları kullanarak bu değer düşürülebilir.



Şekil 14. Farklı RPM İçin İtki Değerlerinin Karşılaştırılması

Referanslar

[1] Kutty, H. A., & Rajendran, P. (2017). 3D CFD simulation and experimental validation of small APC slow flyer propeller blade. *Aerospace*, 4(1), 10.

[2] McCrink, M., & Gregory, J. W. (2015). *Blade element momentum modeling of low-Re small UAS electric propulsion systems*. In 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference (p. 3296).

[3] Kutty, H. A., Rajendran, P., & Mule, A. (2017, April). Performance analysis of small scale UAV propeller with slotted design. In *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 695-700). IEEE.

[4] J. B. Brandt and M. S. Selig, "Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers," 49th AIAA Aerosp. Sci. Meet., no. January, pp. 1–18, 2011.

[5] Visual Basic Interface Reference

[6] https://www.apcprop.com/files/PER3_10x7.dat