

Τυπολογιστική ρευστομηχανική
7^ο εξάμηνο

Προαιρετικό θέμα 1

Προσομοίωση τυρβώδους ροής εντός αεροσύραγγας



Γεώργιος Νιδριώτης - mc18054
4 Φεβρουαρίου 2024

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Εισαγωγή | 1 |
| 1 Κατασκευή πλέγματος | 1 |
| 1.1 Κατασκευή πλέγματος κατά την ακτινική διεύθυνση | 1 |
| 1.2 Κατασκευή πλέγματος κατά την αξονική διεύθυνση | 3 |
| 1.3 Παράμετροι & εικόνες πλέγματος | 4 |
| 2 Ορισμός συνοριακών συνθηκών - μοντελοποίηση δίσκου ορμής | 5 |
| 2.1 Ορισμός συνοριακών συνθηκών | 6 |
| 2.2 Μοντελοποίηση δρομέα με δίσκο ορμής | 9 |
| 3 Αρχείο παραμέτρων και τελικές τιμές | 9 |
| 4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων | 9 |
| 4.1 Προφίλ ταχύτητας στην αξονική θέση του δρομέα | 9 |
| 4.2 Ισοταχείς της ροής παρουσία δρομέα | 10 |
| 4.3 Προφίλ μεγεύθων κατάντι του δρομέα | 10 |
| 5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων | 12 |
| 5.1 Επίδραση τοιχωμάτων στην τιμή της ώσης | 12 |

Εισαγωγή

Το παρόν θέμα περιλαμβάνει την προσομοίωση ροής εντός αεροσύραγγας. Η ροή είναι ασυμπίεστη, συνεκτική και τυρβώδης, και το πρόβλημα περιλαμβάνει δύο μέρη. Πρώτον, προσομοιώνουμε τη ροή εντός του αγωγού, χωρίς σώμα, όπως θα ήταν στο εσωτερικό κυλινδρικού αγωγού. Δεύτερον, εισάγουμε σε κάποια αξινική θέση και στο κέντρο ακτινικά της αεροσύραγγας τον δρομέα μιας ανεμογεννήτριας.

Επιπλέον, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως αξιονοσυμμετρικό και επομένως λύνεται ως διδιάστατο για τη μισή διάμετρο της αεροσύραγγας. Η ροή που μελετάται διέπεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes, διατυπωμένες για κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων για αξιονοσυμμετρικό πεδίο ροής (εξ. 1).

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruv)}{\partial r} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] \\ \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv^2)}{\partial r} &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{v^2}{r} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Οι εξισώσεις 1 είναι αδιαστατοποιημένες ως προς την ακτίνα του δρομέα και την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής.

Η επίδραση του δρομέα της A/G στην ροή μοντελοποιείται με τη μέθοδο δίσκου ορμής όπου στην εξίσωση ορμής κατά x (δεύτερη εξίσωση των 1) προσθέτουμε έναν επιπλέον όρο στον όρο πηγής που μπορεί να περιγραφεί από μια καταβόθρα ορμής στη θέση που βρίσκεται ο δρομέας (x και r). Ο όρος που προστίθεται είναι η ποσότητα του φορτίου που ασκείται από τον δρομέα στο ρευστό, και μετά τη διακριτοποίηση, ο όρος που προσθέτουμε σε ένα κελλί δίνεται στη σχέση 2.

$$dF = -\frac{1}{2} \rho C_t U_{ref}^2 dA \quad (2)$$

όπου,

- U_{ref} είναι η μέση ταχύτητα στην επιφάνεια του δίσκου για αδιατάρακτη ροή (απουσία δίσκου)
- $dA = 2\pi r dr$, με r τη μέση ακτίνα του εκάστοτε κελλιού, και dr το ακτινικό εύρος του κελλιού

1 Κατασκευή πλέγματος

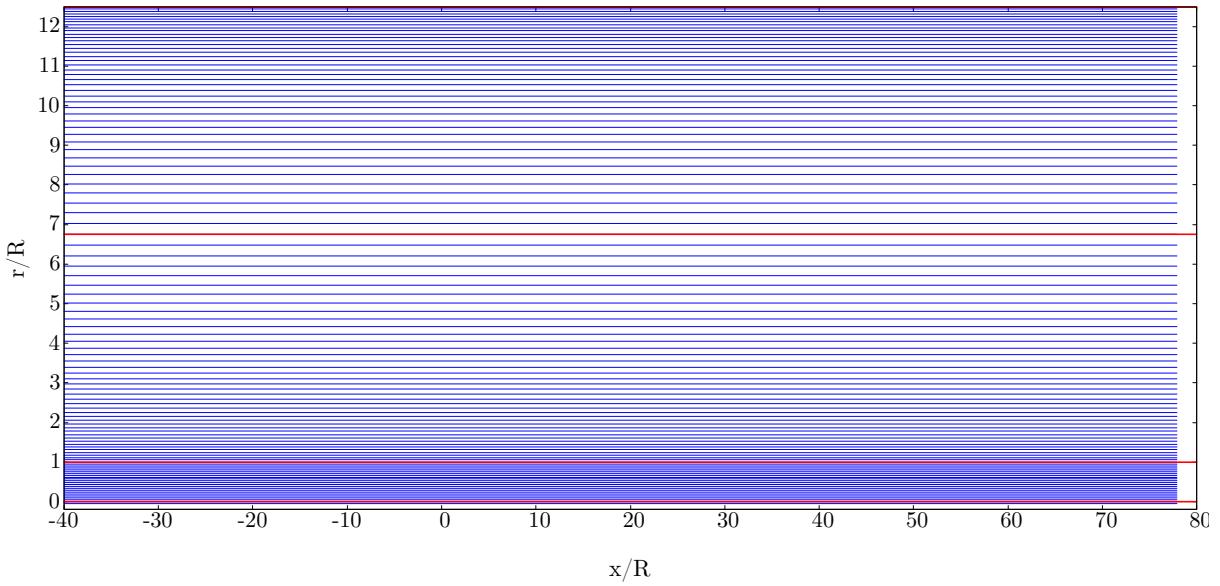
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως αξιονοσυμμετρικό επιλύεται σε διδιάστατο πλέγμα. Για την αυξηση της ακρίβειας των αριθμητικών μεθόδων, εφαρμόσθηκε πύκνωση στις περιοχές όπου έχουμε υψηλές κλίσεις και συγκεκριμένα, στην περιοχή γύρω από τον δρομέα, στο τοίχωμα της αεροσύραγγας, και κοντά στον άξονα συμμετρίας όπου αναπτύσσεται ο ομόρρου της ανεμογεννήτριας.

Η πύκνωση και η αφαίωση του πλέγματος γίνεται με τη χρήση γεωμετρικής προόδου. Συμβολίζοντας με p τη θέση ενός κόμβου, dp την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων, και r τον λόγο της γεωμετρικής προόδου, η γεωμετρική πρόοδος περιγράφεται από τις σχέσεις 1.1.

$$\begin{aligned} \frac{dp_{k+1}}{dp_k} &= r \\ p_k &= p_0 + dp_0 \frac{r^k - 1}{r - 1} \end{aligned} \quad (1.1)$$

1.1 Κατασκευή πλέγματος κατά την ακτινική διεύθυνση

Κατά την ακτινική διεύθυνση το πλέγμα χωρίστηκε σε τρείς περιοχές. Αρχικά στην περιοχή από τον άξονα συμμετρίας έως την ακτίνα του δρομέα έχουμε ομοιόμορφο πλέγμα με μέγεθος dy_grid που εισάγεται από τον χρήστη. Επειτα, το υπόλοιπο ακτινικό χωρίο χωρίζεται στα δύο. Από τη θέση y=1 (ακτίνα δρομέα) έως το μέσο του υπολοιπού χωρίου, έχουμε σταδιακή αφαίωση με γεωμετρική πρόοδο. Ενώ από το μέσο του χωρίου έως το τοίχωμα έχουμε σταδιακή πύκνωση με τον ίδιο λόγο γεωμετρικής προόδου, επομένως έχουμε αντικατωπτρισμό του πλέγματος που δημιουργήθηκε στην δεύτερη περιοχή. Το πλέγμα σε αυτές τις περιοχές ελέγχεται από τον χρήστη εισάγωντας τον αριθμό των κελλιών σε κάθε περιοχή και τον λόγο της γεωμετρικής προόδου. Οι τρεις περιοχές και το παραγόμενο πλέγμα φαίνονται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Κόμβοι πλέγματος κατά την ακτινική διεύθυνση

Όπως φαίνεται και στο τμήμα του αώδιακα 2, με βάση τις εισόδους (αριθμός κελλιών) υπολογίζουμε μέσω της σχέσης 1.1 το μήκος του πρώτου κελλιού στην πρόοδο (του μικρότερου), και χρησιμοποιώντας την ίδια σχέση υπολογίζουμε τη θέση του κάθε κόμβου.

```

1 !--- Uniform grid in y-direction
2   !From y=ymin to y=1 (disk radius)
3
4 ! Second point is on symmetry line
5 y_grid(2)=ymin
6
7 do j=2,ngridy1-1
8   y_grid(j+1)=y_grid(j) + dy_grid
9 enddo
10
11 ! First point is symmetric to third
12 y_grid(1)=-y_grid(3)
```

Τμήμα αώδιακα 1: Κατασκευή ομοιόμορφου πλέγματος

```

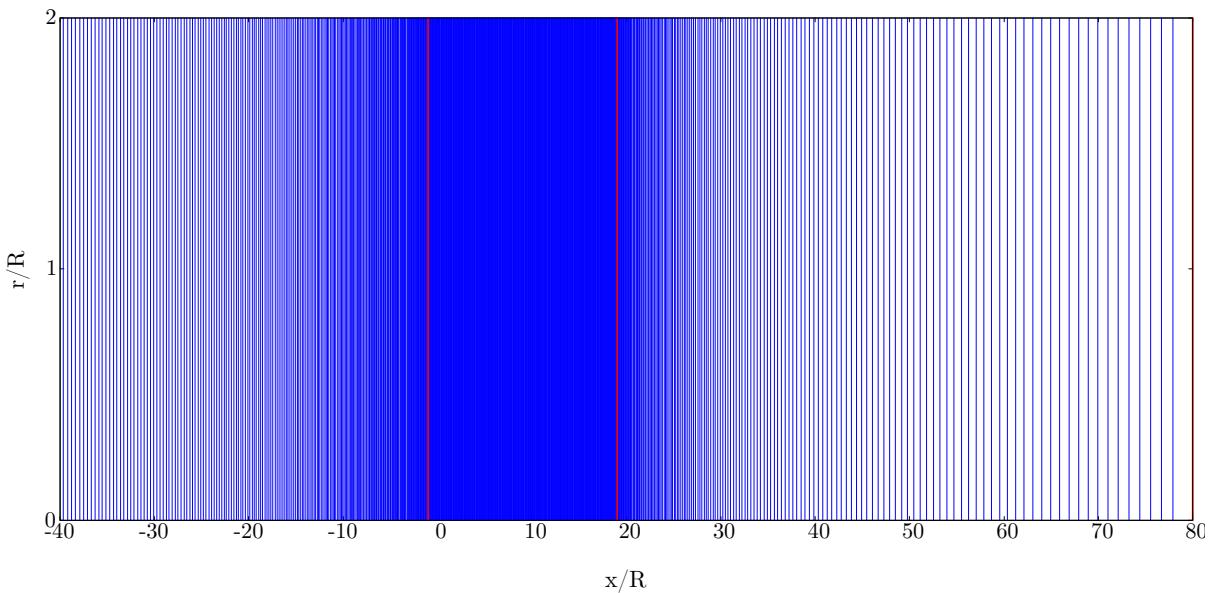
1 !--- Non-uniform grid from ngridy1 to ngridy2
2 !--- From y=1 to y=y_mid
3
4 ! Calculate length of first cell in coarsening region
5 ! using the number of cells
6 dy_grid_first= ((y_mid-1.d0) / (raty**dble(ngridy2)) -
7   1.d0) * (raty-1.d0)
8
9 do j=1,ngridy2
10   y_grid(j+ngridy1)=y_grid(j+ngridy1-1) +
11     dy_grid_first*raty**(j-1)
12 enddo
```

Τμήμα αώδιακα 2: Αραίωση πλέγματος

```

1 !--- Non-uniform grid from ngridy1 to ngridy2
2 !--- From y=y_mid to y=ymax
3
4 do j=1,ngridy2
5   ! Inverse raty to refine mesh
6   y_grid(j+ngridy1+ngridy2)=y_grid(j+ngridy1+ngridy2-
7     1) + dy_grid_first/raty**(j-1)*raty**((ngridy2-1)
```

Τμήμα αώδιακα 3: Πύκνωση πλέγματος



Σχήμα 2: Κόμβοι πλέγματος κατά την αξονική διεύθυνση

1.2 Κατασκευή πλέγματος κατά την αξονική διεύθυνση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην αξονική διεύθυνση έχουμε ομοιόμορφο πλέγμα κοντά στον δρομέα, και σταδιακή αραίωση ανάντι και κατάντι αυτού. Ξανά, το μήκος των κελλιών στην ομοιόμορφη περιοχή ορίζεται από τον χρήστη και είναι ίσο με το μήκος των κελλιών κατά την ακτινική διεύθυνση στο ομοιόμορφο τμήμα. Η κατανομή των κόμβων κατά την αξονική διεύθυνση φαίνεται στο σχήμα 2.

Παρακάτω φαίνονται τα τμήματα του κώδικα που δημιουργούν το πλέγμα για τις τρείς περιοχές κατά την αξονική διεύθυνση.

```

1 !-- x-grid
2 write(*,*)
3 ! Target Uni Dx=", dx_uni_tar
4 ! Correct uniform spacing to intersect x=-1 and x=0
5 dx_uni_cor = 10**LOG10(1.d0)-LOG10(dble(ceiling(10**(
6     LOG10(1.d0)-LOG10(dx_uni_tar))))) )
7 ! Calculate number of grid points
8 ngridx2 = ceiling(xuni / dx_uni_cor)
9 dx_grid2 = dx_uni_cor
10 dx_grid1 = dx_uni_cor
11 write(*,*) 'dx_grid1=', dx_grid1
12
13 ngridx1 = int(dlog(1.d0+xmin*(1.d0-ratx1)/dx_grid1)/dlog
14     (ratx1))
15 ngridx3 = int(dlog(1.d0-(xmax-xuni)*(1.d0-ratx2)/
16     dx_grid1)/dlog(ratx2))
17 ngridx=ngridx1+ngridx2+ngridx3
18 ! Save the index of rotor axial position
19 x0ind = ngridx1+ngridx2/xuni

```

Τμήμα αώδικα 4: Υπολογισμός παραμέτρων πλέγματος στην αξονική διεύθυνση

```

1 ! Upstream coarsening (x < -1) with ratx1 ratio
2 x_grid(ngridx1)=-1.d0
3 do i=1,ngridx1-1
4     x_grid(ngridx1-i)=x_grid(ngridx1-i+1)-dx_grid1*ratx1
5     *(i-1)
5 enddo

```

Τμήμα αώδικα 5: Αραίωση πλέγματος ανάντι δρομέα

```

1 ! Uniform grid -1 < x < XUNI-1

```

```

2   do i=1,ngridx2
3     x_grid(ngridx1+i)=x_grid(ngridx1+i-1)+dx_grid2
4   enddo

```

Τμήμα κώδικα 6: Ομοιόμορφο πλέγμα κοντά στον δρομέα

```

1 ! Downstream coarsening (x > XUNI-1) with ratx2 ratio
2 do i=1,ngridx3
3   x_grid(ngridx1+ngridx2+i)=x_grid(ngridx1+ngridx2+i
4   -1)+dx_grid2*ratx2**(i-1)
4 enddo

```

Τμήμα κώδικα 7: Αραίωση πλέγματος κατάντι δρομέα

Όπως φαίνεται και στο τμήμα του κώδικα 4, το πλήθις των κόμβων για τα δύο τμήματα που αφαιώνουμε, υπολογίζεται ώστε προσεγγιστικά να φτάνει το πλέγμα έως τα όρια που έχει ορίσει ο χρήστης. Θα μπορούσαμε εναλλακτικά να εισάγουμε το πλήθις των κόμβων και να λύσουμε την εξίσωση 1.1 ωστε να καθορίσουμε το απαιτούμενο μήκος του πρώτου κελλιού. Ωστόσο, δεν μας ενδιαφέρει να πετύχουμε ακριβώς τη θέση εισόδου και εξόδου που ορίζει ο χρήστης, αφού απλά ενδιαφερόμαστε να έχουμε ικανοποιητικό μήκος ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε συνοριακές συνθήκες που δεν θα επηρεάζονται από τις συνυθήκες κοντά στον δρομέα, δηλαδή να έχουμε αποκατεστημένη ροή.

Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, είναι προτιμότερο να έχουμε ομαλή μετάβαση από το τμήμα ομοιόμορφου πλέγματος στα τμήματα της αράιωσης διατηρώντας ίδιο μήκος κελλιού στο σύνορο των περιοχών.

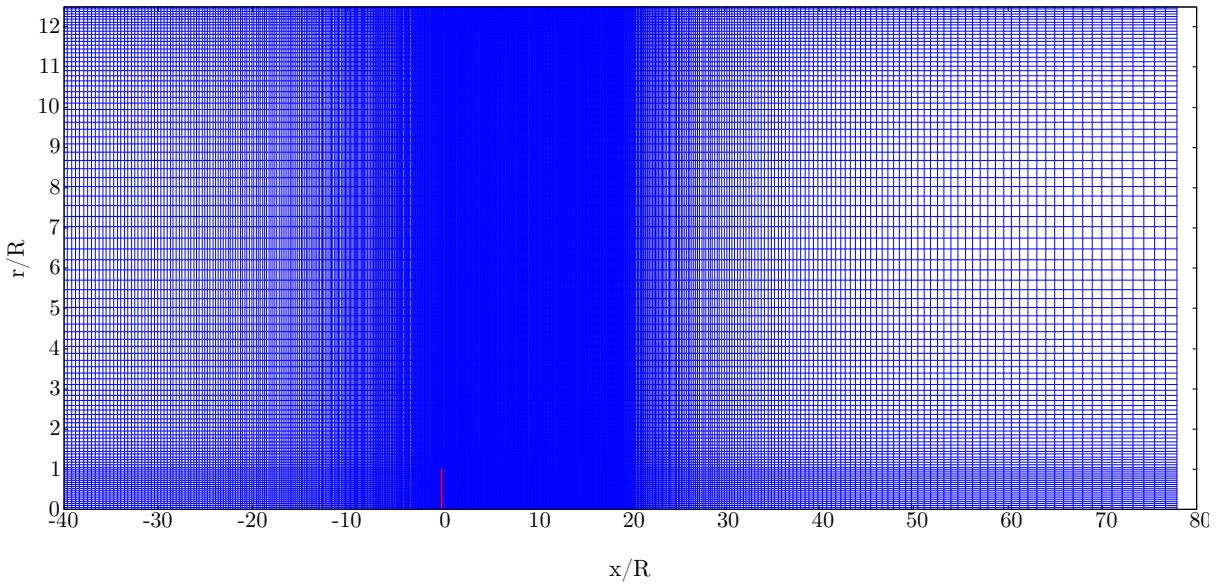
1.3 Παράμετροι & εικόνες πλέγματος

Οι τελικές γεωμετρικές παράμετροι και οι παράμετροι που αφορούν το πλέγμα και αναφέρθηκαν παραπάνω παρατίθενται στον πίνακα 1.

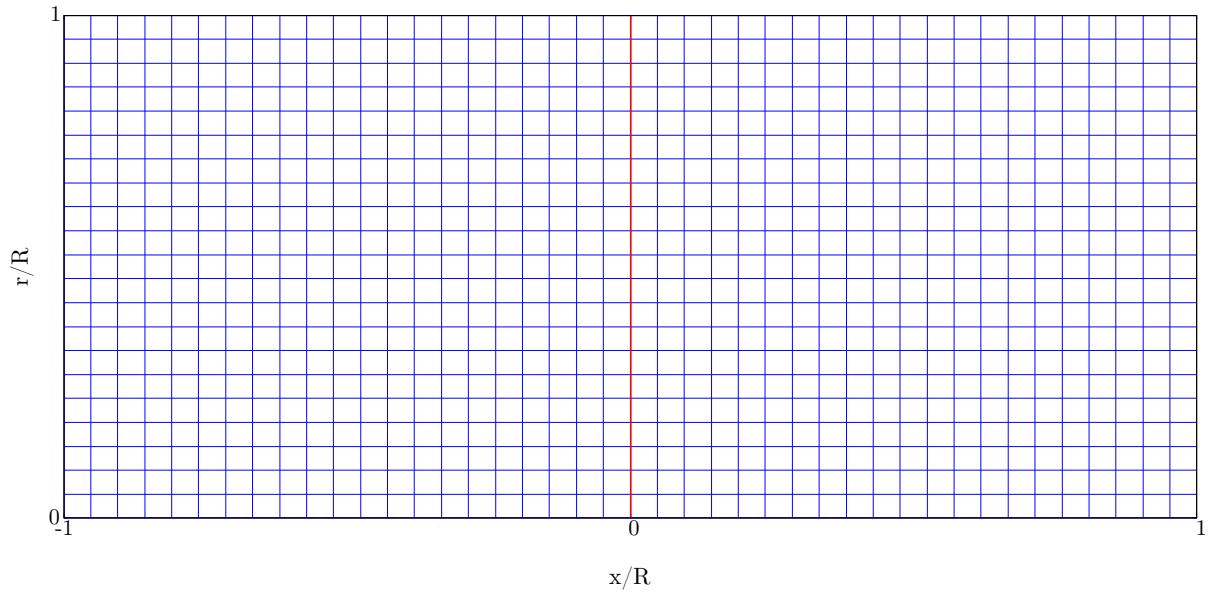
| | | |
|---------|------|--------------------------------------|
| XMIN | -40 | Αρχή υπολογιστικού χωρίου |
| XMAX | 80 | Τέλος υπολογιστικού χωρίου |
| XUNI | 20 | Μήκος τμήματος ομοιόμορφου πλέγματος |
| YMIN | 0 | Ελάχιστη ακτινική θέση |
| YMAX | 12.5 | Μέγιστη ακτινική θέση |
| NGRIDX1 | 91 | Πλήθις κόμβων αραίωσης - αξονικά |
| NGRIDX | 582 | Συνολικό πλήθις κόμβων - αξονικά |
| NGRIDY1 | 41 | Πλήθις κόμβων αραίωσης - ακτινικά |
| NGRIDY | 102 | Συνολικό πλήθις κόμβων - ακτινικά |
| dx_uni | 0.05 | Μέγεθος κελλιού - ομοιόμορφο πλέγμα |
| RATX1 | 1.01 | Λόγος ΓΠ ανάντι |
| RATX2 | 1.02 | Λόγος ΓΠ κατάντι |
| RATY | 1.04 | Λόγος ακτινικής πύκνωσης |

Πίνακας 1: Τελικές γεωμετρικές παράμετροι και παράμετροι πλέγματος

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η τελική μορφή του πλέγματος σε ολόκληρο το χωρίο και εστιασμένο στις περιοχές ενδιαφέροντος. Η θέση του δρομέα σημειώνεται με κόκκινη συμπαγή γραμμή.



Σχήμα 3: Συνολική εικόνα πλέγματος



Σχήμα 4: Περιοχή δρομέα - ομοιόμορφο πλέγμα

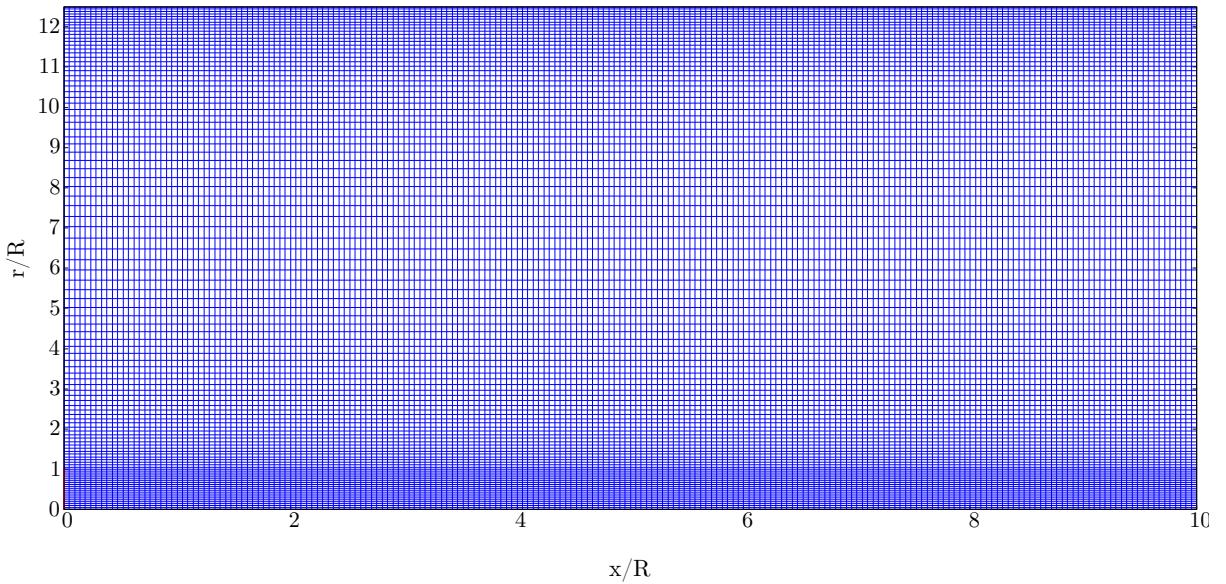
2 Ορισμός συνοριακών συνθηκών - μοντελοποίηση δίσκου ορυχής

Για την κατάστρωση του γενικού συστήματος των εξισώσεων η διατύπωση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης για κάθε κελλί φαίνεται στην εξίσωση 2.1.

$$\alpha_P u_P = \alpha_E u_E + \alpha_W u_W + \alpha_N u_N + \alpha_S u_S + S \quad (2.1)$$

Όπου:

- **u:** η τιμή του μεγέθους προς επίλυση (π.χ ταχύτητα, πίεση, κινητική ενέργεια τύρβης)
- **α :** ο συντελεστής συνεισφοράς του εν λόγω μεγέθους στην εξίσωση προς επίλυση
- **S:** όρος πηγής της εξίσωσης



Σχήμα 5: Περιοχή κατάντι δρομέα

Και οι δείκτες E,W,N,S αναφέρονται στα γειτονικά κελλιά από αυτό που διατυπώνουμε την εξίσωση (ανατολικό, δυτικό κ.ο.κ), και ο δείκτης P αναφέρεται στην τιμή του μεγέθους που έχει το δεδομένο κελλί.

Οι τιμές των συντελεστών (α) προφανώς προκύπτουν αφού φέρουμε την γενική εξίσωση σε γραμμικοποιημένη μορφή.

2.1 Ορισμός συνοριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες που ορίζουμε σε κάθε περιοχή είναι οι εξής:

Είσοδος

- $u = 1$, αφού έχουμε αδιαστατοποιήσει με την ταχύτητα ελεύθερης ροής
- $v = 0$
- $k = 1.5(U^2 I^2)$, όπου k η κυνητική ενέργεια της τύρβης, U το μέτρο της ταχύτητας, και I η ατμοσφαιρική ένταση της τύρβης

Έξοδος

- $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$
- $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$
- $\frac{\partial k}{\partial x} = 0$

Άνω σύνορο

- $u = 0$
- $v = 0$
- $\frac{\partial k}{\partial r} = 0$

Άξονας συμμετρίας

- $v = 0$

- $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$

- $\frac{\partial v}{\partial r} = 0$

- $\frac{\partial k}{\partial r} = 0$

Έτσι, παρακάτω φαίνεται η υλοποίηση των οριακών συνθηκών ακολουθώντας τη γραμμικοποιημένη μορφή της

2.1. Σημειώνεται πως στον κώδικα BB συμβολίζεται ο όρος πηγής και οι οριακές συνθήκες της μορφής $\frac{\partial U}{\partial x} = 0$ υλοποιούνται εκφράζοντας πεπερασμένες διαφορές ως: $U_i - U_{i-1} = 0$.

```

1      !--- Coefficient matrix initialization
2      AE = 0.d0
3      AW = 0.d0
4      AN = 0.d0
5      AS = 0.d0
6      AP = 0.d0
7      BB = 0.d0
8      DU = 0.d0
9
10     !==== INFLOW BOUNDARY CONDITIONS
11     do j=1,ngridy-1
12         AP(1,j) = 1.d0
13         BB(1,j) = 1.d0
14
15         DU(1,j)=1.d0
16     enddo
17
18     !==== OUTFLOW BOUNDARY CONDITIONS
19
20     do j=2,ngridy-1
21         AW(ngridx,j) = 1.d0
22         AP(ngridx,j) = 1.d0
23
24         DU(ngridx,j)=1.d0
25     enddo
26
27     !----- BOUNDARY CONDITIONS AT SYMMETRY AXIS
28
29     do i=2,ngridx
30         AP(i,1)=1.d0
31         AN(i,1)=1.d0
32
33         DU(i,1)=1.d0
34     enddo
35
36     !----- BOUNDARY CONDITIONS AT UPPER BOUNDARY
37     do i=2,ngridx-1
38         AP(i,ngridy-1)=1.d0
39         BB(i,ngridy-1)=0.d0
40
41         DU(i,ngridy-1)=1.d0
42     end do

```

Τμήμα κώδικα 8: Οριακές συνθήκες ταχύτητας u

```

1      !--- Coefficient matrix initialization
2      AE = 0.d0
3      AW = 0.d0
4      AN = 0.d0
5      AS = 0.d0
6      AP = 0.d0
7      BB = 0.d0
8      DV = 0.d0
9

```

```

10 !====INFLOW BOUNDARY CONDITIONS
11
12 do j=1,ngridy
13   AP(1,j)=1.d0
14   BB(1,j)=0.d0
15
16   DV(1,j)=1.d0
17 enddo
18
19 !====OUTFLOW BOUNDARY CONDITIONS
20 do j=2,ngridy-1
21   AP(ngridx,j)=1.d0
22   AW(ngridx,j)=1.d0
23
24   DV(ngridx,j)=1.d0
25 end do
26
27 !-----SYMMETRY AXIS
28 do i=2,ngridx
29   AP(i,2)=1.d0
30   BB(i,2)=0.d0
31   DV(i,2)=1.d0
32
33   AP(i,1)=1.d0
34   BB(i,1)=-VVEL(i,3)
35   DV(i,1)=1.d0
36 enddo
37
38 !-----UPPER BOUNDARY CONDITIONS
39
40 do i=2,ngridx
41   AP(i,ngridy)=1.d0
42   BB(i,ngridy)=0.d0
43   DV(i,ngridy)=1.d0
44 end do

```

Τμήμα αώδιακα 9: Οριακές συνθήκες ταχύτητας v

```

1 !--- Coefficient matrix initialization
2 AE=0.d0
3 AW=0.d0
4 AN=0.d0
5 AS=0.d0
6 AP=0.d0
7 BB=0.d0
8
9 !====INFLOW BOUNDARY CONDITIONS
10 do j=1,ngridy-2
11   AP(1,j)=1.d0
12   BB(1,j)=1.5d0*tiamb**2.d0
13 enddo
14
15 !====OUTFLOW BOUNDARY CONDITIONS
16
17 do j=2,ngridy-2
18   AP(ngridx-1,j)=1.d0
19   AW(ngridx-1,j)=1.d0
20 enddo
21
22 !----- BOUNDARY CONDITIONS AT SYMMETRY AXIS
23
24 do i=2,ngridx-1
25   AP(i,1)=1.d0
26   AN(i,1)=1.d0
27 enddo
28
29 !----- BOUNDARY CONDITIONS AT UPPER BOUNDARY
30 do i=1,ngridx-1
31   AP(i,ngridy-1)=1.d0
32   AS(i,ngridy-1)=1.d0
33 end do

```

Τμήμα αώδιακα 10: Οριακές συνθήκες κινητικής ενέργειας τύρβης k

2.2 Μοντελοποίηση δρομέα με δίσκο ορμής

Όπως φαίνεται στο τμήμα 4 του κώδικα, αποθηκεύουμε τον δείκτη των κόμβων κατά x στον οποίο βρίσκεται ο δρομέας ($x=0$). Έτσι, στα κελλιά στη θέση $x=0$ για τις τιμές της ακτίνας από 0 μέχρι 1 (ακτίνα δρομέα) προσθέτουμε τον όρο της εξίσωσης 2 στον όρο πηγής της εξίσωσης ορμής κατά x του κελλιού. Η τιμή της ταχύτητας αναφοράς (U_{ref}) λήφθηκε από το πρώτο τρέξιμο του κώδικα χωρίς τον δρομέα ως η μέση τιμή της οριζόντιας ταχύτητας στη θέση του δρομέα. Με βάση τη ταχύτητα αναφοράς από την εκφώνηση προσδιορίζουμε τον αντίστοιχο συντελεστή ώσης από τα δεδομένα της εκφώνησης. Και οι δύο παράμετροι, καθώς και η επιλογή προσομοίωσης με ή χωρίς τον δρομέα ελέγχονται από κατάλληλες παραμέτρους στο αρχείο εισόδου (12).

```

1   --- Add disc contribution
2   if (disc.eq.1) then
3       --- Add source term to cells on x=0
4       if (i.eq.x0ind) then
5           --- Add source term to cells from r=0 to r=R
6           if(y_grid(j).le.1) then
7               BB(i,j) = BB(i,j) - 0.5*ct*2*pi*y*dygridstgu(j)*uref
8           endif
9       endif
10      endif

```

Τμήμα κώδικα 11: Προσθήκη όρου πηγής - ορμή κατά x - δίσκος ορμής

3 Αρχείο παραμέτρων και τελικές τιμές

Για τη δική μου περίπτωση η ταχύτητα ελεύθερης ροής και η ακτίνα του δρομέα προκύπτουν ίσες με: $U = 14m/s$ και $R = 0.34m$. Μετά την πρώτη προσομοίωση, η ταχύτητα αναφοράς για την ώση και ο αντίστοιχος συντελεστής ώσης είναι ίσοι με: $U_{ref} = 17.67m/s$ και $C_t = 0.1266$.

```

1   XMIN      XMAX      XUNI     YMIN      YMAX
2   -40.       80.        20.       0.         12.5
3   NGRIDX1   NGRIDY1   DX_UNI
4   91          41        0.05d0
5   RATX1     RATX2     RATY
6   1.01        1.02      1.04
7   DVISC      UINF
8   1.5e-5     14.
9   RADIUS     CT        UREF ! CT AND UREF for thrust
10    calculation
11    0.34d0    0.1266   17.67
12   ITMAX      NSWP      NBACKUP
13   30000      5          500
14   EPS         TINY
15   1d-6        1d-20
16   URFU       URFV      URFP      URFTE     URFVIS
17   0.40        0.40      0.350     0.40      0.450
18   TIAMB
19   0.10
20   IBACKUP   RUN_WITH_DISC ! (0 for free, 1 for rotor)

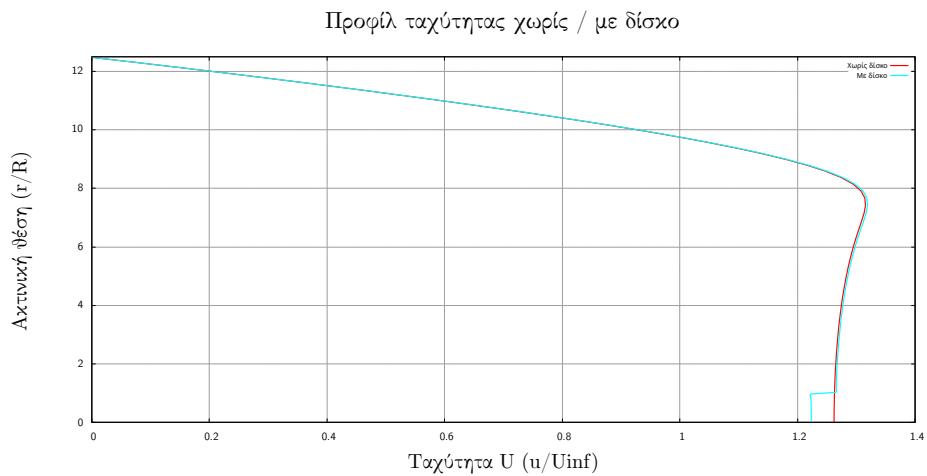
```

Τμήμα κώδικα 12: Αρχείο εισόδου

Λόγω δυσκολιών στη σύγκλιση, οι συντελεστές υποχαλάρωσης μειώθηκαν συγκριτικά με τους προτεινόμενους με τον μικρότερο να χρησιμοποιείται στην πίεση. Οι ακριβείς συντελεστές υποχαλάρωσης φαίνονται στο αρχείο εισόδου (12). Για την προσεγγιστική ανάλυση σε τριδιαγώνια συστήματα έγιναν 5 σαρώσεις ανά κατεύθυνση.

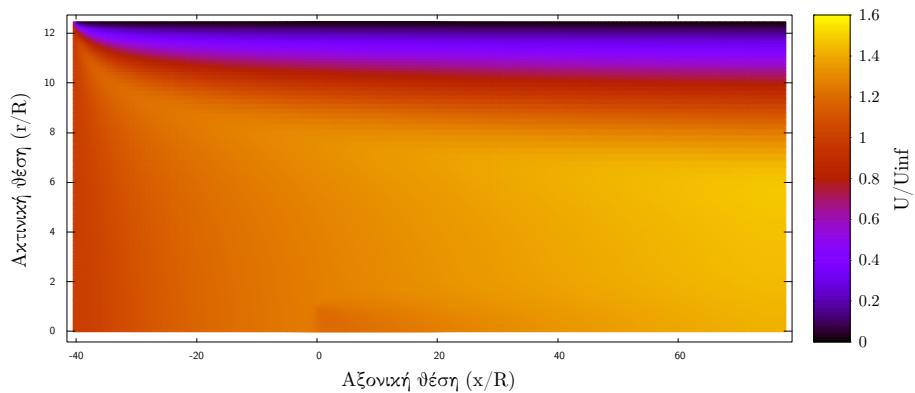
4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

4.1 Προφίλ ταχύτητας στην αξονική θέση του δρομέα



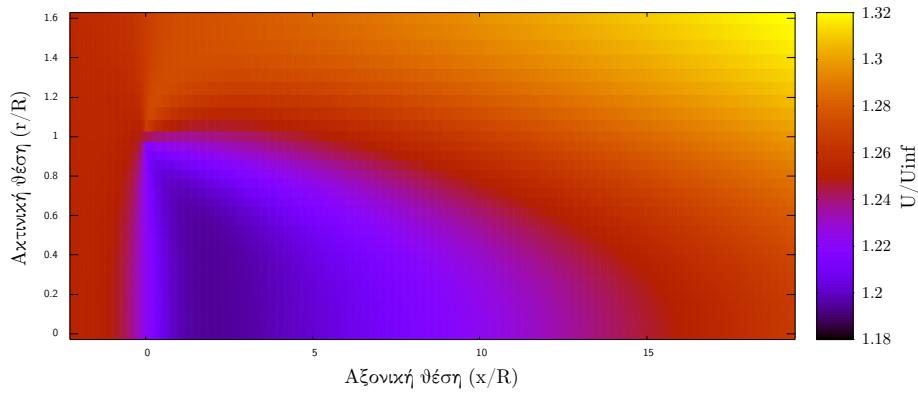
Σχήμα 6: Αξονική θέση του δρομέα

4.2 Ισοταχείς της ροής παρουσία δρομέα



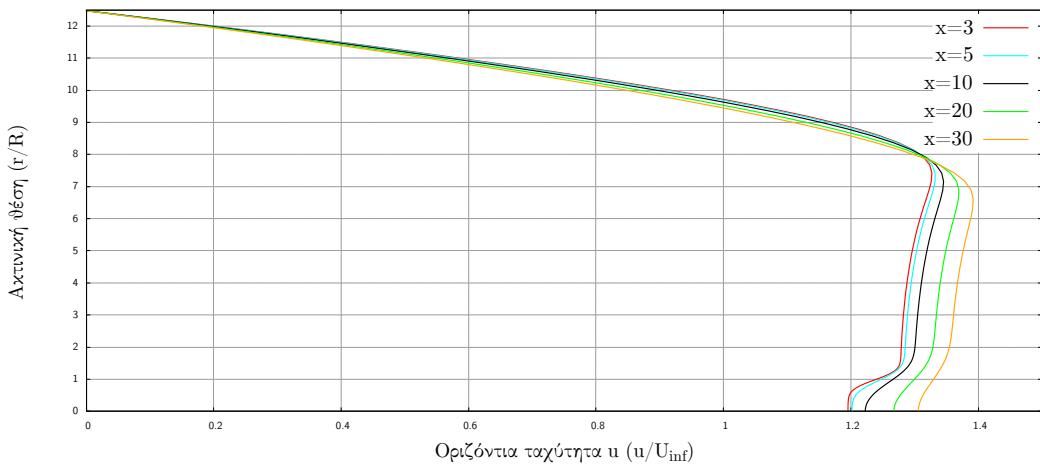
Σχήμα 7: Ισοταχείς του πεδίου ροής

4.3 Προφίλ μεγεθών κατάντι του δρομέα

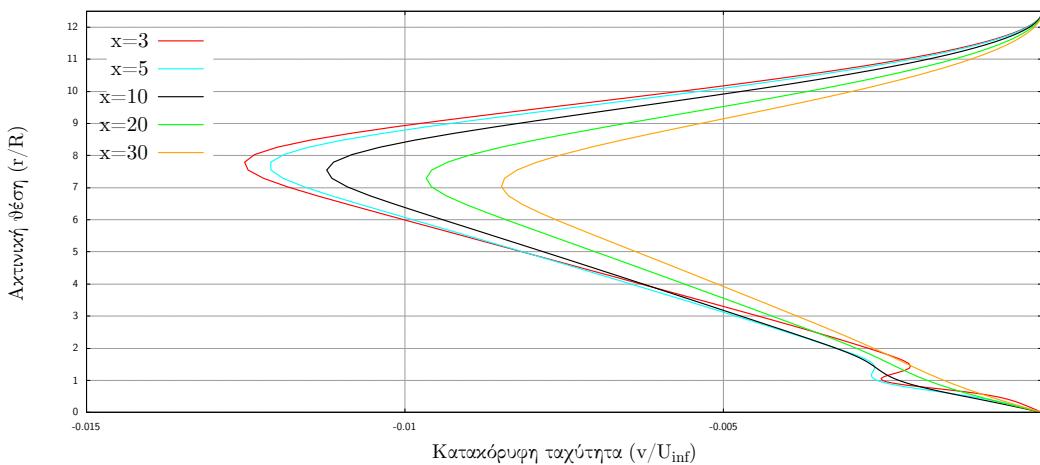


Σχήμα 8: Ισοταχείς του πεδίου ροής - μεγέθυνση στην περιοχή του δρομέα

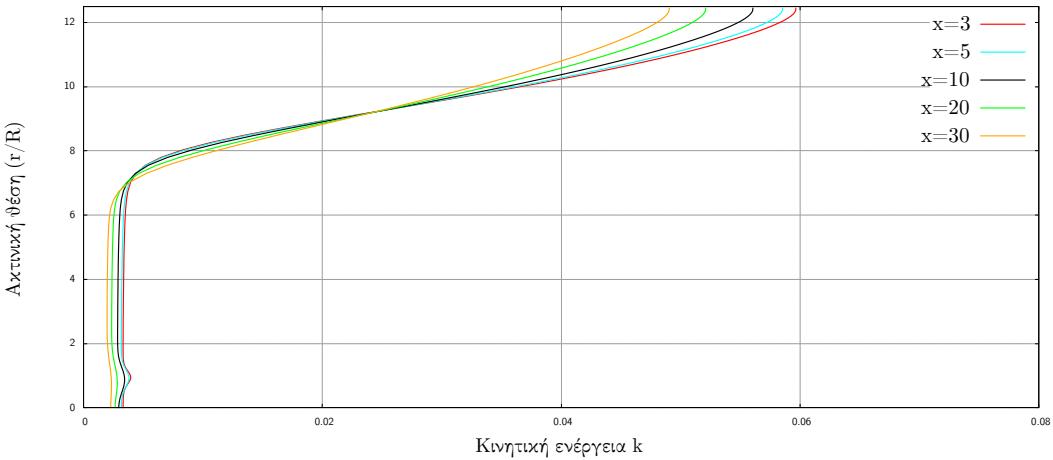
Προφίλ οριζόντιας ταχύτητας



Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας



Προφίλ κινητικής ενέργειας τύρβης



5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Ξεκινώντας, παρατηρούμε πως το μοντέλο μπόρεσε να αντικατοπτρίσει την ανάπτυξη του οριακού στρώματος στο τοίχωμα της σύραγγας ικανοποιητικά. Επιπλέον, η μοντελοποίηση του δρομέα με τη χρήση της θεωρίας δίσκου ορμής, όπως φαίνεται και στα σχήματα 8 και 6 δρά σωστά ως καταβόθρα ορμής και δημιουργεί ενα σκαλοπάτι στην τιμή της οριζόντιας ταχύτητας υ. Επιπλέον, από την επίλυση του πεδίου παρατηρούμε επίσης την επιτάχυνση της ροής γύρω από τον δρομέα, και για την ικανοποίηση της εξίσωσης της συνέχειας, έχουμε αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας ν και την επιτάχυνση της ροής εντός του οριακού στρώματος. Δηλαδή, η παρουσία του δρομέα, αυθεί την ροή να κινηθεί γύρω του.

Περετάριων αναφορικά με τη μοντελοποίηση του δρομέα, προφανώς το συγκεκριμένο μοντέλο δεν επιλύει τα χαρακτηριστικά της ώσης του δρομέα, παραμόνο την ροή γύρω από αυτόν με δεδομένη τη συμπεριφορά του δρομέα από τα δεδομένα της εκφώνησης. Δηλαδή, αν θα θέλαμε να υπολογίσουμε μόνοι μας την επίδραση της ροής στον δρομέα, δηλαδή να εξάγουμε κάποια χαρακτηριστική καμπύλη ώσης (ή συντελεστή ώσης) συναρτήσει της ταχύτητας, θα έπρεπε να τον μοντελοποιήσουμε ως στερεό σώμα, με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και την αντίστοιχη γωνιακή του ταχύτητα, και φυσικά σε αυτή την περίπτωση, το μοντέλο δεν θα μπορούσε να περιγραφεί ως αξιονοσυμμετρικό και θα χρειαζόμασταν ενα τρισδιάστατο πλέγμα με τρισδιάστατη έκφραση των εξισώσεων Navier-Stokes.

5.1 Επίδραση τοιχωμάτων στην τιμή της ώσης

Το παρόν μοντέλο είναι ικανό να υπολογίσει την επίδραση των χαρακτηριστικών της σύραγγας και του δρομέα στην τιμή της ώσης. Πράγματι, μπορούμε να εκτιμήσουμε την επίδραση της σύραγγας (των τοιχωμάτων δηλαδή, και συνεπώς του οριακού στρώματος) στην τιμή της ώσης για ίδια ταχύτητα ελεύθερης ροής.

Λόγω της ανάπτυξης του οριακού στρώματος, ακολουθώντας την εξίσωση της συνέχειας και διατήρησης ορμής, η ταχύτητα κοντά στο κέντρο της σύραγγας επιταχύνεται ώστε η συνολική παροχή σε ολόκληρη τη διατομή της σύραγγας να είναι ίση με την παροχή στην είσοδο της σύραγγας με ομοιόμορφο πεδίο ταχύτητας.

Έτσι, ακολουθώντας τα δεδομένα της εκφώνησης για τον συντελεστή ώσης έχουμε:

| | Σύραγγα | Ελεύθερη ροή |
|---------------------|---------|--------------|
| $U_{ref}(m/s)$ | 17.67 | 14 |
| C_t | 0.1266 | 0.26 |
| $T(N)$ | 8.78 | 11.32 |
| Ποσοστιαία μεταβολή | -22.43% | |

Πίνακας 2: Επίδραση σύραγγας στην ώση

Παρατηρούμε πως ενώ θα αναμένουμε την τιμή της ώσης να αυξηθεί λόγω της αυξημένης ταχύτητας, η ταχύτητα της ελεύθερης ροής μας έιναι 14 m/s που έιναι ήδη υψηλή για ανεμογεννήτρια. Μάλιστα, ήδη από τα 12 m/s περίπου είτε λόγω αποκόλλησης στα blades της A/G είτε μέσω ενεργητικού ελέγχου, μειώνεται σκόπιμα ο συντελεστής ώσης, ώστε να προστατεύσει την εγκατάσταση, το δίκτυο κ.α. Έτσι, πρόσθιο που η επίδραση του τοιχώματος αυξάνει την τιμή της ταχύτητας στην θέση του δρομέα, ο συντελεστής ώσης πέφτει απότομα και ώς συνολική επίδραση η ώση μειώνεται.