



**Διπλωματική Εργασία**  
**Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων**  
**Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου**

**Σύνταξη: Γ. Καβαθάς**  
**Σελίδα: 1 από 223**  
**Έκδοση: 10/06/2020**

## **ΔΠΜΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων**  
**Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου**

**ΚΑΒΑΘΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 52118013**

Επιβλέπων	:	Βασίλειος Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Υπόψιν	:	Νικόλαο Μαρκάτο, Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ

**Ιούνιος 2020**



*Αφιερώνεται στην σύζυγο μου, **Αναστασία**, για τις προσωπικές της  
θυσίες, την πίστη και την υποστήριξη της προς το πρόσωπό μου. Μου  
έδινε δύναμη να συνεχίσω.*

*Δεν ξεχνώ τα παιδιά μου **Ειρήνη** και **Λουκά** για το ενδιαφέρον τους.  
Θα πρέπει να θυμούνται ότι*

***“Η ΓΝΩΣΗ ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΗΛΙΚΙΑ ΚΑΙ ΟΡΙΑ”***



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση της διασποράς ρύπων από καμινάδα διυλιστηρίου με χρήση και τροποποίηση του εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής PHOENICS v. 2009. Οι μετεωρολογικές συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη, είναι η ταχύτητα του ανέμου (σχετίζεται άμεσα με την ένταση της τύρβης) και η επικρατούσα θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι ρύποι που προσομοιώνονται είναι το διοξείδιο θείου και αζώτου, καθώς και τα συνολικά αιωρούμενα σωματίδια.

Εξετάστηκαν σενάρια προσομοίωσης με καμινάδα με και χωρίς κώνο, σε διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου και σε δύο τιμές τραχύτητας εδάφους. Επίσης εξετάστηκαν διάφορα ύψη καμινάδας ως προς την επίδρασή τους στην συγκέντρωση των ρύπων στο επίπεδο του εδάφους. Παράλληλα αξιολογήθηκε η χρήση της αδιάστατης συγκέντρωσης στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ρύπου άμεσα και χωρίς την χρήση του κώδικα. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης RNG derived  $k-\epsilon$  και η αριθμητική επίλυση έγινε με το υβριδικό σχήμα διακριτοποίησης.

Το πεδίο ροής των προσομοιώσεων είναι τρισδιάστατο με διαστάσεις, 6.250 m x 600 m x 500 m (για ύψος τραχύτητας 0,1 m) ή 700 m (για ύψος τραχύτητας 0,3m). Κατά την αριθμητική επίλυση ελήφθη υπόψη το επίπεδο συμμετρίας παράλληλο στο μήκος και κάθετο στο πλάτος του πεδίου ροής, δηλ. η επίλυση έγινε για πλάτος του πεδίου ροής 300 m. Από την ανεξαρτησία πλέγματος έχει προκύψει ένα πεδίο με 156.000 κελιά (25 x 78 x 80).

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την συγκεκριμένη καμινάδα της εργασίας. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα της εργασίας έχουν γενικότερα εφαρμογή σε οποιαδήποτε καμινάδα διυλιστηρίου.

Η αύξηση της τραχύτητας εδάφους προκαλεί μείωση της ανύψωσης του πλουμίου των ρύπων με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις στο επίπεδο του εδάφους και επιπλέον οι μέγιστες συγκεντρώσεις να παρουσιάζονται σε μικρότερες σχετικά αποστάσεις από την καμινάδα. Επίσης ανάλογα φαινόμενα παρατηρούνται και με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Μάλιστα σε πολύ ισχυρούς ανέμους (και στις δύο τιμές τραχύτητας), το πλούμιο έχει παρόμοια συμπεριφορά σε μεγάλες αποστάσεις από την καμινάδα.

Η καμινάδα με ειδικό κώνο αύξησης της ταχύτητας εκροής των καυσαερίων παρουσιάζει μεγαλύτερη ανύψωση του πλουμίου των ρύπων σε σχέση με αυτήν χωρίς κώνο, με αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεων στο επίπεδο του εδάφους σε αποστάσεις μέχρι 4.000 m από την καμινάδα, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις οι συγκεντρώσεις είναι παρόμοιες. Η μείωση αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και είναι μεγάλη (έως 300%) για χαμηλές ταχύτητες ανέμου, σημαντικά μικρότερη (έως 20%) για μέτριες ταχύτητες ανέμου και πολύ μικρή (έως 10% για μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα) για ισχυρές ταχύτητες. Σε πολύ ισχυρούς ανέμους οι συγκεντρώσεις και στις δύο περιπτώσεις καμινάδας είναι παρόμοιες.

Για καμινάδα με κώνο, όσο αυξάνεται το ύψος της έχουμε μείωση συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου στο επίπεδο του εδάφους. Υψηλότερη καμινάδα οδηγεί σε μεγαλύτερο ενεργό ύψος, άρα αυξημένη ανύψωση του πλουμίου. Η μείωση αυτή είναι πιο ελαφριά σε ύψη καμινάδας από 80 m σε 90 m. Αύξηση κατά 10 m του ύψους της καμινάδας οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο



αναπνοής κατά 19% μέσο όρο περίπου. Η συνολική μείωση είναι της τάξης του 50,00% κατά μέσο όρο για καμινάδα ύψους 90 m. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται το ποσοστό μείωσης της συγκεντρώσεως του διοξειδίου του θείου ανά 10 m αύξησης ύψους καμινάδας.

Για καμινάδα χωρίς κώνο, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μειώνεται η ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα να δίνει υψηλότερες αδιάστατες συγκεντρώσεις και κατά επέκταση συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης όσο μειώνεται η ανύψωση του πλουμίου (αύξηση ταχύτητας ανέμου), οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα.

Για την καμινάδα με κώνο, σε σταθερή ταχύτητα ανέμου, όσο αυξάνεται η παροχή των καυσαερίων, τόσο αυξάνεται η ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα να δίνει μικρότερες αδιάστατες συγκεντρώσεις και κατά επέκταση συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Κρίσιμος παράγοντας για την αύξηση της παροχής καυσαερίων είναι η ταχύτητα εκροής καυσαερίων από την καμινάδα. Αυτή με την σειρά της επηρεάζεται από τον ρυθμό εκροής ( $m^3/sec$ ) των καυσαερίων από την καμινάδα – ανάλογα – και από την επιφάνεια εκροής – αντιστρόφως ανάλογα. Επίσης όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου με παράλληλη αύξηση της παροχής εκροής καυσαερίων, τόσο μειώνεται η ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα να δίνει υψηλότερες αδιάστατες συγκεντρώσεις και κατά επέκταση συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου.

Για την εκτίμηση της επίδρασης της δημόσιας υγείας από την διασπορά ρύπων στις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας σε ετήσια βάση, συμπεραίνεται ότι η διασπορά των ρύπων από καμινάδα διυλιστηρίου ευθύνεται για μικρό σχετικά μέρος των μετρούμενων συγκεντρώσεων ρύπων σε ετήσια βάση στις εν λόγω πόλεις, στις οποίες μάλιστα δεν καταγράφονται υπερβάσεις των νομοθετημένων οριακών τιμών.

Ως προς το διοξείδιο του θείου για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι το 33,45% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 16,73% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή αποτελεί το 17,89% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 8,95% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Ως προς το διοξείδιο του αζώτου για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι το 5,35% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 2,67% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή αποτελεί το 2,90% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 1,45% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Σχετικά με τα αιωρούμενα σωματίδια για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι το 0,16% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 0,10% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή αποτελεί το 0,09% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 0,005% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.



## ABSTRACT

The present work refers to the simulation of pollutants dispersion from a refinery stack by modifying appropriately the commercial software "PHOENICS". The meteorological conditions taken into account are the wind velocity (related to the turbulence intensity) and the ambient temperature. The simulated pollutants are the sulfur and nitrogen dioxides, as well as the total particulate matter.

Many simulation cases were examined for a stack (with and without a cone) at various wind velocities and at two ground roughness values. Different stack heights were also examined for their effect on pollutant concentrations on the ground level. Furthermore, the use of a non-dimensional concentration in calculating the pollutants concentration directly from the relative diagrams, was evaluated. The Hybrid Differencing Scheme was used. This scheme switches the discretization of the convection terms between Central Differencing Scheme and Upwind Differencing Scheme, according to the local cell Peclet number. The turbulence model used was the RNG derived  $k \sim \epsilon$  model for all the simulation cases.

The simulation flow field is considered as three dimensional, with dimensions 6.250 m X 600 m X 500 m (for roughness value equal to 0,1) or 700 m (for roughness value equal to 0,3). In the field considered there is a layer of symmetry which is parallel to the length and perpendicular to the width of the flow field. Due to that symmetry the width of the flow field considered is 300 m. From the grid independency study performed, the finess of the grid required to obtain grid-independent results is 156.000 cells (25 x 78 x 80).

The evaluation of the simulation results obtained, leads to the following conclusions for the specific stack of this work. It should be noted that the results of this work are generally applied to any refinery stack.

Increasing the ground roughness causes a decrease in the elevation of the plume, resulting in an increase of the maximum pollutants concentrations at the ground level; and to take place at relatively shorter distances from the stack (at smaller lengths of the flow field). Similar phenomena are also observed with increasing wind speed. In fact, in very strong winds (at both roughness values), the plume has similar behavior over long distances from the stack.

Stack with cone, for increasing the exhaust gas velocity, has a higher plume elevation than stack without cone. It presents lower pollutants concentrations at ground level up to long distances from the stack (4.000 m), while at longer distances the concentrations are similar. This reduction depends on the wind velocity and is significant (up to 300%) for low wind velocities, significantly lower (up to 20%) for moderate wind velocities and very low (up to 10% for shorter distances from the stack) for high velocities. At very strong winds the concentrations in both cases of stack are similar.

For stack with cone, rise of its height results to the reduction of sulfur dioxide concentrations at ground level. Higher stack leads to a higher active height, thus increased plume elevation. This decrease is not so acute when the stack height varies



from 80 m to 90 m. This is the reason why we consider as the optimum stack height the value of 80 m. In general an increase of 10 m of stack height leads to a decrease in the sulfur dioxide concentration at breathing level by approximately 19% on average. The total reduction is about 50.00% for a 90 m stack height.

For a cone-free stack, as the wind velocity increases, the plume elevation decreases, with result higher non-dimensional concentrations and consequently higher concentrations of sulfur dioxide. Also, as the plume elevation decreases (with wind velocity increase), the maximum pollutants concentrations are observed at smaller distances from the stack.

For the cone stack, at constant wind velocity, the higher exhaust gasses flow the higher the plume elevation, resulting in smaller non-dimensional concentrations and therefore smaller sulfur dioxide concentrations. A critical factor for the increase of the exhaust gasses flow rate, is the velocity of the gasses coming out from the stack. This velocity is affected by the outlet flow rate ( $m^3/sec$ ) of the exhaust gasses from the stack - accordingly - and by the outlet surface - inversely. Also, as the wind velocity increases, while the exhaust gasses flow rate increases, the plume elevation decreased which results to higher non-dimensional concentrations and therefore higher sulfur dioxide concentrations.

Estimating the health impact of pollutant dispersion in the cities of Elefsina and Mandra, we conclude that the pollutants dispersion from a refinery stack gives concentrations at the ground level bellow the annual limit set by legislation. Therefore there is no negative effect in the health of the residents. These concentrations also constitute a small percentage of the annual results which are available from the Elefsina air pollution monitoring station.

As for sulfur dioxide for the stack with cone, the total average concentration for the city of Elefsina is 33,45% of the measured annual value from the Elefsina Environmental Station and 16,73% of the legislated annual permitted limit. For the city of Mandra, the concentration is 17,89% of the measured annual value from the Elefsina Station and 8,95% of the legislated annual limit.

For nitrogen dioxide for the stack with cone, the total average concentration for the city of Elefsina is 5,35% of the measured annual value from the Elefsina Environmental Station and 2,67% of the legislated annual limit. For the city of Mandra, the concentration is 2,90% of the measured annual value from the Elefsina Station and 1,45% of the legislated annual limit.

Relating PM for the stack with cone, the total average concentration for the city of Elefsina is 0,16% of the measured annual value from the Elefsina Environmental Station and 0,10% of the legislated annual limit. For the city of Mandra, the concentration is 0,09% of the measured annual value from the Elefsina Station and 0,005% of the legislated annual limit.

---





7.4	Ατμοσφαιρική Θερμοβαθμίδα.....	46
7.5	Θερμοκρασιακή Αναστροφή.....	47
7.6	Κλάσεις Ευστάθειας Α.Ο.Σ.....	48
7.7	Επίδραση ευστάθειας - αναστροφών στην ανάπτυξη πλουμίων.....	51
7.8	Σημασία του Α.Ο.Σ.....	54
8.	Μοντέλα Διασποράς Ρύπων .....	56
9.	Αρχές διατήρησης – Θεμελιώδεις διαφορικές εξισώσεις.....	58
10.	Εξισώσεις Εργασίας.....	61
10.1	Εξίσωση Συνέχειας.....	61
10.2	Εξίσωση Ορμής (Navier – Stokes).....	61
10.3	Εξίσωση Θερμότητας.....	62
10.4	Εξίσωση Συγκέντρωσης.....	62
10.5	Εξισώσεις Επίλυσης του Προβλήματος.....	62
11.	Τύρβη.....	64
11.1	Εισαγωγή.....	64
11.2	Οι διαφορικές Εξισώσεις NAVIER-STOKES ως προς την Τύρβη.....	66
11.3	Ελεύθερες Τυρβώδης Ροές.....	67
11.4	Οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας.....	69
11.5	Κυριότερα Μαθηματικά Πρότυπα Μεταφοράς Τύρβης.....	71
11.6	Το μοντέλο $k \sim \epsilon$ .....	72
11.7	Το μοντέλο RNG derived $k \sim \epsilon$ .....	73
12.	Γενική Περιγραφή Κώδικα PHOENICS.....	75
13.	Αριθμητική Μέθοδος Επίλυσης.....	77
13.1	Μέθοδος πεπερασμένων όγκων ελέγχου (F.V.M) .....	77
13.2	Ολοκληρωτική Μορφή της Εξίσωσης Μεταφοράς.....	77
13.3	Πλέγμα – Όγκοι Ελέγχου .....	77
13.4	Διακριτοποίηση της Εξίσωσης Μεταφοράς.....	78
13.5	Χειρισμός Όρων Συναγωγής και Διάχυσης.....	80
13.6	Υβριδικό Σχήμα .....	81
13.7	Επίλυση Συστημάτων Εξισώσεων.....	81
13.8	Μέθοδοι Επίλυσης Συστημάτων Εξισώσεων .....	85
13.9	Παράθυρα Ελέγχου Υπολογιστικού Προγράμματος.....	88
14.	Περιγραφή Εργασίας.....	89





15.	Περιγραφή Διεργασίας.....	90
16.	Δεδομένα Εργασίας .....	91
16.1	Δεδομένα Καμινάδας.....	91
16.1.1	Σχεδιαστικά Δεδομένα Καμινάδας.....	91
16.1.2	Δεδομένα Ρύπων Εκροής από την Καμινάδα .....	92
16.1.3	Λειτουργικά Στοιχεία Καμινάδας .....	93
16.2	Μετεωρολογικά Δεδομένα Περιοχής Διυλιστηρίου.....	93
16.3	Δεδομένα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην πόλη της Ελευσίνας.....	97
16.3.1	Διοξείδιο του Θείου .....	97
16.3.2	Διοξείδιο του Αζώτου.....	98
16.3.3	Αιωρούμενα Σωματίδια .....	98
17.	Οριακές Συνθήκες Εργασίας – Αδιάστατοι Αριθμοί.....	99
17.1	Οριακές Συνθήκες Στερεών Ορίων Πλέγματος .....	99
17.2	Οριακές Συνθήκες Πεδίου Ροής .....	100
17.3	Οριακές Συνθήκες Συγκεντρωτικά.....	102
17.4	Τραχύτητα Εδάφους.....	103
17.5	Αδιάστατοι Αριθμοί.....	103
18.	Ανάπτυξη Αριθμητικού Μοντέλου .....	104
18.1	Δεδομένα Αναφοράς - Παραδοχές.....	104
18.2	Δεδομένα Εισόδου Ταχύτητας Ανέμου στο πεδίο ροής .....	105
18.3	Γεωμετρικά στοιχεία του πεδίου ροής .....	109
18.3.1	Εισαγωγή.....	109
18.3.2	Γεωμετρία Πεδίου Ροής Χώρου Προσομοίωσης .....	110
18.3.3	Γεωμετρία Καμινάδας Προσομοίωσης.....	113
18.4	Ανεξαρτησία Πλέγματος.....	115
18.5	Σύγκριση Μοντέλων Τύρβης και Σχημάτων Διακριτοποίησης .....	123
19.	Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .....	125
19.1	Εισαγωγή.....	125
19.2	Καμινάδα χωρίς Κώνο.....	127
19.2.1	Ταχύτητα Ανέμου 0,5 m/s.....	127
19.2.2	Ταχύτητα Ανέμου 2 m/s.....	132
19.2.3	Ταχύτητα Ανέμου 4 m/s.....	138
19.2.4	Ταχύτητα Ανέμου 6 m/s.....	146
19.2.5	Ταχύτητα Ανέμου 9 m/s.....	152



19.2.6	Ανύψωση Πλουμίου Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .....	159
19.3	Καμινάδα με Κώνο .....	160
19.3.1	Ταχύτητα Ανέμου 0,5 m/s.....	161
19.3.2	Ταχύτητα Ανέμου 2 m/s.....	166
19.3.3	Ταχύτητα Ανέμου 4 m/s.....	172
19.3.4	Ταχύτητα Ανέμου 6 m/s.....	180
19.3.5	Ταχύτητα Ανέμου 9 m/s.....	187
19.3.6	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Ανύψωσης Πλουμίου .....	195
19.3.7	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Τραχύτητας 0,1 και 0,3 .....	196
19.3.8	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Καμινάδας με Κώνο και χωρίς.....	199
19.4	Βέλτιστο Ύψος Καμινάδας.....	201
19.4.1	Ταχύτητα Άνεμου 4 m/s.....	201
19.4.2	Ταχύτητα Άνεμου 6 m/s.....	203
19.5	Αδιάστατη Συγκέντρωση .....	204
19.5.1	Αδιάστατη Συγκέντρωση με Συγκεκριμένη Παροχή.....	205
19.5.2	Υπολογισμός Συγκέντρωσης από την Αδιάστατη Συγκέντρωση.....	206
19.5.3	Αδιάστατη Συγκέντρωση με Διαφορετικές Παροχές .....	207
19.5.4	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Αδιάστατης Συγκέντρωσης.....	210
19.6	Εκτίμηση Επίδρασης στην δημόσια υγεία στις πόλεις Ελευσίνας και Μάνδρας.....	210
19.6.1	Όρια Ποιότητας Αέρα.....	211
19.6.2	Διοξείδιο του Θείου .....	212
19.6.3	Διοξείδιο του Αζώτου.....	213
19.6.4	Αιωρούμενα Σωματίδια (PM) .....	215
20.	Γενικά Συμπεράσματα.....	217
20.1	Εισαγωγή.....	217
20.2	Τραχύητες Εδάφους 0,1 και 0,3 .....	217
20.3	Καμινάδα με ή χωρίς Κώνο.....	217
20.4	Βέλτιστο Ύψος Καμινάδας.....	218
20.5	Αδιάστατη Συγκέντρωση .....	218
20.6	Επίδραση στην Δημόσια Υγεία για τις πόλεις Ελευσίνας και Μάνδρας.....	218
20.7	Προτάσεις για Ανάπτυξη της Εργασίας.....	219
21.	Βιβλιογραφία – Παραπομπές.....	220



## **1. Αντικείμενο και Στόχοι της Εργασίας**

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσέγγιση προσομοίωσης μιας πραγματικής βιομηχανικής διεργασίας με υπολογιστικές μεθόδους. Το αντικείμενο της, αφορά την διασπορά ρύπων από καμινάδα διυλιστηρίου, που είναι τα προϊόντα καύσης σε εστίες φούρνου κατά την παραγωγική διαδικασία. Επιπρόσθετα εξετάζεται η επίδραση του ύψους της καμινάδας στην διασπορά των ρύπων, με πρόταση για το βέλτιστο ύψος της.

Με την ανάπτυξη των θετικών επιστημών παρατηρήθηκε ανάλογη ισχυρή ανάπτυξη της τεχνολογίας και κατά συνέπεια της βιομηχανίας. Αυτή η ανάπτυξη έχει οδηγήσει στην αλματώδη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων. Βέβαια, όσο μεγάλη αν είναι η προσφορά της επιστήμης και της τεχνολογίας, άλλο τόσο μεγάλες είναι οι επιπτώσεις που είχαν στο Περιβάλλον και στην Ασφάλεια, εξαιτίας της έντονης ανάπτυξής τους.

Η γενικότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος, οδήγησε σε περιορισμούς στις εκπομπές ρύπων, αυστηρές προδιαγραφές στα καύσιμα και αυστηρή νομοθεσία για την προστασία του. Οι εν λόγω προδιαγραφές και νομοθεσία, ανάγκασε τις εταιρείες να επανασχεδιάσουν τις διεργασίες τους με απώτερο στόχο την αποτελεσματική προστασία του Περιβάλλοντος, μέσω της μείωσης των εκπεμπόμενων ρυπαντών.

Στα πλαίσια της εργασίας, τροποποιήθηκε κατάλληλα ο εμπορικός κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής PHOENICS v. 2009 ώστε να επιτρέπει την μελέτη της διασποράς και εναπόθεσης ρύπων στο επίπεδο του εδάφους, από μια βιομηχανική καμινάδα διυλιστηρίου.

Οι συγκεκριμένοι στόχοι που ετέθησαν κατά την εκπόνηση της εργασίας, διακρίθηκαν σε τρία επίπεδα (καλύτερα σε τρεις φάσεις)

Στο πρώτο επίπεδο, ο στόχος ήταν η εισαγωγή των λειτουργικών παραμέτρων της καμινάδας, ο καθορισμός του πεδίου (χωρικά και χρονικά) προσομοίωσης και η εισαγωγή των κατάλληλων "ρυθμίσεων" στον κώδικα για να επιτευχθεί η απαιτούμενη σύγκλιση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα λειτουργικά δεδομένα είναι πραγματικά, προερχόμενα από τον αναλυτή της καμινάδας και τον μετεωρολογικό σταθμό της εγκατάστασης.

Στο δεύτερο επίπεδο, ο στόχος ήταν η εξαγωγή και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασισμένων σε θεμελιώδεις αρχές. Όπως η μεταβολή των συγκεντρώσεων των ρύπων συναρτήση των χωρικών συντεταγμένων και του χρόνου, λαμβάνοντας υπόψη και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Επιπλέον το επίπεδο συγκέντρωσης των ρύπων σε ύψος 1,5 μέτρα από το επίπεδο του εδάφους. Σημαντική είναι η αξιολόγηση των επιδράσεων στην υγεία της όμορης οικιστικής ζώνης, με το διυλιστήριο.

Στο τρίτο επίπεδο, ο στόχος ήταν να βρεθεί η βέλτιστη σχέση μεταξύ του ύψους της καμινάδας και της συγκέντρωσης των ρύπων σε ύψος 1,5 μέτρα από το επίπεδο του εδάφους.

Η προσδοκία από την εργασία είναι να αποτελέσει ένα πολύ καλό και χρήσιμο "εργαλείο" στα διυλιστήρια γενικότερα για τον άμεσο έλεγχο της διασποράς των αερίων ρύπων από καμινάδες, λόγω της διεργασίας των. Μπορεί να θεωρηθεί ακόμα σαν συνεισφορά στη σύνδεση της Βιομηχανίας με τα Ανώτατα Εκπαιδευτικά Ιδρύματα.



### Διπλωματική Εργασία

**Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων  
Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου**

**Σύνταξη: Γ. Καβαθάς  
Σελίδα: 12 από 223  
Έκδοση: 10/06/2020**

Στα πλαίσια υλοποίησης αυτής της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον Πρύτανη του Ε.Μ.Π., καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών και διευθυντή του ΔΜΠΣ "ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ", **κ. Ανδρέα Μουντουβή**, για τις κατευθύνσεις και το ενδιαφέρον του ως προς την ολοκλήρωση του Μεταπτυχιακού Προγράμματος.

Τους επιβλέποντες της Διπλωματικής μου εργασίας, τον Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών και τ. Πρύτανη του Ε.Μ.Π., **κ. Νικόλαο Μαρκάτο** και τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, **κ. Βασίλειο Ριζιώτη**. Για την εμπιστοσύνη προς το πρόσωπό μου σχετικά με την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, καθώς και τις παρεμβάσεις τους κατά την διάρκεια εκπόνησής της.

Τον **κ. Μιχάλη Χριστόλη**, Πολιτικό Μηχανικό - Περιβαλλοντολόγο DEA. Για την συνεχή καθοδήγησή μου σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης για τον χρόνο που αφιέρωσε σε εμένα προσωπικά με συμβουλές, ακόμα και με διδασκαλία σε θέματα κρίσιμα και δυσνόητα ως προς το θεωρητικό υπόβραθο της εργασίας. Δεν θα πρέπει να λησμονηθεί, ότι η συμβολή του ήταν καθοριστική και σημαντικότερη στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Τον Διευθυντή των Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων Ελευσίνας **κ. Κωνσταντίνο Πανταζή** και τον Διευθυντή μου **κ. Παύλο Ιωακειμίδη** για την υποστήριξή τους στην προσπάθειά μου.

Τον εκλεκτό συνάδελφο **κ. Μιχάλη Παλαιοκρασσά** για τις συμβουλές του σε περιβαλλοντικά θέματα.

Τους αγαπητούς συναδέλφους μου **Μαρία, Φώτη, Παναγιώτη, Γιώργο** και **Βέλια** για την υποστήριξή τους σε επαγγελματικό επίπεδο.



## 2. Δομή της Εργασίας

Η Εργασία αποτελείται από 21 Κεφάλαια. Μια συνοπτική περιγραφή αυτών ακολουθεί στην συνέχεια.

Το **Κεφάλαιο 3** αποτελεί μια σύντομη εισαγωγή για τις πηγές από τις οποίες προέρχεται η ατμοσφαιρική ρύπανση, ποιες είναι οι κύριες αιτίες πρόκλησης αυτής και ποιοι είναι οι κυριότεροι ρύποι. Σημαντικό στοιχείο αναφορικά με τις πηγές των ρύπων, είναι ότι το 90% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αντιστοιχεί στην χρήση ανθρακούχων καυσίμων, αλλά σε αυτό το ποσοστό η βιομηχανία έχει αναλογικά μικρή συμβολή.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται εκτενής αναφορά στους κυριότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους, οι οποίοι καθορίζουν την έκταση της ρύπανσης στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Περιγράφεται η χημική συμπεριφορά τους όταν έρθουν σε επαφή με άλλα χημικά στοιχεία ή φυσικούς παράγοντες της ατμόσφαιρας, η επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία, στην πανίδα και στα υλικά. Μεταξύ των πιο επιβλαβών ρυπαντών είναι το Διοξείδιο του Θείου ( $\text{SO}_2$ ), το Διοξείδιο του Αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) και το Μονοξείδιο του Άνθρακα ( $\text{CO}$ ).

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται εν συντομία η 'τροχιά' των ρυπαντών από την στιγμή που εξέρχονται από μία καμινάδα μέχρι την απόθεσή τους στο έδαφος. Επίσης γίνεται μια αναφορά στις γενικές αρχές λειτουργίας της καμινάδας η οποία αποτελεί το απλούστερο και πρωτοβάθμιο μέσο για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που προκαλείται από κάθε είδους βιομηχανική δραστηριότητα. Έτσι επιτυγχάνεται, η εκπομπή των καυσαερίων και των επιμέρους ρύπων σε κάποιο ύψος από το έδαφος και η αραιώσή τους στην ατμόσφαιρα. Στην αρχή λόγω της τυρβώδους κίνησης του αέρα παρατηρείται κατακόρυφη μεταφορά και διαπλάτυνση του πλουμίου των ρύπων, με τελικό αποτέλεσμα την αραιώση της συγκέντρωσής τους. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διάχυση. Η διάχυση των ρύπων γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της γης το οποίο ονομάζεται ύψος ανάμειξης. Το στρώμα το οποίο περιέχεται ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και το ύψος ανάμειξης ονομάζεται στρώμα ανάμειξης. Στο τέλος έχουμε την απόθεση των ρύπων από την ατμόσφαιρα στο έδαφος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τον χρόνο της παραμονής τους στην ατμόσφαιρα, οι ρύποι υφίστανται διάφορους χημικούς μετασχηματισμούς, λόγω αντιδράσεων είτε μεταξύ τους είτε με τα συστατικά της καθαρής ατμόσφαιρας.

Το **Κεφάλαιο 6** περιγράφει την Δομή της Ατμόσφαιρας. Η διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας αποτελείται από την Τροπόσφαιρα (είναι η πρώτη ζώνη αέρα από την επιφάνεια της Γης με ύψος  $12 \pm 4$  km), την Στρατόσφαιρα (αρχίζει από την τροπόπαυση και εκτείνεται σε συνολικό ύψος 50 km), την Μεσόσφαιρα, την Θερμόσφαιρα (όπου η θερμοκρασία αρχίζει πάλι να αυξάνεται με το ύψος) και στην Εξώσφαιρα (ισόθερμη περιοχή).

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται αναφορά για το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (Α.Ο.Σ), το οποίο είναι το μέρος της τροπόσφαιρας που επηρεάζεται άμεσα από την επιφάνεια της γης και αντιδρά στις διάφορες επιφανειακές μεταβολές σε μια κλίμακα χρόνου. Παρατηρούνται αρκετά υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας, ορμής και θερμότητας που συντηρούνται από τυρβώδεις κινήσεις που έχουν την ίδια κλίμακα μήκους με το οριακό στρώμα. Σημαντική παράμετρος στην συμπεριφορά του πλουμίου ρυπαντών είναι η θερμοκρασιακή αναστροφή (η θερμοκρασία αντί να μειώνεται, είτε παραμένει σταθερή,



είτε αυξάνεται με το ύψος για μικρές σχετικά κατακόρυφες αποστάσεις). Η ευστάθεια του Α.Ο.Σ. σε συνδυασμό με την θερμοκρασιακή αναστροφή, επιρ

ρεάζει την ανάπτυξη και τον σχηματισμό των πλουμίων. Επίσης περιγράφονται οι Κλάσεις Ευστάθειας του Α.Ο.Σ. και επεξηγείται η σπουδαιότητά τους για την διασπορά των ρυπαντών.

Το **Κεφάλαιο 8** περιγράφει εν συντομία τα κυριότερα Μοντέλα Διασποράς Ρύπων, όπως το Μοντέλο "Κουτιού" (Box model) (Το μοντέλο αυτό είναι το απλούστερο), το Γκαουσιανό Μοντέλο (Gaussian Model, το οποίο είναι ίσως το παλαιότερο και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο), το Μοντέλο Lagrangian (Lagrangian Model, ακολουθεί την κίνηση κάποιων σωματιδίων (parcels) των ρύπων καθώς αυτά κινούνται στην ατμόσφαιρα και μοντελοποιεί τη κίνηση τους ως μια διαδικασία τυχαίου περιπάτου (random walk)), το Μοντέλο Eulerian (Eulerian Model, παρόμοιο με το μοντέλο Lagrangian με την διαφορά ότι χρησιμοποιεί ένα σταθερό τρισδιάστατο Καρτεσιανό σύστημα αναφοράς και όχι ένα κινούμενο σύστημα αναφοράς) και τα Μοντέλα Πυκνού αερίου (Dense gas model) που προσομοιώνουν τη διασπορά πυκνών πλουμίων.

Στο **Κεφάλαιο 9** υπάρχουν οι θεμελιώδεις διαφορικές εξισώσεις που συναντώνται στην ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς και εκφράζουν μια αρχή διατήρησης για κάποια φυσική ποσότητα. Δίνονται οι εξισώσεις για την αρχή διατήρησης μάζας, ορμής, μάζας συστατικού και ενέργειας. Όλες οι εξισώσεις έχουν την ίδια μορφή και οι όροι που εμφανίζονται είναι, ο μεταβατικός όρος, ο όρος συναγωγής, ο όρος διάχυσης και ο όρος παραγωγής ή κατανάλωσης (δηλαδή πηγή ή καταβόθρα) μιας φυσικής ποσότητας.

Στο **Κεφάλαιο 10** γίνεται αναφορά στις Εξισώσεις που θα επιλυθούν και είναι οι διαφορικές εξισώσεις συνέχειας, ορμής (Navier – Stokes), θερμότητας, συγκέντρωσης και τύρβης. Ειδικότερα οι εξισώσεις Navier – Stokes είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού. Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές λόγω παρουσίας του τελεστή μεταφοράς  $u \cdot \nabla$ . Η επίλυσή τους γίνεται με αριθμητικές μεθόδους που δίνουν προσεγγιστικές λύσεις. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε πρόβλημα ροής. Στην συγκεκριμένη εργασία η προσομοίωση του προβλήματος περιλαμβάνει αδιαβατική ατμόσφαιρα και το μοντέλο τύρβης RNG derived  $k \sim \epsilon$ . Η επιλογή του μοντέλου τύρβης RNG derived  $k \sim \epsilon$ , έγινε γιατί δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το κλασικό μοντέλο  $k \sim \epsilon$ , σε περιοχές κοντά σε στερεά όρια όπου αναπτύσσονται έντονες διατμητικές τάσεις.

Το **Κεφάλαιο 11** περιγράφει τα κυριότερα χαρακτηριστικά του φαινομένου της τύρβης. Το κύριο γνώρισμα της τυρβώδους ροής είναι η τυχαία διακύμανση των ιδιοτήτων του ρευστού σε τυχόν σημείο του πεδίου ροής. Η περιγραφή της γίνεται συνήθως με τη χρησιμοποίηση στατιστικών μέσων όρων. Υπάρχουν δύο είδη ιξώδους ροής, η στρωτή και η τυρβώδης, που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την εσωτερική δομή της ροής. Η βασική δομή της τύρβης αποτελείται από δίνες και στροβίλους διαφόρων μεγεθών. Όλα μαζί αποτελούν τη τυρβώδη ροή. Επίσης ορίζονται οι διαφορικές Εξισώσεις NAVIER-STOKES ως προς την Τύρβη και περιγράφονται οι έννοιες για το Οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας. Στο τέλος γίνεται αναφορά για τα κυριότερα μαθηματικά πρότυπα μεταφοράς τύρβης και περιγράφονται τα μοντέλα  $k \sim \epsilon$  και RNG derived  $k \sim \epsilon$ .

Το **Κεφάλαιο 12** περιλαμβάνει μια Γενική Περιγραφή του Κώδικα PHOENICS που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της διασποράς των ρυπαντών. Είναι ένας κώδικας



## Διπλωματική Εργασία

Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων  
Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου

Σύνταξη: Γ. Καβαθάς  
Σελίδα: 15 από 223  
Έκδοση: 10/06/2020

υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) της εταιρείας CHAM Ltd (Λονδίνο, 1981). Το όνομά του – PHOENICS – προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων - Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής ρευστών (αέρας, νερό, ατμός, αίμα, κλπ), για εσωτερικές και εξωτερικές ροές (χημικούς αντιδραστήρες, μηχανές, κτήρια, ανθρώπινους οργανισμούς, ωκεανούς, κλπ), για τις μεταβολές χημικής και φυσικής σύστασης και των τάσεων που αναπτύσσονται σε στερεά σώματα.

Στο **Κεφάλαιο 13** περιγράφεται η Αριθμητική Μέθοδος Επίλυσης της εργασίας με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (F.V.M). Η μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων Ελέγχου (finite volume method), ανήκει στις ολοκληρωτικές μεθόδους (integral methods) αριθμητικής επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στις ολοκληρωτικές μεθόδους η διακριτοποιημένη εξίσωση, μέσω της οποίας προσδιορίζεται η αριθμητική λύση, προκύπτει από την ολοκλήρωση της εξίσωσης μεταφοράς πάνω σε κάποιο πεπερασμένο όγκο ελέγχου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη διακριτοποίηση του πεδίου επίλυσης σε μικρότερους όγκους ελέγχου που δεν αλληλεπικαλύπτονται και περιβάλλουν ο καθένας ένα πλεγματικό σημείο. Επίσης περιγράφονται οι αλγόριθμοι SIMPLE και SIMPLEC και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Στο τέλος περιγράφονται οι Μέθοδοι Επίλυσης Συστημάτων Εξισώσεων, όπου προκύπτει ένα σύστημα "τυπικά" γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Η επίλυση του συστήματος γίνεται είτε με άμεσες ή επαναληπτικές μέθοδοι, όπου περιγράφονται οι τελευταίες μέθοδοι με υπέρ – χαλάρωση ή χωρίς.

Στο **Κεφάλαιο 14** δίνεται το γενικό πλαίσιο της εργασίας που αφορά την προσομοίωση του νέφους ρύπων από καμινάδα διυλιστηρίου. Δηλαδή, γίνεται μαθηματική προσομοίωση των εκπομπών της καμινάδας σε Η/Υ, ώστε να εκτιμηθεί το εύρος της εναπόθεσης των ρύπων κάτω από συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες και παραμέτρους λειτουργίας του φούρνου.

Το **Κεφάλαιο 15** περιγράφει την Διεργασία Παραγωγής των αέριων ρύπων της εργασίας. Αυτοί προέρχονται από την καμινάδα του φούρνου της Μονάδας Κενού. Σε γενικά πλαίσια η μονάδα αποτελείται από το τμήμα προθέρμανσης της τροφοδοσίας, το φούρνο Κενού, τον πύργο Απόσταξης Κενού και τον σύστημα Παραγωγής Κενού.

Στο **Κεφάλαιο 16** υπάρχουν τα Δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία για την ανάπτυξη του μοντέλου. Είναι διαθέσιμα δεδομένα ημερήσιων μέσων όρων για τις ακόλουθες παραμέτρους: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, H<sub>2</sub>O, Πίεση εξόδου καυσαερίων, Θερμοκρασία Εξόδου Καυσαερίων, Συνολικής Ροής Καυσαερίων, O<sub>2</sub>, Θερμοκρασία Περιβάλλοντος, Ένταση και Διεύθυνση Ανέμων. Επίσης έγινε εκτίμηση της συχνότητας εμφάνισης των διαφόρων κλάσεων ευστάθειας λαμβάνοντας υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα του 2018. Για την εργασία έχει επιλεγεί η μέση ετήσια συγκέντρωση του Διοξειδίου του Θείου και των υπόλοιπων ρύπων. Παρουσιάζονται δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την πόλη της Ελευσίνας (στα ανατολικά της εγκατάστασης) που προέρχονται από τον Περιβαλλοντικό Σταθμό Ελευσίνας για το 2018 και περιέχονται στην ετήσια έκθεση του Υπουργείου Περιβάλλοντος. Για την πόλη της Μάνδρας (βόρεια της εγκατάστασης) λόγω μη διαθεσιμότητας στοιχείων λαμβάνονται υπόψη αυτά της πόλης της Ελευσίνας.

Στο **Κεφάλαιο 17** ορίζονται οι Οριακές Συνθήκες που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία. Οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση της ορμής είναι: Είσοδος - διατήρηση των τιμών από τις αρχικές συνθήκες στα όρια του πεδίου, Εκροή - ορίζονται οι κλίσεις



των μεταβλητών κατά την διεύθυνση της ροής ίσες με μηδέν, Στερεά όρια - η συνιστώσα της ταχύτητας που είναι παράλληλη στον τοίχο, ορίζεται ίση με μηδέν. Στα στερεά όρια στο πλέγμα γίνεται χρήση των συναρτήσεων τοίχου (wall functions), όπου οι τιμές στο οριακό κελί δίνονται με αναλυτικές εξισώσεις.

Στο **Κεφάλαιο 18** γίνεται η Ανάπτυξη Αριθμητικού Μοντέλου με την εισαγωγή των δεδομένων και την δημιουργία πλέγματος. Ως προς το πλέγμα η ανεξαρτησία έδειξε την επιλογή του πυκνού. Επίσης έγινε σύγκριση του υβριδικού και του Van Leer σχήματος διακριτοποίησης και των μοντέλων τύρβης  $k-\epsilon$  και RNG derived  $k-\epsilon$ .

Στο **Κεφάλαιο 19** γίνεται η Παρουσίαση και Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων με κατάλληλα διαγράμματα και πίνακες. Τα αποτελέσματα αφορούν την εκτίμηση των επιπτώσεων που προέρχονται από την διασπορά των παραγόμενων ρυπαντών ( $SO_2$ ,  $NO_2$ , PM) στο επίπεδο της αναπνοής, δηλαδή σε ύψος 1,5 m από το έδαφος. Ακόμα παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων του πλουμίου ως προς το ύψος, σε διάφορα μήκη του πεδίου ροής. Γίνεται πρόβλεψη του ύψους του πλουμίου διοξειδίου του θείου, καθώς και των επιδράσεων που έχει η αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου και της τραχύτητας του εδάφους στην συγκέντρωση των ρύπων. Προτείνεται το βέλτιστο ύψος καμινάδας που οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Στο τέλος εξετάζονται τα αποτελέσματα της αδιάστατης συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου, σε διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου και παροχής καυσαερίων από την καμινάδα και σχολιάζονται τα αποτελέσματα ως την επίδραση στην δημόσια υγεία για τις πόλεις της Ελευσίνας και της Μάνδρας.

Στο **Κεφάλαιο 20** παρατίθενται τα Γενικά Συμπεράσματα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων συγκέντρωσης των ρύπων στο επίπεδο του εδάφους, σε διάφορες τιμές τραχύτητας εδάφους, ταχύτητας ανέμου και καμινάδας με και χωρίς κώνο.

Στο **Κεφάλαιο 21** υπάρχουν οι σχετικές αναφορές Βιβλιογραφίας και Παραπομπές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκπόνηση της εργασίας.





### 3. Ατμοσφαιρική Ρύπανση από Βιομηχανικές Εκπομπές

Με τον όρο ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται η μεταβολή της σύστασης του ατμοσφαιρικού αέρα, λόγω της παρουσίας ρύπων. Εκτός από τη φυσική ρύπανση της ατμόσφαιρας που οφείλεται σε ηφαιστειακές δράσεις ή στη σήψη φυτών και ζώων, το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό της οφείλεται σε ανθρώπινες δραστηριότητες που προέρχονται από τη βιομηχανία, τη θέρμανση και τα αυτοκίνητα.

Η υπερβολική χρήση ανθρακούχων καυσίμων σε κάποια κύρια ή δευτερεύουσα φάση της παραγωγικής διαδικασίας των βιομηχανιών, σε συνδυασμό με τη διακίνηση των υλικών και άλλες ρυπογόνες διεργασίες, είναι από τις βασικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τη βιομηχανία. Κοινό σημείο όλων των ανωτέρω δραστηριοτήτων είναι, ότι οι πηγές αυτές έχουν εξ ολοκλήρου ανθρωπογενή προέλευση.

Οι ουσίες που προκαλούν ατμοσφαιρική ρύπανση διακρίνονται σε σωματίδια και αέριους ρύπους. Στα πρώτα υπάγονται τα ατμοσφαιρικά σωματίδια (η σκόνη, τα αιωρούμενα σωματίδια και ο καπνός) και τα αιωρούμενα σωματίδια βαρέων μετάλλων. Στους αέριους ρύπους υπάγονται οι ενώσεις του θείου ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $H_2S$ ), τα οξειδία του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα, το όζον, οι υδρογονάνθρακες καθώς και οι ενώσεις χλωρίου και φθορίου. Οι περισσότεροι ρύποι είναι πρωτογενείς (αιωρούμενα σωματίδια, καπνός, μονοξείδιο του αζώτου, διοξείδιο του θείου), δηλαδή εκπέμπονται απ' ευθείας από τις διάφορες πηγές στην ατμόσφαιρα, ενώ υπάρχουν και οι δευτερογενείς ρύποι (π.χ. το όζον, διοξείδιο του αζώτου), που σχηματίζονται από τους πρωτογενείς ρύπους με αντιδράσεις.

Οι κύριες αιτίες αέριας ρύπανσης της ατμόσφαιρας είναι [1]:

#### Κυκλοφορία (καυσαέρια)

- Βενζινοκίνητα ΙΧ επιβατικά οχήματα
- Πετρελαιοκίνητα οχήματα
- Σιδηροδρομικοί συρμοί
- Άλλα μέσα συγκοινωνίας

#### Παραγωγή ενέργειας

- Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί
- Καύση απορριμμάτων

#### Βιομηχανία

- Διυλιστήρια ( $SO_2$ , αιωρούμενα σωματίδια. Θειούχα αέρια, προϊόντα πυρόλυσης, υδρογονάνθρακες)
- Χημική βιομηχανία ( $SO_2$ , λιπάσματα, πετροχημικά)
- Μεταλλουργική βιομηχανία

#### Μικροκαταναλωτές

- Επιχειρήσεις κατεργασίας
- Εμπορική κατανάλωση
- Οικιακή κατανάλωση



Το 90% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αντιστοιχεί στην χρήση καυσίμων, αλλά σε αυτό το ποσοστό η βιομηχανία έχει αναλογικά μικρή συμβολή. Το ποσοστό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται από τις βιομηχανικές καύσεις, συνολικά, ανέρχεται μόλις στο 10% με 15%. Τα τελευταία χρόνια γίνονται επενδύσεις για την χρήση οικολογικών καυσίμων (π.χ. φυσικό αέριο) στην βιομηχανία σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στον 3.1 συνοψίζονται οι διάφοροι παραγόμενοι αέριοι ρύποι ανά κλάδο βιομηχανίας [2].

Πίνακας 3.1: Παραγωγή διαφόρων αερίων ρύπων ανά βιομηχανικό κλάδο

<b>ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ</b>	<b>ΡΥΠΟΙ</b>
Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί	Καπνός, σωματίδια οξειδία του θείου οξειδία του αζώτου υδρογονάνθρακες
Διυλιστήρια πετρελαίου	Υδρογονάνθρακες μονοξειδίο του άνθρακα οξειδία του θείου οξειδία του αζώτου σωματίδια υδρόθειο
Εργοστάσια τσιμέντου	Σωματίδια οξειδία του θείου οξειδία του αζώτου
Χαλυβουργεία	Σωματίδια μονοξειδίο του άνθρακα οξειδία του θείου οξειδία του αζώτου υδρογονάνθρακες
Λιπάσματα	Σωματίδια αμμωνία ή / και φθοριούχα ή / και φωσφορούχα ή / και θειικά ή / και νιτρικά παράγωγα
Βιομηχανία γυαλιού	οξειδία του θείου οξειδία του αζώτου οξειδία του θείου φθοριούχα παράγωγα σωματίδια



## 4. Ατμοσφαιρικοί Ρύποι

### 4.1 Γενικά

Ρύπανση της ατμόσφαιρας προκαλείται τόσο από φυσικές διεργασίες (έδαφος, ηφαιστεια, πυρκαγιές, ωκεανοί) όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανία, θέρμανση, παραγωγή ενέργειας, μεταφορές). Ο ρυθμός εκπομπής ορισμένων αερίων ρύπων από την ίδια την φύση ξεπερνά τον αντίστοιχο ρυθμό εκπομπής από ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Οι εκπομπές που προκαλούνται από τον άνθρωπο, παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα της συγκέντρωσης των ρύπων πάνω από τα αστικοβιομηχανικά κέντρα. Οι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, παραμένουν εκεί σε διάφορες μορφές (αέρια, ατμοί, σκόνη, καπνός). Καθένας από αυτούς χαρακτηρίζεται από τον χρόνο παραμονής του στην ατμόσφαιρα (residence time) ή ημιπερίοδο ζωής. Οι κυριότεροι παράμετροι που καθορίζουν την έκταση της ρύπανσης που υφίσταται η ατμόσφαιρα είναι [3]:

- Διοξείδιο του Θείου ( $\text{SO}_2$ )
- Αζωτούχες ενώσεις ( $\text{NO}_x$ )
- Οξειδία του άνθρακα ( $\text{CO}_x$ )
- Αιωρούμενα σωματίδια (TPM – Total Particulate Matter)

### 4.2 Διοξείδιο του Θείου

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα άχρωμο αέριο. Σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει έντονη ερεθιστική οσμή. Στην ατμόσφαιρα αντιδρά εύκολα με οξειδωτικά ή σωματίδια, σχηματίζοντας σουλφίδια και όξινα σωματίδια του θείου, τα οποία είναι πιο επικίνδυνα από το αρχικό διοξείδιο του θείου. Τα όξινα σωματίδια του θείου είναι τα κύρια συστατικά της όξινης βροχής, που προκαλεί σημαντικές περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις.

#### 4.2.1 Μηχανισμοί Οξειδωσης

Από τις ενώσεις του θείου [16], εκείνη της οποίας ο μηχανισμός οξειδωσης παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι του διοξειδίου του θείου. Είναι ένα φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται έντονα από τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα. Τέτοιες συνθήκες είναι η θερμοκρασία, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η σχετική υγρασία και η ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι μηχανισμοί της οξειδωσης είναι κυρίως η καταλυτική οξειδωση, η φωτο-οξειδωση και η οξειδωση με ρίζες. Η καταλυτική οξειδωση μπορεί να περιγραφεί γενικά ως εξής:

M

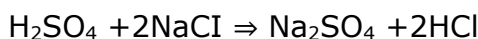
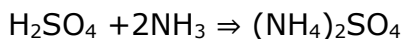


Όπου M μπορεί να είναι ( $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{N}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$ ).

Επίσης, το διοξείδιο του θείου έρχεται σε επαφή με το νερό που περιέχεται στα σύννεφα και οξειδώνεται στην υδατική φάση. Σε ένα διάλυμα  $\text{SO}_2$  στο νερό η ρίζα  $\text{HSO}_3^-$  επικρατεί διότι το νερό της βροχής έχει pH από 4 έως 6.



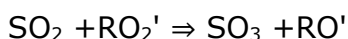
Παρατηρήθηκε ότι η αμμωνία δρα ως καταλύτης στην οξειδωση του διοξειδίου του θείου στο ατμοσφαιρικό νερό. Επίσης, το διάλυμα οξειδώνεται από  $S^{-4}$  σε  $S^{+6}$ . Αυτό έχει σαν συνέπεια τον σχηματισμό θειικών ιόντων  $(SO_4)^{2-}$  τα οποία αντιδρούν με αμμωνία ή άλατα όπως το  $NaCl$  που προέρχονται από την θάλασσα και σχηματίζουν τα θειικά άλατα σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Η φωτοχημική οξειδωση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις της είναι αρκετά μεγάλες. Εάν όμως το απαιτούμενο πόσο ενέργειας, προσφερθεί από τον ήλιο στα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, η οξειδωση μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

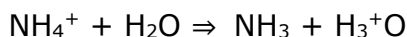
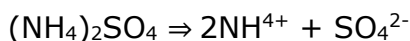


Ακόμη ένας τρόπος οξειδωσης τον διοξειδίου του θείου, είναι με ρίζες όπως η παρακάτω:



Όπου, R είναι  $CH_3CO$

Οι παραπάνω αντιδράσεις παράγουν όξινο περιβάλλον, γεγονός το οποίο μειώνει το pH τον βρόχινου νερού.



Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται όξινη βροχή και είναι η αιτία πολλές φορές για τον θάνατο διάφορων οργανισμών οι οποίοι ζουν και αναπτύσσονται στο περιβάλλον και είναι ευαίσθητοι στις μεταβολές της ποιότητας του νερού.

Οι μηχανισμοί οξειδωσης οι οποίοι είναι και "επιφορτισμένοι" να απομακρύνουν τις ενώσεις του θείου από την ατμόσφαιρα, όπως φαίνεται τελικά δεν λύνουν το πρόβλημα αλλά το μεταθέτουν σε ένα επόμενο στάδιο που είναι η απόθεση τους στο οικοσύστημα.

Ο κύριος υπεύθυνος για αυτό είναι η φύση του ρύπου και επιπρόσθετα η μεταβολή του διοξειδίου σε τριοξείδιο. Καθώς αυξάνονται τα ποσοστά διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα αυξάνονται και αυτά του  $SO_3$ , το οποίο επιδρά βλαπτικότερα στην υγεία καθώς μετατρέπεται σε  $H_2SO_4$ .

Η συγκέντρωση του  $SO_2$ , αποτελεί δείκτη ελέγχου της ποιότητας και του βαθμού ρυπάνσεως της ατμόσφαιρας. Η μόλυνση από το  $SO_2$  δεν είναι μόνο τοπικό πρόβλημα, εφόσον η φύση του ρύπου καθιστά εύκολη την μεταφορά του με τον άνεμο, ο οποίος είναι δυνατόν να τον μεταφέρει και 500 km από την πηγή του.

Η μεγαλύτερη πηγή  $SO_2$  είναι η καύση ανθρακούχων καυσίμων, που περιέχουν θείο ως προσμίξεις ή διάφορες θειούχες ενώσεις.



#### 4.2.2 Επιδράσεις στην Υγεία

Οι προκαλούμενες από το διοξείδιο του θείου βλάβες στην υγεία [3] είναι δυνατόν να διακριθούν σε λειτουργικές, αναπνευστικές και δερματικές. Το SO<sub>2</sub> θεωρείται ως οξύ του αίματος το οποίο εισπνεόμενο από τον άνθρωπο, επιδρά βλαπτικά στην βλεννογόνο της μύτης και των ματιών και δύναται να καταστεί τοξικό αέριο για το αναπνευστικό σύστημα. Προκαλεί φτέρνισμα, έντονο βήχα και δάκρυα.

Η κυριότερη όμως παθογόνος ενέργεια του, προσδιορίζεται στον ερεθισμό των αναπνευστικών οδών με παροδικούς σπασμούς.

Τα φαινόμενα αυτά σε έντονες συγκεντρώσεις του SO<sub>2</sub> μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και τον θάνατο. Το SO<sub>2</sub> εισερχόμενο στους πνεύμονες βλάπτει τους λεπτούς ιστούς, δια της απορροφήσεως του στην κυκλοφορία του αίματος. Βλάπτει πέραν των πνευμόνων και άλλα όργανα του σώματος.

Πάντως πρέπει να τονιστεί ότι ενώ η ορατότητα μειώνεται για συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub> και μικροσωματιδίων μεγαλύτερες των 100 μg/m<sup>3</sup> υπό σχετική υγρασία 50% και άνω, η υγεία αρχίζει να κινδυνεύει για τιμές 114 μg/m<sup>3</sup> (0,04 ppm) και άνω. Εάν η εν λόγω συκέντρωση υπερβαίνει επί 3 έως 4 ημέρες τα 314 μg/m<sup>3</sup> (0.11 ppm), τότε αρχίζουν οι δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία οι οποίες μπορεί να επιδεινωθούν σε περίπτωση θερμοκρασιακής αναστροφής.

Κατά το φαινόμενο αυτό ενώ η θερμοκρασία του αέρα έπρεπε να μειώνεται προς τα επάνω (τροπόσφαιρα) συμβαίνει το αντίθετο, με αποτέλεσμα στρώματα αέρα να μην μπορούν να κινηθούν ανοδικά καθώς επάνω τους υπάρχουν άλλα θερμότερα.

Έτσι οι ρύποι συγκεντρώνονται και παραμένουν σε πολύ χαμηλό ύψος με όλες τις συνέπειες που συνεπάγεται αυτό για τον άνθρωπο. Ένα τέτοιο περιστατικό συνέβη στο Λονδίνο το 1952 με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί αύξηση στους θανάτους κατά 4.000 από τους κανονικούς για εκείνη την περίοδο.

Σε πιο υψηλά, επίπεδα συγκεντρώσεων, όταν οι τιμές του SO<sub>2</sub> φτάνουν τα 250 έως 500 μg/m<sup>3</sup> (0,09-0,17 ppm) επιδεινώνεται η κατάσταση των ατόμων με πνευμονικές παθήσεις, ενώ για τιμές άνω των 500 μg/m<sup>3</sup> αυξάνεται ο αριθμός των εισαγομένων στα νοσοκομεία όσο και της θνησιμότητας.

Όταν οι συγκεντρώσεις ξεπερνούν τα 800 μg/m<sup>3</sup> (0,28 ppm) η παρουσία του διοξειδίου γίνεται αισθητή και με την οσμή, τέτοιες τιμές προκαλούν βρογχοσπασμούς, οι οποίοι μπορούν να αποβούν και μοιραίοι για τους οργανισμούς.

Στον Πίνακα 4.1 συνοψίζονται οι αρνητικές επιπτώσεις του διοξειδίου του θείου στον άνθρωπο.



Πίνακας 4.1: Επίδραση του SO<sub>2</sub> στην ανθρώπινη υγεία [4]

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ SO <sub>2</sub>		ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ
μg/m <sup>3</sup>	ppm	
2.000	0,7	Αυξημένη θνησιμότητα σε 24ώρο διάρκεια με παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων
1.000	0,35	Αυξημένη ημερήσια θνησιμότητα επί 24ώρου βάσεως και έντονη παρουσία καπνού 750 μg/m <sup>3</sup>
750	0,262	Πρόκληση αιφνίδιων ασθενειών επί 24ώρου βάσεως
600	0,21	Έντονα συμπτώματα χρόνιων αναπνευστικών νοσημάτων και παρουσία καπνού 380 μg/m <sup>3</sup>
500	0,175	Αυξημένη θνησιμότητα σε 24ώρο διάρκεια με χαμηλή συγκέντρωση σωματιδίων
400	0,14	Αυξημένη είσοδος ασθενών σε νοσοκομεία και χαμηλή συγκέντρωση σωματιδίων
30	0,105	Αύξηση συχνότητας αναπνευστικών συμπτωμάτων και γενικώς νοσημάτων του πνεύμονα
200	0,07	Αύξηση αναπνευστικών νοσημάτων σε παιδιά
100	0,035	Αυξημένη θνησιμότητα από βρογχίτη και καρκίνου των πνευμόνων

#### 4.2.3 Επίδρασεις στην Πανίδα

Οι συγκεντρώσεις, οι οποίες καταστρέφουν τα φυτά, είναι γενικά μικρότερες από αυτές που επηρεάζουν τον άνθρωπο. Επίσης, διάφορα φυτά έχουν διαφορετική ευαισθησία στο SO<sub>2</sub>. Το διοξείδιο του θείου σε περιεκτικότητα 0,5 ppm προκαλεί στα φυτά οξείες βλάβες, ενώ σε περιεκτικότητα 0,1-0,03 ppm προκαλεί κάτω από ευνοϊκές συνθήκες και σε ευαίσθητα φυτά, χρόνιες βλάβες.

Τα συμπτώματα της προσβολής του SO<sub>2</sub> στα μονοκοτυλήδονα παρουσιάζονται με μορφή ανοικτών στιγμάτων στα άκρα των φύλλων, σαν ξέπλυμα και πολλές φορές με κύρτωση τους. Στα δικοτυλήδονα σε οξείες καταστάσεις, παρατηρείται νέκρωση στα άκρα των φύλλων ή στους χώρους των νεύρων. Στα πλατύφυλλα παρατηρείται περιφερειακή νέκρωση, όπως και νέκρωση στους χώρους μεταξύ των νεύρων.

Επίσης εμφανίζονται κηλίδες σαν ξεπλύματα, άσπρες, κιτρινωπές και καμιά φορά καφετιές ή και συσπείρωση φύλλων, ενώ στα κωνοφόρα παρατηρείται κατά λωρίδες νέκρωση στα άκρα των βελονών, καθώς και χλώρωση των γύρω ιστών.

Οι επιδράσεις αυτές είναι τόσο άμεσες για τον άνθρωπο όσο και έμμεσες, καθώς πέρα από τις επιπτώσεις που επέρχονται στην τροφική αλυσίδα και στα επίπεδα του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα, ο άνθρωπος επιβαρύνεται με ένα επιπρόσθετο κόστος για τον περιορισμό αυτών των φαινομένων ώστε να διατηρήσει το βιοτικό του επίπεδο υψηλό. Αυτό πραγματοποιείται είτε περιορίζοντας της πηγές του διοξειδίου του θείου είτε παρεμβαίνοντας στην φύση.



#### 4.2.4 Επιδράσεις στα Υλικά

Τα δομικά υλικά καθώς και τα μέταλλα υφίστανται και αυτά τις συνέπειες λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων του  $\text{SO}_2$  στον αέρα. Έχει βλαβερές συνέπειες στον ασβεστόλιθο ( $\text{CaCO}_3$ ). Το  $\text{SO}_2$  απορροφάται από τον ασβεστόλιθο και οξειδώνεται μέσα σ' αυτόν σε θειϊκό ιόν. Η είσοδος του  $\text{O}_2$  είναι σχετικά εύκολη καθώς ο ασβεστόλιθος είναι αρκετά πορώδης, ενώ η απορροφητικότητα αυξάνεται με την αύξηση της σχετικής υγρασίας.

Έτσι, το  $\text{SO}_2$  εισερχόμενο στο κρυσταλλικό πλέγμα του ασβεστόλιθου σχηματίζει  $\text{CaSO}_4$ , το οποίο έχει μεγαλύτερο μοριακό όγκο από το  $\text{CaCO}_3$  με αποτέλεσμα να προκύπτουν παραμορφωτικές διατμητικές τάσεις, οι οποίες κομματιάζουν τον ασβεστόλιθο και τον καταστρέφουν.

Η κυριότερη κατηγορία υλικών όπου το  $\text{SO}_2$  έχει βλαβερές συνέπειες είναι τα μέταλλα. Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από παράγοντες όπως η συγκέντρωση του  $\text{O}_2$  στην ατμόσφαιρα, από την υγρασία της μεταλλικής επιφάνειας καθώς και από την θερμοκρασία. Ένα κλασικό παράδειγμα διάβρωσης είναι αυτό του Fe στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Ο μηχανισμός της διάβρωσης εξηγείται ηλεκτροχημικά και κατά αυτόν μεταφέρονται ιόντα σιδήρου από το εσωτερικό του υλικού στην επιφάνεια σχηματίζοντας  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (σκουριά). Το  $\text{SO}_2$  απορροφάται από το υλικό και κατά την οξείδωση του σχηματίζονται ιόντα  $\text{SO}_4$  τα οποία με τον σίδηρο δίνουν το  $\text{FeSO}_4$  που δρα σαν ιοντικός αγωγός αυξάνοντας το πόσο της σκουριάς.

Στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί, συσχετίζονται οι επιπτώσεις του  $\text{SO}_2$  στα φυτά και υλικά για διάφορες συγκεντρώσεις. Η μόλυνση της ατμόσφαιρας από το διοξείδιο του θείου αγγίζει λοιπόν όπως φαίνεται ένα ευρύ φάσμα των δραστηριοτήτων του ανθρώπου.

Πίνακας 4.2: Επίδραση του  $\text{SO}_2$  στην βλάστηση και στα υλικά [4]

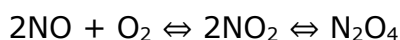
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ $\text{SO}_2$		ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΝΙΔΑ ΚΑΙ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	
2.000 – 4.000	0,7 – 0,14	Βλάβη στα δέντρα επί 8ώρου βάσεως
300	0,105	Διάβρωση του χάλυβα κατά 50% περισσότερο με την παρουσία σωματιδίων
200	0,07	Ελάττωση ορατότητας στα 8 Km παρουσία σωματιδίων και 50% σχετική υγρασία
150	0,052	Μέτρια μέχρι ισχυρή βλάβη της βλάστησης με τη σύγχρονη επίδραση $\text{O}_3$ και $\text{NO}_2$ επί 4ώρου βάσεως
100	0,035	Χρόνια βλάβη στη βλάστηση και πτώση των φύλλων



#### 4.3 Οξειδία του Αζώτου

Με τον όρο οξειδία του αζώτου εννοούνται το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) που εμφανίζονται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Συνήθως στην ομάδα αυτή των οξειδίων περιλαμβάνεται και το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O), αέριο το οποίο συμβάλλει σημαντικά στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το άζωτο ως γνωστό αποτελεί το 78% περίπου του ατμοσφαιρικού αέρα. Κατά την καύση σχηματίζει οξειδία. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της καύσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα των σχηματιζόμενων οξειδίων του αζώτου.

Τα οξειδία του αζώτου [16] εξετάζονται μαζί λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας τους στην χημική ισορροπία της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στην ατμόσφαιρα.

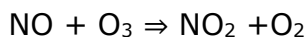


Σε στέρεα κατάσταση, το NO<sub>2</sub> αποτελείται εξ ολοκλήρου από N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, ενώ στους 100°C συναντάται σε αέρια φάση με σύσταση κατά 90% NO<sub>2</sub> και κατά 10% N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Η παραγωγή NO<sub>2</sub> από το NO στην ατμόσφαιρα γίνεται με μικρότερη ταχύτητα απ' ότι η αντίστροφη αντίδραση, που είναι δεύτερης τάξης ως προς τη συγκέντρωση του NO. Οι μηχανισμοί της μεταβολής αυτής είναι πολύπλοκοι, λόγω των φωτοχημικών αντιδράσεων που συντελούνται.

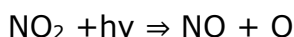
Η μεγαλύτερη παραγωγή των οξειδίων αυτών γίνεται μέσω βιολογικών μηχανισμών. Το NO που σχηματίζεται και παραμένει στην ατμόσφαιρα για χρόνο που διαρκεί από 4 ως 6 ημέρες οξειδώνεται μερικώς προς NO<sub>2</sub> από O<sub>2</sub> ή O<sub>3</sub>. Η αναλογία που δημιουργείται είναι της τάξεως του 1 / 2,5 (λόγος NO /NO<sub>2</sub>).



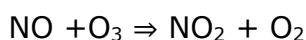
Οπου M είναι συνήθως N<sub>2</sub> ή O<sub>2</sub>.



Το NO<sub>2</sub> που παράγεται απορροφά ισχυρά την υπεριώδη ακτινοβολία και διασπάται σε NO και ατομικό οξυγόνο. Τελικά, το συνολικό αποτέλεσμα είναι να παράγονται ίσες συγκεντρώσεις NO και NO<sub>3</sub> από το NO<sub>2</sub> που έχει συσσωρευτεί στην ατμόσφαιρα λόγω φυσικών και τεχνητών αιτιών. Όταν το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι μικρότερο των 380 nm, ισχύει:

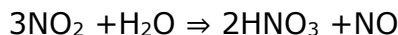
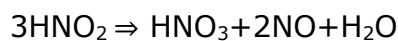
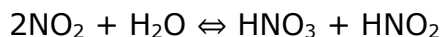


Οπου, M είναι συνήθως N<sub>2</sub> ή O<sub>2</sub>. Το NO και το O<sub>3</sub> με την σειρά τους αντιδρούν μεταξύ τους, συμπληρώνοντας τον κύκλο των αντιδράσεων.

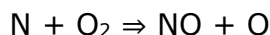
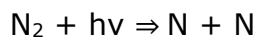


Τα μόρια του NO<sub>2</sub> παραμένουν στην ατμόσφαιρα περίπου 3 ημέρες. Το NO<sub>2</sub> εκτός από την πιο πάνω διάσπαση, εμπλέκεται και σε αντιδράσεις για το σχηματισμό νιτρικού οξέος, συνεισφέροντας έτσι στην πρόκληση όξινης βροχής. Οι παρακάτω χημικές αντιδράσεις περιγράφουν την διαδικασία:

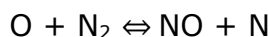
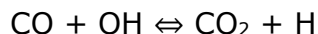




Στο στρώμα της θερμόσφαιρας το NO παράγεται από την αντίδραση



Η παραπάνω αντίδραση θεωρείται βασική για την απομάκρυνση του ατομικού οξυγόνου. Η παρουσία των NO και NO<sub>2</sub> ανιχνεύεται και στα καυσαέρια. Το NO βρίσκεται σε μεγαλύτερες ποσότητες, διότι ο σχηματισμός του ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες. Το NO παράγεται στην περιοχή της φλόγας κατά την καύση, από το άζωτο και το οξυγόνο του αέρα, όπως φαίνεται στον πιο κάτω μηχανισμό.



Οι δύο πρώτες αντιδράσεις περιγράφουν την παραγωγή ατομικού οξυγόνου. Καθοριστικός παράγοντας στην παραγωγή NO σε κανονικές συνθήκες καύσης είναι η θερμοκρασία. Όσο περισσότερο αυξάνει η θερμοκρασία μεγαλώνει και η παραγωγή NO. Με βάση αυτά, προκύπτει ότι οι σπουδαιότερες πηγές εκπομπής NO είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι βιομηχανικοί καυστήρες, που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατά προσεγγίσεις, προκύπτει ότι μόνο 6~7 % του ολικού NO που εκλύεται στην ατμόσφαιρα, προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες.

Στην ατμόσφαιρα των οξειδίων του αζώτου, μια ομάδα αντιδράσεων είναι γνωστή ως φωτοχημική καπνομίχλη (photochemical smog). Μια τυπική φωτοχημική καπνομίχλη προκαλείται από την ζέστη και τον ηλιόλουστο καιρό και χαρακτηρίζεται από ομίχλη, συγκέντρωση όζοντος, ερεθισμό των ματιών και καταστροφή της βλάστησης.

Τα χαρακτηριστικά της φωτοχημικής καπνομίχλης [1] είναι τα εξής:

- Εκπομπή των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και υδρογονανθράκων (HC) στην ατμόσφαιρα. Τα NO<sub>x</sub> απορροφούν ενέργεια που είναι απαραίτητη, για μια σειρά αντιδράσεων κυρίως με τους υδρογονάνθρακες (HC), και για την χημική φωτοχημική διάσπαση του NO<sub>2</sub>.
- Κατανάλωση των NO<sub>x</sub> και ταυτόχρονη αύξηση των οξειδωτικών, όπως O<sub>3</sub>, O<sub>2</sub> και υπεροξειδίων.
- Αερολύματα (αεροζόλ) και ενώσεις που προκαλούν ερεθισμούς στα μάτια. Το βασικό αντιδραστήριο στο σχηματισμό της φωτοχημικής καπνομίχλης είναι το NO<sub>2</sub>. Με την απουσία HC υπάρχει μια ψευδό-ισορροπία των NO και NO<sub>2</sub>, ενώ με την παρουσία HC, η ισορροπία διαταράσσεται με μια αλυσωτή αντίδραση που αρχίζει με την αντίδραση του ατομικού οξυγόνου και O<sub>3</sub> με τους HC.



#### 4.3.1 Επιδράσεις στην Υγεία και στην Πανίδα

Τα οξειδία του αζώτου θεωρούνται τοξικές ενώσεις [3], με τοξικότερο το  $\text{NO}_2$  από το  $\text{NO}$ . Ζώντες οργανισμοί (κυρίως ζώα) που εκτίθενται σε μεγάλες συγκεντρώσεις  $\text{NO}$ , παρουσιάζουν παράλυση και σπασμούς του νευρικού συστήματος. Παρόλα αυτά, θάνατοι από το  $\text{NO}$  δεν είναι γνωστοί.

Το  $\text{NO}_2$  ερεθίζει τα μάτια και τους πνεύμονες, αντιδρά με τους υδρατμούς των βρόγχων των κυψελίδων και προκαλεί ερεθισμούς ακόμη και πνευμονικό οίδημα. Όταν η συγκέντρωση  $\text{NO}_2$  υπερβεί τα 150 ppm αποτελεί αιτία θανάτου, ενώ σε συγκέντρωση 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (0,12 ppm) γίνεται αισθητό από την ανθρώπινη όσφρηση. Γενικά, τα οξειδία του αζώτου έχουν δυσμενείς επιπτώσεις και στα φυτά, επιφέροντας νέκρωση στον περίγυρο των φύλλων και ελαττώνουν την ανάπτυξη των φυτών.

#### 4.4 Διοξείδιο του Άνθρακα

Το  $\text{CO}_2$  [16] είναι ένα ρυπογόνο αέριο της ατμόσφαιρας που παράγεται είτε από φυσικές αποσυνθέσεις είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η χρήση των φυσικών καυσίμων ως πηγή ενέργειας είναι ο κυριότερος τρόπος ρύπανσης της ατμόσφαιρας αφού, βάση όλων των φυσικών καυσίμων είναι οι υδρογονάνθρακες (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο).

Η βελτιστοποίηση των καυσίμων αυτών απαιτεί στην τέλεια καύση τους, γεγονός που ακόμα δεν έχει επιτευχθεί. Αυτό έχει ως συνέπεια, το διοξείδιο του άνθρακα να είναι ένα από τα κυριότερα ρυπαντικά αέρια της ατμόσφαιρας.

Πίνακας 4.3: Παραγωγή  $\text{CO}_2$  από ανθρώπινες δραστηριότητες στην ατμόσφαιρα [5]

Προέλευση	Παραγωγή σε εκατ. τόνοι/έτος
Καύση άνθρακα	7.000
Καύση πετρελαίου	4.000
Καύση φυσικού αερίου	1.000
Διάφορα	1.000
ΣΥΝΟΛΟ	13.000

Η συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα αυξάνεται συνεχώς κατά σταθερό ρυθμό. Θεωρητικά, το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της θερμοκρασίας της γης, γνωστό ως φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η έκταση κατά την οποία, θα υποστεί μεταβολές το φάσμα του γήινου κλίματος εξαρτάται από τις αριθμητικές παραμέτρους του φαινομένου, που αυτή την στιγμή γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστούν σε θεωρητική βάση.

Κατά τον προσδιορισμό του φαινομένου, χρησιμοποιούνται παράμετροι που προβλέπουν εξαιρετικά καταστρεπτικές επιδράσεις στο κλίμα, παράλληλα με μερικές άλλες που προβλέπουν περιορισμένες και ήπιες κλιματικές επιδράσεις.



Οι πολλές και σημαντικές διεργασίες, στις οποίες λαμβάνει μέρος το  $\text{CO}_2$  γίνεται στην επιφάνεια της Γης, και σαφώς ανήκουν στο κύκλο του άνθρακα. Εάν η ατμόσφαιρα θεωρηθεί ως ένας αποθηκευτικός χώρος συγκεκριμένης δύναμης για τις ποσότητες  $\text{CO}_2$ , τότε η ανάλογη χωρητικότητα των ωκεανών υπολογίζεται να είναι 60 φορές μεγαλύτερη. Η διαστρωμάτωση στους ωκεανούς συντελείται από 2 καθορισμένες στοιβάδες. Στην επιφανειακή στοιβάδα, βάθους 100 m, η ισορροπία με την ατμόσφαιρα αποκαθίσταται πολύ γρηγορότερα απ' ό,τι με την υπερκείμενη στοιβάδα, στο βάθος των ωκεανών.

Η ανακύκλωση του άνθρακα στα θαλάσσια νερά γίνεται με πολύ αργό ρυθμό (χρόνος ανακύκλωσης  $> 10^5$  έτη). Ο άνθρωπος επεμβαίνει στον κύκλο με την χρήση ανθρακούχων καυσίμων ως πηγή ενέργειας και έτσι επιταχύνει την ανακύκλωση του άνθρακα με την παραγωγή του  $\text{CO}_2$ , που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα.

Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει ισορροπία του  $\text{CO}_2$  σε καθένα σημείο τη γήινης επιφάνειας. Για παράδειγμα, τα φυτά επηρεάζουν την συγκέντρωση  $\text{CO}_2$  στην επιφάνεια της Γης με την αναπνοή και την φωτοσύνθεση. Στην ατμόσφαιρα της Γης το  $\text{CO}_2$  προσλαμβάνεται από την βλάστηση και διατηρείται στην βιόσφαιρα για περίπου 20 χρόνια (μέσος όρος ζωής φυτών και χρόνος μικροβιολογικής αποσύνθεσης). Ένα από τα σημαντικά στάδια του κύκλου του άνθρακα είναι η ανταλλαγή του  $\text{CO}_2$  μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφανειακής στοιβάδας των ωκεανών. Η παραμονή του  $\text{CO}_2$  στην επιφανειακή στοιβάδα είναι 1,85 έτη ενώ η παραμονή του, στα βαθιά νερά των ωκεανών είναι 50 έτη.

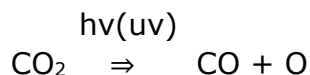
Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων  $\text{CO}_2$  μακριά από τα αστικοβιομηχανικά κέντρα επιβεβαιώνουν μια σταθερή αύξηση της παρουσίας του στην ατμόσφαιρα, με ρυθμό αύξησης 1 mg/kg ανά έτος. Υπολογίζεται από την ετήσια παραγόμενη μάζα  $\text{CO}_2$ , ότι η μεταβολή στη συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα λόγω καύσης, ανταποκρίνεται στο 50% της ποσότητας του  $\text{CO}_2$  που παράγεται από φυσικά καύσιμα. Λόγω των μεγάλων ποσοτήτων  $\text{CO}_2$  στους ωκεανούς και της διαλυτότητας του στο νερό, θα έπρεπε το  $\text{CO}_2$  από καύση να απομακρύνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς από την ατμόσφαιρα. Αυτό δεν συμβαίνει διότι:

- η ταχύτητα ανταλλαγής του  $\text{CO}_2$  μέσα στο θαλάσσιο νερό είναι μικρή.
- ο ωκεανός συμπεριφέρεται ως ένα ρυθμιστικό σύστημα (διάλυμα) ανθρακικών-όξινων ανθρακικών με pH 8, γεγονός που απαιτεί δυσανάλογη μεγάλη αύξηση της πίεσης για μια μικρή αύξηση της συγκέντρωσης.

Η μικρή αύξηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης  $\text{CO}_2$  επιφέρει τα εξής αποτελέσματα:

- Η αύξηση του  $\text{CO}_2$ , επηρεάζει ενδεχομένως την φωτοσύνθεση.
- Η αύξηση του  $\text{CO}_2$  μπορεί να επιδράσει στο κλίμα της Γης. (Λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου).

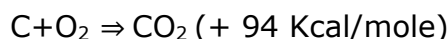
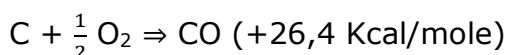
Η συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού  $\text{CO}_2$  αυξάνει σταθερά από το έτος 1880, συμπέρασμα που ενισχύεται και από τις πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει όχι μόνο σε βιομηχανικά κέντρα αλλά και σε αγροτικές (πεδινές, ημιορεινές) περιοχές. Η μεταβολή του  $\text{CO}_2$  σχετίζεται και με τις εποχές του χρόνου. Την άνοιξη παρατηρούνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις  $\text{CO}_2$ , ενώ μικρότερες το φθινόπωρο. Τέλος, στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας το  $\text{CO}_2$  υφίσταται φωτοχημικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα την παραγωγή CO, σύμφωνα με την χημική αντίδραση:



#### 4.5 Μονοξείδιο του Άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα [16] βρίσκεται στα χαμηλά στρώματα της ρυπασμένης ατμόσφαιρας. Είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο και ελάχιστα διαλυτό στο νερό, αναφλέγεται όταν καίγεται και παράγει μπλε φλόγα. Η παραγωγή του CO γίνεται από την ατελή καύση των ανθρακούχων καυσίμων. Οι μεγαλύτερες πηγές ατελών καύσεων CO είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης, η βιομηχανία και οι αστικές δραστηριότητες. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις του CO εντοπίζονται, στους πολυσύχναστους δρόμους των μεγάλων πόλεων, ξεπερνώντας τα 100 mg/kg και σε σήραγγες διέλευσης τροχοφόρων φθάνουν τα 300 mg/kg. Πρόσφατες έρευνες αποδεικνύουν ότι μόνο το 10% της συνολικής παραγωγής CO προέρχεται από καύση.

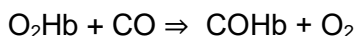
Ο άνθρακας καίγεται σχηματίζοντας μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, σύμφωνα με τις εξής χημικές αντιδράσεις:



Όπως προκύπτει από τις ανωτέρω αντιδράσεις, κατά την ατελή καύση του άνθρακα και τον σχηματισμό του CO παρατηρούνται μεγάλες απώλειες ενέργειας. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή των συνθηκών καύσης τόσο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ή θέρμανσης όσο και στα οχήματα. Η αύξηση της αναλογίας αέρα καυσίμου περιορίζει σημαντικά τον σχηματισμό CO.

##### 4.5.1 Επιδράσεις στην Υγεία

Το CO σε μεγάλες ποσότητες (>100 ppm) είναι θανατηφόρο [3]. Η τοξική του δράση οφείλεται στην μεγάλη χημική συγγένεια που έχει με την αιμογλοβίνη (Hb) του αίματος. Η αιμογλοβίνη δρα ως μεταφορέας του οξυγόνου από τους πνεύμονες στα κύτταρα του σώματος και του CO<sub>2</sub> από τα κύτταρα στους πνεύμονες. Έτσι το CO που εισπνέεται από τον αέρα περιορίζει την οξυγόνωση των κυττάρων, διότι αντικαθιστά το οξυγόνο στην οξυαιμογλοβίνη (O<sub>2</sub>Hb) και σχηματίζει την καρβοξυαιμογλοβίνη.



Η ανοξαιμία, η οποία προκαλείται από την COHb, εκδηλώνεται με συμπτώματα κεφαλαλγιών και ναυτιών. Με τη συνεχή έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις CO παρατηρείται ξαφνική απώλεια της συνείδησης χωρίς αναπνευστικές διαταραχές και σε παρατεταμένα χρονικά διαστήματα, προκαλεί το θάνατο. Ανάλογες περιπτώσεις συνέβαιναν συχνά στο παρελθόν, με παραδοσιακούς τρόπους θέρμανσης.

#### 4.6 Αιωρούμενα Σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια [16] (σωματιδιακή ύλη ή αερολύματα) στην ατμόσφαιρα αν και έχουν διαφορετική προέλευση, εμφανίζουν ως κοινό σημείο το γεγονός ότι



αποτελούνται από λεπτά διαχωρισμένα σωματίδια. Το μέγεθος των σωματιδίων διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του και την διεργασία που έχει υποστεί.

Τα αερολύματα διατηρούν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες της ύλης αλλά παρουσιάζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συνολική επιφάνεια ανάλογα με το μέγεθος και το πορώδες τους. Οι παραπάνω λόγοι αποτελούν σημείο εφαρμογής στην βιομηχανία (χημική, δομικά υλικά, μεταλλεύματα κ.α.) αλλά και ταυτόχρονα δημιουργεί προβλήματα ρύπανσης.

Ως σωματίδιο θεωρείται οτιδήποτε υγρό ή στερεό υπάρχει σε μία αέρια φάση με μέγεθος από  $10^{-7}$   $\mu\text{m}$  έως  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Το μέγεθος των σωματιδίων που εκλύονται από βιομηχανικές εκπομπές καμινάδων εξαρτάται από την ταχύτητα των καυσαερίων και από την κατασκευή της καμινάδας. Τυπικές ταχύτητες εξόδου καυσαερίων από καμινάδες είναι από 5-20 m/sec. Αυτές οι ταχύτητες είναι ικανές να μεταφέρουν σωματίδια μέσης διαμέτρου 400  $\mu\text{m}$ . Τα μεγαλύτερα σε διάμετρο σωματίδια παραμένουν στην καμινάδα ενώ τα πολύ μικρότερα εξέρχονται από την καμινάδα.

Γενικά, η ιπτάμενη τέφρα που αναδύεται από τις καμινάδες αναλύεται σε άνθρακα, θειικά άλατα και σε οξειδία του πυριτίου, του σιδήρου, του νικελίου, του ασβεστίου, του αργιλίου και του φωσφόρου.

Τα διάφορα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από καύσεις ταξινομούνται σύμφωνα με τον τύπο και τις ιδιότητες. Τα λεπτά υγρά σωματίδια ονομάζονται "νέφος", ενώ τα στερεά σωματίδια "σκόνη ή καπνός". Η ομίχλη αποτελείται από μεγάλη συγκέντρωση μικρών σταγόνων ύδατος, ενώ ο συνδυασμός καπνού και ομίχλης σχηματίζει την "καπνό μίχλη".

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων ρυθμίζεται από φυσικές διεργασίες. Το άνω όριο προσδιορίζεται από τις δυνάμεις της βαρύτητας ενώ το κάτω όριο ελέγχεται από μεθόδους "θρομβώσεως". Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, με την ονομασία τους. Με την βοήθεια της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διαπιστώθηκε ότι το σχήμα των σωματιδίων δεν είναι πάντα σφαιρικό αλλά παρουσιάζει ποικίλες μορφές. Για παράδειγμα το σχήμα του τυπικού σωματιδίου καπνού είναι απολύτως σφαιρικό ενώ τα σωματίδια σκόνης λαμβάνουν ακανόνιστο σχήμα.

Πίνακας 4.4: Διαχωρισμός μεγέθους & προέλευσης σωματιδίων [5]

Σωματίδια	Προσδιορισμός
Σωματίδια Aitken	Ακτίνα μεγέθους κάτω από 0,1 $\mu\text{m}$
Μεγάλα σωματίδια	Ακτίνα μεγέθους μεταξύ 0,1-1 $\mu\text{m}$
Γιγαντιαία σωματίδια	Ακτίνα μεγέθους πάνω από 1 $\mu\text{m}$
Σκόνη	Στερεά σωματίδια αποκομμένα από στερεά σώματα και διασκορπισμένα από αέρια ρεύματα
Ατμός	Στερεά ή υγρά σωματίδια από συμπύκνωση στη αέρια φάση
Καπνός	Ατμός ως αποτέλεσμα καύσης



Η συμβατική μέθοδος προσομοίωσης του μεγέθους σωματιδίου είναι μέθοδος της διαμέτρου Stokes. Η διάμετρος Stokes ορίζεται ως η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας που έχει την ίδια ταχύτητα πτώσης και πυκνότητα με το υπό μελέτη σωματίδιο.

Η διάμετρος Stokes ενός απομονωμένου σωματιδίου ατμού της ατμόσφαιρας είναι ίδια με την γεωμετρική του διάμετρο, αλλά η διάμετρος Stokes ενός σωματιδίου σκόνης που σχηματίζεται από θρόμβωση ορισμένων άλλων σωματιδίων είναι πολύ μικρότερη από την μετρούμενη γεωμετρική.

#### 4.6.1 Γενικές Επιδράσεις

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων επιδρά στην συμπεριφορά της ατμόσφαιρας ή ορισμένων παραμέτρων της ως εξής:

**Καταλυτική συμπεριφορά:** Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του σωματιδίου τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια του. Αυτό έχει ως συνέπεια να καταλύονται καλύτερα χημικές αντιδράσεις, διότι διάφορα αέρια ή υγρά απορροφούνται από τις μεγάλες επιφάνειες των σωματιδίων. Αυτή η διεργασία σχετίζεται με την σχηματισμό φωτοχημικής καπνομίχλης, γεγονός με δυσμενείς συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία. Η μεγάλη επιφάνεια των σωματιδίων οφείλεται σε μικροπόρους, που στην συντριπτική τους πλειονότητα έχουν διάμετρο μικρότερη ή ίση με 20 nm. Στο εσωτερικό των πόρων απορροφούνται και συμπυκνώνονται ατμοσφαιρικά αέρια, όπως CO<sub>2</sub> (150-300 μgr/gr), CO (10-30 μgr/gr), CH<sub>4</sub> (15-60 μgr/gr) και NH<sub>3</sub> (30-100 μgr/gr).

**Φαινόμενα ανακλάσεως:** Το μέγεθος των σωματιδίων είναι σημαντικός παράγοντας στη ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα μεγαλύτερα ποσοστά (περίπου 10%) ανακλάσεως προκαλούνται από τα σωματίδια μεγέθους 0,1-1 μm, γιατί η διάμετρος τους είναι συγκρίσιμη με τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας.

Πίνακας 4.5: Επίδραση αιωρούμενων σωματιδίων στην ορατότητα [4]

Συγκέντρωση (μgr/m <sup>3</sup> )	Ορατότητα (Km)	Περιοχή
30	40	Εκτός κατοικημένης περιοχής
100	10	Σε κατοικημένη περιοχή
200	5	Σε κατοικημένη περιοχή
750	1,5	Σε κατοικημένη περιοχή

Γενικά τα σωματίδια μειώνουν την ορατότητα καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι αυτή να φθάσει στην επιφάνεια της Γης. Η αύξηση της θολερότητας συντελεί στην πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας και στην αναστολή της επέκτασης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ο Πίνακας 4.5 εμφανίζει κατά προσέγγιση τα όρια ορατότητας σε διάφορες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που είναι τυπικές για κατοικημένες και μη περιοχές.

**Επίδραση στο κλίμα:** Σωματίδια με τάξη μεγέθους 0,1—1 μm αποτελούν πυρήνες για το σχηματισμό σταγόνων βροχής, την αύξηση των σύννεφων και τη βροχόπτωση. Μ' αυτόν τον τρόπο τα σωματίδια επηρεάζουν το κλίμα ενός αστικού κέντρου, αυξάνοντας



τις βροχοπτώσεις, τις χαλαζοπτώσεις και τις καταιγίδες. Αν τα σωματίδια είναι μικρότερου μεγέθους τότε οι σταγόνες της βροχής είναι και αυτές μικρότερες και δεν πέφτουν με αποτέλεσμα την μείωση των βροχοπτώσεων και την αύξηση της συννεφιάς.

Βιολογική επίδραση: Όταν τα σωματίδια επικάθονται στα φυτά εμποδίζουν την κυκλοφορία του CO<sub>2</sub> και του O<sub>2</sub> που εμπλέκονται στον μηχανισμό της φωτοσύνθεσης. Στην περίπτωση των ζώων, τα σωματίδια προκαλούν προβλήματα στο αναπνευστικό τους σύστημα. Τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των 10 μm παγιδεύονται στη μύτη ή το φάρυγγα και στη συνέχεια απομακρύνονται ή καταπίνονται χωρίς να παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα. Σωματίδια όμως, με μέγεθος μικρότερο από 0,1 μm εναποτίθενται στους πνεύμονες και προκαλούν βλάβες, γιατί είναι δύσκολη η απομάκρυνση τους.

Επίδραση στον Άνθρωπο: Η κατάταξη των σωματιδίων με βάση την διεισδυτικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό ορίζεται ως εξής [37]:

Πίνακας 4.6: Κατάταξη ωματιδίων με βάση τη διεισδυτικητα στον ανθρώπινο οργανισμό.

Τύπος Σωματιδίων	Μέγεθος σωματιδίων
Εισπνεύσιμα σωματίδια (Inhalable particles)	< 10 μm
Θωρακικά σωματίδια (Thoracic particles)	< 7 μm
Αναπνεύσιμα σωματίδια (Respirable particles)	< 2.5 μm

Τέλος είναι καλό να αναφερθεί ο αυστηρός ορισμός των PM 10 και PM 2.5 όπως τον αναφέρει η Ε.Ε στις σχετικές οδηγίες της.

“PM 10 νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10 μm.”

Και ο αντίστοιχος για ορισμός για τα PM 2.5

“PM 2.5 νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 2.5 μm.”

#### 4.6.2 Καθίζηση Σωματιδίων

Η σωματιδιακή ύλη [16] αποτελείται από αιρούμενα στερεά σωματίδια, με διαμέτρους που κυμαίνονται από μερικά mm έως μερικά nm. Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα καθορίζεται από το μέγεθος και το ειδικό βάρος τους. Η ταχύτητα πτώσης τους στο έδαφος καθορίζεται από το νόμο του Stokes:

$$V_0 = \frac{gd^2(\rho_1 - \rho_2)}{18\eta} \quad 4.1$$



Όπου:

$V_0$  οριακή ταχύτητα σφαιρικού σωματιδίου

$\rho_1$  πυκνότητα σωματιδίου

$d$  διάμετρος σωματιδίου

$\rho_2$  πυκνότητα περιβάλλοντος και

$\eta$  το ιξώδες περιβάλλοντος αέρα

Οι αποκλίσεις που εμφανίζει ο νόμος του Stokes οφείλονται στα μη κανονικά σχήματα των σωματιδίων, της τυρβώδους ροής γύρω από τα μεγάλα σωματίδια, των κινήσεων Brown των πολύ μικρών σωματιδίων και των καιρικών επιδράσεων (άνεμος βροχοπτώσεις, κλπ.). Τα σωματίδια μικρής διαμέτρου για να καθιζάνουν πρέπει να συσσωματώνονται, σε μεγαλύτερα και να απομακρύνονται από τον αέρα.

#### 4.7 Καπνός

Σαν καπνός ορίζονται τα σωματίδια που βρίσκονται σε αιώρηση στα καυσαέρια και απορροφούν, διαθλούν ή ανακλούν το φως. Ο καπνός αποτελείται κατά κύριο λόγο από σωματίδια αιθάλης, ουσιαστικά σωματίδια ελεύθερου άνθρακα. Ο σχηματισμός αιθάλης γίνεται στο πρώτο στάδιο της καύσης, όταν υπάρχει φλόγα διάχυσης. Στην περίοδο αυτή, η φλόγα είναι πολύ φωτεινή, ένδειξη ύπαρξης ελεύθερου άνθρακα.

Ένα πολύ μικρό μέρος του άνθρακα αυτού δεν προλαβαίνει να καεί, σχηματίζοντας έτσι αιθάλη, μέσω πολύπλοκων διεργασιών πυρόλυσης, πολυμερισμού και μερικής οξειδωσης [36].

Οι κύριες φάσεις σχηματισμού της αιθάλης είναι τρεις: ο σχηματισμός των μικρών πυρήνων, η αρχική συσσωμάτωση και αύξηση μεγέθους, και τέλος η δημιουργία των ακόμη μεγαλύτερων αδρομερών. Οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται σε φλόγες διάχυσης, προωθούν τις αντιδράσεις πολυμερισμού και συμπύκνωσης, πριν τη φάση της αφυδρογόνωσης.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες αρωματικοί και πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες λειτουργούν ως αρχικοί πυρήνες. Οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν σε προαναμιγμένες φλόγες και φλόγες τυρβώδους διάχυσης, προωθούν αντιδράσεις πυρόλυσης και διάσπασης μορίων.

Ενδιάμεσο προϊόν αυτών των δράσεων είναι το ακετυλένιο ( $\text{HC}\equiv\text{HC}$ ). Οι πυρήνες συσσωμάτωσης αυξάνουν ταχύτερα σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες. Μετά την εκπομπή τους από τις θερμότερες περιοχές της φλόγας, τα μικρά αλλά πλήρως σχηματισμένα σωματίδια αιθάλης συνεχίζουν την αύξηση του μεγέθους τους. Μέρος του σχηματιζόμενου άνθρακα καίγεται, και ο τελικός ρυθμός εκπομπής αιθάλης είναι ανάλογος της διαφοράς του ρυθμού παραγωγής σωματιδίων και του ρυθμού καύσης τους [36].

Τα σωματίδια ή καπνός βρίσκονται στον αέρα υπό κολλοειδή διασπορά και διακρίνονται σε λευκό, γαλάζιο και μαύρο καπνό. Ο λευκός και γαλάζιος καπνός είναι κυρίως κολλοειδής διασπορές σταγονιδίων. Τα σταγονίδια του λευκού καπνού είναι μεγαλύτερα περίπου  $1\mu\text{m}$  σε διάμετρο ενώ του γαλάζιου είναι μικρότερα του  $0.4\mu\text{m}$ . Ο αύρος





καπνός είναι αιθάλη δηλαδή σωματίδια άνθρακα μεγέθους μικρότερων των 0.2  $\mu\text{m}$  που προέρχονται από την ατελή καύση του καυσίμου [35].

Επιπλέον ο σχηματισμός αιθάλης εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω φυσικοχημικούς παράγοντες:

- Σύσταση και χημική δομή του καυσίμου
- Θερμοκρασία
- Αναλογία – Αέρα και Καυσίμου

Η καύση μίγματος καυσίμων μπορεί να προκαλέσει είτε την αύξηση είτε την μείωση της παραγόμενης αιθάλης ανάλογα με τον βαθμό αλληλεπίδρασης των συστατικών του μίγματος και τον βαθμό πυρόλυσης που προκαλείται στο μίγμα. Γενικά τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται από στερεά ή και υγρά σωματίδια που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές.



## 5. Ατμοσφαιρικός Κύκλος της Ρύπανσης

### 5.1 Γενικά

Οι αέριοι ρύποι όταν αφήνουν την καμινάδα είναι θερμότεροι από τον περιβάλλοντα αέρα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την αρχική ορμή που έχουν τα καυσαέρια όταν φθάνουν στην κορυφή της καμινάδας, έχει ως αποτέλεσμα το πλούμιο να ανυψώνεται μέχρι ενός ορισμένου ύψους. Το ύψος αυτό είναι βέβαια υψηλότερο του φυσικού (κατασκευαστικού) ύψους της καμινάδας και ονομάζεται ενεργό ύψος της καμινάδας.

Δηλαδή το ενεργό ύψος είναι το άθροισμα του πραγματικού ύψους της καμινάδας και του πρόσθετου ύψους. Το πρόσθετο ύψος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων, την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας.

Η μεταφορά ρύπων με τις κινήσεις των αερίων μαζών ονομάζεται διασπορά, ενώ η αραιώση των ρύπων σε μία αέρια μάζα χαρακτηρίζεται ως διάχυση. Αν και οι δύο όροι συχνά συγχέονται, είναι ορθότερο να γίνεται διάκριση μεταξύ τους. Με βάση την παραπάνω διάκριση, η ανάλυση της διασποράς ρύπων στην ατμόσφαιρα προϋποθέτει την περιγραφή της ατμοσφαιρικής ροής στην υπό εξέταση περιοχή. Και αυτό, επειδή η διάχυση των ρύπων διαφέρει ανάλογα με το είδος της ροής. Σε μία ομοιόμορφη στρωτή ροή, επικρατεί η μοριακή διάχυση εξαιτίας της κίνησης των αερίων συστατικών με σκοπό τη μείωση της ανομοιογένειας των συγκεντρώσεών τους. Ομοιόμορφες στρωτές ροές λαμβάνουν χώρα στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, όπου οι τριβές είναι αμελητέες.

Στο κεφάλαιο 7 θα δούμε ότι το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, οι τριβές παίζουν σημαντικότερο ρόλο. Η φύση των τριβών στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της τύρβης (δηλαδή στροβιλισμούς που προκαλούνται από μηχανικά, αλλά κυρίως από θερμικά αίτια). Έτσι, στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα έχουμε κατά κύριο λόγο τυρβώδη διάχυση, η οποία είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους εντονότερη από τη μοριακή. Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα δεν είναι σταθερό, αλλά παρουσιάζει χρονικές διακυμάνσεις ανάλογα με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας επιφάνειας.

### 5.2 Αρχές Λειτουργίας Καμινάδας

Η απλούστερη και πρωτοβάθμια λύση για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που προκαλείται από κάθε είδους βιομηχανική δραστηριότητα είναι η καμινάδα [16]. Με την εφαρμογή της λύσης αυτής επιτυγχάνεται, τα καυσαέρια και οι επιμέρους ρύποι να απομακρύνονται και να διαχέονται με την αραιώση τους, που είναι ανάλογη του ύψους διαφυγής τους.

Η ικανοποιητική απόδοση μια καμινάδας προϋποθέτει το κατάλληλο ύψος και μετεωρολογικές συνθήκες. Γενικά καλή διασπορά και απόδοση επιτυγχάνεται σε συνθήκες αδιαβατικής και ασταθούς ατμόσφαιρας. Στην αντίθετη περίπτωση, κατά την οποία παρατηρούνται και συνθήκες θερμοκρασιακής αναστροφής της ατμόσφαιρας, έχει σαν αποτέλεσμα την μη αραιώση των καυσαερίων και την κακή διασπορά τους με αποτέλεσμα την απόθεσή τους σε περιοχή μικρής ακτίνας από την καμινάδα.



Η σωστή λειτουργία της καμινάδας απαιτεί, εκτός από την επικράτηση συνθηκών σταθερής ατμόσφαιρας, ικανοποιητικές ταχύτητες εξόδου των αέριων καυσαερίων. Η κλίμακα των ταχυτήτων διαφυγής εξαρτάται από το είδος των εξερχόμενων ρύπων, την παροχή, το ύψος, και τις θερμοκρασίες εξόδου από τον φούρνο, από την καμινάδα και αυτή του περιβάλλοντος. Τυπικές ταχύτητες εξόδου είναι από 5 έως 20 m/sec.

Κατά την λειτουργία μιας καμινάδας παρατηρούνται τα εξής:

- Η συγκέντρωση ρυπαντών στο έδαφος είναι ανάλογη του όγκου των εξερχόμενων καυσαερίων από αυτή.
- Η συγκέντρωση των ρυπαντών στο έδαφος είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου.
- Η συγκέντρωση των ρυπαντών στο έδαφος είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του ύψους της καμινάδας.
- Η μέγιστη συγκέντρωση ρυπαντών στο έδαφος εξαρτάται από την σταθερότητα της ατμόσφαιρας. Όταν η ατμόσφαιρα είναι ευσταθής, η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή και υπάρχει αναστροφή, τότε η μέγιστη συγκέντρωση ρύπων σημειώνεται κοντά στην καμινάδα. Καθώς αυξάνεται, η ταχύτητα ή αναστροφή ανατρέπεται, οι ρύποι μεταφέρονται και αραιώνονται μακριά από την καμινάδα.

### 5.3 Διασπορά Αερίων Ρύπων

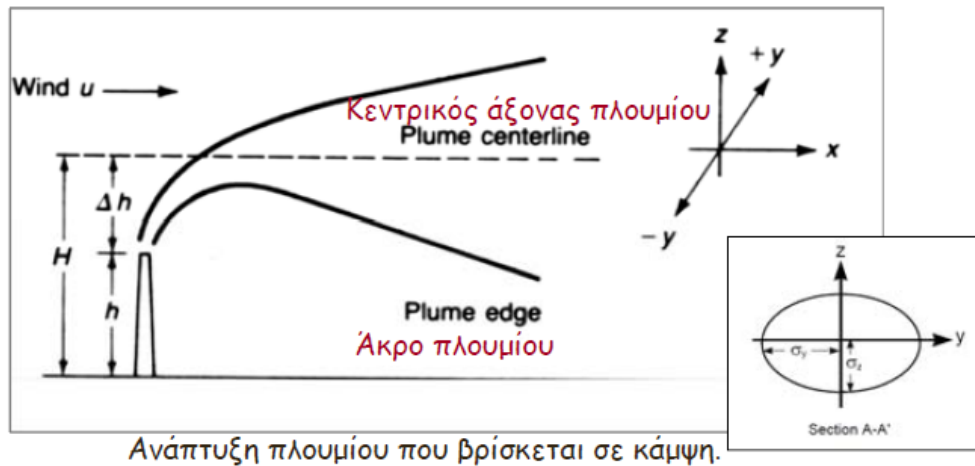
Η διαφορά ανάμεσα στο φυσικό και στο ενεργό ύψος της καμινάδας ονομάζεται αρχική ανύψωση του πλουμίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αρχική ανύψωση του πλουμίου έχει πολύ μεγάλη σημασία στην ποιότητα του αέρα της περιοχής, διότι μπορεί να αυξήσει το ενεργό ύψος της καμινάδας με ένα παράγοντα 2 έως 10 φορές το κατασκευαστικό ύψος της.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη συγκέντρωση εδάφους είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του ενεργού ύψους εκπομπής, είναι φανερό ότι η ανύψωση του πλουμίου μπορεί, στη ακραία περίπτωση, να μειώσει τις συγκεντρώσεις εδάφους με ένα παράγοντα της τάξης του 100.

Το πλούμιο μεταφέρεται μακριά από την πηγή από τον μέσο οριζόντιο άνεμο. Η οριζόντια μεταφορά αποτελεί τον πλέον σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης και αραιώσης των ρύπων. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ χαμηλή (άπνοια) οι συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές για την διασπορά των ρυπαντών. Επίσης συνθήκες άπνοιας δίνουν μεγάλα ενεργά ύψη καμινάδας.

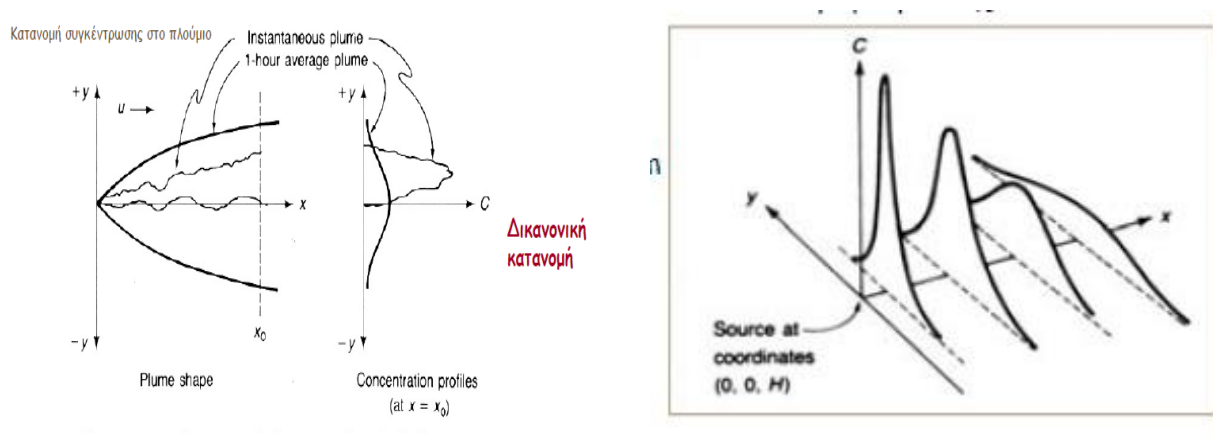
Οι διαστάσεις του πλουμίου σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονά του, δίνονται γενικά με την μορφή της τυπικής απόκλισης της κατανομής της μέσης συγκέντρωσης, μια που η κατανομή σε κάθε επίπεδο είναι σχεδόν κανονική.

Σχήμα 5.1: Ανάπτυξη Πλουμίου που είναι σε κάμψη



Στα σχήματα που ακολουθούν υπάρχουν κατανομές συγκέντρωσης ρύπων. Πιο συγκεκριμένα στο αριστερό σχήμα υπάρχει η κάτοψη ενός στιγμιαίου πλουμίου και ενός μέσου ωριαίου πλουμίου. Στην συγκεκριμένη εργασία το πλούμιο των ρύπων, εξετάζεται σε μέσο χρόνο και όχι στιγμιαία. Στο δεξιό σχήμα υπάρχει η κατανομή συγκεντρώσεων συνάρτηση του ύψους για συγκεκριμένα μήκη του πεδίου ροής. Παρόμοια διαγράμματα υπάρχουν στο κεφάλαιο 19 στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Σχήμα 5.2: Κατανομές Συγκεντρώσεων Πλουμίου



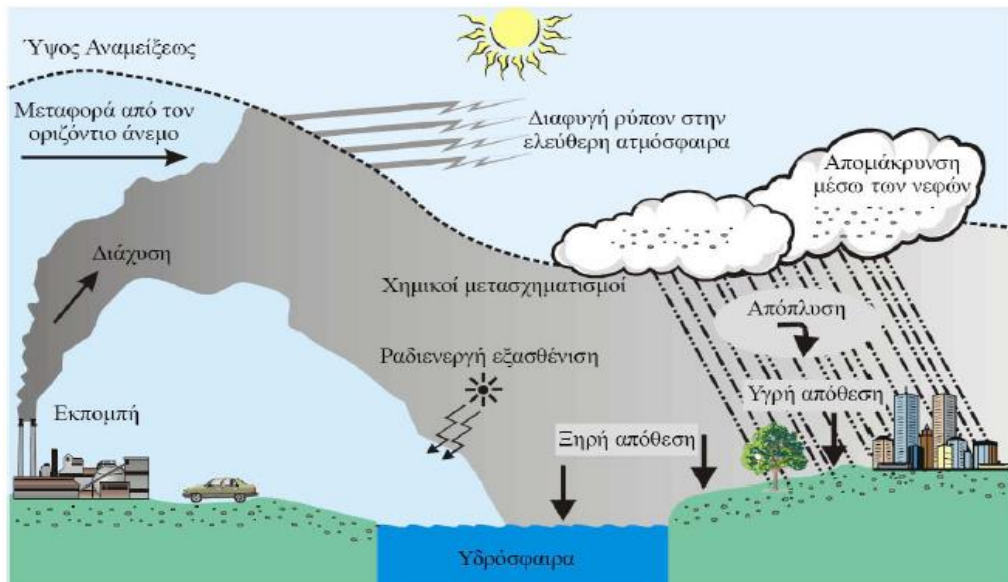
Οι αναταρακτικές κινήσεις του αέρα (τυρβώδεις στρόβιλοι) είναι υπεύθυνες για την κατακόρυφη μεταφορά και την διαπλάτυνση του πλουμίου, με τελικό αποτέλεσμα την αραιώση. Όπως τονίστηκε παραπάνω, η διαδικασία αυτή ονομάζεται διάχυση. Η κλίμακα και η ένταση της αραιώσης εξαρτώνται από τον βαθμό ανατάραξης της ατμόσφαιρας. Στο Κεφάλαιο 5.7 που ακολουθεί, γίνεται αναφορά για τις αναταράξεις.

Σε συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρότερης κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση γίνεται αργά ενώ σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση πολύ έντονη. Η διάχυση των ρύπων γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της γης το οποίο ονομάζεται ύψος ανάμειξης.



Το στρώμα το οποίο περιέχεται ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και το ύψος ανάμειξης ονομάζεται στρώμα ανάμειξης. Η μεταφορά των ρύπων από την ατμόσφαιρα στο έδαφος ονομάζεται απόθεση. Γενικά ξεχωρίζουμε τρεις διαφορετικούς τύπους απόθεσης:

- Καθίζηση ονομάζεται η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων.
- Ξηρή απόθεση υφίστανται τα μικρά σωματίδια και οι αέριες ενώσεις τα οποία ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και τα οποία κατακρατούνται, όταν έρθουν σε επαφή, από την υποκείμενη επιφάνεια.
- Υγρή απόθεση μπορεί να συμβεί σε κάποιο από τα παρακάτω ενδεχόμενα: Είτε σάρωση των ρύπων, οι οποίοι βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, από την βροχή ή το χιόνι (απόπλυση), είτε πρόσληψη των ρύπων σε ένα προηγούμενο στάδιο από τα μικρά σταγονίδια του νέφους, τα οποία αργότερα ενώνονται μεταξύ τους φτιάχνοντας σταγόνες βροχής.



Σχήμα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση των διαδικασιών οι οποίες συντελούν στην διασπορά των αερίων ρύπων που εκπέμπονται από μία καμινάδα [47].

Κατά τον χρόνο της παραμονής τους στην ατμόσφαιρα οι ρύποι υφίστανται διάφορους χημικούς μετασχηματισμούς, λόγω αντιδράσεων είτε μεταξύ τους είτε με τα συστατικά της καθαρής ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα είναι ένα αποτελεσματικό εργαστήριο αντιδράσεων, μέσα στο οποίο διοχετεύονται χημικά ενεργά συστατικά, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός αριθμού καινούργιων ουσιών. Οι καινούργιες ουσίες παράγονται από αέρια και υγρά, τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους, καθώς και με τα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Οι χημικές αντιδράσεις των ρύπων μπορεί να δώσουν και ουσίες οι οποίες δεν είναι ρύποι. Σε πολλές περιπτώσεις όμως στα προϊόντα των χημικών αντιδράσεων περιλαμβάνονται και νέοι ρύποι, οι οποίοι ονομάζονται δευτερογενείς ρύποι, σε αντιδιαστολή με αυτούς που εκπέμπονται από τις πηγές, οι οποίοι ονομάζονται πρωτογενείς ρύποι όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.



Ένα μέρος της ρύπανσης διαφεύγει από το στρώμα ανάμειξης στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Η απουσία αναταρακτικών κινήσεων στην ελεύθερη ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα η διάχυση και η κατακόρυφη μεταφορά των ρύπων να γίνεται με πολύ βραδύτερους ρυθμούς. Από την άλλη μεριά, οι αντίστοιχοι ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί είναι μεγαλύτερης χωρικής και χρονικής κλίμακας, με αποτέλεσμα τα φαινόμενα να επηρεάζουν ευρύτερες περιοχές της γης [6].

#### 5.4 Χρόνος Παραμονής Ρύπων στην Ατμόσφαιρα

Στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζουμε τους χαρακτηριστικούς χρόνους τους οποίους οι διάφορες χημικές ουσίες παραμένουν στην ατμόσφαιρα. Για τον λόγο αυτό ορίζονται διάφορες παράμετροι, όπως ο χρόνος παραμονής και ο χρόνος ημιζωής, οι οποίες αποτελούν ένα μέτρο του μέσου χρόνου τον οποίο ένα αντιπροσωπευτικό μόριο μιας συγκεκριμένης ουσίας θα παραμείνει στην ατμόσφαιρα προτού απομακρυνθεί από φυσικές ή χημικές διεργασίες. Οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην ατμόσφαιρα επηρεάζονται από τεσσάρων ειδών διεργασίες [53]:

- Εκπομπές: Οι ρύποι εκπέμπονται συνεχώς από μια ποικιλία πηγών ρύπανσης, τόσο ανθρωπογενών όσο και φυσικών.
- Χημικούς μετασχηματισμούς: Οι χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα μπορούν να οδηγήσουν τόσο στο σχηματισμό όσο και στην απομάκρυνση ρύπων
- Διασπορά: Οι ρύποι μεταφέρονται μακριά από την πηγή από τον άνεμο ενώ υπεύθυνοι για την κατακόρυφη μεταφορά τους είναι οι τυρβώδεις στρόβιλοι.
- Απόθεση: Οι ρύποι τελικά αποτίθενται στην επιφάνεια της γης, με τη μορφή είτε της ξηρής είτε της υγρής απόθεσης, όπως αναφέρθηκε παρπάνω. Ο ρυθμός διαφυγής τους στο διάστημα θεωρείται αμελητέος.

Ο χρόνος παραμονής των ρύπων στην ατμόσφαιρα εξαρτάται κυρίως από τις φυσικές τους ιδιότητες και τη χημική τους δραστηριότητα [53]. Για τα σωματίδια μεγάλη σημασία έχει το μέγεθός τους, γιατί τα μεγάλα μεγέθους σωματίδια έχουν μεγάλες ταχύτητες βαρυντικής καθίζησης.

Επίσης τα στοιχεία που έχουν μεγάλη χημική δραστηριότητα (π.χ. NO) και/ή έχουν μεγάλη διαλυτότητα στο νερό (π.χ. NH<sub>3</sub>) απομακρύνονται σχετικά γρήγορα και έχουν χρόνους παραμονής λίγων ωρών μέχρι 1 εβδομάδα. Σωματίδια τα οποία έχουν μέγεθος μικρότερο από 1 μm ή είναι δυσδιάλυτα στο νερό (π.χ. Pb, Hg) έχουν χρόνους παραμονής σημαντικά μεγαλύτερους της μίας εβδομάδας. Στον Πίνακα που ακολουθεί υπάρχουν οι μέσοι χρόνοι παραμονής στην ατμόσφαιρα διαφόρων ουσιών

Πίνακα 5.1: Μέσοι χρόνοι παραμονής στην ατμόσφαιρα διαφόρων ουσιών – ρύπων

Ουσία – Ρύπος	Χρόνος Παραμονής
NO	4 -5 ημέρες
NO <sub>2</sub>	2-8 ημέρες
H <sub>2</sub> S	0,08-2 ημέρες
SO <sub>2</sub>	0,01-7 ημέρες
CO	0,9-2,7 έτη
CO <sub>2</sub>	2-10 έτη
CH <sub>4</sub>	1,5-2 έτη



## 5.5 Κριτήρια Εγκλωβισμού και Διασποράς Αερίων Ρύπων

Όταν η ταχύτητα του αέρα που περνά πάνω από μία συνεχή πηγή εκπομπής ρύπων είναι μικρή [53], [66], τότε οι συγκεντρώσεις των ρύπων στις αέριες μάζες που κινούνται κατά τη διεύθυνση του ανέμου είναι πολύ υψηλότερες από ότι θα ήταν, εάν η ταχύτητα του αέρα ήταν μεγαλύτερη. Εάν σε ήδη ρυπασμένο αέρα προστίθενται επιπλέον ρύποι, τότε η συγκέντρωση τους θα αυξάνεται. Γενικά η συγκέντρωση των ρύπων σε μία περιοχή εξαρτάται από τον αερισμό της περιοχής και βεβαίως από το πλήθος και το μέγεθος των πηγών ρύπανσης. Οι συνθήκες αερισμού μίας περιοχής εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα βαρομετρικά συστήματα που επικρατούν.

Ετσι λοιπόν, όταν επικρατεί ένα σύστημα χαμηλών πιέσεων, ο αέρας στρέφει γενικά και κινείται προς το κέντρο του συστήματος λόγω της αυξανόμενης τριβής κοντά στο έδαφος. Αυτή η σύγκλιση των αερίων μαζών έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ανοδικών ρευμάτων του αέρα κοντά στο κέντρο του συστήματος. Παρά το γεγονός ότι η ταχύτητα του ανέμου στο κέντρο του συστήματος είναι χαμηλή, σε μεγαλύτερες αποστάσεις έχουμε σχετικά υψηλές ταχύτητες και σαν αποτέλεσμα ικανοποιητικές συνθήκες αερισμού. Τα συστήματα χαμηλών πιέσεων συνήθως έχουν μικρή γεωγραφική έκταση, κινούνται γρήγορα και παραμένουν στην ίδια περιοχή, με αναλλοίωτα τα χαρακτηριστικά τους, για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα.

Συνήθως συνοδεύονται με νεφώσεις που μπορεί να καταλήξουν σε βροχοπτώσεις. Λόγω των νεφώσεων η ευστάθεια της ατμόσφαιρας δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές από μέρα σε μέρα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις ανοδικές κινήσεις του αέρα στο κέντρο του συστήματος και τις σχετικά υψηλές ταχύτητες του ανέμου στην περιφέρεια οδηγεί σε συνθήκες καλού αερισμού όταν σε μία περιοχή επικρατεί σύστημα χαμηλών πιέσεων.

Η συμπεριφορά των αερίων μαζών είναι αντίθετη όταν σε μία περιοχή επικρατούν υψηλές πιέσεις. Τα συστήματα υψηλών πιέσεων, συνήθως κινούνται αργά και καλύπτουν μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Η ροή του ανέμου έχει κατεύθυνση από το κέντρο του συστήματος προς την περιφέρεια και σαν συνέπεια στο κέντρο του συστήματος εμφανίζονται καθοδικοί άνεμοι. Λόγω των καθοδικών κινήσεων του αέρα εμφανίζονται θερμοκρασιακές αναστροφές κατάπτωσης.

Επίσης, επειδή τα υψηλά βαρομετρικά συστήματα συνοδεύονται συνήθως από ανέφελο ουρανό, είναι συχνή η εμφάνιση θερμοκρασιακών αναστροφών ακτινοβολίας κατά τις νυκτερινές και πρώτες πρωϊνές ώρες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό και με τις χαμηλές ταχύτητες του ανέμου, όταν σε μία περιοχή επικρατούν υψηλές πιέσεις, οδηγεί σε συνθήκες που δεν ευνοούν τον αερισμό της περιοχής.

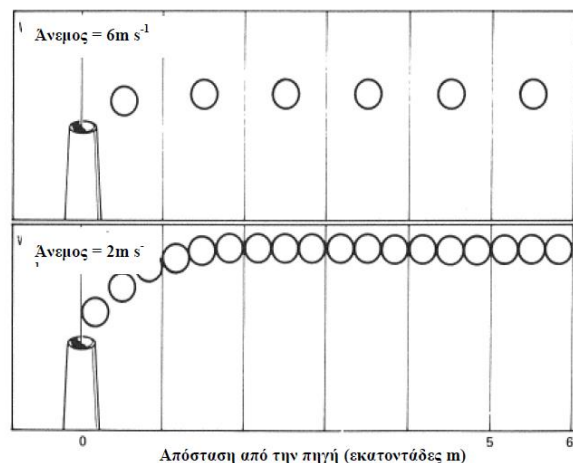
## 5.6 Η σημασία του ανέμου

Ο άνεμος είναι μέγεθος διανυσματικό και μπορεί να αναλυθεί σε τρεις Συνιστώσες [53]. Ετσι, αν θεωρήσουμε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, το διάνυσμα του ανέμου αναλύεται σε τρεις συνιστώσες, δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη. Από τις τρεις αυτές συνιστώσες σημαντικότερες για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι οι δύο πρώτες, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα (η οποία είναι συνήθως μία τάξη μεγέθους μικρότερη από τις δύο άλλες) εξετάζεται μόνο σε ειδικά προβλήματα διασποράς ρύπων.



Συνήθως όταν αναφερόμαστε στον άνεμο εννοούμε τις δύο οριζόντιες συνιστώσες. Έτσι τα δύο μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το διάνυσμα του ανέμου στο οριζόντιο επίπεδο είναι η διεύθυνση και η ταχύτητα. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων που εκπέμπονται από σημειακές πηγές (π.χ. μία καμινάδα) εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τη διεύθυνση του ανέμου.

Έτσι λοιπόν, μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου έστω και κατά 5% μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στις συγκεντρώσεις των ρύπων που παρατηρούνται σε έναν αποδέκτη, που βρίσκεται σε κάποια απόσταση από την πηγή προς την κατεύθυνση του ανέμου. Οι μεταβολές αυτές κυμαίνονται έως και 10% όταν η ατμόσφαιρα είναι ασταθής, έως 50% όταν η ατμόσφαιρα είναι ουδέτερη και έως 90% όταν η ατμόσφαιρα είναι ευσταθής. Η διεύθυνση του ανέμου συνήθως μεταβάλλεται με το ύψος, ιδιαίτερα κοντά στο έδαφος.



Σχήμα 5.4: Αραίωση των ρυπασμένων αερίων μαζών που εκλύονται από μία καμινάδα, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου.

### 5.7 Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις

Ατμοσφαιρικές αναταράξεις [53], [66] ονομάζουμε τις άκρως ακανόνιστες κινήσεις των αερίων μαζών κατά τις οποίες η ροή δεν είναι στρωτή, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλονται έντονα και ταχύτατα με τρόπο που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί τυχαίος. Αυτές οι ακανόνιστες κινήσεις του αέρα συμβαίνουν ταυτόχρονα με τη γενική ροή των αερίων μαζών και έτσι δημιουργούνται στρόβιλοι διαφόρων μεγεθών.

Η δημιουργία ατμοσφαιρικών στρόβιλων οφείλεται σε δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος αναφέρεται στη δημιουργία στρόβιλων όταν αέριες μάζες περάσουν πάνω από φυσικά εμπόδια. Ο μηχανισμός ονομάζεται τότε μηχανική ανατάραξη. Όταν θερμές αέριες μάζες ακολουθούν ανοδική πορεία και ταυτόχρονα ψυχρός αέρας βυθίζεται αργά προς το έδαφος, τότε δημιουργούνται στρόβιλοι και ο μηχανισμός ονομάζεται θερμική ανατάραξη.

Συγκριτικά, το μέγεθος των στρόβιλων που παράγονται κατά τη μηχανική ανατάραξη του αέρα είναι μικρότερο από το αντίστοιχο μέγεθος των στρόβιλων που παράγονται από θερμικές αναταράξεις.





**Διπλωματική Εργασία**

**Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων  
Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου**

**Σύνταξη: Γ. Καβαθάς  
Σελίδα: 41 από 223  
Έκδοση: 10/06/2020**

Η πλέον σημαντική διαδικασία ανάμειξης στην ατμόσφαιρα, στην οποία οφείλεται η διασπορά των ρύπων, ονομάζεται «διάχυση λόγω στροβίλων» ή «τυρβώδης διάχυση». Οι ατμοσφαιρικοί στρόβιλοι αποκόπτουν τη συνοχή των αερίων μαζών που περιέχουν ρύπους και προκαλούν την ανάμειξή τους με σχετικά καθαρό αέρα. Έτσι οι συγκεντρώσεις των ρύπων ελαττώνονται συνεχώς αφού η ίδια ποσότητα ρύπων κατανέμεται σε συνεχώς αυξανόμενο όγκο αέρα.

Αυτός ο μηχανισμός είναι πιο αποτελεσματικός όταν το μέγεθος των στροβίλων είναι παρόμοιο με το μέγεθος των ρυπασμένων αερίων μαζών. Όταν οι στρόβιλοι είναι μικρότεροι τότε επιδρούν μόνο στην εξωτερική επιφάνεια των ρυπασμένων αερίων μαζών. Τέλος, η επίδραση των στροβίλων μεγάλου μεγέθους περιορίζεται στη μεταφορά των ρυπασμένων αερίων μαζών χωρίς να διευκολύνεται σημαντικά η αραιώσή τους.



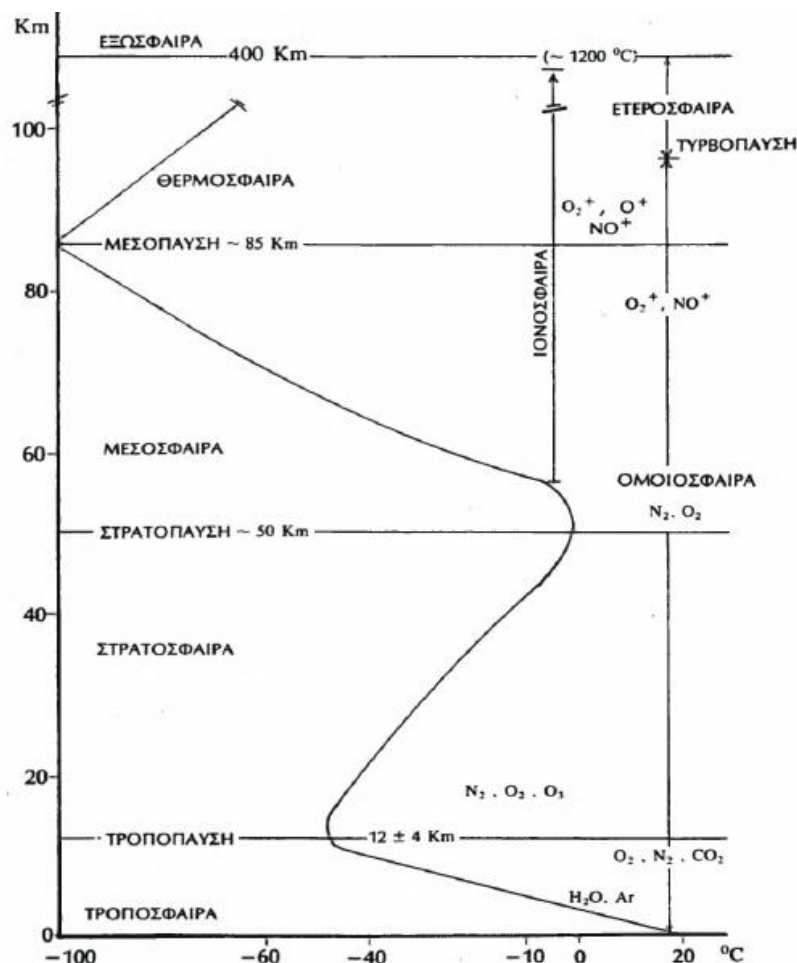
## 6. Δομή της Ατμόσφαιρας

Με τον όρο ατμόσφαιρα [16] της Γης εννοούμε το μείγμα των αερίων που περιβάλλει τη Γη με τη μορφή λεπτού στρώματος. Αυτό συγκρατείται λόγω της βαρύτητάς της, φτάνοντας πρακτικά σε ύψος 3.500 χιλιομέτρα. Το όριο ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα δεν είναι αυστηρά καθορισμένο. Το υψόμετρο των 122 χλμ. ορίζει το σημείο που τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα γίνονται αισθητά κατά τη διάρκεια της επανεισόδου στην ατμόσφαιρα. Η γραμμή Κάρμαν στα 100 χλμ. λαμβάνεται επίσης συχνά σαν το σύνορο ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το διάστημα.

Η σύσταση, η πυκνότητα, η πίεση και η θερμοκρασία του μίγματος αυτού μεταβάλλεται με το ύψος. Η ατμόσφαιρα αποτελεί τον προστατευτικό μανδύα της Γης. Απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής και κοσμικής ακτινοβολίας και έτσι προφυλάσσει τη ζωή στη Γη. Απορροφά επίσης την υπέρυθη ακτινοβολία του ηλίου καθώς και αυτή που εκπέμπεται από το έδαφος.

Με τον τρόπο αυτό η ατμόσφαιρα δρα ως ρυθμιστικός παράγοντας θερμότητας. Με βάση την μεταβολή της θερμοκρασίας - σε σχέση με το ύψος - η ατμόσφαιρα χωρίζεται σε διάφορα στρώματα. Στο Σχήμα 6.1 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της θερμοκρασίας και η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας.

Σχήμα 6.1: Διαστρωμάτωση της Ατμόσφαιρας και Θερμοκρασιακές Μεταβολές [7]





Η διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας είναι η εξής:

**Τροπόσφαιρα:** Η πρώτη ζώνη αέρα από την επιφάνεια της Γης με ύψος  $12 \pm 4$  km (Ποικίλει με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους). Χαρακτηρίζεται από την βαθμιαία ελάττωση της θερμοκρασίας με το ύψος. Η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει την τροπόσφαιρα από κάτω, δηλαδή θερμαίνεται πρώτα το έδαφος και στην συνέχεια ο αέρας. Ο θερμός αέρας ανέρχεται και εκτονώνεται αδιαβατικά. Η θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται γραμμικά με κλίση περίπου  $6^{\circ}\text{C}$  για κάθε χιλιόμετρο ύψους.

**Στρατόσφαιρα:** Η στρατόσφαιρα αρχίζει από την τροπόπαυση και εκτείνεται σε συνολικό ύψος 50 km. Στα πρώτα χιλιόμετρα της ζώνης αυτής η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και στη συνέχεια αυξάνει συνεχώς μέχρι την στρατόπαυση και φθάνει ως τους  $0^{\circ}\text{C}$ . Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στο στρώμα όζοντος ( $\text{O}_3$ ) που υπάρχει σε ενδιάμεσο ύψος 25 - 30 km. Η συγκέντρωση του στρατοσφαιρικού όζοντος φθάνει τα 10 ppm, ποσότητα που είναι ικανή να προστατεύσει τους ζώντες οργανισμούς από την υπεριώδη ακτινοβολία.

**Μεσόσφαιρα:** Αμέσως, μετά την στρατόπαυση συναντάται το στρώμα της μεσόσφαιρας. Σ' αυτή την ζώνη παρατηρείται πάλι ελάττωση της θερμοκρασίας. Η ελάττωση παρουσιάζει γραμμικότητα μέχρι το ύψος των 85 km που καταλήγει το στρώμα. Η μεσόσφαιρα είναι η πιο ψυχρή ζώνη της ατμόσφαιρας, γεγονός που οφείλεται στα κατακόρυφα ανοδικά στρώματα (όμοια με την τροπόσφαιρα), και στην ελάχιστη συγκέντρωση συστατικών που απορροφούν την ενέργεια της ακτινοβολίας.

**Θερμόσφαιρα:** Πάνω από την μεσόπαυση βρίσκεται η θερμόσφαιρα, στην οποία η θερμοκρασία αρχίζει πάλι να αυξάνεται με το ύψος. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται μέχρι τα 400 Km (θερμόπαυση), όπου επικρατούν θερμοκρασίες  $1.200^{\circ}\text{C}$  ή και μεγαλύτερες. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο στρώμα αυτό οφείλεται:

- στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μήκη κύματος κάτω των 200 nm,
- στην ενέργεια που εκλύεται από τις διάφορες εξώθερμες αντιδράσεις και
- στην έλλειψη διεργασιών απόψυξης.

**Εξώσφαιρα:** Η περιοχή πάνω από τη θερμόπαυση είναι ισόθερμη. Στα μεγάλα αυτά ύψη τα συστατικά αποκτούν πολλές φορές κινητική ενέργεια τόσο μεγάλη που υπερνικούν το βαρυτικό πεδίο της Γης και διαφεύγουν στο διάστημα.

Από φυσικοχημική θεώρηση η ατμόσφαιρα αποτελείται από τις εξής ζώνες:

- Ομοιόσφαιρα: Στην ομοιόσφαιρα, η σύσταση της ατμόσφαιρας είναι σταθερή μέχρι το ύψος των 100 Km από το έδαφος. Η σταθερή σύσταση οφείλεται στις διεργασίες τυρβώδους ανάμειξης των συστατικών.
- Ετερόσφαιρα: Ως ετερόσφαιρα χαρακτηρίζεται το στρώμα της ατμόσφαιρας πάνω από τα 100 Km. Λόγω της μοριακής διάχυσης που κυριαρχεί στα ύψη αυτά, παρουσιάζεται αναμοιομορφία στην σύσταση από μέρος σε μέρος.



## 7. Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (Α.Ο.Σ)

### 7.1 Γενικά

Το μέρος της τροπόσφαιρας που επηρεάζεται άμεσα από την επιφάνεια της γης και αντιδρά στις διάφορες επιφανειακές μεταβολές σε κλίμακα χρόνου της μιας ώρας ή λιγότερο, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (Α.Ο.Σ). Στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας υπάρχουν αρκετά υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας, ορμής και θερμότητας και συντηρούνται από τυρβώδεις κινήσεις που πολλές φορές έχουν την ίδια κλίμακα μήκους με το οριακό στρώμα. Τα αίτια των παραπάνω επιφανειακών μεταβολών, μπορεί να οφείλονται [8] σε:

- Οριζόντια και κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας.
- Δυνάμεις τριβής.
- Εξάτμιση
- Εκπομπή Ρύπων
- Μεταβολή της ροής λόγω του εδάφους (τραχύτητα)
- Ρυθμό θέρμανσης ή ψύξης της επιφάνειας.

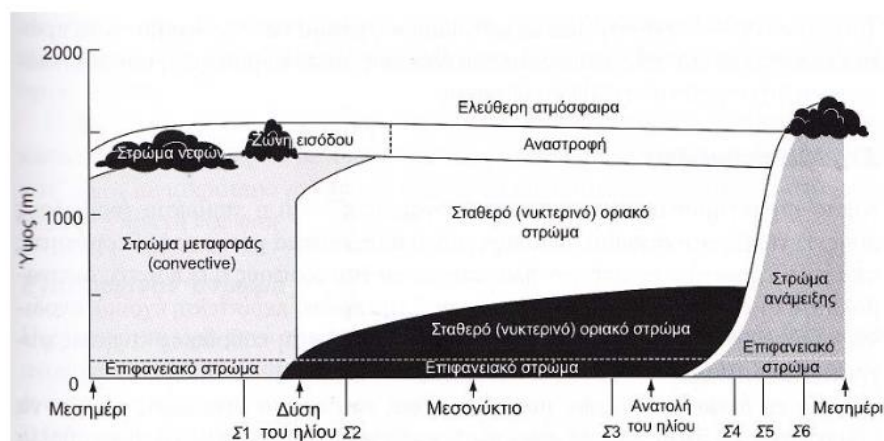
Όπως είναι γνωστό η κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds υπερβαίνεται κατά πολύ, αν θεωρηθεί ως χαρακτηριστική κλίμακα μήκους το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος σε μία τυπική μέρα. Για ύψος 1.000 m και για ταχύτητα 10 m/s, προκύπτει ότι:

$$Re = \frac{10 \cdot 10^3}{1.5 \cdot 10^{-5}} = 7 \cdot 10^8$$

Όπου επιβεβαιώνεται ο παραπάνω ισχυρισμός ότι το οριακό στρώμα είναι τυρβώδες. Το μοναδικό σημείο που μπορεί να ειπωθεί ότι η ροή είναι στρωτή, είναι τα τελευταία χιλιοστά πάνω από την επιφάνεια της γης [9].

Εξαιτίας των παραπάνω φαινομένων και της τρισδιάστατης και τυρβώδους φύσης του, το Α.Ο.Σ είναι χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενο. Αυτό εξηγεί την ιδιότητα του οριακού στρώματος να έχει μικρότερο πάχος σε περιοχές υψηλής πίεσης απότι σε περιοχές με χαμηλή πίεση. Ως εκ τούτου η δομή του οριακού στρώματος είναι διαφορετική το πρωί, σε σχέση με άλλες ώρες της ημέρας. Επίσης διαφέρει εάν η περιοχή είναι πεδινή ή παραθαλάσσια.

Σχήμα 7.1: Ημερήσια Μεταβολή του ΑΟΣ και Απεικόνιση των Τμημάτων του [10]





Οι πιο σημαντικές συνιστώσες της δομής ενός οριακού στρώματος στην ημερήσια πορεία του είναι:

- Στρώμα επιφανείας το χαμηλότερο 10%. Έχει περίπου δεκάδες μέτρα ύψος με άμεση επίδραση της επιφάνειας της γης. Υπάρχουν μεγάλες κατακόρυφες βαθμίδες ανέμου, θερμοκρασίας και υγρασίας.
- Αναμεμιγμένο στρώμα  $\sim 75\%$  του ασταθούς οριακού στρώματος. Παρατηρούνται μεγάλοι τυρβώδεις στρόβιλοι και ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας, ανέμου, υγρασίας και των ρύπων.
- Στρώμα εισροής, ευσταθής στρωμάτωση (αναστροφή θερμοκρασίας). Έχουμε εισροή αέρα από την ελεύθερη ατμόσφαιρα.
- Νυχτερινό οριακό στρώμα που είναι ευσταθές οριακό στρώμα (stable boundary layer)
- Αποκομμένο στρώμα.

## 7.2 Αναμεμιγμένο Στρώμα

Μισή ώρα μετά από την ανατολή του ηλίου λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη του αναμεμιγμένου στρώματος που οφείλεται στην θέρμανση του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία. Η στρωτή ροή του ευσταθούς νυχτερινού σέρα μετατρέπεται σε τυρβώδη. Κατά την αύξηση του υψομέτρου η διατήρηση της τύρβης μειώνεται εξαιτίας των διατμηματικών τάσεων και έτσι αυξάνεται η παραγωγή της.

Επίσης το πάχος του στρώματος ανάμιξης αυξάνει, λόγω της θέρμανσης του εδάφους που συνεχίζεται κατά την διάρκεια της ημέρας λόγω συναγωγής. Η τύρβη στο στρώμα αυτό εξαρτάται από τις κινήσεις του αέρα που οφείλονται στις ανωστικές δυνάμεις λόγω διαφοράς πυκνότητας. Οι δύο βασικές συνιστώσεις που δημιουργούν τις κινήσεις αυτές, είναι η μεταφορά θερμότητας από την θερμή επιφάνεια της γης και η ψύξη από ακτινοβολία από την κορυφή του στρώματος νεφών. Ο πρώτος μηχανισμός δημιουργεί τμήματα θερμού σέρα που ανυψώνονται από το έδαφος, ενώ ο δεύτερος τμήματα ψυχρού αέρα που κατεβαίνουν από την κορυφή των νεφών. Παρόλο που οι ανωστικές δυνάμεις αποτελούν το κύριο μηχανισμό γένεσης της τύρβης στο στρώμα αυτό, συνήθως υπάρχει και βαθμίδα ανέμου που συμμετέχει στην παραγωγή της τύρβης. Η τύρβη που παράγεται τείνει να αναμίξει θερμότητα, υδρατμούς και ορμή ενιαία στην κατακόρυφη διεύθυνση [9].

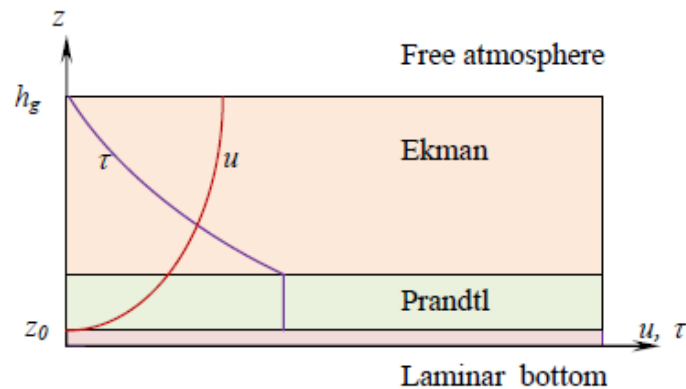
Οι κατανομές του θερμοκρασιακού δυναμικού στο μισό του αναμεμιγμένου στρώματος είναι σχεδόν αδιαβατικές. Οι ταχύτητες του ανέμου είναι υπογεωστροφικές και παρουσιάζουν διευθύνσεις που τέμνουν τις ισοβαρείς με μικρή γωνία προς την πλευρά των χαμηλών πιέσεων. Το μισό του αναμεμιγμένου στρώματος έχει σχεδόν σταθερή ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, ενώ οι ταχύτητες ελαττώνονται πλησιάζοντας το έδαφος.

Η αναλογία υδρατμών – αέρα ελαττώνεται με το ύψος ακόμη και στο κεντρικό τμήμα του αναμεμιγμένου στρώματος. Κάτι τέτοιο αντανακλά την εξάτμιση του εδάφους, την υγρασία της βλάστησης από κάτω και την εισροή του ξηρότερου αέρα από πάνω. Η ελάττωση της υγρασίας στην κορυφή του στρώματος είναι έντονη και πολλές φορές χρησιμοποιείται με τις κατανομές της δυναμικής θερμοκρασίας για να προσδιοριστεί η κορυφή του αναμεμιγμένου στρώματος από ραδιοβολίσεις [8].



### 7.3 Υποδιαίρεση Α.Ο.Σ – μια άλλη προσέγγιση

Όπως αναφέρθηκε, το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα είναι το κατώτερο μέρος της τροπόσφαιρας και η συμπεριφορά του άμεσα επηρεάζεται από την επαφή του με την επιφάνεια της γης. Γενικά, το Α.Ο.Σ. θα μπορούσε να χωριστεί σε 3 μέρη κατακόρυφα [50], όπως απεικονίζεται στο σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2: Υποδιαίρεση του Α.Ο.Σ., με απεικόνιση της κατακόρυφης κατανομής της οριζόντιας ταχύτητας και της διατμητικής τάσης

Το χαμηλότερο τμήμα είναι γνωστό ως γραμμικό υπόστρωμα πυθμένα με πάχος ίσο με το αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας  $z_0$ , που είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το ύψος του Α.Ο.Σ. [50]. Σε μοντέλο CFD, η επίδραση αυτού του στρώματος στην ροή του ανέμου περιγράφεται με τις συναρτήσεις τοίχου όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 17 – Οριακές Συνθήκες Εργασίας.

Το παραπάνω από το  $z_0$  στρώμα, είναι το Prandtl ή επιφανειακό στρώμα όπου η τύρβη είναι πλήρως ανεπτυγμένη και η κατακόρυφη έκτασή της μπορεί να κυμαίνεται από 20 έως 100 μέτρα, ανάλογα με τις θερμικές στρωματοποιήσεις του αέρα [50].

Πάνω από το στρώμα Prandtl είναι το λεγόμενο στρώμα Ekman, το οποίο μπορεί να φτάσει σε ύψος που υπερβαίνει το 1000 m, ανάλογα με τη σταθερότητα του αέρα, την παράμετρο Coriolis και το ύψος τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους [50]. Πάνω από το στρώμα Ekman είναι η ελεύθερη ατμόσφαιρα, όπου ο άνεμος είναι περίπου γεωστροφικός (ο άνεμος που προκύπτει ως αποτέλεσμα της τέλει ισορροπίας μεταξύ των δυνάμεων βαροβαθμίδας και Coriolis), η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας εδάφους έχει εξαφανιστεί και η τύρβη ροής είναι σχεδόν αμελητέα.

### 7.4 Ατμοσφαιρική Θερμοβαθμίδα

Ως ατμοσφαιρική θερμοβαθμίδα (lapse rate) [47], ορίζουμε την αρνητική παράγωγο της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας ως προς το ύψος  $z$ . Όπως είναι γνωστό η θερμοκρασία στην τροπόσφαιρα μειώνεται με το ύψος. Μερικές φορές όμως, στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα κοντά στο έδαφος, ή και σε άλλα ύψη, η θερμοκρασία αντί να μειώνεται, είτε παραμένει σταθερή, είτε αυξάνεται με το ύψος για μικρές σχετικά κατακόρυφες αποστάσεις. Η αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας με το ύψος, ή η μηδενική μεταβολή της ονομάζεται θερμοκρασιακή αναστροφή. Μαθηματικά, η ατμοσφαιρική θερμοβαθμίδα συμβολίζεται ως εξής:

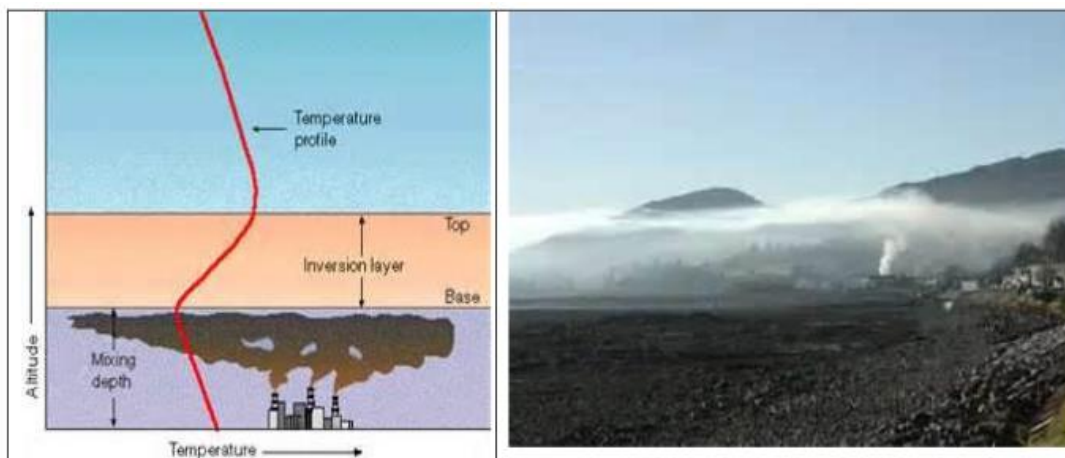


$$-\frac{dT}{dz} = \gamma \quad 7.1$$

Από την σχέση αυτή παρατηρούμε ότι όταν η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος, πράγμα που συνήθως συμβαίνει, έχουμε θετική ατμοσφαιρική θερμοβαθμίδα. Στην περίπτωση της θερμοκρασιακής αναστροφής, η ατμοσφαιρική θερμοβαθμίδα είναι αρνητική ή μηδενική.

### 7.5 Θερμοκρασιακή Αναστροφή

Η θερμοκρασία στην τροπόσφαιρα μειώνεται με το ύψος. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως κατά τις οποίες εμφανίζεται το αντίστροφο, δηλαδή η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος, εμφανίζεται δηλαδή θερμοκρασιακή αναστροφή (αρνητική ή μηδενική ατμοσφαιρική θερμοβαθμίδα). Πρόκειται για μία ακραία περίπτωση ευσταθούς ατμόσφαιρας. Η θερμοβαθμίδα του περιβάλλοντος είναι, στην περίπτωση αυτή, σημαντικά μικρότερη από αυτή του αέρα, με αποτέλεσμα να είναι δυσχερέστατη η ανάπτυξη κατακόρυφης κίνησης. Η σταθερότητα που προκαλεί η αναστροφή, έχει σαν αποτέλεσμα να παγιδεύεται ο αέρας μεταξύ του εδάφους και του ύψους αναστροφής, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων. Αυτό εξηγεί γιατί ο σχηματισμός των αναστροφών έχει ιδιαίτερη σημασία σε θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης [47].



Σχήμα 7.3 [48]: (αριστερό σχήμα) Κατακόρυφη δομή της θερμοκρασίας αέρα, στην οποία παρατηρείται ανυψούμενη θερμοκρασιακή αναστροφή. Το στρώμα αναστροφής λειτουργεί ως εμπόδιο για την κατακόρυφη διάδοση των αερίων ρύπων, (δεξιά φωτογραφία) θερμοκρασιακή αναστροφή στο Lochcarron της Σκωτίας (2006).

Οι αναστροφές προκαλούνται από διάφορα αίτια, ανάλογα με τα οποία και τις ταξινομούμε. Οι κατηγορίες αναστροφών περιγράφονται στη συνέχεια [47]:

Οι αναστροφές ακτινοβολίας, προκαλούνται κυρίως τις χειμερινές μέρες όταν επικρατεί άπνοια και ο ουρανός είναι σχετικά καθαρός, λόγω της ψύξης της επιφάνειας του εδάφους με ακτινοβολία. Η συγκεκριμένη διεργασία μπορεί να αυτοτροφοδοτηθεί υπό συνθήκες ήπιου ανέμου, όπου η τύρβη μεταφέρει ποσά θερμότητας από υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα, περιορίζοντας έτσι την ψύξη του εδάφους. Αν όμως σχηματιστεί αναστροφή, η δημιουργούμενη αντίσταση στις κατακόρυφες κινήσεις περιορίζει την τύρβη. Έτσι το έδαφος ψύχεται περαιτέρω, με αποτέλεσμα να ενισχύεται



η αναστροφή. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να σχηματιστεί ομίχλη στο τμήμα κάτω από το σημείο αναστροφής.

Ένας άλλος τύπος αναστροφής, συνήθης σε πολλές υποτροπικές περιοχές του πλανήτη, είναι η λεγόμενη αληγής ή αντικυκλωνική αναστροφή. Αυτή οφείλεται στο ότι ο άνεμος στις υποτροπικές περιοχές είναι καθοδικός. Κατά την κάθοδό του θερμαίνεται αδιαβατικά με αποτέλεσμα να γίνει κάποια στιγμή θερμότερος σε σχέση με τα χαμηλά στρώματα αέρα. Η αντικυκλωνική αναστροφή έχει μεγάλη εμβύθιση. Εμφανίζεται σε ύψη από 400 m έως και 2 km, ανάλογα με την περιοχή.

Πολλές υποτροπικές μεγαλουπόλεις εμφανίζουν έντονη ατμοσφαιρική ρύπανση, εξ αιτίας της αντικυκλωνικής αναστροφής. Το πρόβλημα της ρύπανσης ενισχύεται περισσότερο όταν η αστική περιοχή περιβάλλεται από βουνά, τα οποία εμποδίζουν την οριζόντια μεταφορά των ρύπων. Ανάλογες καταστάσεις μπορούν να δημιουργήσουν τα έμμονα αντικυκλωνικά συστήματα πάνω από μία περιοχή.

Άλλα είδη αναστροφών είναι:

- Αναστροφή θερμής μεταφοράς: Προκαλείται όταν θερμή αέρια μάζα περάσει, κατά την οριζόντια κίνηση της, πάνω από ψυχρότερη περιοχή. Τότε τα στρώματα αέρα κοντά στο έδαφος ψύχονται περισσότερο σε σχέση με τα υπερκείμενα στρώματα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αναστροφής.
- Αναστροφή χιονοσκεπούς εδάφους: Όταν το έδαφος καλύπτεται από χιόνι, τότε αφαιρούνται ποσά θερμότητας από τα χαμηλά στρώματα του αέρα, ως λανθάνουσα θερμότητα για την τήξη του χιονιού. Έτσι τα χαμηλά στρώματα ψύχονται περισσότερο από τα υπερκείμενα και δημιουργείται η αναστροφή.
- Αναστροφή ορογραφίας: Δημιουργούνται σε κοιλάδες, κατά την κάθοδο ψυχρών αερίων μαζών από τις υψηλότερες περιοχές που τις περιβάλλουν.
- Μετωπικές αναστροφές: Εκδηλώνονται στις μετωπικές επιφάνειες, όπου ο θερμός αέρας ανεβαίνει πάνω από σφήνα ψυχρού αέρα. Αν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο αερίων μαζών είναι μεγάλη, τότε η θερμοκρασιακή ασυνέχεια εξελίσσεται σε θερμοκρασιακή αναστροφή.
- Δυναμικές αναστροφές: Εκδηλώνονται στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, σε περιοχές που ο άνεμος έχει πολύ υψηλές ταχύτητες.

## 7.6 Κλάσεις Ευστάθειας Α.Ο.Σ.

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 5, η διασπορά των αερίων ρύπων όταν αφήνουν την καμινάδα εξαρτάται σημαντικά από την ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Για τον καθορισμό της κατηγορίας ευστάθειας, η πιο ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Pasquill (Pasquill 1961) και ελαφρώς τροποποιήθηκε από τον Turner.

Έτσι μετά από συστηματικές συσχετίσεις που έχουν αναπτυχθεί μεταξύ μετεωρολογικών μετρήσεων ρουτίνας (ταχύτητα ανέμου στα 10 m από το έδαφος, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, νέφωση) και κατάσταση ευστάθειας ατμόσφαιρας, έχει προταθεί από τον Pasquill ο ακόλουθος Πίνακας 7.1 κατηγοριών ευστάθειας.





Πίνακας 7.1: Μετεωρολογικές Συνθήκες Καθορισμού Κατηγοριών Ευστάθειας κατά Pasquill [15], [29].

Επιφανειακός Άνεμος (m/s)	Ημερήσια Ηλιοφάνεια			Νυχτερινές Συνθήκες	
	Ισχυρή	Μέση	Ελαφρά	Ελαφριά Νέφωση ή >4/8 χαμηλά νέφη	Νέφωση ++ <=3/8
<2	A	A - B	B	G	G
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 4	B	B - C	C	D	E
4 - 6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

++ Ορίζεται ως το τμήμα εκείνο του ουρανού πάνω από τον τοπικό ορίζοντα που καλύπεται από σύννεφα.

Η ισχυρή ηλιοφάνεια αντιστοιχεί σε ηλιακή ακτινοβολία με γωνία πρόσπτωσης  $60^\circ$  ή και μεγαλύτερη, σε ουρανό χωρίς σύννεφα ενώ η ελαφριά ηλιοφάνεια αντιστοιχεί σε γωνία μεταξύ  $15^\circ$  και  $35^\circ$ . Η ύπαρξη νέφωσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και κατά τη διάρκεια της ημέρας διότι μειώνεται το ποσό της εισερχόμενης ακτινοβολίας.

Η ως άνω μέθοδος προσδιορισμού των καταστάσεων ευστάθειας αποδίδει ικανοποιητικά την τυρβώδη κατάσταση της ατμόσφαιρας σε ανοικτές και ημιαστικές περιοχές ενώ έχει λιγότερο ικανοποιητική απόδοση στις αστικές περιοχές, λόγω του φαινομένου της "θερμικής νησίδας".

Πίνακας 7.2: Περιγραφή Κατηγοριών Ευστάθειας κατά Pasquill [29].

Κατηγορίες Ευστάθειας	Περιγραφή
A	Εξαιρετικά Ευσταθής Κατάσταση
B	Ενδιάμεσα Ασταθής Κατάσταση
C	Ελαφρά Ασταθής Κατάσταση
D	Ουδέτερη +
E	Ελαφρά Ευσταθής Κατάσταση
F	Ευσταθής Κατάσταση
G	Πολύ Ευσταθής Κατάσταση

+ Εφαρμόσιμη για βαριά νέφωση, νύχτα ή μέρα.

Για περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες Pasquill έξω από την περιοχή ισχύος τους, όπως η πολύπλοκη μορφολογία εδάφους, αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 km, ενεργά ύψη εκπομπών μεγαλύτερα των 100 m, τότε κρίνονται αναγκαίες άμεσες μετρήσεις τύρβης ή θεωρητικές επεκτάσεις [12].



Στον ακόλουθο Πίνακα 7.3 φαίνονται οι διαφορές των κλάσεων ευστάθειας κατά Zanetti.

Πίνακας 7.3: Σύγκριση Κλάσεων Ευστάθειας κατά Zanetti [15], [55], [56].

Κλάση	Περίοδος 24 h	Βαθμίδα Θερμοκρασίας (°C/m)	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Ύψος Αναστροφής (m)
A	Ημέρα	-0,02	< 2,0	700
B	Ημέρα	-0,018	2,5 - 4,0	600
C	Ημέρα	-0,016	3,0 - 6,0	500
D	Ημέρα - Νύχτα	-0,01	4,0 - 5,0	500
E	Νύχτα	0,005	2,0 - 6,0	200
F	Νύχτα	0,028	< 2,0	200

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι κυρίαρχο ρόλο στη συσσώρευση των ρύπων παίζει το ύψος της θερμοκρασιακής αναστροφής, δεδομένου ότι το επίπεδο έναρξης μιας χαμηλής αναστροφής λειτουργεί ως οροφή στην οποία ανακλάται το πλούμιο των ρύπων.

Για ασταθείς και ουδέτερες συνθήκες θεωρείται ότι στα αρχικά στάδια ενός ανωστικού πλουμίου, η εσωτερική τύρβη επικρατεί της τύρβης του περιβάλλοντος, αλλά από κάποιο σημείο και μετά η τύρβης του περιβάλλοντος κυριαρχεί της εσωτερικής και η ανύψωση σταματά [60].

Τέλος στον επόμενο Πίνακα 7.4 φαίνονται οι διαφορές των κλάσεων ευστάθειας ως προς την πιθανή αλλαγή κατεύθυνσης του ανέμου, καθώς και την παραγόμενη κάθετη και οριζόντια διάχυση. Οι ασταθείς συνθήκες είναι οι χειρότερες για την διασπορά των ρυπαντών, γιατί περιλαμβάνουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες αλλαγής κατεύθυνσης του ανέμου.

Για τον ανθρώπινο πληθυσμό είναι χειρότερες οι συνθήκες A και F. Στην περίπτωση κλάσης A, έχουμε υψηλή κατακόρυφη διάχυση με αποτέλεσμα οι μέγιστες συγκεντρώσεις ρύπων να είναι κοντά στις πηγές.

Για την κλάση F λόγω έλλειψης κατακόρυφης και παράπλευρης διάχυσης, έχουμε ισχυρή οριζόντια διάχυση. Άρα οι ρύποι ταξιδεύουν πιο μακριά σε σχέση με την περίπτωση A και επομένως οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τις πηγές εκπομπής [8].



Πίνακας 7.4: Σύγκριση Κλάσεων Ευστάθειας με βάση την Κατεύθυνση Ανέμου από τις Παραγόμενες Διαχύσεις [15]

Κλάση	Αλλαγή Κατεύθυνσης Ανέμου	Παραγόμενη Κάθετη Διάχυση	Παραγόμενη Πλευρική Διάχυση
A	$>135^\circ$	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή
B	$105^\circ - 135^\circ$	Υψηλή	Υψηλή
C	$75^\circ - 105^\circ$	Μέτρια - Υψηλή	Μέτρια - Υψηλή
D	$45^\circ - 75^\circ$	Μέτρια - Χαμηλή	Μέτρια - Χαμηλή
E	$15^\circ - 45^\circ$	Χαμηλή	Χαμηλή
F	$<15^\circ$	Πολύ Χαμηλή	Πολύ Χαμηλή
G	$< 15^\circ$	Πολύ Χαμηλή	Υψηλή

### 7.7 Επίδραση ευστάθειας - αναστροφών στην ανάπτυξη πλουμιών

Η ευστάθεια της ατμόσφαιρας και οι θερμοκρασιακές αναστροφές είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη διασπορά των αερίων ρύπων. Υπάρχουν διαφορές στην ανάπτυξη των πλουμιών που εξαρτώνται μεταξύ άλλων από τη θερμοβαθμίδα του πλουμίου καθώς και από τη θερμοβαθμίδα του περιβάλλοντος. Οι αναταρακτικές κινήσεις του αέρα (τυρβώδεις στρόβιλοι), που είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις δυνάμεις τριβής, είναι υπεύθυνες για τη διαπλάτυνση του πλουμίου, μέσω διάχυσης, με τελικό αποτέλεσμα την αραιώση των ρύπων.

Η μεταφορά των ρύπων στην κατακόρυφη διεύθυνση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ευστάθεια της ατμόσφαιρας, που προσδιορίζεται από την κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας (θερμοβαθμίδα) και η οποία επηρεάζει τη δημιουργία και την ένταση τυρβωδών αναταράξεων.

Συνθήκες ευστάθειας, δηλαδή σε περίπτωση που η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος ή μειώνεται λιγότερο από περίπου  $10^\circ\text{K}$  ανά χιλιόμετρο (θερμοκρασιακή αναστροφή), εμποδίζουν τις ανοδικές κινήσεις και την κατακόρυφη διάχυση, με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό και την αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων.

Αντίθετα, σε περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας με το ύψος κατά περισσότερο από περίπου  $10^\circ\text{K}$  ανά χιλιόμετρο, δηλαδή σε συνθήκες αστάθειας, οι τυρβώδεις αναταράξεις ενισχύονται και η κάθετη ανάμειξη των ρύπων ευνοείται. Η διάχυση των ρύπων γίνεται μέσα στο στρώμα ανάμειξης μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους, το ύψος ανάμειξης.

Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις πλουμιών [49]:

#### Ελικοειδής διασπορά (fanning)

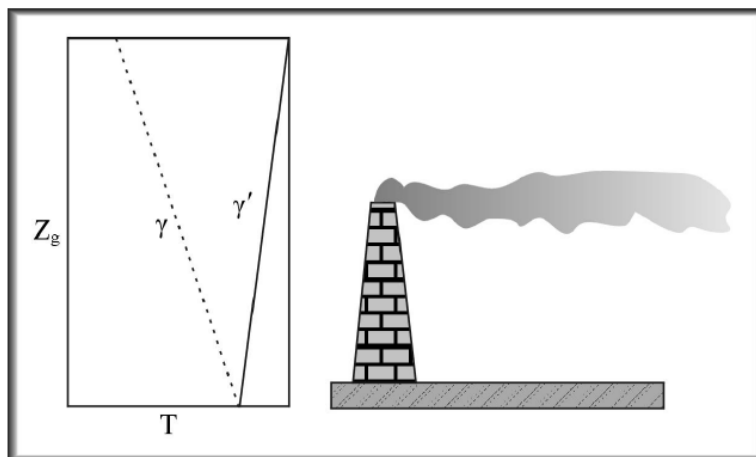
Η ελικοειδής διασπορά παίρνει το όνομά της από το ότι η μορφή του πλουμίου θυμίζει τα απόνερα έλικας πλοίου. Η θερμοβαθμίδα του πλουμίου  $\gamma$ , παριστάνεται με τη διακεκομένη γραμμή, ενώ η θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας  $\gamma'$ , με την έντονη συνεχή. Βλέπουμε ότι  $\gamma' < \gamma$  και μάλιστα να έχει δημιουργηθεί θερμοκρασιακή αναστροφή η



οποία ξεκινάει σχεδόν από την επιφάνεια του εδάφους, άρα οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα ευσταθείς. Για το λόγο αυτό τα στοιχεία του πλουμίου δεν έχουν τη δυνατότητα να μετατοπιστούν πολύ από το ύψος εκπομπής τους.

Έτσι η κατακόρυφη διασπορά του πλουμίου είναι ελάχιστη, πρακτικά αμελητέα, ενώ η οριζόντια διασπορά του ιδιαίτερα σημαντική. Η ελικοειδής διασπορά εμφανίζεται κυρίως τη νύχτα, κάτω από συνθήκες ιδιαίτερης ευστάθειας, με ισχυρή θερμοκρασιακή αναστροφή, ενώ οι άνεμοι είναι ασθενείς και μεταβλητών διευθύνσεων.

Η ισχυρή ευστάθεια δεν επιτρέπει την ανάπτυξη κατακόρυφης τύρβης και διάχυσης, ενώ οι μεταβλητές διευθύνσεις των ανέμων δημιουργούν τους «μαιάνδρους» του πλουμίου. Αν ο άνεμος είναι σταθερής διεύθυνσης, τότε η νυκτερινή οριζόντια διασπορά είναι μικρής έκτασης και το πλούμιο έχει σχήμα ταινιών, το μήκος των οποίων μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο, δεδομένου ότι οι ρύποι παραμένουν συγκεντρωμένοι μέσα σ' αυτές.



Σχήμα 7.4: Ελικοειδής διασπορά

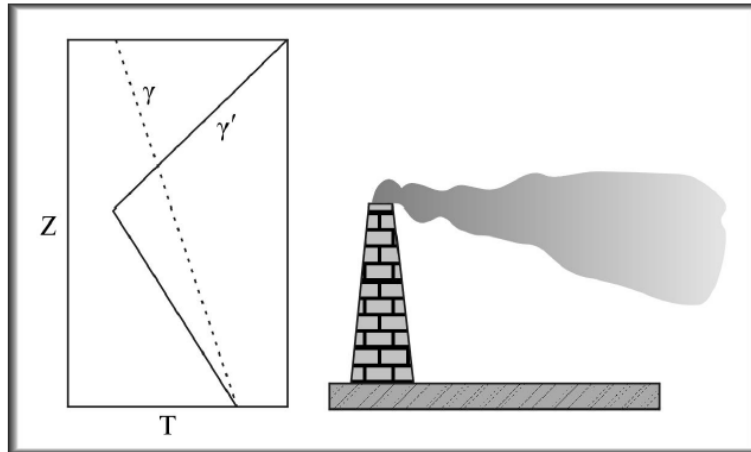
#### Καπνισμός (fumigation)

Καπνισμός ονομάζεται ο τρόπος εξάπλωσης ενός πλουμίου όταν πάνω από το στρώμα ανάμειξης υπάρχει θερμοκρασιακή αναστροφή με χαμηλή βάση, ενώ κάτω από τη βάση η ανάμειξη των ρύπων είναι έντονη. Εμφανίζεται όταν το ύψος αναστροφής είναι περίπου ίσο με το ύψος εκπομπής των ρύπων. Στην περιοχή μεταξύ επιφάνειας εδάφους και ύψους αναστροφής - εκπομπής επικρατεί αστάθεια ( $\gamma' > \gamma$ ) ενώ μετά το ύψος εκπομπής, η αναστροφή σε συνδυασμό με το γεγονός ότι  $\gamma' < \gamma$ , δημιουργούν ευσταθείς συνθήκες.

Η κατάσταση αυτή συναντάται λίγο μετά την ανατολή του ήλιου, οπότε η νυκτερινή αναστροφή εξουδετερώνεται λόγω θέρμανσης του εδάφους και σταδιακά αντικαθίσταται από ένα ασταθές στρώμα το οποίο αναπτύσσεται μέχρι την κορυφή του πλουμίου. Μόλις το πλούμιο εισέρχεται στο ασταθές στρώμα, η τύρβη μεταφοράς προκαλεί την ανάμιξή του προς το έδαφος, ενώ η υπερκείμενη αναστροφή εμποδίζει την ανάμιξη προς τα επάνω. Ο καπνισμός είναι μεταβατικό φαινόμενο, αλλά έχει συχνά ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μέγιστων συγκεντρώσεων ρύπων στο έδαφος, για μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης της μισής ώρας), γιατί σταδιακά το ύψος αναστροφής



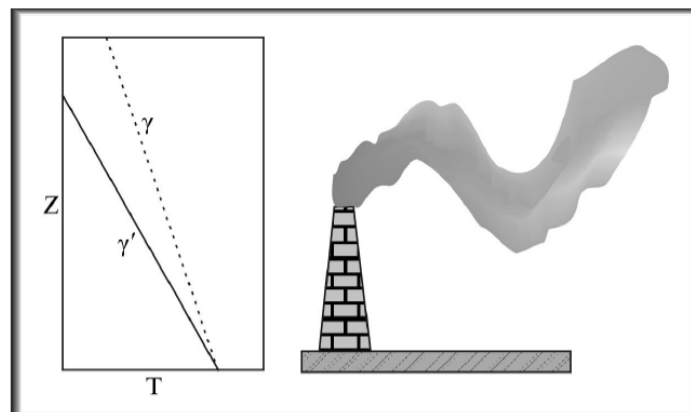
υπερβαίνει το ύψος εκπομπής. Τότε οι ρύποι διαχέονται σε μεγαλύτερα ύψη, μειώνονται οι συγκεντρώσεις στο έδαφος και παύει ο καπνισμός.



Σχήμα 7.5: Καπνισμός

#### Κατακόρυφος κυκλική διασπορά (looping)

Συμβαίνει κάτω υπό συνθήκες ιδιαίτερα ασταθείς όταν υπάρχουν έντονα θερμικά φαινόμενα, συνήθως το μεσημέρι ή το απόγευμα. Αυτές οι συνθήκες προκαλούν έντονη θερμική κυκλοφορία, υπό μορφή ανοδικών και καθοδικών κινήσεων σε όλη την έκταση του οριακού στρώματος. Οι ανοδικές και καθοδικές κινήσεις του αέρα συμπαρασύρουν τους ρύπους διαδοχικά προς τα επάνω και προς τα κάτω, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το χαρακτηριστικό αυτό σχήμα. Στιγμιαία ή βραχυπρόθεσμα, ο μηχανισμός αυτός μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των ρύπων σε αποστάσεις αρκετά κοντά στην πηγή.



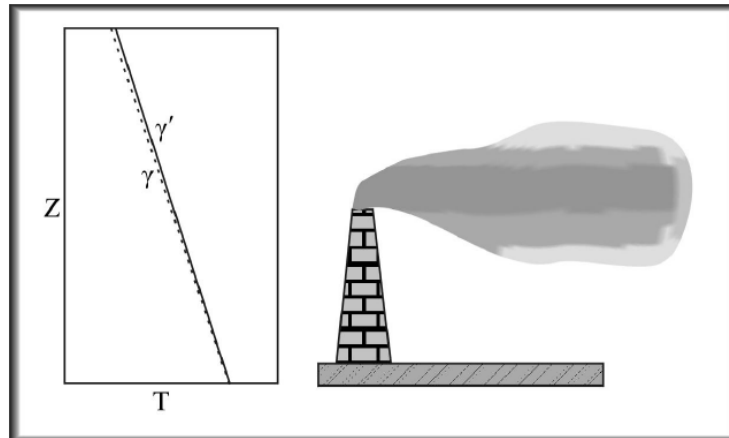
Σχήμα 7.6: Κατακόρυφος κυκλική διασπορά

#### Κωνική διασπορά (coning)

Όπως δηλώνει και το όνομα του μηχανισμού, το πλούμιο έχει κωνική μορφή, εκτεινόμενος το ίδιο τόσο στην κατακόρυφη, όσο και στην οριζόντια διάσταση. Η κατάσταση αυτή παρατηρείται συνήθως όταν υπάρχουν σύννεφα και άνεμος και η ατμόσφαιρα είναι ευσταθής. Αυτές οι καιρικές συνθήκες σχετίζονται συχνά με τη διέλευση καταιγίδων που οφείλονται σε κυκλώνες (βαρομετρικά χαμηλά) ή με τη



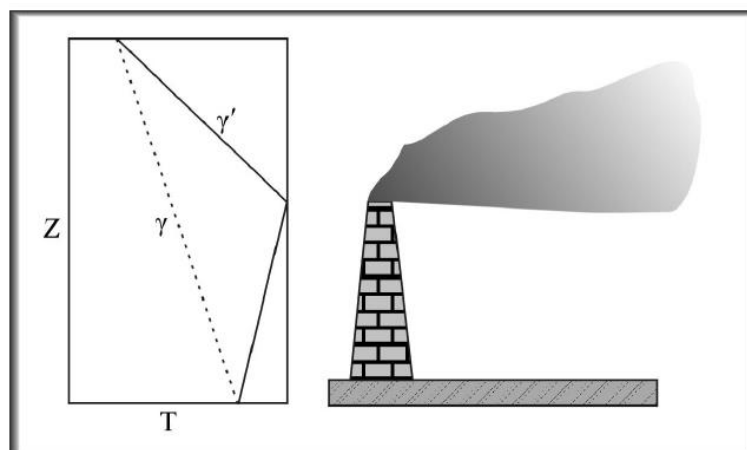
διέλευση μετώπων, επομένως μπορούν να συμβούν καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου.



Σχήμα 7.7: Κωνική διασπορά

#### Διασπορά υπέρ την αναστροφή (lofting)

Το πλούμιο παραμένει πάνω από το ύψος αναστροφής και πάνω από το σταθερό οριακό στρώμα. Αυτό συμβαίνει λίγο μετά τη μετάβαση από ασταθείς σε ευσταθείς συνθήκες, χρονικά κοντά στο ηλιοβασίλεμα. Η ισχυρή επιφανειακή αναστροφή εμποδίζει τους ρύπους να διαχυθούν κάτω από το ύψος αναστροφής, με αποτέλεσμα αυτοί να συγκεντρώνονται σε ένα λεπτό στρώμα επάνω από την αναστροφή. Το πάχος του πλουμίου επάνω από το ύψος αναστροφής εξαρτάται από την ένταση της τύρβης στην περιοχή αυτή. Έτσι το πλούμιο μπορεί να είναι ή λεπτό ή παχύ. Ανάλογα με το ύψος εκπομπής αλλά και το ύψος αναστροφής, η συνθήκη αυτή μπορεί να διατηρηθεί από μερικές ώρες έως και όλη τη νύχτα.



Σχήμα 7.8: Διασπορά υπέρ την αναστροφή

#### 7.8 Σημασία του Α.Ο.Σ.

Αν και το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα είναι ένα μικρό τμήμα της ατμόσφαιρας, εντούτις η σημασία του είναι σημαντική τόσο για τον άνθρωπο, όσο και για την ίδια την ύπαρξη της ζωής στον πλανήτη. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν πολλοί λόγοι μελέτης των φαινομένων που το διέπουν [8].



### Διπλωματική Εργασία

**Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων  
Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου**

**Σύνταξη: Γ. Καβαθάς  
Σελίδα: 55 από 223  
Έκδοση: 10/06/2020**

- Στο Α.Ο.Σ. λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα και επηρεάζεται άμεσα από την δομή του, αφού είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό των τιμών των συγκεντρώσεων των ρύπων και του ρυθμού της τυρβώδους ανάμειξης.
- Αποτελεί την μεγαλύτερη πηγή θερμικής ενέργειας στην ατμόσφαιρα ως μέσο εξισορρόπησης των συνεχών απωλειών προς το διάστημα.
- Έχει σημαντικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο, όπου οι υδρατμοί που προέρχονται από εξάτμιση με την είσοδό τους στο Α.Ο.Σ. σχηματίζουν τα νέφη.
- Η μικρή κλίμακας τύρβη, είναι υπεύθυνη για την κατανάλωση του 50% της κινητικής ενέργειας στο Α.Ο.Σ.
- Στο χαμηλότερο τμήμα του Α.Ο.Σ. συναντάμε τα αέρια τμήματα της βιόσφαιρας με συνέπεια η ανάπτυξη των περισσότερων οικοσυστημάτων συνδέεται με τις διεργασίες του Α.Ο.Σ.
- Η ανάπτυξη και η βελτιστοποίηση των μοντέλων για να προβλέπουν με μεγαλύτερη ακρίβεια, στηρίζεται στην μεγαλύτερη εκτίμηση και μοντελοποίηση των επιφανειακών δυνάμεων τριβής και της ανταλλαγής θερμότητας και υδρατμών στην επιφάνεια.



## 8. Μοντέλα Διασποράς Ρύπων

Τα κυριότερα μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [23] είναι τα ακόλουθα:

Μοντέλο "κουτιού" (Box Model): Το μοντέλο αυτό είναι το απλούστερο. Αναπτύσσεται σε ένα συγκεκριμένο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα σε μια γεωγραφική περιοχή που έχει το σχήμα ενός κουτιού. Προϋποθέτει ότι οι ρύποι στο εσωτερικό του κουτιού είναι κατανομημένοι ομοιογενώς και χρησιμοποιεί αυτή την υπόθεση για τον υπολογισμό του μέσου όρου των συγκεντρώσεων των ρύπων σε οποιοδήποτε σημείο εντός αυτού. Αν και χρήσιμο, το μοντέλο αυτό είναι πολύ περιορισμένο στην ικανότητά του να προβλεφθεί με ακρίβεια η διασπορά των αερίων ρύπων, γιατί η υπόθεση της ομοιογενούς κατανομής ρύπων είναι πολύ απλοϊκή [13].

Γκαουσιανό Μοντέλο (Gaussian Model): Το μοντέλο αυτό είναι ίσως το παλαιότερο (γύρω στο 1936) [22] και ίσως το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο. Υποθέτει ότι η διασπορά των αερίων ρύπων έχουν Gaussian κατανομή, πράγμα που σημαίνει ότι ο ρύπος διανομής έχει μια κανονική κατανομή πιθανοτήτων. Τα μοντέλα Gaussian πιο συχνά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της διασποράς συνεχών, ανωστικών πλουμίων. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της διασποράς των μη συνεχών πλουμίων (που ονομάζεται puff models). Ο πρωταρχικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στα Gaussian μοντέλα είναι ο «Generalized Dispersion Equation For A Continuous Point-Source Plume» [14]:

$$\langle c(x,y,z) \rangle = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_x} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\} \quad 8.1$$

Όπου,

C: συγκέντρωση σε μόνιμες συνθήκες στο σημείο (x,y,z), (mg/m<sup>3</sup>)

Q: ρυθμός εκπομπής, (mg/s)

σ<sub>y</sub>, σ<sub>z</sub>: οριζόντια και κατακόρυφη παράμετρος εξάπλωσης (m), που είναι παράμετροι της απόστασης x και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας.

U: μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας, (m/s)

y: οριζόντια απόσταση από τον κεντρικό άξονα του πλουμίου, (m)

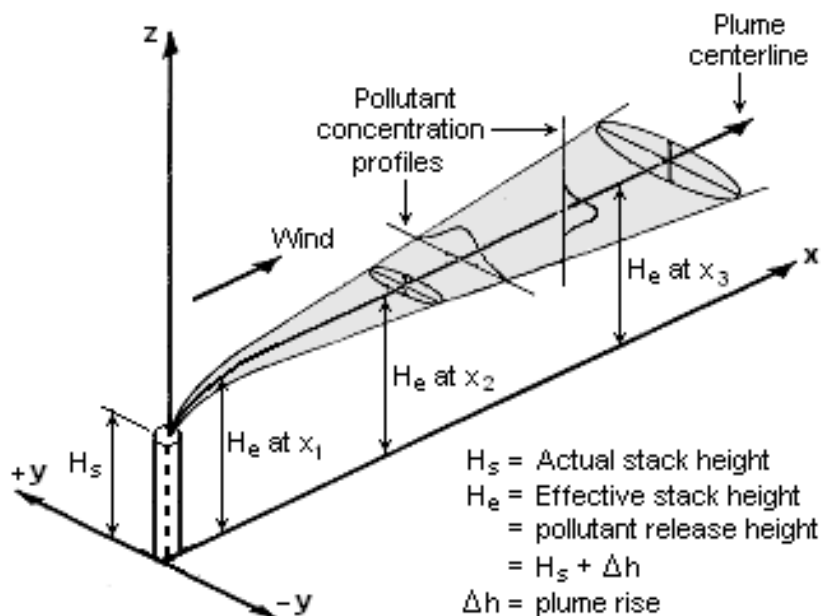
z: κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο του εδάφους, (m)

H: ενεργό ύψος καμινάδας (H = h + Δh), (m)

h: φυσικό ύψος καμινάδας, (m)

Δh: ανύψωση πλουμίου, (m) [1].





Σχήμα 8.1: Gaussian Plume [17]

Μοντέλο Lagrangian (Lagrangian Model): Το συγκεκριμένο μοντέλο ακολουθεί την κίνηση κάποιων σωματιδίων (parcels) των ρύπων καθώς αυτά κινούνται στην ατμόσφαιρα και μοντελοποιεί τη κίνηση τους ως μια διαδικασία τυχαίου περιπάτου (random walk). Στη συνέχεια υπολογίζει τη διασπορά των ρύπων με υπολογισμό των στατιστικών της πορείας ενός μεγάλου αριθμού των σωματιδίων (parcels) των ρύπων. Ένα μοντέλο Lagrangian χρησιμοποιεί ένα κινούμενο πλαίσιο αναφοράς καθώς τα σωματίδια (parcels) μετακινούνται από την αρχική θέση τους. Ένας παρατηρητής του Lagrangian μοντέλου κινείται μαζί με το πλούμιο. [18]

Μοντέλο Eulerian (Eulerian Model): Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι παρόμοιο με το μοντέλο Lagrangian, δεδομένου ότι ακολουθεί επίσης την κυκλοφορία ενός μεγάλου αριθμού σωματιδίων (parcels) καθώς μετακινούνται από την αρχική θέση τους. Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι ότι το Eulerian μοντέλο χρησιμοποιεί ένα σταθερό τρισδιάστατο Καρτεσιανό σύστημα αναφοράς και όχι ένα κινούμενο σύστημα αναφοράς [18].

Μοντέλα Πυκνού αερίου (Dense gas model): Είναι μοντέλα που προσομοιώνουν τη διασπορά πυκνών πλουμίων (πλούμια βαρύτερα από τον αέρα). Τα τρία πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα πυκνού αερίου (Dense gas model) είναι τα ακόλουθα:

- DEGADIS MODEL, που αναπτύχθηκε από τους Dr. Jerry Havens και Dr. Tom Spicer στο πανεπιστήμιο του Αρκάνσας υπό την προμήθεια των US Coast Guard and US EPA. [19]
- SLAB MODEL, που αναπτύχθηκε από το Lawrence Livermore National Laboratory χρηματοδοτούμενο από το αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας (US Department of Energy), την Αμερικανική Πολεμική Αεροπορία (US Air Force) και το American Petroleum Institute [20].
- HEGADAS MODEL αναπτύχθηκε από το τμήμα έρευνας της Shell Oil Company [21].



## 9. Αρχές διατήρησης – Θεμελιώδεις διαφορικές εξισώσεις

Η πολυπλοκότητα των διαφορικών εξισώσεων των φαινομένων μεταφοράς, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επίλυσή τους δεν είναι πάντα δυνατή σε κλειστή μορφή. Αυτό αντιμετωπίζεται με την βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων και σε συνδυασμό με ισχυρή υπολογιστική ισχύ, δίνεται η δυνατότητα επίλυσής τους

Οι διάφορες εξισώσεις που συναντώνται στην ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς, εκφράζουν απλώς μια αρχή διατήρησης για κάποια φυσική ποσότητα [28], [65].

Αρχή Διατήρησης. Σε ένα χώρο συντεταγμένων Euler (ακίνητος παρατηρητής των μεταβολών που συμβαίνουν σε όγκο ελέγχου) η αρχή διατήρησης για τη φυσική ποσότητα  $\Phi$ , θα έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned} \text{Συσσώρευση} + (\text{Εκροή} - \text{Εισροή}) \\ = \\ (\text{Παραγωγή} - \text{Κατανάλωση}) \end{aligned}$$

Οι όροι της διαφορικής εξίσωσης, συνεπώς, ορίζουν κάποια δράση (ανά μονάδα όγκου) με τρόπο ώστε το άθροισμα τους να συνεπάγεται ένα ισοζύγιο.

Φυσική Ποσότητα. Η φυσική ποσότητα που διατηρείται μπορεί να είναι η μάζα,  $m$ , το κλάσμα μάζας ( $\omega_j$ ) του συστατικού  $j$ , η ταχύτητα ( $u_j$ ) η ενέργεια  $\epsilon$ , η ενθαλπία ( $h$ ), η θερμοκρασία ( $T$ ).

Οι ανωτέρω φυσικές ποσότητες είναι εξαρτημένες μεταβλητές και η εξίσωση διατήρησης εκφράζει την ισορροπία των διάφορων παραγόντων που επηρεάζουν αυτή τη μεταβλητή. Συνήθως οι εξαρτημένες μεταβλητές στις εξισώσεις διατήρησης είναι ποσότητες ανοιγμένες στη μονάδα μάζας, π.χ. κλάσμα μάζας (μάζα συστατικού ως προς τη μάζα μείγματος), ταχύτητα (ορμή ανά μονάδα μάζας), ειδική ενθαλπία. Η θερμοκρασία, που χρησιμοποιείται συχνά ως εξαρτημένη μεταβλητή, δεν αποτελεί ανοιγμένη ποσότητα. Προκύπτει από τις πιο βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούν την ειδική ενθαλπία ή την ειδική εσωτερική ενέργεια ως εξαρτημένη μεταβλητή.

Για την αρχή διατήρησης μάζας το ισοζύγιο δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} &\text{Ρυθμός αύξησης της πυκνότητας} \\ &+ \\ &\text{Ρυθμός καθαρής εκροής μάζας στον όγκο ελέγχου} \\ &= \\ &\text{Μηδέν} \end{aligned}$$

Για ένα πεπερασμένο όγκο ελέγχου, η αρχή περιγράφεται σε Μορφή καρτεσιανών τανυστών [27], [38]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad 9.1$$



Για την αρχή διατήρησης ορμής το ισοζύγιο δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \text{Ρυθμός αύξησης της ορμής στη διεύθυνση } m \\ & + \\ & \text{Καθαρή εκροή ορμής στον όγκο ελέγχου} \\ & = \\ & \text{Καθαρή δύναμη που ασκείται στον όγκο ελέγχου} \end{aligned}$$

Για ένα πεπερασμένο όγκο ελέγχου, η αρχή, περιγράφεται σε Μορφή καρτεσιανών τανυστών [27], [38]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_m) = \frac{\partial}{\partial x_i} p_{m,i} + g_m - f_m \quad 9.2$$

Η  $p_{m,i}$  παριστάνει τη συνιστώσα, στην  $i$ -διεύθυνση του συστήματος συντεταγμένων, όλων των τάσεων του ρευστού που επηρεάζουν την ορμή στη  $m$ -διεύθυνση. Συχνά, αλλά όχι αναγκαστικά, η  $m$ -διεύθυνση αντιστοιχεί σε μια από τις  $i$ -διευθύνσεις.

Στις δυνάμεις όγκου,  $g_m$ , ανήκουν η βαρύτητα, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις κλπ. Η δύναμη αντίδρασης  $f_m$  μπορεί να αντιστοιχεί για παράδειγμα, στην αντίσταση που εισάγει στη ροή η παρουσία ενός πορώδους μέσου.

Για την αρχή διατήρησης μάζας συστατικού το ισοζύγιο δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \text{Ρυθμός αύξησης της μάζας του συστατικού } I \\ & + \\ & \text{Ρυθμός καθαρής εκροής με συναγωγή και διάχυση} \\ & = \\ & \text{Ρυθμός καθαρής παραγωγής με χημική αντίδραση} \end{aligned}$$

Για ένα πεπερασμένο όγκο ελέγχου, η αρχή, περιγράφεται σε Μορφή καρτεσιανών τανυστών [27], [38]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega_I) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega_I + J_{I,i}) = R_I \quad 9.3$$

Για την αρχή διατήρησης ενέργειας το ισοζύγιο δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \text{Ρυθμός αύξησης (εσωτερικής ενέργειας και κινητικής ενέργειας)} \\ & + \\ & \text{Ρυθμός καθαρής εκροής ενθαλπίας ηρεμίας} \\ & + \\ & \text{Ρυθμός καθαρής εκροής θερμότητας} \\ & + \\ & \text{Ρυθμός καθαρής εκροής διατμητικού έργου} \\ & = \\ & \text{Ακτινοβολία + Άλλες πηγές ενέργειας} \end{aligned}$$

Για ένα πεπερασμένο όγκο ελέγχου, η αρχή περιγράφεται σε Μορφή καρτεσιανών τανυστών [27], [38]:



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{h} - p) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_i \tilde{h} + q_i + w_{s,i} + \sum_l h_l J_{l,i} \right) = S_{rad} + \dots \quad 9.4$$

Είναι φανερό ότι όλες οι παραπάνω εξισώσεις έχουν την ίδια μορφή. Έτσι, η διαφορική εξίσωση της γενικευμένης αρχής διατήρησης θα μπορούσε να γραφεί με τη μορφή [27], [38]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varphi) + \text{div}(\rho \bar{u} \varphi + \bar{J}_\varphi) = S_\varphi \quad 9.5$$

όπου  $\varphi$  παριστάνει τις φυσικές ποσότητες  $u_m$ ,  $\omega_1$ ,  $\tilde{h}$  ή τη μονάδα (στην περίπτωση της εξίσωσης της συνέχειας). Οι όροι που εμφανίζονται στην εξίσωση (9.5) είναι, από αριστερά προς τα δεξιά, ο μεταβατικός όρος, ο όρος συναγωγής, ο όρος διάχυσης και ο όρος παραγωγής ή κατανάλωσης (δηλαδή πηγή ή καταβόθρα) του  $\varphi$ .



## 10. Εξισώσεις Εργασίας

Για μόνιμη ροή ανέμου οι εξισώσεις που θα επιλυθούν είναι οι διαφορικές εξισώσεις συνέχειας, ορμής, θερμότητας, συγκέντρωσης και τύρβης.

### 10.1 Εξίσωση Συνέχειας

Η γενική μορφή της εξίσωσης συνέχειας σε συμβολισμό δεικτών είναι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad 10.1$$

Η εξίσωση καθορίζει την πυκνότητα και τη ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου ροής. Η εξίσωση ισχύει για κάθε περίπτωση τρισδιάστατης ροής (μόνιμης ή μη μόνιμης, στρωτής ή τυρβώδους, συμπιεστής ή ασυμπιεστής) ενός καθαρού ρευστού ή ενός ομοιογενούς μείγματος ρευστών, υπό την προϋπόθεση ότι δεν συμβαίνουν πυρηνικές ή χημικές αντιδράσεις στον απειροστό όγκο ελέγχου [15], [64].

Στην περίπτωση μας έχουμε τρισδιάστατη, μόνιμη και ασυμπιεστή ροή, έτσι οι όροι της εξίσωσης συνέχειας με την μορφή των δεικτών θα γίνει:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad 10.2$$

Αν στην εξίσωση 10.2 θέσουμε όπου  $j$  τις τιμές  $x, y, z$  αντίστοιχα και αθροίζοντας τις επιμέρους παραγώγους θα έχουμε την τελική εξίσωση:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad 10.3$$

### 10.2 Εξίσωση Ορμής (Navier – Stokes)

Η γενική μορφή της εξίσωσης Navier – Stokes σε συμβολισμό δεικτών είναι:

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad 10.4$$

Για να ισχύσει η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να έχουμε νευτώνειο ρευστό, ασυμπιεστή ροή και σταθερό ιξώδες. Στην εξίσωση 10.4 αν αντικαταστήσουμε τον ελεύθερο δείκτη  $i$  με  $x, y$  και  $z$  και τον επαναλαμβανόμενο δείκτη  $j$  με  $x, y$  και  $z$  (για κάθε τιμή του  $i$ ), προκύπτουν τρεις καρτεσιανές συνιστώσες της εξίσωσης.

$x$ - Διεύθυνση

$$\rho \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad 10.5$$

$y$ - Διεύθυνση

$$\rho \left( \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \quad 10.6$$



z- Διεύθυνση

$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad 10.7$$

Οι εξισώσεις Navier – Stokes είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού. Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές λόγω παρουσίας του τελεστή μεταφοράς  $u \cdot \nabla$ . Η επίλυσή τους γίνεται με αριθμητικές μεθόδους που δίνουν προσεγγιστικές λύσεις [15], [64]. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε πρόβλημα ροής.

### 10.3 Εξίσωση Θερμότητας

Η γενική μορφή της εξίσωσης θερμότητας είναι:

$$\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T \quad 10.8$$

Στον όρο  $S_T$  εκτός του όρου πηγής συμπεριλαμβάνεται και ο όρος  $\left( \frac{dP}{dt} + u_j \frac{dP}{d_j} \right)$  ο οποίος στα πλαίσια της αριθμητικής προσομοίωσης θεωρείται ως πηγή. Στην περίπτωση που το πρόβλημα δεν εμφανίζει υψηλές κλίσεις πίεσης, ο παραπάνω όρος αμελείται. Επίσης ο όρος  $S_T$  αναφέρεται στον όρο παραγωγής ή κατανάλωσης που τυχόν υπάρχει στο πεδίο.

### 10.4 Εξίσωση Συγκέντρωσης

Η γενική μορφή της εξίσωσης ενέργειας είναι:

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \rho D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + S_C \quad 10.9$$

Επίσης ο όρος  $S_C$  αναφέρεται στον όρο παραγωγής ή κατανάλωσης που τυχόν υπάρχει στο πεδίο.

Στην συγκεκριμένη εργασία η προσομοίωση του προβλήματος περιλαμβάνει αδιαβατική ατμόσφαιρα και το μοντέλο τύρβης RNG derived  $k\sim\epsilon$  [28], [65]. Η επιλογή του μοντέλου τύρβης RNG derived  $k\sim\epsilon$ , έγινε γιατί δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το κλασικό μοντέλο  $k\sim\epsilon$ .

### 10.5 Εξισώσεις Επίλυσης του Προβλήματος

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad 10.10$$

Εξίσωση Ορμής:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)] + g_i \frac{T - T_{ref}}{T_{ref}} \quad 10.11$$

Όπου:

P – είναι η διαφορά της πίεσης από την αδιαβατική κατάσταση.



$\rho$  – είναι η πυκνότητα στο επίπεδο του εδάφους.

Εξίσωση Θερμότητας:

$$u_j \frac{\partial h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\nu}{P_r} + \frac{\nu_T}{\sigma_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] \quad 10.12$$

Εξίσωση Συγκέντρωσης:

$$u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\nu}{S_c} + \frac{\nu_T}{\sigma_c} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] \quad 10.13$$

Εξίσωση Κινητικής Ενέργειας Τύρβης:

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_b - \varepsilon \quad 10.14$$

Εξίσωση Κατανάλωσης Κινητικής Ενέργειας Τύρβης:

$$u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} G_b) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 4} \frac{\sigma_k^2}{k} \quad 10.15$$

Εξισώσεις των όρων Παραγωγής και Κατανάλωσης Κινητικής Ενέργειας Τύρβης:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = C_\mu k^{1/2} L_k \quad 10.16$$

$$G_b = -g\beta \frac{\nu_T}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial y} \quad 10.17$$

$$P_k = \nu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 10.18$$

Οι σταθερές του μοντέλου RNG derived  $k\sim\varepsilon$  έχουν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 10.1

Πίνακας 10.1. Τιμές των σταθερών του μοντέλου RNG derived  $k\sim\varepsilon$

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$n_o$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\beta$
0.0845	1.42	1.68	$\tanh(u/\nu)$	4.38	0.719	0.719	0.012

Οι σταθερές του μοντέλου  $k\sim\varepsilon$  έχουν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 10.2

Πίνακας 10.2. Τιμές των σταθερών του μοντέλου  $k\sim\varepsilon$

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.0845	1.44	1.92	1.00	1.30



## 11. Τύρβη

### 11.1 Εισαγωγή

Το θέμα της τύρβης [28], [65] έχει από πολύ καιρό αναγνωρισθεί ως ένα από τα μεγάλα άλυτα επιστημονικά αλλά και διανοητικά προβλήματα του αιώνα μας. Είναι πολύ εκτεταμένο και δύσκολο στην κατανόησή του. Το κύριο γνώρισμα της τυρβώδους ροής είναι η τυχαία διακύμανση των ιδιοτήτων του ρευστού σε τυχόν σημείο του πεδίου ροής. Η περιγραφή της γίνεται συνήθως με τη χρησιμοποίηση στατιστικών μέσων όρων.

Υπάρχουν δύο είδη ιξώδους ροής, η στρωτή και η τυρβώδης, που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την εσωτερική δομή της ροής. Η βασική δομή της τύρβης αποτελείται από δίνες και στροβίλους διαφόρων μεγεθών. Όλοι μαζί αποτελούν τη τυρβώδη ροή.

Μέσα σε κάθε μία δίνη οι μοριακές επιδράσεις του μοριακού ιξώδους είναι σημαντικές αλλά η αλληλεπίδραση όλων αυτών των δινών σχεδόν απόλυτα καλύπτει τις μοριακές επιδράσεις, τουλάχιστον από την άποψη ενός παρατηρητή. Εν τούτοις, οι μη-μόνιμης κατάστασης εξισώσεις συνεχείας και ορμής (Navier-Stokes) περιγράφουν ακριβώς την τυρβώδη ροή, επειδή οι δίνες είναι πολύ μεγαλύτερες από τη μέση μοριακή ελεύθερη διαδρομή και οι τυρβώδεις διακυμάνσεις δεν είναι υπερβολικά γρήγορες.

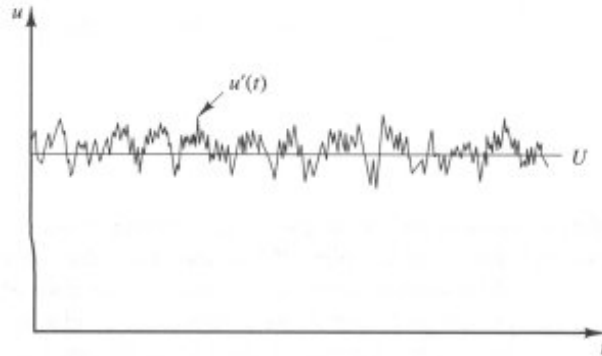
Ο αριθμός Reynolds ενός πεδίου ροής δίνει το μέτρο της σχετικής σημασίας των αδρανειακών δυνάμεων (που σχετίζονται με τα αποτελέσματα της συναγωγής) και των δυνάμεων συνεκτικότητας (που σχετίζονται με τα αποτελέσματα του ιξώδους).

Παρατηρείται πειραματικά στα πεδία ροής ότι για τιμές κάτω του λεγόμενου κρίσιμου αριθμού  $Re_{κρ}$  η ροή είναι στρωτή και ότι τα γειτονικά στρώματα του ρευστού ολισθαίνουν μεταξύ τους το ένα με το άλλο με ομαλό τρόπο. Εάν οι εφαρμοζόμενες οριακές συνθήκες δεν μεταβάλλονται με το χρόνο η ροή είναι μόνιμη. Αυτή η περιοχή ροής λέγεται στρωτή ροή.

Σε τιμές του αριθμού  $Re$  άνω της κρίσιμης τιμής  $Re_{κρ}$  συμβαίνει μια περίπλοκη σειρά φαινομένων που τελικά οδηγεί σε θεμελιώδη μεταβολή του χαρακτήρα της ροής. Στην τελική κατάσταση η συμπεριφορά της ροής είναι τυχαία και χαοτική. Η κίνηση γίνεται ουσιαστικά μη-μόνιμη ακόμα και όταν εφαρμόζονται σταθερές οριακές συνθήκες. Η ταχύτητα και όλες οι άλλες ιδιότητες της ροής μεταβάλλονται κατά τυχαίο και χαοτικό τρόπο. Αυτή η περιοχή ροής λέγεται τυρβώδης.

Μια πιο ποσοτική εικόνα της διαφοράς στρωτής και τυρβώδους ροής λαμβάνεται από ένα ευαίσθητο όργανο μέτρησης της ταχύτητας που τοποθετείται μέσα στη ροή. Εάν μετρήσουμε την  $x$ -συνιστώσα της ταχύτητας σ' ένα σταθερό σημείο εντός σωλήνα για στρωτή και για τυρβώδη μόνιμη ροή, προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα ταχύτητας ως προς χρόνο.





Σχήμα 11.1: Τυπική μέτρηση σημειακής ταχύτητας σε τυρβώδη ροή.

Για μόνιμη στρωτή ροή, η ταχύτητα σ' ένα σημείο παραμένει σταθερή με το χρόνο. Στη τυρβώδη μόνιμη ροή το διάγραμμα της ταχύτητας δείχνει τυχαίες διακυμάνσεις της στιγμιαίας ταχύτητας  $u$ , γύρω από τη χρονικά-μέση ταχύτητα  $\bar{u}$ . Μπορούμε να θεωρήσουμε την στιγμιαία ταχύτητα  $u$  ως το άθροισμα της χρονικά - μέσης ταχύτητας  $\bar{u}$ , και της διακυμαινόμενης συνιστώσας  $u'$ :

$$u = \bar{u} + u' \quad 11.1$$

Επειδή η ροή είναι μόνιμη, η μέση ταχύτητα  $\bar{u}$ , δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Γενικά, είναι εξαιρετικά χρήσιμο να χαρακτηρίζουμε μια τυρβώδη ροή με τις μέσες τιμές των ιδιοτήτων της ροής  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ , κλπ. και τις στατιστικές ιδιότητες των διακυμάνσεών τους  $u', v', w', p'$ , κλπ. όπου υφίστανται ιξώδεις διατμητικές τάσεις που οφείλονται είτε σε μεγάλες κλίσεις ταχύτητας είτε και σε ασυνέχειες της ταχύτητας. Η πρώτη περίπτωση, γνωστή και ως τύρβη στερεού σώματος, απαντάται σε προβλήματα ροής ρευστών μέσα σε αγωγούς ή γύρω από βυθισμένα στερεά στην περιοχή του οριακού στρώματος. Η δεύτερη περίπτωση, γνωστή και ως ελεύθερη τύρβη, απαντάται σε προβλήματα ροής ρευστών γύρω από βυθισμένα στερεά στην περιοχή του ολκού ή σε ροές μέσα σε ακίνητα ρευστά. Οι επιφάνειες ασυνέχειας της ταχύτητας είναι εξαιρετικά ασταθείς και αποτελούν πηγές διαταραχών και δημιουργίας τύρβης.

Η βασική παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει το είδος μιας ροής (ως στρωτής ή τυρβώδους) είναι ο αριθμός Reynolds,  $Re$ , ο οποίος ορίζεται από την γενική εξίσωση:

$$Re = \frac{u_o l_o}{\nu} \quad 11.2$$

Όπου  $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού,  $u_o$  κάποια ταχύτητα αναφοράς και  $l_o$  ένα χαρακτηριστικό μήκος το οποίο εξαρτάται από την γεωμετρία του εξεταζόμενου προβλήματος.

Από φυσική άποψη, ο αριθμός Reynolds παριστάνει το λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις ιξώδεις δυνάμεις που δρουν πάνω στο ρευστό:

$$Re = \frac{\text{Δυνάμεις Αδράνειας}}{\text{Ιξώδεις Δυνάμεις}} \quad 11.3$$



Για καθορισμένη γεωμετρία ροής και είδος ρευστού, ο αριθμός Reynolds είναι ανάλογος προς την ταχύτητα αναφοράς. Για μικρές ταχύτητες (άρα και μικρούς αριθμούς  $Re$ ), η ροή είναι στρωτή και διέπεται από τις ιξώδεις δυνάμεις οι οποίες μπορούν να αποσβήνουν κάθε διαταραχή που επιβάλλεται στη ροή. Με την αύξηση της ταχύτητας (άρα και του αριθμού  $Re$ ), οι δυνάμεις αδρανείας αυξάνονται και από κάποια τιμή και πέρα, γίνονται πιο σημαντικές από τις ιξώδεις δυνάμεις.

Στην περίπτωση αυτή, μικρή διαταραχή της ροής, αντί να αποσβηστεί (όπως θα συνέβαινε αν η ταχύτητα ήταν μικρή), διατηρείται ή και ενισχύεται. Αν η διαταραχή απλώς διατηρείται, μεταφέρεται κατά τη διεύθυνση της ροής, χωρίς να επηρεάζει τη λοιπή ροή, η οποία και παραμένει στρωτή. Αν η διαταραχή ενισχύεται, μεταφερόμενη κατά τη διεύθυνση της ροής, διαχέεται και καταλαμβάνει σημαντικό τμήμα του πεδίου ροής, με αποτέλεσμα την αλλαγή του είδους της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Για μεγάλες ταχύτητες (άρα, και μεγάλους αριθμούς  $Re$ ), ολόκληρο το πεδίο ροής κατέχεται από τυρβώδη ροή. Η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται ως πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδης ροή.

Βασική διάκριση λοιπόν μεταξύ στρωτών και τυρβωδών πεδίων ροής αποτελεί η χρονική συμπεριφορά μιας διαταραχής ορισμένου πλάτους και συχνότητας που δημιουργείται μέσα στο πεδίο ροής. Συγκεκριμένα, αν το πλάτος της τυχαίας διαταραχής που δημιουργείται μέσα στο πεδίο ροής (π.χ. λόγω τραχύτητας σωλήνα, που είναι πηγή διαταραχής), ελαττώνεται με το χρόνο, τότε ομιλούμε περί στρωτής ροής.

Αν όμως το πλάτος της διαταραχής αυξάνει με το χρόνο, δείχνοντας έτσι ότι η αρχική διαταραχή (ή η αρχική αστάθεια στη ροή) μπορεί να αφαιρέσει από τη ροή κινητική ενέργεια και στη συνέχεια να δημιουργήσει (να σπάσει) και άλλες διαταραχές μικρότερου πλάτους και διαφορετικής συχνότητας (ο μηχανισμός αυτός θα οδηγήσει σε τυρβώδη ροή αν βρισκόμαστε στη μεταβατική περιοχή), τότε η ροή καλείται τυρβώδης.

## 11.2 Οι διαφορικές Εξισώσεις NAVIER-STOKES ως προς την Τύρβη

Οι εξισώσεις 10.1 έως 10.9 αποτελούν την μαθηματική έκφραση της ροής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας/μάζας, με τις υποθέσεις ότι το ρευστό είναι ένα συνεχές μέσο, φύσης Νευτωνικής, και ότι η ροή μπορεί να καθοριστεί από τις εξισώσεις Navier-Stokes [28]. Για τυρβώδεις ροές οι ανωτέρω εξισώσεις ισχύουν για τις στιγμιαίες τιμές των φυσικών ποσοτήτων της ροής.

Επομένως οι εξισώσεις αυτές, αν και ισχύουν, δεν έχουν πρακτική αξία για την τυρβώδη ροή και αυτό λόγω των συνεχών και περίπλοκων μεταβολών της στιγμιαίας ταχύτητας και των άλλων μεταβλητών. Έτσι οι εξισώσεις πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να καταστούν πιο εύχρηστες από πρακτική άποψη. Γι' αυτό εφαρμόζουμε την εξής διαδικασία:

- Πρώτα αντικαθιστούμε τα διάφορα μεγέθη με τα αθροίσματά τους, π.χ.

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}', \quad p = \bar{p} + p', \quad \Phi = \bar{\Phi} + \Phi'$$

- Μετά εκτελούμε τις πράξεις, και
- Τέλος λαμβάνουμε τις μέσες χρονικές τιμές κάθε όρου των εξισώσεων, εφαρμόζοντας τις εξισώσεις του Reynolds.



Οι πιο κάτω παρατηρήσεις είναι χρήσιμες για την παραπέρα απλοποίηση των εξισώσεων που θα προκύψουν.

1. Το ιξώδες δεν επηρεάζει συνήθως τις μεγαλύτερες δίνες που είναι κυρίως υπεύθυνες για την τυρβώδη ανάμιξη, με εξαίρεση το "ιξώδες υπόστρωμα" που σχηματίζεται πολύ κοντά σε μια στερεή επιφάνεια.
2. Οι επιδράσεις των διακυμάνσεων της πυκνότητας επί της τύρβης είναι μικρές εάν, όπως συμβαίνει στην πλειοψηφία των πρακτικών προβλημάτων, οι διακυμάνσεις αυτές είναι μικρές σε σχέση με την μέση πυκνότητα, με εξαίρεση τις επιδράσεις των χρονικών διακυμάνσεων και χωρικών κλίσεων της πυκνότητας σ' ένα πεδίο βαρύτητας.

Επομένως, με βάση τις δύο πιο πάνω παρατηρήσεις, συνήθως αγνοούμε τις άμεσες επιδράσεις του ιξώδους και της συμπιεστότητας επί της τύρβης.

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι αυτό που οδηγεί τα διακυμαινόμενα πεδία των βαθμωτών μεγεθών (π.χ. θερμοκρασίας, συγκέντρωσης) είναι το διακυμαινόμενο πεδίο ταχυτήτων, ενώ η αντίστροφη επίδραση είναι συνήθως αμελητέα.

Με βάση τα παραπάνω οι εξισώσεις 10.1 έως 10.9 μετατρέπονται σε μία γενική εξίσωση, όπου  $\phi$  είναι κάθε βαθμωτό μέγεθος.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\rho} \bar{\phi}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}'_j \phi'}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right] + \frac{Dp}{Dt} - \left[ \left( \frac{\partial \bar{\rho}' \phi'}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\rho}' \phi'}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}' u'_j \bar{\phi} + \bar{\rho}' u'_j \phi') \right] + \bar{S}_\phi \quad 11.4$$

Ειδικότερα η εξίσωση 14.9 που αφορά τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών γίνεται [31]:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\bar{V} \bar{C}) + S_c + D_c \nabla^2 \bar{C} - \frac{\partial (\bar{u}' C')}{\partial x} - \frac{\partial (\bar{v}' C')}{\partial y} - \frac{\partial (\bar{w}' C')}{\partial z} \quad 11.5$$

### 11.3 Ελεύθερες Τυρβώδης Ροές

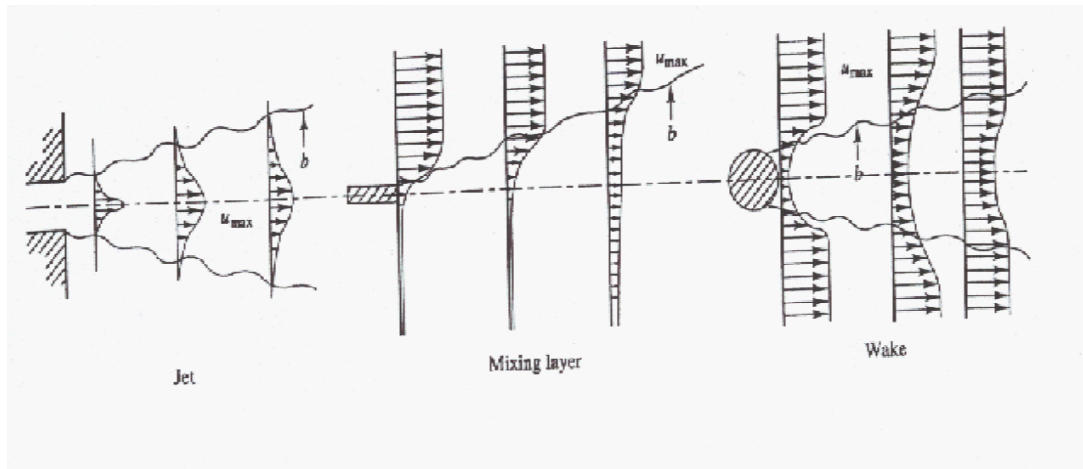
Σημαντικό ενδιαφέρον στην προσομοίωση αερίων ρυπαντών [28], [65] αποτελούν οι ελεύθερες τυρβώδεις ροές: στρώματα ανάμιξης, πίδακες και ολκοί.

Το στρώμα ανάμιξης σχηματίζεται στη διεπιφάνεια δύο περιοχών: μιας με γρήγορα και μιας με αργά κινούμενο ρευστό.

Στον πίδακα έχουμε μια περιοχή ροής υψηλής ταχύτητας περιβαλλόμενη πλήρως από ακίνητο ρευστό.

Ο ολκός σχηματίζεται πίσω από ένα αντικείμενο εντός ροής, δηλαδή εδώ έχουμε μια περιοχή αργής κίνησης που περιβάλλεται από γρήγορα κινούμενο ρευστό.

Το σχήμα 11.2 δίνει διαγράμματα της ανάπτυξης των διανομών μέσης ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της ροής γι' αυτές τις ελεύθερες ροές.



Σχήμα 11.2: Ελεύθερες Τυρβώδης Ροές

Είναι φανερό ότι συμβαίνουν σημαντικές μεταβολές της ταχύτητας διαμέσου ενός αρχικά λεπτού στρώματος και στις τρεις ροές: η μετάβαση στη τύρβη συμβαίνει σε πολύ κοντινή απόσταση, κατά τη διεύθυνση της ροής, από το σημείο όπου αρχικά συναντώνται τα διάφορα ρεύματα, η τύρβη προκαλεί έντονη ανάμιξη γειτονικών στρωμάτων ρευστού και γρήγορη διαπλάτυνση της περιοχής στην οποία συμβαίνουν οι μεταβολές της ταχύτητας.

Το σχήμα 11.3 δείχνει μια ροή πίδακα, όπου φαίνεται καθαρά ότι η τυρβώδης περιοχή της ροής περιέχει ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων μήκους. Μεγάλες δίνες, μεγέθους συγκρίσιμου με το πλάτος της ροής, συνυπάρχουν με δίνες πολύ μικρού μεγέθους.



Σχήμα 11.3: Ροή Πίδακα

Η εικόνα προτείνει σωστά ότι η ροή μέσα στην περιοχή του πίδακα είναι πλήρως τυρβώδης αλλά η ροή στην έξω περιοχή μακριά από τον πίδακα είναι ομαλή και σχεδόν ανεπηρέαστη από την τύρβη. Η θέση του άκρου της τυρβώδους ζώνης προσδιορίζεται από το (χρονικά μεταβαλλόμενο) πέρασμα ανεξάρτητων μεγάλων δινών. Κοντά στο άκρο αυτές οι δίνες θα περνούν μερικές φορές στην περικλείουσα περιοχή. Κατά την διάρκεια αυτών των «εκρήξεων» της τυρβώδους δραστηριότητας στην εξωτερική περιοχή – που καλείται διαλείπουσα διεργασία (intermittency) – επισύρεται ρευστό από το περιβάλλον μέσα στην τυρβώδη ζώνη.



Αυτή η διαδικασία λέγεται διείσδυση (entrainment) και είναι η κύρια αιτία της εξάπλωσης των τυρβωδών ροών (περιλαμβανομένων των οριακών στρωμάτων κοντά σε τοίχο) στη διεύθυνση της ροής. Αρχικά γρήγορα κινούμενο ρευστό του πίδακα θα χάσει ορμή για να επιταχύνει το ακίνητο περιβάλλον ρευστό. Λόγω της διείσδυσης του περιβάλλοντος ρευστού, οι κλίσεις της ταχύτητας μειώνονται στη διεύθυνση της ροής, και αυτό προκαλεί την ελάττωση της μέσης ταχύτητας του πίδακα στον κεντρικό του άξονα.

Ομοίως, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ του ρευστού του ολκού και του γρήγορου περιβάλλοντός του θα μειωθεί, κατά τη διεύθυνση της ροής. Στα στρώματα ανάμιξης το πλάτος του στρώματος που περιέχει τη μεταβολή ταχύτητας εξακολουθεί να αυξάνει κατά τη διεύθυνση της ροής, αλλά η συνολική διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο εξωτερικών περιοχών παραμένει αμετάβλητη.

#### 11.4 Οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας

Η τυρβώδης ροή κοντά σε στερεούς τοίχους έχει διαφορετική συμπεριφορά και δομή από τις ελεύθερες τυρβώδεις ροές. Στην περίπτωση της άσκησης αυτό συμβαίνει όταν το πεδίο ροής του αέρα συναντήσει εμπόδια όπως η καμινάδα ή κάποιος υψηλός εξοπλισμός του διυλιστηρίου.

Στις τυρβώδεις ροές λεπτού διατμητικού στρώματος ένας αριθμός  $Re$  που βασίζεται σε μια κλίμακα μήκους στην διεύθυνση της ροής  $L$  είναι πάντα πολύ μεγάλος. Αυτό σημαίνει ότι οι αδρανειακές δυνάμεις είναι συντριπτικά μεγαλύτερες από τις ιξώδεις δυνάμεις σ' αυτές τις κλίμακες. Εάν σχηματίσουμε ένα αριθμό  $Re$  που να βασίζεται στην απόσταση  $y$  από ένα τοίχωμα βλέπουμε ότι αν η τιμή του  $y$  είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το  $L$ , ισχύουν τα παραπάνω. Οι δυνάμεις αδρανείας υπερिशχύουν στην ροή μακριά από τον τοίχο. Καθώς το  $y$  ελαττώνεται προς το μηδέν, όμως, θα υπάρξουν τιμές του  $y$  για τις οποίες ο  $Re$  είναι της τάξης του 1. Σ' αυτήν την απόσταση από τον τοίχο και κοντύτερα του οι ιξώδεις δυνάμεις θα έχουν την ίδια τάξη μεγέθους με τις δυνάμεις αδρανείας ή θα είναι μεγαλύτερες.

Άρα, σε ροές κατά μήκος στερεών ορίων υπάρχει συνήθως μια σημαντική περιοχή ροής μακριά από στερεό που κυριαρχείται από δυνάμεις αδρανείας και ένα λεπτό στρώμα μέσα στο οποίο είναι σημαντικές οι επιδράσεις του ιξώδους. Κοντά στον τοίχο η ροή επηρεάζεται από ιξώδεις επιδράσεις και δεν εξαρτάται από τις παραμέτρους του ελεύθερου ρεύματος. Στην άμεση γειτονιά αδιαπέραστου τοίχου η μεταφορά της μέσης ορμής δια συναγωγής είναι συνήθως αμελητέα και η κλίμακα μήκους των δινών πολύ μικρή.

Η διανομή τύρβης στην «περιοχή τοίχου» βρίσκεται σε τοπική ισορροπία, δηλαδή η διάρκεια ζωής μιας δίνης είναι μικρή συγκρινόμενη με το χρόνο που χρειάζεται για να συμβεί μεταβολή της ροής. Έχουμε την παρακάτω σχέση με τη βοήθεια διαστατικής αναλύσεως:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad 11.6$$



Όπου η κλίμακα ταχύτητας που δίνεται από την παρακάτω σχέση καλείται ταχύτητα τριβής.

$$u_\tau = (\tau_w / \rho)^{1/2} \quad 11.7$$

Η σχέση 11.6 καλείται ο «νόμος του τοίχου» για λείες αδιαπέρατες επιφάνειες, και περιέχει τους ορισμούς δύο σημαντικών αδιάστατων ομάδων, την ταχύτητα σ' ένα σημείο να επηρεάζεται από τις επιβραδυντικές συνέπειες του τοίχου μέσω της τιμής της διατμητικής τάσης στον τοίχο, αλλά όχι από το ίδιο το ιξώδες.

Η διαστατική ανάλυση της σχέσης 11.5 μας οδηγεί στην παρακάτω σχέση:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = g\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad 11.8$$

Η πλέον χρήσιμη μορφή προκύπτει όταν θεωρήσουμε την διατμητική τάση στον τοίχο ως την αιτία ενός ελλείματος ταχύτητας  $U_{max} - U$  που ελαττώνεται όσο πιο κοντά πηγαίνουμε προς το όριο του οριακού στρώματος ή τον άξονα του σωλήνα. Έτσι:

$$\frac{U_{max} - U}{u_\tau} = g\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad 11.9$$

Αυτός ο τύπος λέγεται ο «νόμος του ελλείματος της ταχύτητας» (velocity defect law).

Στη στερεή επιφάνεια το ρευστό είναι ακίνητο. Στην άμεση γειτονιά του τοίχου οι διαταραχές της ταχύτητας (οι τυρβώδεις κινήσεις των δινών) δεν μπορούν να αποκτήσουν μεγάλα πλάτη επειδή αποσβένονται από την παρουσία του τοίχου. Έτσι οι τυρβώδεις διατμητικές τάσεις (οι τάσεις Reynolds) μπορεί να αγνοηθούν και το ρευστό εγγύτατα στον τοίχο ελέγχεται από την ιξώδη τάση. Αυτό το στρώμα είναι στην πράξη εξαιρετικά λεπτό  $y^+ < 5$  και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η διατμητική τάση είναι κατά προσέγγιση σταθερή διαμέσου αυτού του στρώματος και ίση με την τάση στο τοίχωμα.

Ισχύει μια γραμμική σχέση μεταξύ της μέσης ταχύτητας και της απόστασης από τον τοίχο.

$$U = \frac{\tau_w y}{\mu} \quad 11.10$$

Η παραπάνω σχέση μας οδηγεί στην ισότητα  $u^+ = y^+$  όπου το στρώμα ρευστού εγγύτατα στον τοίχο είναι γνωστό ως το γραμμικό οριακό υπόστρωμα.

Έξω από το ιξώδες υπόστρωμα  $30 < y^+ < 500$  υπάρχει μια περιοχή όπου οι επιδράσεις του ιξώδους και της τύρβης είναι αμφοτέρως σημαντικές. Η διατμητική τάση μεταβάλλεται αργά με την απόσταση από τον τοίχο και εντός αυτού του εσωτερικού στρώματος θεωρείται σταθερά και ίση με τη διατμητική τάση στον τοίχο. Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad 11.11$$



όπου οι σταθερές  $\kappa$ ,  $\beta$  και  $E$  είναι παγκόσμιες σταθερές και ισχύουν για όλες τις τυρβώδεις ροές κοντά σε λείους τοίχους.

Λόγω της λογαριθμικής σχέσης των  $u^+$  και  $y^+$  ο παραπάνω τύπος λέγεται συχνά «λογαριθμικός νόμος» και το στρώμα όπου το  $y^+$  έχει τιμές μεταξύ 30 και 500, το στρώμα του λογαριθμικού νόμου.

Στο εξωτερικό στρώμα, δηλαδή στην περιοχή μακριά από τον τοίχο όπου υπερισχύουν οι αδρανειακές δυνάμεις, πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι ο λογαριθμικός νόμος ισχύει στην περιοχή  $0.02 < y < \delta < 0.2$ .

Για μεγαλύτερες τιμές του  $y$  ισχύει ο νόμος του ελλείματος της ταχύτητας (11.9). Στη μεταβατική περιοχή επικάλυψης πρέπει ο λογαριθμικός νόμος να είναι ίσος με το νόμο του ελλείματος της ταχύτητας.

Οι Tennekes και Lumley (1972) έδειξαν ότι μια εξισωτική επικάλυψη συμβαίνει όταν θεωρήσουμε την παρακάτω λογαριθμική μορφή.

$$\frac{U_{\max} - U}{u_{\tau}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + A \quad 11.12$$

Όπου  $A$  είναι μια σταθερά. Ο νόμος του ελλείματος της ταχύτητας συχνά καλείται ο νόμος του ολκού.

### 11.5 Κυριότερα Μαθηματικά Πρότυπα Μεταφοράς Τύρβης

Ο στόχος ενός μαθηματικού προτύπου [28], [65] της τυρβώδους ροής είναι η ανάπτυξη υπολογιστικών διαδικασιών, ικανοποιητικής ακρίβειας και γενικότητας, ώστε να μπορούν να προβλεφθούν οι τάσεις Reynolds και οι όροι τυρβώδους μεταφοράς των βαθμωτών μεταβλητών. Τα πρότυπα αυτά πρέπει να είναι ευρείας εφαρμογής, ακριβή, απλά και οικονομικά στη χρήση τους.

Γενικά, η μοντελοποίηση της τύρβης έχει επιχειρηθεί με πέντε μεθόδους, ως εξής:

- Αναλυτικές θεωρίες τύρβης. Αναπτύσσονται γενικά σε χώρο Fourier (αριθμός κύματος ή συχνότητας). Πολύπλοκες θεωρίες που δεν έχουν ακόμα εφαρμοσθεί σε πραγματικά προβλήματα Μηχανικού.
- Πρότυπα υπό-πλεγματικής κλίμακας ή Εξομοίωσης Μεγάλων Δινών. Βασίζονται στην υπόθεση ότι η τυρβώδης κίνηση θα μπορούσε να αναλυθεί σε συνιστώσα μεγάλης κλίμακας και συνιστώσα υπό-πλεγματικής (μικρής) κλίμακας, έτσι ώστε ο διαχωρισμός των δύο να μην έχει σημαντική επίδραση στην εξέλιξη των μεγάλων κλιμάκων. Αυτές οι μέθοδοι, αν και πολλά υποσχόμενες, απαιτούν ακόμα υπερβολικό χρόνο  $H/Y$  για να είναι χρήσιμες για εφαρμογές μηχανικού.
- Άμεση αριθμητική προσομοίωση. Η μέθοδος επιχειρεί να προσομοιώσει άμεσα όλες τις δυναμικά σημαντικές κλίμακες των τυρβωδών ροών υψηλού αριθμού Reynolds. Βασίζεται στην υπόθεση ότι η άμεση προσομοίωση γίνεται με την τεχνητή μείωση του αριθμού Reynolds μέχρι του σημείου όπου μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια σε υπάρχοντες  $H/Y$  όλες οι σημαντικές κλίμακες, και ότι ένας ικανός αριθμός μεγάλων κλιμάκων παραμένει αμετάβλητος από κάθε αλλαγή του αριθμού Reynolds. Αυτή η μέθοδος απαιτεί ακόμα πάρα πολύ υπολογιστικό χρόνο.



- Πρότυπα Μεταφοράς. Αποτελούν τη βάση της προσέγγισης των μηχανικών, όπου οι προσπάθειες συγκεντρώνονται στην ανεύρεση απλοποιημένων μοντέλων για τους όρους που περιγράφουν την μεταφορά ορμής, θερμότητας κτλ. Αυτά τα μοντέλα είναι όμοια με τις αναλυτικές θεωρίες κατά το ότι χρησιμοποιούν τις δυναμικές ποσότητες ως στατιστικά-μέσα πεδία αλλά προσομοιώνουν μόνο τα συνολικά χαρακτηριστικά της τύρβης, ενώ οι αναλυτικές θεωρίες προσέχουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων κλιμάκων της κίνησης. Τα πρότυπα Μεταφοράς χρησιμοποιούν τις εξισώσεις Reynolds και είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως.
- Τα πρότυπα εξομίωσης Μεγάλων Δινών είναι τα πρότυπα που επιλύουν τις χρονικά εξαρτημένες εξισώσεις της ροής για τη μέση ροή και για τις μέγιστες δίνες, ενώ μοντελοποιούν τις επιδράσεις των μικρότερων δινών. Βασίζονται λοιπόν σε εξισώσεις με χωρικά φίλτρα. Οι μεγαλύτερες δίνες αλληλοεπιδρούν ισχυρά με τη μέση ροή και περιέχουν το μέγιστο της ενέργειας και έτσι αυτή η διαδικασία οδηγεί σε ένα καλό μοντέλο των κύριων αποτελεσμάτων της τύρβης.

Το αρχικό σημείο όλων αυτών των μοντέλων είναι η εξίσωση Reynolds και το πρόβλημα κλεισίματος του συστήματος των εξισώσεων, ανάγεται σε μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds σε όρους ποσοτήτων της μέσης ροής. Τα απλά μοντέλα χρησιμοποιούν μια υπόθεση ιξώδους συνεκτικότητας βάση της αναλογίας μεταξύ των μοριακών και των τυρβωδών κινήσεων. Η κατάταξη των διαφόρων μοντέλων εξαρτάται από τον αριθμό των συμπληρωματικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν. Αυτός ο αριθμός κυμαίνεται από το μηδέν, για τα μοντέλα μηδενικής εξίσωσης έως δώδεκα για τα πιο πολύπλοκα μοντέλα τάσεων Reynolds.

Με βάση τα παραπάνω διαχωρίζονται σε [28], [15], [63]:

1. Μοντέλα μηδενικής εξίσωσης-μοντέλο μήκους ανάμιξης
2. Μοντέλα μιας διαφορικής εξίσωσης
3. Μοντέλα δύο διαφορικών εξισώσεων – μοντέλο  $k \sim \epsilon$
4. Μοντέλα εξισώσεων τάσεων Reynolds
5. Μοντέλα αλγεβρικών εξισώσεων τάσεων Reynolds

#### 11.6 Το μοντέλο $k \sim \epsilon$

Το μοντέλο  $k \sim \epsilon$  είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο της τύρβης και το πιο καλά επιβεβαιωμένο [15], [63]. Το συγκεκριμένο μοντέλο επικεντρώνεται στους μηχανισμούς που επιδρούν στη τυρβώδη κινητική ενέργεια. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο "RNG derived  $k \sim \epsilon$ " αλλά γίνεται αναφορά και στο μοντέλο  $k \sim \epsilon$  προκειμένου να γίνει μία σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων.

Το μοντέλο  $k \sim \epsilon$  των Launder and Spalding [32], [33] αποτελείται από δύο εξισώσεις, μία για το  $k$  και μία για το  $\epsilon$ .

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι [15], [28], [63]:

- Είναι το πιο απλό μοντέλο για το οποίο χρειάζονται μόνο αρχικές και οριακές συνθήκες.
- Εμφανίζει πολύ καλή λειτουργία σε πολλές βιομηχανικές ροές.
- Θεωρείται το πιο δημοφιλές και διαδεδομένο μοντέλο.
- Έχει γίνει καλή έρευνα μελέτης πάνω του.





Τα μειονεκτήματα του μοντέλου είναι [15], [28], [63]:

- Πιο δαπανηρό σε υπολογιστικό χρόνο από τα μοντέλα μήκους ανάμιξης.
- Δεν εμφανίζει σωστή λειτουργία σε πολλές περιπτώσεις, όπως, Μερικές Ελεύθερες Ροές, Ροές με μεγάλες πρόσθετες παραμορφώσεις (π.χ καμπύλα οριακά στρώματα, ροές περιδίνησης), Περιστρεφόμενες ροές.

Τέλος το μοντέλο  $k\sim\epsilon$  παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα όταν εφαρμόζεται για την πρόβλεψη ροών με περίπλοκα πεδία παραμορφώσεων ή με σημαντικές δυνάμεις σώματος. Κάτω από τέτοιες συνθήκες οι τάσεις Reynolds δεν παριστάνονται ικανοποιητικά από τη σχέση Boussinesq ακόμα και αν η κινητική ενέργεια της τύρβης υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί μοντέλα δεύτερης τάξης, με ένα από τα πιο σπουδαία το "RNG derived  $k\sim\epsilon$ " [34].

Παρακάτω απεικονίζονται οι εξισώσεις του μοντέλου.

$$\mu_t = \rho l_m k^{\frac{1}{2}} \quad 11.13$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad 11.14$$

$$l_m = C_D^{\frac{1}{4}} L_k \quad 11.15$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad 11.16$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad 11.17$$

Οι σταθερές του μοντέλου  $k\sim\epsilon$  έχουν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 11.1

Πίνακας 11.1. Τιμές των σταθερών του μοντέλου  $k\sim\epsilon$

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.0845	1.44	1.92	1	1.3

### 11.7 Το μοντέλο RNG derived $k\sim\epsilon$

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία είναι το μοντέλο της τύρβης RNG derived  $k\sim\epsilon$ . Το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης επινοήθηκε από τους Yakhot και Orszag [34], [15], [63] ενώ τα αρχικά RNG προέρχονται από τις λέξεις Renormalization Group. Η διαδικασία του μοντέλου RNG μετακινεί συστηματικά της μικρής κλίμακας



κίνηση από τις εξισώσεις, εκφράζοντας τις επιδράσεις σε κινήσεις μεγαλύτερης κλίμακας και σε μεταβλητό ιξώδες.

Το πλεονέκτημα του μοντέλου RNG derived  $k\sim\epsilon$  έγκειται στο ότι περιέχει ένα διορθωτικό όρο στη σταθερά  $C_{\epsilon 1}$  της εξίσωσης του, που εξαρτάται από την παραμόρφωση. Παράλληλα το μοντέλο μπορεί να εφαρμοσθεί είτε με τον μη-γραμμικό τύπο είτε με τον ιστροπικό τύπο της τάσης Reynolds.

Το μοντέλο είναι μια παραλλαγή του  $k\sim\epsilon$  και επομένως οι υπολογιστικοί υπολογισμοί είναι λίγο πιο δαπανηροί. Ωστόσο όμως οδηγεί σε βελτιώσεις στην πρόβλεψη περίπλοκων τυρβωδών ροών [28], [65].

Παρακάτω απεικονίζονται οι εξισώσεις του μοντέλου.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad 11.18$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - \frac{c_\mu n^3 \left( 1 - \frac{n}{n_o} \right) \epsilon^2}{1 + \beta_1 n^3} \frac{1}{k} \quad 11.19$$

$$n = S \frac{K}{\epsilon} \quad 11.20$$

$$S = \left( 2 S_{ij} S_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 11.21$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad 11.22$$

$$n_o = \sqrt{\frac{C_{\epsilon 2} - 1}{C_\mu (C_{\epsilon 1} - 1)}} \quad 11.23$$

Οι σταθερές του μοντέλου RNG derived  $k\sim\epsilon$  έχουν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 11.2

Πίνακας 11.2. Τιμές των σταθερών του μοντέλου RNG derived  $k\sim\epsilon$

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	$n_o$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\beta$
0.0845	1.42	1.68	$\tanh(u/v)$	4.38	0.719	0.719	0.012

Η μόνη σταθερά του μοντέλου που τροποποιείται και η τιμή της υπολογίζεται από τα δεδομένα της τύρβης είναι η  $\beta$ . Οι υπόλοιπες σταθερές ορίζονται από την μέθοδο [15], [34], [63].



## 12. Γενική Περιγραφή Κώδικα PHOENICS

Η λύση της τρισδιάστατης εργασίας θα γίνει με τη χρήση και την απαραίτητη τροποποίηση του υπολογιστικού κώδικα ρευστομηχανικής PHOENICS (Λονδίνο 1981). Είναι ένας κώδικας [26] υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) της εταιρείας CHAM Ltd. Το όνομά του – PHOENICS – προέρχεται από τα αρχικά των παρακάτω λέξεων.

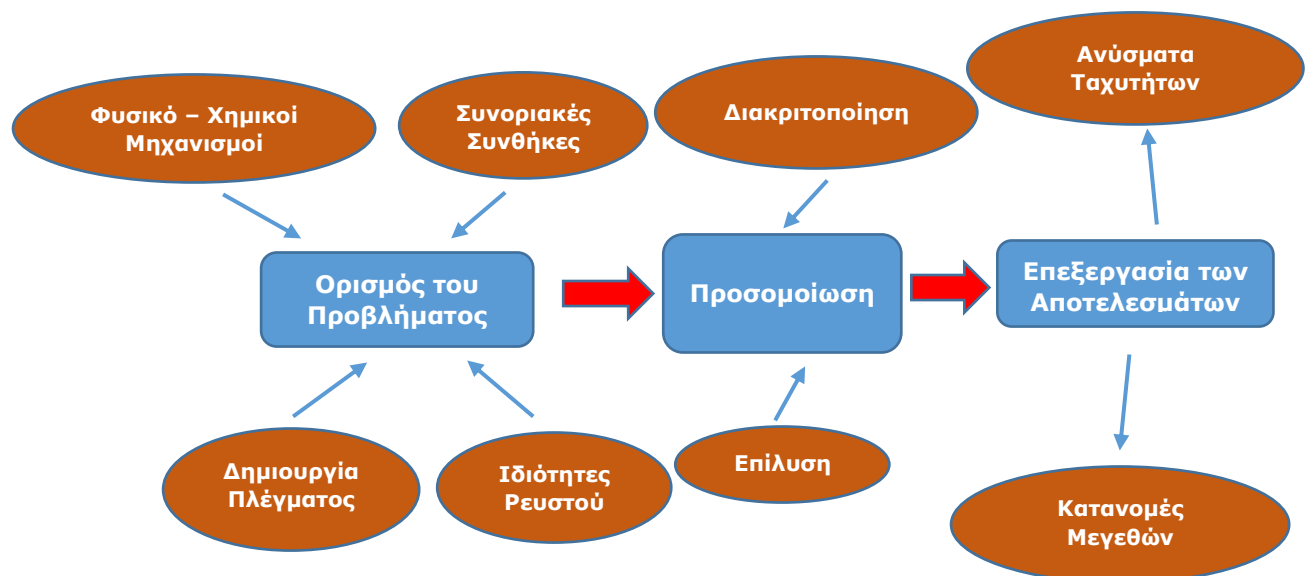
### Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series

Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής ρευστών (αέρας, νερό, ατμός, αίμα, κλπ), για εσωτερικές και εξωτερικές ροές (χημικούς αντιδραστήρες, μηχανές, κτήρια, ανθρώπινους οργανισμούς, ωκεανούς, κλπ), για τις μεταβολές χημικής και φυσικής σύστασης και των τάσεων που αναπτύσσονται σε στερεά σώματα.

Η διαδικασία (μεθοδολογία) της προσομοίωσης των φαινομένων μεταφοράς και των φυσικό-χημικών διεργασιών, σχηματικά έχει ως παρακάτω:



Αναλύοντας την κάθε διαδικασία προσομοίωσης σχετικά με την εισαγωγή και εξαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων, προκύπτουν τα εξής:



Ο κώδικας επιλύει αριθμητικά τις μερικές διαφορικές εξισώσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (FVM), η οποία είναι μία ολοκληρωτική μέθοδος (Integral method) και περιλαμβάνει τρία στάδια:

1ο στάδιο: Ολοκλήρωση των εξισώσεων διατήρησης σε όλους του πεπερασμένους όγκους ελέγχου (finite control volumes) του πεδίου επίλυσης (solution domain). Οι όγκοι ελέγχου προκύπτουν από την διακριτοποίηση του πεδίου επίλυσης σε μικρότερους που δεν αλληλεπικαλύπτονται και περιβάλλουν ο καθένας ένα πλεγματικό σημείο. Δηλαδή το πεδίο υπολογισμού διαιρείται σ' έναν αριθμό όγκων ελέγχου, που ο



**Διπλωματική Εργασία**  
**Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων**  
**Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου**

**Σύνταξη: Γ. Καβαθάς**  
**Σελίδα: 76 από 223**  
**Έκδοση: 10/06/2020**

καθένας περικλείει έναν κόμβο και η διαφορική εξίσωση ολοκληρώνεται πάνω σε κάθε όγκο ελέγχου.

2ο στάδιο: Η διακριτοποίηση περιλαμβάνει την αντικατάσταση των διαφόρων όρων της ολοκληρωτικής εξίσωσης με προσεγγίσεις πεπερασμένων διαφορών.

3ο στάδιο: Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με χρήση επαναληπτικής μεθόδου.



### 13. Αριθμητική Μέθοδος Επίλυσης

#### 13.1 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων ελέγχου (F.V.M)

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων Ελέγχου (finite volume method) [61], [27] [15], ανήκει στις ολοκληρωτικές μεθόδους (integral methods) αριθμητικής επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος είναι γενική και μπορεί να αντιμετωπίσει με επιτυχία προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, μάζας και ορμής.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου [15], [63] είναι ότι η λύση τηρεί την ολοκληρωτική διατήρηση μάζας, ορμής και θερμότητας για όλους τους όγκους ελέγχου, επομένως και για ολόκληρο το πεδίο. Η ιδιότητα αυτή τηρείται για οποιονδήποτε αριθμό πλεγματικών σημείων. Αν αυξήσουμε τον αριθμό των πλεγματικών σημείων, η λύση που προκύπτει προσεγγίζει όλο και περισσότερο την πραγματική.

Στις ολοκληρωτικές μεθόδους η διακριτοποιημένη εξίσωση, μέσω της οποίας προσδιορίζεται η αριθμητική λύση, προκύπτει από την ολοκλήρωση της εξίσωσης μεταφοράς πάνω σε κάποιο πεπερασμένο όγκο ελέγχου.

Αντίθετα, στις μη-ολοκληρωτικές μεθόδους (π.χ. πεπερασμένες διαφορές), η διακριτοποιημένη εξίσωση προκύπτει από τη διαφορική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς με προσέγγιση διαφορών των μερικών παραγώγων.

Η μαθηματική μέθοδος που θα αναφερθούμε στη συνέχεια, αποτελεί ουσιαστικά τα στάδια της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων ελέγχου, δηλαδή τη δημιουργία πλέγματος, τη διακριτοποίηση και την επίλυση των τελικών εξισώσεων που προκύπτουν καθώς και την αντιμετώπιση των όρων πηγής, διάχυσης και συναγωγής [39].

#### 13.2 Ολοκληρωτική Μορφή της Εξίσωσης Μεταφοράς

Η γενική εξίσωση μεταφοράς (9.5) ολοκληρώνεται πάνω στον όγκο ελέγχου  $V$  με σύνορο την επιφάνεια  $A$  και με την χρήση των μέσων τιμών των διαφόρων ποσοτήτων στον όγκο ελέγχου,  $V$ , προκύπτει:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho\phi]\Delta V + \iiint_V \text{div}(\rho\vec{u}\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) dV = [S_\phi]\Delta V \quad 13.1$$

Όπου  $\phi$  είναι μεταβλητή  $\phi$  ανά μονάδα μάζας. Εφαρμόζοντας το θεώρημα Gauss, το ολοκλήρωμα όγκου της απόκλισης του ρυθμού ροής της  $\phi$  μετατρέπεται σε επιφανειακό ολοκλήρωμα ροής:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho\phi]\Delta V + \iint_A (\rho\vec{u}\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) \cdot \vec{n} dA = [S_\phi]\Delta V \quad 13.2$$

Όπου  $\vec{n}$  το μοναδιαίο διάνυσμα, κάθετο στην επιφάνεια  $A$ .

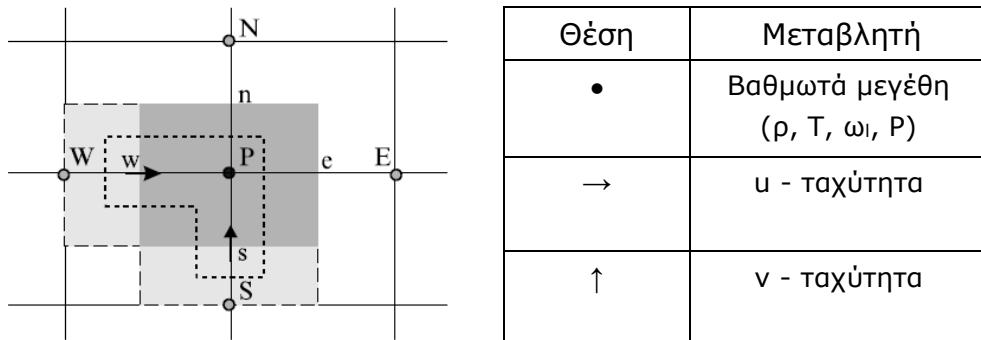
#### 13.3 Πλέγμα - Όγκοι Ελέγχου

Η ολοκλήρωση του επιφανειακού ολοκληρώματος της 13.2 απαιτεί τον ορισμό των όγκων ελέγχου. Για το σκοπό αυτό, το πεδίο χωρίζεται σε πεπερασμένους όγκους τυχαίου μεγέθους αλλά πάντοτε καρτεσιανού σχήματος. Ο τελευταίος περιορισμός



δηλώνει ότι οι όγκοι ελέγχου μπορεί να είναι μη-ορθογώνιου σχήματος αλλά θα έχουν πάντοτε έξη ακμές και έξη πλευρές, στη γενική τρισδιάστατη περίπτωση. Στο εσωτερικό κάθε όγκου ελέγχου ορίζεται το σημείο (P στο σχήμα 13.1) στο οποίο αποθηκεύονται οι τιμές των βαθμωτών μεγεθών  $\rho$ ,  $T$ ,  $\rho$ ,  $\omega_j$ .

Σχήμα 13.1: Μετατοπισμένο Πλέγμα

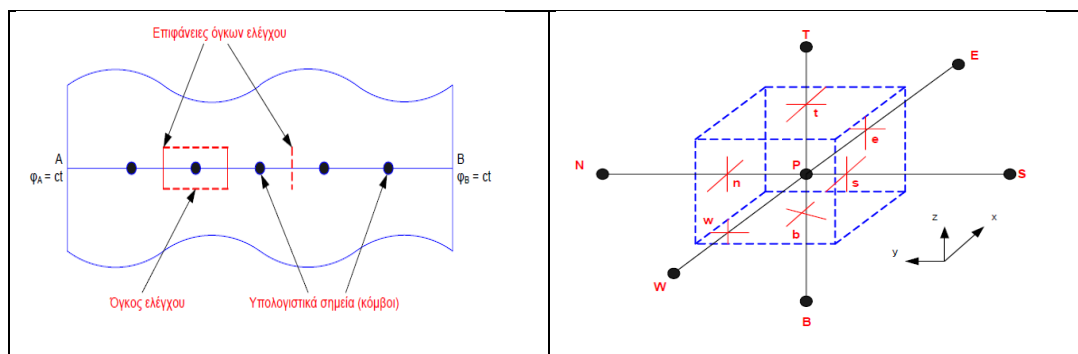


Για τη δημιουργία του πλέγματος ορίζεται η θέση των κόμβων του πλέγματος (σημεία αποθήκευσης βαθμωτών μεταβλητών). Στη συνέχεια, στη μέση της απόστασης δύο κόμβων και κάθετα στη γραμμή που τους ενώνει, χαράσσονται τα μέτωπα των όγκων ελέγχου. Με τη μέθοδο αυτή, όταν το πλέγμα είναι ανομοιόμορφο τα υπολογιστικά σημεία δεν βρίσκονται στο κέντρο των όγκων ελέγχου.

Οι τιμές των ταχυτήτων  $u$ ,  $v$  αποθηκεύονται στα μέτωπα των όγκων ελέγχου ( $W$ ,  $S$  στα σχήματα 13.1 και 13.2). Οι όγκοι ελέγχου των ταχυτήτων είναι κατά συνέπεια μετατοπισμένοι προς τα πίσω, ως προς τους όγκους ελέγχου των βαθμωτών μεγεθών. Η τριάδα των σημείων  $P$ ,  $W$ ,  $S$  έχουν στη μνήμη του υπολογιστή την ίδια θέση αναφοράς.

Η πρακτική αυτή ορίζει τρία σύνολα όγκων ελέγχου. Ένα για τα βαθμωτά μεγέθη, ένα για τις  $u$ -ταχύτητες και ένα για τις  $v$ -ταχύτητες.

Σχήμα 13.2: Όγκοι Ελέγχου [39], [15]



### 13.4 Διακριτοποίηση της Εξίσωσης Μεταφοράς

Εφαρμόζοντας τη γενική ολοκληρωτική εξίσωση μεταφοράς στον όγκο ελέγχου του σχήματος 13.1 ή 13.2, προκύπτει η σχέση:



$$\frac{d}{dt}[\rho\phi]V_P + g_e - g_w + g_n - g_s = [S_\phi]V_P \quad 13.3$$

όπου για παράδειγμα, η ροή της  $\phi$  από την ανατολική επιφάνεια του όγκου ελέγχου. θα είναι ίση με:

$$g_e = \iint_{A_e} \left( \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) dA_e \quad 13.4$$

Η διακριτοποίηση της εξίσωσης μεταφοράς, επιτυγχάνεται στη βάση των παρακάτω παραδοχών:

1. Ομοιόμορφη κατανομή των διαφόρων ποσοτήτων στον όγκο ελέγχου. Δηλαδή:

$$[\rho\phi]V_P = \rho_P \phi_P V_P \quad 13.5$$

$$[S_\phi]V_P = S_{\phi,P} V_P \quad 13.6$$

2. Ομοιόμορφη κατανομή των διαφόρων ποσοτήτων στα μέτωπα του όγκου ελέγχου. Για παράδειγμα, η ροή της  $\phi$  από την ανατολική επιφάνεια του όγκου ελέγχου θα είναι ίση με:

$$g_e = (\rho u)_e A_e \phi_e - \Gamma_e A_e \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_e = CE + DE \quad 13.7$$

3. Πρώτης τάξης προσέγγιση με ανάντη-διαφορές του όρου της χρονικής παραγώγου, όπου με πάνω δείκτη "o" συμβολίζεται η τιμή της μεταβλητής στο προηγούμενο χρονικό βήμα.

$$\frac{d}{dt}[\rho\phi]V_P = \frac{d}{dt}(\rho_P \phi_P) V_P = \frac{(\rho_P \phi_P - \rho_P^o \phi_P^o) V_P}{\Delta t} \quad 13.8$$

Με τη βοήθεια των παραδοχών αυτών η εξίσωση μεταφοράς παίρνει τη μορφή:

$$\frac{(\tilde{n}_P \phi_P - \tilde{n}_P^o \phi_P^o) V_P}{\Delta t} + (CE + DE) - (CW + DW) \quad 13.9$$
$$+ (CN + DN) - (CS + DS) = S_{\phi,P} V_P$$

Οι όροι (CE, CW, CN, CS) και (DE, DW, DN, DS) εκφράζουν όρους συναγωγής και διάχυσης αντίστοιχα. Όταν η εξαρτημένη μεταβλητή  $\phi$  συμπίπτει με κάποια από τις συνιστώσες της ταχύτητας ( $u$ ,  $v$ ), οι όροι συναγωγής (CE, CW, CN, CS) είναι μη-γραμμικοί. Για τη γραμμικοποίηση των όρων αυτών, η πρώτη ταχύτητα (ταχύτητα συναγωγής) θεωρείται γνωστή και η δεύτερη (μεταφερόμενη ποσότητα) ως άγνωστη. Η προσέγγιση αυτή αντιστοιχεί άμεσα στον τρόπο που αντιμετωπίζονται οι όροι αυτοί κατά την επίλυση των βαθμωτών μεταβλητών. Για να είναι όμως τότε δυνατή η επίλυση των εξισώσεων απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία.



### 13.5 Χειρισμός Όρων Συναγωγής και Διάχυσης

Για την πλήρη διακριτοποίηση της εξίσωσης μεταφοράς απαιτείται ο υπολογισμός των τιμών της μεταβλητής  $\varphi$  και των παραγώγων της στα μέτωπα των όγκων ελέγχου  $e$ ,  $w$ ,  $n$  και  $s$  ως συνάρτηση των τιμών της στα υπολογιστικά σημεία  $E$ ,  $W$ ,  $N$  και  $S$ .

#### Σχήμα Κεντρικών Διαφορών

Στο σχήμα κεντρικών διαφορών γίνεται η υπόθεση της γραμμικής κατανομής της ποσότητας  $\varphi$  γύρω από τα μέτωπα των όγκων ελέγχου. Η τιμή της  $\varphi$  και η πρώτη παράγωγός της στο δυτικό μέτωπο του όγκου ελέγχου δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varphi_w = 0.5(\varphi_W + \varphi_P) \quad 13.10$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_w = \frac{\varphi_P - \varphi_W}{\Delta x}$$

Η εξίσωση μεταφοράς για μονοδιάστατη, μόνιμη ροή, μετά την ολοκλήρωσή της, γράφεται:

$$CE + DE - CW - DW = S_{\varphi,P} V_P \quad 13.11$$

ή

$$(\rho u)_e A_e \varphi_e - \Gamma_e A_e \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_e - (\rho u)_w A_w \varphi_w + \Gamma_w A_w \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_e = S_{\varphi,P} V_P \quad 13.12$$

Μετά από αντικατάσταση των τιμών της  $\varphi$  και των παραγώγων στα μέτωπα του όγκου ελέγχου, προκύπτει:

$$\begin{aligned} 0.5C_e(\varphi_E + \varphi_P) - D_e(\varphi_E - \varphi_P) \\ -0.5C_w(\varphi_P + \varphi_W) + D_w(\varphi_P - \varphi_W) = S_{\varphi,P} V_P \end{aligned} \quad 13.13$$

Μετά από αντικατάσταση των τιμών της  $\varphi$  και των παραγώγων στα μέτωπα του όγκου ελέγχου, προκύπτει:

$$A_P \varphi_P = A_E \varphi_E + A_W \varphi_W + S_{\varphi,P} V_P \quad 13.14$$

Γενικά το σχήμα των κεντρικών διαφορών οδηγεί σε αφύσικες λύσεις εκτός αν καθορίσουμε το πλέγμα να είναι υπερβολικά πυκνό. Αυτό όμως είναι δυνατόν να συνεπάγεται αδικαιολόγητα μεγάλο κόστος υπολογισμών.

#### Σχήμα Ανάντη Διαφορών

Για να ξεπερασθεί η προηγούμενη δυσκολία χρησιμοποιείται για τους όρους συναγωγής το σχήμα των ανάντη διαφορών. Σύμφωνα με αυτό, στο δυτικό μέτωπο του όγκου ελέγχου, η τιμή της  $\varphi$  ορίζεται, από τις:

$$\varphi_w = \begin{cases} \varphi_W, & \text{όταν } u_w \geq 0 \\ \varphi_P, & \text{όταν } u_w < 0 \end{cases} \quad 13.15$$





Και η παράγωγός της ορίζεται:

$$\left[ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]_w = \frac{\varphi_P - \varphi_W}{\Delta x} \quad 13.16$$

Η ολοκληρωμένη εξίσωση μεταφοράς (17.9) για τη μονοδιάστατη και σε μόνιμη κατάσταση ροή, γράφεται:

$$CE + DE - CW - DW = S_{\varphi P} V_P \quad 13.17$$

ή

$$A_P \varphi_P = A_E \varphi_E + A_W \varphi_W + S_{\varphi P} V_P \quad 13.18$$

Η ανωτέρω σχέση αποτελεί τις εξισώσεις διακριτοποίησης για ένα οποιοδήποτε εσωτερικό κόμβο.

### 13.6 Υβριδικό Σχήμα

Για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα των κεντρικών και των ανάντη διαφορών και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθούν, τα μειονεκτήματά τους, εισάγεται το υβριδικό σχήμα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία.

$$C_e \varphi_e + D_e (\varphi_P - \varphi_E) - C_w \varphi_w - D_w (\varphi_W - \varphi_P) = S_{\varphi P} V_P \quad 13.19$$

Έτσι η σχέση (17-18) μπορεί να γραφεί με τη γενική μορφή:

$$-C_w \varphi_w + D_w (\varphi_P - \varphi_W) = \left\{ \max[0.5 C_w, D_w] + 0.5 C_w \right\} (\varphi_P - \varphi_W) - C_w \varphi_P \quad 13.20$$

$$C_e \varphi_e + D_e (\varphi_P - \varphi_E) = \left\{ \max[0.5 C_e, D_e] - 0.5 C_e \right\} (\varphi_P - \varphi_E) + C_e \varphi_P$$

Αντικαθιστώντας την πρώτη εξίσωση της 13.20 στην 13.19 προκύπτει και πάλι η μορφή της 13.18.

$$A_P \ddot{\varphi}_P = A_E \ddot{\varphi}_E + A_W \ddot{\varphi}_W + S_{\delta, P} V_P \quad 13.21$$

### 13.7 Επίλυση Συστημάτων Εξισώσεων

Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις διατήρησης [27], [61], [62] για τις μη-υδροδυναμικές μεταβλητές γραμμένες για όλα τα πλεγματικά σημεία δημιουργούν ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων το οποίο λύνεται με χρήση αλγορίθμου επίλυσης γραμμικών συστημάτων. Στην περίπτωση των υδροδυναμικών μεταβλητών ( $P$ ,  $u$ ,  $v$ ) χρησιμοποιείται μια πρόσθετη διαδικασία. Ο λόγος είναι ότι οι εξισώσεις ορμής περιέχουν ως άγνωστο και την πίεση,  $p$ . Αν η τελευταία ήταν γνωστή τότε και οι εξισώσεις ορμής θα επιλύονταν με τον ίδιο τρόπο. Όμως η πίεση είναι και αυτή



μεταβλητή που πρέπει να υπολογισθεί πράγμα που δημιουργεί την ανάγκη εισαγωγής ενός αλγόριθμου επίλυσης του υδροδυναμικού πεδίου.

Σε γενικές γραμμές για την επίλυση μιας υδροδυναμικής μεταβλητής  $\Phi$ , θα απαιτηθεί μια εξίσωση όπου η  $\Phi$  να είναι κυρίαρχη μεταβλητή. Για την επίλυση τέτοιων εξισώσεων χρησιμοποιούνται κάποιοι αλγόριθμοι μερικοί από τους πιο γνωστούς αναφέρονται παρακάτω [15]:

- SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)
- SIMPLEST (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Shortened)
- SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent)

### Αλγόριθμος SIMPLE

Για την επίλυση μιας ορισμένης  $\phi$  μεταβλητής, απαιτείται μια εξίσωση όπου η  $\phi$  να είναι κυρίαρχη μεταβλητή. Όλες οι μη υδροδυναμικές μεταβλητές ικανοποιούν αυτή την συνθήκη. Οι  $u$ ,  $v$  ικανοποιούν αυτή την απαίτηση μέσω των εξισώσεων ορμής. Για την πίεση όμως δεν υπάρχει τέτοια εξίσωση. Υπάρχει μια επιπλέον εξίσωση, η εξίσωση συνέχειας, στην οποία όμως δεν εμφανίζεται καθόλου η πίεση.

Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος λέγεται SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [27], [61], [62] και στηρίζεται στην εκτίμηση ενός πεδίου πίεσης  $P^*$  και στη διόρθωση αυτού μέχρι οι ταχύτητες που προκύπτουν, να ικανοποιήσουν την εξίσωση συνέχειας και τις εξισώσεις ορμής.

Διόρθωση Ταχύτητας. Έστω μια εκτίμηση πίεσης  $P^*$ . Το πεδίο ταχυτήτων, που βασίζεται σε αυτήν την εκτίμηση της πίεσης, θα είναι το  $(u^*, v^*, w^*)$ . Αν:

$$P = P^* + P' \quad 13.22$$

$$u = u^* + u' \quad 13.23$$

όπου  $P$ ,  $u$  είναι οι σωστές (correct) μεταβλητές και  $P'$ ,  $u'$  είναι η πίεση και ταχύτητα διόρθωσης (pressure - velocity-correction) αντίστοιχα, η εξίσωση πεπερασμένων όγκων για την  $u$ -ορμή θα έχει τη μορφή:

$$(A_p - SP_u)u_p^* = \sum_{i=\gamma\epsilon\iota\tau\omicron\nu\epsilon\varsigma} A_i u_i^* + A_{ew}(P_w^* - P_p^*) + SU_u \quad 13.24$$

ή

$$A_p u_p' = \sum_{i=\gamma\epsilon\iota\tau\omicron\nu\epsilon\varsigma} A_i u_i' + A_{ew}(P_w' - P_p') \quad 13.25$$

Στον αλγόριθμο SIMPLE γίνεται η υπόθεση ότι:

$$\sum A_i u_i' \rightarrow 0 \quad 13.26$$

Οπότε:



$$A_p u'_p = A_{ew}(P'_W - P'_p) \quad 13.27$$

Ως προς την διόρθωση της ταχύτητας  $u'$ , οι θα δίδονται από τον παρακάτω τύπο:

$$u_p = u_p^* + DU_{w'} \cdot (P'_W - P'_p) \quad 13.28$$

Ως προς την διόρθωση της πίεσης,  $P'$ , από την διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης συνέχειας, έχουμε:

$$\frac{(\rho_p - \rho_p^0)V_p}{\Delta t} + \left[ (\rho u)_e A_e - (\rho u)_w A_w \right] + \left[ (\rho v)_n A_n - (\rho v)_s A_s \right] = 0 \quad 13.29$$

Εάν στην παραπάνω αντικατασταθούν όλες οι συνιστώσες της ταχύτητας, θα προκύψει η εξίσωση διόρθωσης πίεσης:

$$A_p P'_p = A_E P'_E + A_W P'_W + A_N P'_N + A_S P'_S + S_m$$
$$A_p = A_E + A_W + A_N + A_S \quad 13.30$$

$$S_m = \frac{(\rho_p^0 - \rho_p)V_p}{\Delta t} + \left[ (\rho u^*)_w A_w - (\rho u^*)_e A_e \right] + \left[ (\rho v^*)_n A_n - (\rho v^*)_s A_s \right]$$

Ο όρος πηγής,  $S_m$ , ταυτίζεται με τη διακριτοποιημένη εξίσωση συνέχειας, με αρνητικό πρόσημο και εκφρασμένη σε όρους εκτίμησης ταχύτητας, ( $u^*$ ). Συνεπώς, όταν  $S_m=0$ , η εξίσωση συνέχειας θα ικανοποιείται από τις  $u^*$ -ταχύτητες και η μέθοδος θα έχει συγκλίνει.

Συνεπώς, ο όρος πηγής,  $S_m$ , παριστάνει έναν όρο μάζας ο οποίος θα πρέπει να μηδενίζεται όταν το πρόβλημα συγκλίνει.

Συνοψίζοντας, τα βήματα του αλγορίθμου SIMPLE είναι [27], [61], [62]:

1. Εκτίμηση πεδίου πίεσης  $P^*$
2. Επίλυση εξισώσεων ορμής για ( $u^*$ ,  $v^*$ )
3. Επίλυση εξίσωσης διόρθωσης πίεσης
4. Υπολογισμός σωστής πίεσης από  $P=P^*+P'$
5. Διόρθωση ταχυτήτων
6. Επίλυση της εξίσωσης θερμότητας, συγκέντρωσης συστατικού και λοιπών βαθμωτών μεγεθών.
7. Επιστροφή στο Βήμα 1, θέσε  $P^*=P$  και επανέλαβε μέχρι να πραγματοποιηθεί σύγκλιση.

### Αλγόριθμος SIMPLEC

Στον αλγόριθμο SIMPLE αγνοήθηκε ο όρος της σχέσης 13.26. Η παράλειψη του όρου αυτού έχει επίδραση στις τιμές που παίρνει η μεταβλητή  $P'$ , που έτσι προκύπτουν σημαντικά μεγαλύτερες. Για να αντιμετωπιστούν οι μεγάλες μεταβολές στις τιμές της πίεσης από την μια επίλυση στην αμέσως επομένη, χρησιμοποιείται υποχαλάρωση με



επακόλουθο την ανάγκη εκτέλεσης επιπλέον επαναληπτικών επιλύσεων για την επίτευξη της σύγκλισης.

Οι Van Doormal et al, 1984 [40] παρατήρησαν ότι η αγνόηση του όρου της σχέσης 13.26 που γίνεται στον αλγόριθμο SIMPLE δεν είναι απόλυτα συνεπής. Στην πραγματικότητα αγνοείται ο όρος αυτός στο δεξιό μέλος της 13.25 και ταυτόχρονα όρος της ίδιας τάξης μεγέθους, που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης, διατηρείται έμμεσα. Τα παραπάνω γίνονται εμφανή αν αναπτυχθεί ο συντελεστής  $A_p$  μέσω της σχέσης 13.26.

Οι Van Doormal et al προτείνουν την παράλειψη του όρου  $\sum A_i u_i'$  και από τα δύο μέλη της 17.25:

$$\left( A_p - \sum_{i=\gamma \epsilon \text{ ί τ ο ν ε ζ}} A_i u_i' \right) u_p = A_{ew}(P'_W - P'_p) \quad 13.31$$

Ο νέος αλγόριθμος είναι γνωστός ως SIMPLEC και η σπουδαιότερη βελτίωση, σε σχέση με το SIMPLE, που εισάγει είναι ότι πλέον η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης δεν χρειάζεται υποχαλάρωση. Επιπλέον, στις εξισώσεις ορμής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχετικά μεγαλύτεροι συντελεστές υποχαλάρωσης επιτρέποντας, έτσι, μια ταχύτερη σύγκλιση της επίλυσης.

### Αλγόριθμος SIMPLEST

Ο αλγόριθμος SIMPLEST είναι μια βελτιωμένη εκδοχή του αλγόριθμου SIMPLE [15]. Η διαφορά στους δύο αλγόριθμους είναι ότι στη περίπτωση του πρώτου οι όροι συναγωγής των διακριτοποιημένων εξισώσεων ορμής διαχωρίζονται από τους όρους διάχυσης και συγκεντρώνεται μαζί με τους όρους πηγής όπου αντιμετωπίζονται ως γνωστές σταθερές. Κατά αυτόν το τρόπο στην εξίσωση διόρθωσης των ταχυτήτων χρησιμοποιούνται μονάχα οι όροι διάχυσης σε αντίθεση με τη περίπτωση του SIMPLE που εισάγονται και οι όροι διάχυσης και οι όροι συναγωγής. Έτσι το πλεονέκτημα του SIMPLEST είναι ότι χειρίζεται τη διάχυση με μεθόδους ταυτόχρονης επίλυσης, ενώ τη μεταφορά δια συναγωγής με μεθόδους σημείο – προς – σημείο.

Τέλος στη περίπτωση του αλγόριθμου SIMPLEST που χρησιμοποιεί τη μέθοδο Jacobi, έχουμε ταχύτερη και πιο ομαλή σύγκλιση σε σχέση με τον SIMPLE και επιπλέον απαιτούνται μικρότερες υποχαλαρώσεις [45].

### Συμπεράσματα

Οι επαναληπτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν κυρίως τους αλγόριθμους SIMPLER και SIMPLEC επειδή έχουν πολύ καλή σύγκλιση, αλλά χωρίς να μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι ο ένας αλγόριθμος είναι καλύτερος του άλλου ή όχι [15]. Επιπρόσθετα όλοι οι αλγόριθμοι χρειάζονται υποχαλάρωση προκειμένου να εξασφαλίσουν σταθερότητα στις επαναληπτικές μεθόδους.

Ο αλγόριθμος SIMPLE ήταν επιτυχής, αλλά έχει αρκετά μειονεκτήματα και χρησιμοποιείται όλο και λιγότερο με την πάροδο του χρόνου. Οι αλγόριθμοι SIMPLER και SIMPLEST προσπαθούν να εξαλείψουν τα μειονεκτήματα του SIMPLE [15].

Για την εργασία θα χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος SIMPLEST.



### 13.8 Μέθοδοι Επίλυσης Συστημάτων Εξισώσεων

Κατά την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων διατήρησης (ορμής, μάζας, ενέργειας) με αριθμητικές μεθόδους, προκύπτει ένα σύστημα "τυπικά" γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων [27]. Η επίλυση του συστήματος αυτού, αποτελεί το σημαντικότερο, σε υπολογιστικό χρόνο βήμα, στην πορεία επίτευξης της προσεγγιστικής λύσης του προβλήματος.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων επίλυσης συστημάτων γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Οι:

- Άμεσες μέθοδοι, και οι
- Επαναληπτικές μέθοδοι.

Βασική διαφορά των δύο μεθόδων είναι ο αριθμός των βημάτων που απαιτούνται για την επίτευξη της λύσης. Οι άμεσες μέθοδοι οδηγούν στη λύση του συστήματος (εφόσον αυτή υπάρχει) μετά από ένα σταθερό αριθμό συστηματικών βημάτων. Οι επαναληπτικές μέθοδοι οδηγούν στη λύση ασυμπτωτικά, μέσω μιας προκαθορισμένης επαναληπτικής διαδικασίας.

Τα κριτήρια με τα οποία αξιολογούνται οι μέθοδοι επίλυσης συστημάτων γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων είναι η ακρίβεια, η αποτελεσματικότητα, η γενικότητα και η απλότητα [27].

1. Η ακρίβεια αναφέρεται στην ικανότητα της μεθόδου να παρέχει τη λύση με τον επιθυμητό αριθμό σημαντικών ψηφίων.
2. Η αποτελεσματικότητα αναφέρεται στην ποσότητα του υπολογιστικού έργου που απαιτείται για την επίτευξη της λύσης με την επιθυμητή ακρίβεια.
3. Η γενικότητα αναφέρεται στην ικανότητα της μεθόδου να συμπεριφέρεται αποδοτικά σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων και συνθηκών.
4. Η απλότητα αναφέρεται στην ευκολία κατανόησης και εφαρμογής της μεθόδου.

Στα πλαίσια της εργασίας έχει χρησιμοποιηθεί η Επαναληπτική μέθοδος Jacobi.

Σε γενικές γραμμές ένα σύστημα  $N$  γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με  $N$  αγνώστους, στη γενική του μορφή, περιγράφεται από την εξίσωση:  $AX = B$ , όπου  $A = a_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, N$ ) ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων,  $X = x_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) ο πίνακας - στήλη των αγνώστων μεταβλητών και  $B = b_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) ο πίνακας-στήλη των σταθερών (μη-ομογενών) όρων.

Σε ένα πεδίο δύο διαστάσεων και χρησιμοποιώντας μια πεπλεγμένη μέθοδο χρονικής ολοκλήρωσης προκύπτει μια γραμμική αλγεβρική εξίσωση της μορφής:

$$\begin{aligned} AP_{i,j} \varphi_{i,j} &= AE_{i,j} \varphi_{i+1,j} + AW_{i,j} \varphi_{i-1,j} + \\ &AN_{i,j} \varphi_{i,j+1} + AS_{i,j} \varphi_{i,j-1} + B_{i,j} \end{aligned} \quad 13.32$$

Οι επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης συστημάτων γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων εκμεταλλεύονται την αραιή μορφή του πίνακα των συντελεστών και εμφανίζουν έτσι αυξημένη αποτελεσματικότητα, σε σχέση με τις άμεσες μεθόδους. Επιπλέον, δεν απαιτούν την αποθήκευση των μηδενικών στοιχείων του πίνακα  $A$ , μειώνοντας έτσι, τον απαιτούμενο υπολογιστικό χώρο. Ταυτόχρονα μειώνουν τον υπολογιστικό φόρτο, καθώς δεν πραγματοποιούν πράξεις με τα μηδενικά στοιχεία.



Το πρόβλημα όμως που εισάγουν είναι η ανάγκη σύγκλισης της επαναληπτικής διαδικασίας. Πρέπει, λοιπόν, να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι δυνατή η σύγκλιση των επαναληπτικών μεθόδων. Μία ικανή (όχι όμως αναγκαία) συνθήκη σύγκλισης των επαναληπτικών μεθόδων, είναι η διαγώνια υπεροχή του πίνακα των συντελεστών. Ένας πίνακας παρουσιάζει διαγώνια υπεροχή όταν η απόλυτη τιμή του κάθε στοιχείου της κύριας διαγώνιου είναι ίση με, ή μεγαλύτερη από, το άθροισμα των απολύτων τιμών όλων των άλλων στοιχείων που βρίσκονται στην ίδια γραμμή, με την ανισότητα να ισχύει τουλάχιστον για ένα στοιχείο.

Οι επαναληπτικές μέθοδοι στηρίζονται στην αναδιάταξη του αρχικού συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η επίλυσή του να είναι οικονομικότερη από πλευράς υπολογιστικού χρόνου και χώρου. Κάτω από τη σκοπιά αυτή, ένα σύστημα εξισώσεων γράφεται με τη μορφή:

$$(N + P) \Phi = B \quad \text{ή} \quad N \Phi = -P \Phi + B \quad 13.33$$

έτσι ώστε ο πίνακας N να μη διαφέρει πολύ από τον A ( $N \approx A$ ) αλλά να είναι εύκολη η παραγοντοποίησή του.

#### Μέθοδος Jacobi

Στη μέθοδο Jacobi [27], [61] χρησιμοποιείται η εξής απλούστατη αναδιάταξη των εξισώσεων.

$$\phi_{i,j}^k = \frac{AE_{i,j}\phi_{i+1,j}^{k-1} + AW_{i,j}\phi_{i-1,j}^{k-1} + AN_{i,j}\phi_{i,j+1}^{k-1} + AS_{i,j}\phi_{i,j-1}^{k-1} + B_{i,j}}{AP_{i,j}} \quad 13.34$$

Οι πίνακες N και P, της γενικής επαναληπτικής μεθόδου, ορίζονται στην περίπτωση αυτή ως:  $N = D$  και  $P = L + U$ , όπου D είναι ο διαγώνιος πίνακας του A και L, U ο κάτω και ο άνω-τριγωνικός πίνακας με μηδενική διαγώνιο αντίστοιχα.

#### Μέθοδος Gauss-Seidel

Η μέθοδος αυτή [27], [61] αποτελεί μια προσπάθεια βελτίωσης της ταχύτητας σύγκλισης της μεθόδου Jacobi. Αντί των τιμών της  $\phi$  στην  $k-1$  επανάληψη, χρησιμοποιούνται οι τιμές της τρέχουσας ( $k$ ) επανάληψης για τις μεταβλητές που έχουν ήδη επιλυθεί. Δηλαδή:

$$\phi_{i,j}^k = \frac{AE_{i,j}\phi_{i+1,j}^{k-1} + AW_{i,j}\phi_{i-1,j}^k + AN_{i,j}\phi_{i,j+1}^{k-1} + AS_{i,j}\phi_{i,j-1}^k + B_{i,j}}{AP_{i,j}} \quad 13.35$$

και οι πίνακες N, P έχουν τη μορφή:  $N = D + L$  και  $P = U$

#### Μέθοδος της Διαδοχικής Υπερχαλάρωσης

Η μέθοδος της διαδοχικής υπερχαλάρωσης (successive overrelaxation) παρέχει μια σημαντική βελτίωση στην ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου Gauss-Seidel. Οι τιμές της  $\phi$  στην τρέχουσα ( $k$ ) επανάληψη υπολογίζονται σαν ένας σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών στην προηγούμενη επανάληψη και των τιμών που δίνει η μέθοδος Gauss-Seidel.



$$\phi_{i,j}^k = a \left( \frac{AE_{i,j}\phi_{i+1,j}^{k-1} + AW_{i,j}\phi_{i-1,j}^k + AN_{i,j}\phi_{i,j+1}^{k-1} + AS_{i,j}\phi_{i,j-1}^k + B_{i,j}}{AP_{i,j}} \right) + (1-a)\phi_{i,j}^{k-1} \quad 13.36$$

Η παράμετρος  $a$  ονομάζεται συντελεστής χαλάρωσης. οι πίνακες  $N$ ,  $P$  έχουν τη μορφή:  $N = D/a + L$  και  $P = (a-1)D/a + U$ .

#### Μέθοδος Επίλυσης Γραμμή προς Γραμμή

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται σε μια αναδιάταξη των γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη επίλυσή τους κατά μήκος μιας κατακόρυφης ή οριζόντιας γραμμής υπολογιστικών σημείων. Για να γίνει αυτό, οι όροι που περιέχουν τις τιμές της  $\phi$  στα σημεία έξω από τη γραμμή επίλυσης, μεταφέρονται στο δεξιό σκέλος των εξισώσεων.

Με την αναδιάταξη αυτή το αρχικό σύστημα μετατρέπεται σε ένα σύνολο τριδιαγώνιων συστημάτων που μπορεί να λυθεί επαναληπτικά με τον αλγόριθμο Thomas.

#### Μέθοδος SIP

Η μέθοδος SIP (Strongly Implicit Procedure) αναπτύχθηκε από το Stone, (Stone, 1968) με στόχο να ικανοποιήσει τα ακόλουθα κριτήρια [27], [41], [61]:

1. Η αναδιάταξη του συστήματος των εξισώσεων να εμφανίζει όσο το δυνατόν πιο πεπλεγμένη μορφή. Δηλαδή, ο πίνακας  $N$  (όπως ορίζεται στη γενική επαναληπτική μέθοδο) να διαφέρει ελάχιστα από τον  $A$ .
2. Η απαλοιφή του πίνακα  $N$  να είναι να είναι όσο το δυνατόν πιο απλή.

Για την ικανοποίηση του δεύτερου κριτηρίου, ο πίνακας  $N$  επιλέγεται έτσι ώστε να μπορεί να παραγοντοποιηθεί σε γινόμενο δύο πινάκων  $N=LU$ , οι οποίοι περιέχουν τρεις μόνο μη-μηδενικές διαγώνιους. Συγκεκριμένα, ο πίνακας  $L$  περιέχει μη-μηδενικά στοιχεία στις αντίστοιχες των  $AP$ ,  $AW$  και  $AS$  διαγώνιους του πίνακα  $A$ , ενώ ο πίνακας  $U$  περιέχει μη-μηδενικά στοιχεία στις αντίστοιχες των  $AE$  και  $AN$  διαγώνιους και έχει μοναδιαία κύρια διαγώνιο. Ο πίνακας  $N$  προκύπτει, σχηματίζοντας το γινόμενο των πινάκων  $LU$  όπως αυτοί έχουν οριστεί. Ο πίνακας αυτός εμφανίζει δύο επιπλέον διαγώνιους σε σχέση με τον αρχικό πίνακα  $A$ . Οι διαγώνιες αυτές βρίσκονται αμέσως μετά και πριν τις διαγώνιους  $AS$  και  $AN$ , και πολλαπλασιάζουν τις τιμές  $\phi_{i+1,j-1}$  και  $\phi_{i-1,j+1}$  του πίνακα των αγνώστων αντίστοιχα.

Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν οι ακόλουθες αναδρομικές σχέσεις υπολογισμού των συντελεστών των  $L$ ,  $U$ :

$$BS_{i,j} = -\frac{AS_{i,j}}{1 + aBE_{i,j-1}}$$
$$BW_{i,j} = -\frac{AW_{i,j}}{1 + aBN_{i-1,j}}$$



$$BP_{i,j} = AP_{i,j} + a(BS_{i,j}BE_{i,j-1} + BW_{i,j}BN_{i-1,j}) - BS_{i,j}BN_{i,j-1} - BW_{i,j}BE_{i-1,j}$$

$$BE_{i,j} = \frac{-AE_{i,j} - aBS_{i,j}BE_{i,j-1}}{BP_{i,j}}$$

$$BN_{i,j} = \frac{-AN_{i,j} - aBW_{i,j}BN_{i-1,j}}{BP_{i,j}}$$

Ακολουθώντας την τακτική της γενικής επαναληπτικής μεθόδου, σε κάθε επανάληψη επιλύεται ένα σύστημα το οποίο είναι ισοδύναμο με τα δύο τριγωνικά συστήματα:

$$LY^k = -R^{k-1} \text{ και } U\Delta^k = Y^k \quad 13.38$$

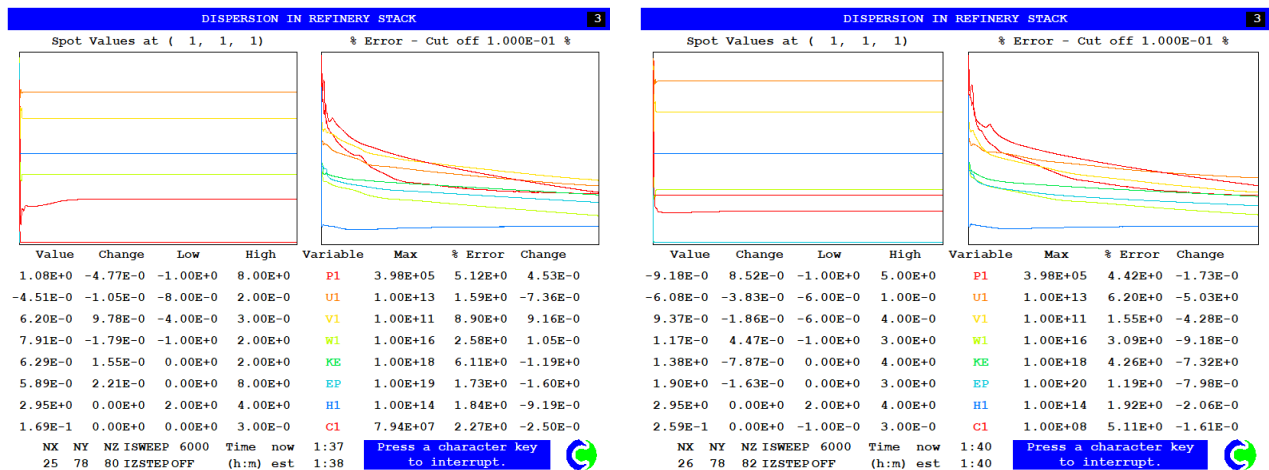
Συνοψίζοντας, σε κάθε επανάληψη της μεθόδου SIP πραγματοποιούνται τα ακόλουθα βήματα:

- Υπολογισμός του πίνακα των υπολοίπων  $R^{k-1}$ .
- Υπολογισμός των πινάκων  $L, U$ .
- Υπολογισμός του πίνακα  $Y^k$ .
- Υπολογισμός του πίνακα των διορθώσεων  $\Delta^k$ .
- Υπολογισμός του πίνακα των αγνώστων  $\Phi^k$ .

### 13.9 Παράθυρα Ελέγχου Υπολογιστικού Προγράμματος

Στα σχήματα που ακολουθούν υπάρχουν παράθυρα ελέγχου του Phoenics από διάφορες προσομοιώσεις.

Σχήμα 13.3: Παράθυρα Ελέγχου Phoenics



Προσομοίωση Καμινάδας χωρίς κώνο με ταχύτητα ανέμου 4 m/s και τραχύτητα 0,3

Προσομοίωση Καμινάδας με κώνο με ταχύτητα ανέμου 6 m/s και τραχύτητα 0,3





## 14. Περιγραφή Εργασίας

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση του πλουμίου ρύπων από μία καμινάδα διυλιστηρίου. Δηλαδή την συμπεριφορά της διασποράς των αερίων ρύπων στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Ουσιαστικά, γίνεται μαθηματική προσομοίωση των εκπομπών από την λειτουργία της καμινάδας με χρήση λογισμικού. Με αυτό τον τρόπο εκτιμάται το εύρος και η απόσταση της εναπόθεσης των ρύπων κάτω από συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες και παραμέτρους λειτουργίας του φούρνου.

Πιο συγκεκριμένα αντικείμενο της εργασίας είναι η καμινάδα του φούρνου της Μονάδας Απόσταξης Κενού. Το χρονικό εύρος που επιλέχθηκε τόσο για τα δεδομένα τροφοδοσίας του λογισμικού, όσο και για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, είναι το 2018.

Εξετάστηκε η εν λόγω καμινάδα γιατί με βάση το έτος 2018, δίνει το 50% περίπου των εκπομπών διοξειδίου του θείου επί του συνόλου των αντίστοιχων εκπομπών από όλες τις καμινάδες του διυλιστηρίου.

Οι παράμετροι λειτουργίας του φούρνου σχετίζονται με την ποιότητα του καυσίμου, το φορτίο και τις συνθήκες καύσης (λόγος αέρα-καυσίμου, ταχύτητα προσαγωγής θερμού αέρα, την ποιότητα των πρώτων υλών, κλπ). Οι γεωμετρικές διαστάσεις του φούρνου δεν αποτελούν παραμέτρους, εφόσον δεν μεταβάλλονται, αλλά καθορίζουν την μέγιστη δυναμικότητα του.

Οι μετεωρολογικές συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη, είναι η ταχύτητα του ανέμου (σχετίζεται άμεσα με την ένταση της τύρβης) και η επικρατούσα θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Από την καμινάδα διαφεύγει θερμό ρεύμα αερίων ρύπων με σύσταση που καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τις φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον φούρνο. Η σύσταση των ρύπων αποτελείται από  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$  και σωματίδια.

Οι ρυπαντές που θα προσομοιωθούν είναι το διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ), το διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ) και τα συνολικά σωματίδια. Η προσομοίωση έγινε λαμβάνοντας υπόψη πραγματικά δεδομένα από τον αναλυτή της καμινάδας και την μεταβολή της συγκέντρωσης των ανωτέρω ρύπων συναρτήση των χωρικών συντεταγμένων και του χρόνου.

Εξετάστηκαν σενάρια προσομοίωσης με καμινάδα με και χωρίς κώνο, σε διάφορα ύψη και εντάσεις ανέμου. Παράλληλα αξιολογήθηκε η χρήση της αδιάστατης συγκέντρωσης στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ρύπου άμεσα και χωρίς την χρήση του κώδικα.

Σαν λογισμικό χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός κώδικας PHOENICS με πραγματικά δεδομένα από τις Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις Ελευσίνας της Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε.

Επιπρόσθετα στην εργασία έγινε χρήση δύο σχημάτων διακριτοποίησης, του Υβριδικού και του Van Leer. Ως προς τα μοντέλα τύρβης, χρησιμοποιήθηκαν το RNG derived  $k-\epsilon$ , ενώ έγινε σύγκριση με το απλό  $k-\epsilon$ .



## 15. Περιγραφή Διεργασίας

Στην Μονάδα Κενού [24] το ατμοσφαιρικό υπόλειμμα κλασμάτωναται σε έναν πύργο Κενού. Η κλασμάτωση επιτυγχάνεται γιατί η βαθμιαία μείωση της θερμοκρασίας από τον πυθμένα στην κορυφή του πύργου, προκαλεί στο να συμπυκνωθούν πρώτα τα συστατικά με το υψηλότερο σημείο βρασμού, ενώ αυτά με το μικρότερο ανεβαίνουν ψηλότερα στον πύργο προτού συμπυκνωθούν.

Μέσα στον πύργο οι ανερχόμενοι ατμοί και το κατερχόμενο υγρό αναμιγνύονται σε επίπεδα όπου υπάρχουν συστάσεις σε ισορροπία μεταξύ τους. Υπάρχουν δίσκοι σε αυτά τα επίπεδα οι οποίοι απομακρύνουν το κλάσμα από το υγρό το οποίο συμπυκνώνονται σε κάθε επίπεδο.

Η Μονάδα Κενού αποτελείται από τα παρακάτω κύρια τμήματα.

- Το τμήμα προθέρμανσης της τροφοδοσίας
- Το φούρνο Κενού
- Τον πύργο Κενού
- Το σύστημα Παραγωγής κενού

Η τροφοδοσία οδηγείται στο φούρνο, όπου θερμαίνεται στους 420°C πριν την εισαγωγή της στη ζώνη εκτόνωσης του πύργου. Εκεί κλασμάτωναται σε light gas oil (LVGO), heavy gas oil (HVGO), τα οποία θα συνδυασθούν για να αποτελέσουν την τροφοδοσία σε άλλες μονάδες του διυλιστηρίου. Οι πύργοι Κενού, παρέχουν την απαιτούμενη μειωμένη πίεση για την αποφυγή θερμικών πυρολύσεων όταν διυλίζεται το υπόλειμμα από τον πύργο ατμοσφαιρικής σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Πύργοι μεγαλύτερης διαμέτρου χρησιμοποιούνται για να κρατήσουν χαμηλότερες τις ταχύτητες.

Στο φούρνο θα πρέπει:

- Να υπάρχουν τέτοιες συνθήκες φορτίου ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία εξόδου.
- Να διατηρούνται συνθήκες βέλτιστου ελκυσμού.
- Να διατηρούνται κατάλληλες ποσότητες περίσσειας αέρα, ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης καύση και ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας.

Ο φούρνος είναι διπλής καμπίνας φούρνος, με κοινό convection και εξωτερικό σύστημα προθέρμανσης αέρα καύσης. Ο φούρνος μπορεί να λειτουργήσει σε δύο διαφορετικές καταστάσεις ελκυσμού:

1. Μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση balanced draft, με το σύστημα προθέρμανσης σε λειτουργία. Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, τα καυσαέρια από την έξοδο του convection οδηγούνται μέσω προθερμαντήρα, όπου προθερμαίνεται ο αέρας καύσης, και στη συνέχεια οδηγούνται στην καμινάδα, μέσω του Induced Draft Fun. Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας τα Forced Duct Fun και Induced Draft Fun είναι σε λειτουργία και το κεντρικό damper της καμινάδας είναι κλειστό.
2. Μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση forced draft με κρύο αέρα καύσης. Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, τα καυσαέρια, οδηγούνται απευθείας στην καμινάδα.

Στην έξοδο της καμινάδας υπάρχουν όργανα καταγραφής συγκέντρωσης ( $\text{mgr/m}^3$ ) των  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , PM, πίεσης (hPa), θερμοκρασίας και ροής ή παροχής εξόδου ( $\text{m}^3/\text{hr}$ ) των καυσαερίων.



## 16. Δεδομένα Εργασίας

### 16.1 Δεδομένα Καμινάδας

Για την ανάπτυξη του μοντέλου θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από το διυλιστήριο μέσω του λογισμικού PI [42] που είναι εγκατεστημένο στην εγκατάσταση.

Είναι διαθέσιμα δεδομένα ημερήσιων μέσων όρων για όλο το 2018 για τις ακόλουθες παραμέτρους: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM, H<sub>2</sub>O, Πίεση εξόδου καυσαερίων, Θερμοκρασία Εξόδου Καυσαερίων, Συνολικής Ροής Καυσαερίων, O<sub>2</sub>, Θερμοκρασία Περιβάλλοντος, Ένταση και Διεύθυνση Ανέμων.

Για την εργασία έχει επιλεγεί ο ετήσιος (2018) μέσος όρος συγκεντρώσεων ρύπων και ρυθμού εκροής των καυσαερίων (σύνολο ρυπαντών, υδρατμούς, οξυγόνο) από την καμινάδα, οπότε έχουμε τους παρακάτω πίνακες.

Η σχέση μετατροπής συγκέντρωσης των μεταβλητών σε κανονική (normal) συγκέντρωση, δίνεται από τον παρακάτω τύπο [51].

$$C_{ref} = Cx \frac{T_m}{T_{ref}} \times \frac{p_{ref}}{p_m} \times \frac{100\% - h_{ref}}{100\% - h_m} \times \frac{21\% - o_{ref}}{21\% - o_m} \quad 16.1$$

Όπου:

T<sub>ref</sub>: η απόλυτη κανονική θερμοκρασία

T<sub>m</sub>: η απόλυτη μετρούμενη θερμοκρασία του αερίου

p<sub>ref</sub>: η κανονική πίεση

p<sub>m</sub>: η μετρούμενη πίεση του αερίου

h<sub>ref</sub>: η κανονική περιεκτικότητα σε υδρατμούς (0 σε ξηρά βάση)

h<sub>m</sub>: η μετρούμενη περιεκτικότητα σε υδρατμούς του αερίου

o<sub>ref</sub>: η κανονική περιεκτικότητα σε οξυγόνο

o<sub>m</sub>: η μετρούμενη περιεκτικότητα σε οξυγόνο του αερίου

#### 16.1.1 Σχεδιαστικά Δεδομένα Καμινάδας

Πρόκειται για καμινάδα [25] ύψους 60 m και εσωτερικής διαμέτρου 2,77 m. Το υλικό κατασκευής είναι ο χάλυβας (carbon steel) πάχους 50 mm με εσωτερική πυρίμαχη επένδυση για λόγους θερμικής μόνωσης του υλικού κατασκευής από τα θερμά καυσαέρια.

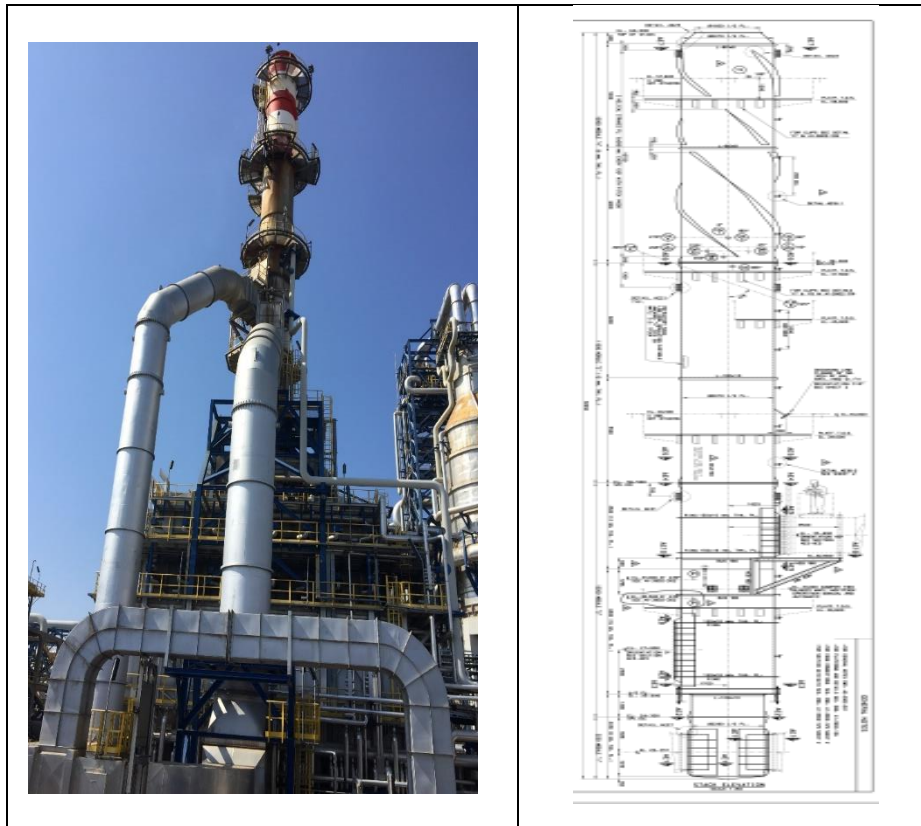
Οι συντεταγμένες της καμινάδας είναι 3.823, E και -22.834 N.

Στην έξοδο της καμινάδας έχει τοποθετηθεί ειδικός κώνος για την αύξηση της ταχύτητας εκροής με ύψος 0,66 m και τελική διάμετρο οπής εξόδου καυσαερίων το 1,85 m.

Στα παρακάτω σχήματα υπάρχουν φωτογραφία της καμινάδας και το αντίστοιχο κατασκευαστικό σχέδιο από το οποίο αντλήθηκαν τα γεωμετρικά δεδομένα της.



Σχήμα 16.1: Φωτογραφία και Κατασκευαστικό σχέδιο Καμινάδας



### 16.1.2 Δεδομένα Ρύπων Εκροής από την Καμινάδα

Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν οι ρυθμοί εκροής των ρύπων. Από την διεργασία της Μονάδας, δεν υπάρχει σαν ρύπος το υδρόθειο.


Πίνακας 16.1: Δεδομένα Ρύπων

Kg ρύπου/kg αέρα		
SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM
4,48 X 10 <sup>-4</sup>	1,42 X 10 <sup>-4</sup>	5,37 X 10 <sup>-6</sup>

Σχετικά με την σύνθεση των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), το μεγαλύτερο ποσοστό είναι μονοξείδιο του αζώτου (NO). Το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο από 95% με την συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) να έχει ποσοστό μικρότερο του 5% [59]. Λόγω του γεγονότος ότι οι οριακές συνθήκες ποιότητας της ατμόσφαιρας είναι εκφρασμένες σε διοξείδιο του αζώτου, η τιμές των συγκεντρώσεων του οξειδίου του αζώτου από την έξοδο της καμινάδας, είναι εκφρασμένες και αυτές σε διοξείδιο του αζώτου. Αυτό συμβαίνει γιατί μόλις το μονοξείδιο του αζώτου εισέρχεται στην ατμόσφαιρα οξειδώνεται γρήγορα σε διοξείδιο ( $2NO + O_2 \Leftrightarrow 2NO_2$ ).

Ο τύπος που χρησιμοποιείται για την μετατροπή, είναι:

$$\text{συγκέντρωση NO}_2 = \text{συγκέντρωση NO} \times 46/30$$

	<b>Διπλωματική Εργασία</b>	<b>Σύνταξη: Γ. Καβαθάς</b> <b>Σελίδα: 93 από 223</b> <b>Έκδοση: 10/06/2020</b>
	<b>Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων</b> <b>Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου</b>	

όπου 46 είναι το Μοριακό Βάρος του διοξειδίου του αζώτου και 30 το αντίστοιχο του μονοξειδίου. Οπότε η συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου είναι το άθροισμα των συγκεντρώσεων διοξειδίου και μονοξειδίου.

### 16.1.3 Λειτουργικά Στοιχεία Καμινάδας

Πίνακας 16.2: Λειτουργικά Στοιχεία Καμινάδας

Στοιχεία Λειτουργίας Καμινάδας					
Πίεση	Θερμοκρασία	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Επιφάνεια Εκροής Καυσαερίων (m <sup>2</sup> )	
hPa	°C	%	%	Χωρίς κώνο	Με κώνο
1.010,58	201,64	1,95	11,16	6,02	2,69

Πίνακας 16.3: Στοιχεία Καυσαερίων

Στοιχεία Καυσαερίων						
Συνολική Ροή Καυσαερίων			Ειδικό Βάρος	Συνολική Ροή Καυσαερίων	Ταχύτητα Εξόδου Καυσαερίων (m/s)	
m <sup>3</sup> /hr	m <sup>3</sup> /s	Nm <sup>3</sup> /hr	Kg/m <sup>3</sup>	kg/s	Χωρίς κώνο	Με κώνο
147.155,96	40,88	79.422,76	0,7450	30,45	6,79	15,21

### 16.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα Περιοχής Διυλιστηρίου

Για το 2018, η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 19,9 °C. Επίσης η συχνότητα εμφάνισης του ανέμου με συγκεκριμένα εύρη έντασης έχουν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 16.4: Συχνότητα Έντασης Ανέμου

Μετεωρολογικά Δεδομένα						
Ένταση Ανέμου m/s	Calm	0,5-2	2-4	4-6	6-9	>9
Συχνότητα %	21,28	32,99	37,27	7,85	0,59	0,01

Μια περαιτέρω ανάλυση της έντασης του ανέμου λαμβάνοντας υπόψη και την διεύθυνση καταλήγουμε στον Πίνακα 16.5.



Πίνακας 16.5: Συχνότητα Έντασης Ανέμου συνάρτηση της Διεύθυνσης του

	Ένταση Ανέμου (m/s)					
	0,5-2	2-4	4-6	6-9	>9	
Διεύθυνση Ανέμου (°)	0	2,71%	2,37%	0,40%	0,03%	0,00%
	22,5	1,23%	0,96%	0,15%	0,01%	0,00%
	45	0,87%	0,66%	0,05%	0,00%	0,00%
	67,5	0,96%	0,63%	0,11%	0,00%	0,00%
	90	1,74%	1,39%	0,17%	0,01%	0,00%
	112,5	3,98%	6,48%	1,88%	0,13%	0,00%
	135	0,96%	1,38%	0,41%	0,06%	0,00%
	157,5	0,32%	0,50%	0,18%	0,00%	0,00%
	180	0,55%	0,58%	0,27%	0,02%	0,00%
	202,5	0,50%	0,54%	0,22%	0,00%	0,00%
	225	0,74%	0,82%	0,18%	0,06%	0,00%
	247,5	0,92%	1,67%	0,32%	0,03%	0,00%
	270	1,08%	1,63%	0,47%	0,01%	0,00%
	292,5	1,61%	1,12%	0,25%	0,01%	0,00%
	315	5,54%	4,18%	0,53%	0,01%	0,00%
337,5	9,28%	12,35%	2,26%	0,21%	0,01%	

Για την Διεύθυνση του Ανέμου ισχύει ο Παρακάτω Πίνακας.

Πίνακας 16.6: Συσχέτιση Διεύθυνσης Ανέμου με °

Συσχέτιση Διεύθυνσης Ανέμου							
0° ή 360°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
B	BA	A	NA	N	NΔ	Δ	BΔ

Όπου:

- |                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| B: Βόρειος Άνεμος    | BA: Βόρειο Ανατολικός Άνεμος |
| A: Ανατολικός Άνεμος | NA: Νότιο Ανατολικός Άνεμος  |
| N: Νότιος Άνεμος     | NΔ: Νότιος Δυτικός Άνεμος    |
| Δ: Δυτικός Άνεμος    | BΔ: Βόρειο Δυτικός Άνεμος    |

Στην εργασία, μας ενδιαφέρουν οι διευθύνσεις ανέμων που επηρεάζουν τις πόλεις της Ελευσίνας και της Μάνδρας. Πιο συγκεκριμένα την Ελευσίνα την επηρεάζουν άνεμοι διεύθυνσης 225° – 270° (νοτιοδυτικοί – δυτικοί), ενώ την Μάνδρα την επηρεάζουν άνεμοι διεύθυνσης 180° – 225°, δηλαδή νότιοι – νοτιοδυτικοί.



Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, με βάση την ταχύτητα του ανέμου και την εκτιμώμενη ένταση ηλιοφάνειας για κάθε ώρα της ημέρας, έγινε αντιστοίχιση με τις κατηγορίες ευστάθειας, όπως αυτές ορίζονται με τα κριτήρια του Pasquill (Κεφάλαιο 7.6). Τα πρωτογενή στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ως άνω κατάταξη, ήταν πίνακες με τις ταχύτητες ανέμου, με βάση τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της εγκατάστασης.

Τα κριτήρια κατάταξης σε κατηγορίες ευστάθειας τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, έχουν ως ακολούθως [54]:

Πίνακας 16.7: Κριτήρια Κατάταξης σε Κατηγορίες Ευστάθειας

Ταχύτητα Ανέμου	Διεύθυνση	Περίοδος Ημέρας	Κλάση Ευστάθειας
< 3 m/s		Ημέρα	κλάση ευστάθειας A
3-6 m/s	Μη νότιος	Ημέρα	κλάση ευστάθειας B
3-6 m/s	Νότιος	Ημέρα	κλάση ευστάθειας D
>6 m/s		Ημέρα	κλάση ευστάθειας C
>2 m/s		Νύχτα	κλάση ευστάθειας E
<2 m/s		Ημέρα	κλάση ευστάθειας F

Τα ποσοστά άπνοιας, δηλαδή οι ταχύτητες ανέμου της τάξης των 0,5 m/s, τα οποία στην περιοχή είναι ιδιαίτερα αυξημένα, κατανεμήθηκαν στην κλάση με την μικρότερη ταχύτητα, δηλαδή στην κλάση ατμοσφαιρικής ευστάθειας A για την ημέρα και την κλάση F για τη νύχτα.

Τα αποτελέσματα της ως άνω κατάταξης μετά από αναγωγή των δεδομένων του Πίνακα 16.5 και την αναγωγή του ποσοστού άπνοιας στις ασθενέστερες κλάσεις ευστάθειας, παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 16.8: Συχνότητες Διευθύνσεων Ανέμου και Καταστάσεις Ευστάθειας (%)

Διεύθυνση ανέμου	B	BA	A	NA	N	NΔ	Δ	ΒΔ	Σύνολο
Κλάση A	19,42	2,21	2,78	9,52	1,60	1,27	4,60	9,33	50,73
Κλάση B	7,76	0,15	0,18	1,33	0	0,2	0,39	0,45	10,46
Κλάση C	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κλάση D	0	0	0	1,1	0,12	0,25	0	0	1,47
Κλάση E	3,25	1,01	1,31	2,65	0,52	0,65	1,05	2,69	13,13
Κλάση F	6,28	1,78	2,26	4,25	1,35	1,63	1,68	4,98	24,21
Σύνολο	36,71	5,15	6,53	18,85	3,59	4	7,72	17,45	100

Προκύπτει ότι το πεδίο ανέμων παρουσιάζει μια σημαντική συχνότητα σε βόρειους ανέμους (γύρω στο 37%). Οι άνεμοι νότιας διεύθυνσης παρουσιάζουν πολύ μικρό ποσοστό εμφάνισης (γύρω στο 4%), ενώ οι δυτικοί και ανατολικοί άνεμοι κυμαίνονται σε χαμηλά ποσοστά της τάξης του 6 με 7%. Οι βόρειοι άνεμοι, τείνουν να μεταφέρουν



## Διπλωματική Εργασία

**Μαθηματική Μοντελοποίηση Διασποράς Αερίων Ρύπων  
Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας Διυλιστηρίου**

**Σύνταξη: Γ. Καβαθάς  
Σελίδα: 96 από 223  
Έκδοση: 10/06/2020**

τους ρύπους οι οποίοι εκλύονται από την εγκατάσταση προς την πλευρά του Σαρωνικού, ενώ οι άνεμοι νότιας διεύθυνσης που είναι κατά κανόνα ασθενέστεροι (θαλάσσια αύρα), τείνουν να μεταφέρουν τους ρύπους προς το Θριάσιο πεδίο και την πόλη της Μάνδρας. Οι δυτικοί άνεμοι τείνουν να μεταφέρουν τους ρύπους την περιοχή της Ελευσίνας, ενώ οι ανατολικοί άνεμοι προς την περιοχή του Λουτρόπυργου.

Όσον αφορά στη συχνότητα εμφάνισης των διαφόρων κλάσεων ευστάθειας, μετά την αναγωγή του ποσοστού άπνοιας στις ασθενέστερες κλάσεις ευστάθειας, η συνηθέστερη κατηγορία ευστάθειας είναι η Α με ποσοστό εμφάνισης 51% περίπου, ακολουθεί η κατηγορία F με ποσοστό 24 % περίπου, η κατηγορία E με ποσοστό 13% περίπου και η κατηγορία B με ποσοστό 10% περίπου.

Λαμβάνοντας υπόψη του Πίνακες 7.3, 16.7 και 16.8, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα για τις συνθήκες ευστάθειας του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος κατά την διάρκεια του 2018.

Η κατηγορία Α κυρίως συνδυάζεται με βόρειους, βόρειο – δυτικούς ανέμους με ποσοστό εμφάνισης συχνότητας 12%. Η κατηγορία αυτή παρουσιάζει χαμηλές εν γένει ταχύτητες ανέμου ( $< 2$  m/sec) και συνδυάζεται με ύψος αναστροφής γύρω στα 700 m. Η κατηγορία Α χαρακτηρίζεται από έντονες κατακόρυφες κινήσεις.

Η κατηγορία Β συνδυάζεται εν γένει με βόρειους και βορειοδυτικούς ανέμους σε ποσοστό σχεδόν 15% και είναι κυρίως υπεύθυνη για την μεταφορά αερίων ρύπων προς την θάλασσα και συνδυάζεται με μέση ταχύτητα ανέμου 2 - 4 m/s και ύψος αναστροφής γύρω στα 600 m.

Η κατηγορία D παρουσιάζει ποσοστά εμφάνισης 1,5% περίπου και συνδυάζεται σχεδόν αποκλειστικά με ανέμους νότιας και νότιο – ανατολικής διεύθυνσης και κατά κανόνα η κατηγορία αυτή περιγράφει την ευστάθεια της ατμόσφαιρας όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της θαλάσσιας αύρας. Αντιστοιχεί ένα μέσο ύψος αναστροφής 500 m περίπου και μέση ταχύτητα ανέμου 5 m/s. Η κατηγορία D χαρακτηρίζεται από σχηματισμό μέτριων συγκεντρώσεων σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις από την πηγή.

Και οι τέσσερις τάξεις ευστάθειας που αναφέρονται ανωτέρω είναι τάξεις που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της ημέρας. Κατά την διάρκεια της νύκτας η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται από τις τάξεις ευστάθειας E και F, οι οποίες έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Η κατηγορία E που παρουσιάζει ποσοστό εμφάνισης, σχεδόν 13%, χαρακτηρίζεται κυρίως από βόρειους, βόρειο δυτικούς ανέμους. Η ταχύτητα του ανέμου στην κατηγορία αυτή δεν υπερβαίνει τα 3 m/s, ενώ το ύψος της αναστροφής, η οποία είναι αναστροφή ακτινοβολίας, δεν ξεπερνά τα 200 m.

Η κατηγορία F αφορά σε πολύ ευσταθείς συνθήκες κατά την διάρκεια της νύκτας, εμφανίζεται στο 24% και συνδυάζεται κυρίως με βόρειους, βόρειο δυτικούς ανέμους και πολύ μικρές ταχύτητες (1-2 m/s), ενώ το ύψος της αναστροφής είναι δυνατόν να φθάσει και τα 150m. Η κατηγορία F, λόγω του μεγάλου ύψους των καμινάδων το πλούμιο φθάνει στο επίπεδο του εδάφους σε μεγάλη απόσταση από την πηγή και έχει επέλθει σημαντική αραιώση.

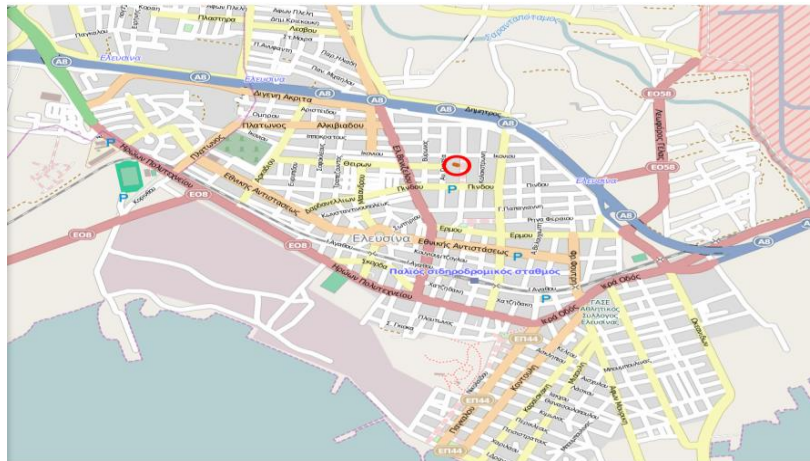




### 16.3 Δεδομένα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην πόλη της Ελευσίνας

Για το 2018, οι παρακάτω μετρήσεις προέρχονται από το σταθμό μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή της Ελευσίνας που είναι τοποθετημένος εντός του κόκκινου κύκλου στο σχήμα που ακολουθεί.

Σχήμα 16.2: Σημείο Τοποθέτησης Σταθμού Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην Περιοχή της Ελευσίνας [57]



Λόγω έλλειψης στοιχείων για την πόλη της Μάνδρας, γίνεται η παραδοχή ότι ισχύουν τα στοιχεία της πόλης της Ελευσίνας.

#### 16.3.1 Διοξείδιο του Θείου

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ετήσιας (2018) Έκθεσης [57], η μέση ετήσια τιμή σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  είναι 11. Η τιμή εξάγεται από τις ωριαίες τιμές.

Οι μέσες μηνιαίες τιμές έχουν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 16.9: Μέσες Μηνιαίες Τιμές [57]

1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος
11	10	12	14	4	10	12	12	12	10	17	

Πίνακας 16.10: Τιμές σε 24ωρη βάση [57]

Διοξείδιο του θείου (τιμές σε 24ωρη βάση σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέση	Διάμεση	98% τιμών < από	Αριθμός ημερησίων τιμών > από 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	37	11	11	23

Πίνακας 16.11: Τιμές σε ωριαία βάση [57]

Διοξείδιο του θείου (τιμές σε 24ωρη βάση σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέση	Διάμεση	98% τιμών < από	Αριθμός ημερησίων τιμών > από 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	133	10	29	0



### 16.3.2 Διοξειδίο του Αζώτου

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ετήσιας (2018) Έκθεσης [57], η μέση ετήσια τιμή σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  είναι 24. Η τιμή εξάγεται από τις ωριαίες τιμές.

Πίνακας 16.12: Μέσες Μηνιαίες Τιμές [57]

1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	3 <sup>ος</sup>	4 <sup>ος</sup>	5 <sup>ος</sup>	6 <sup>ος</sup>	7 <sup>ος</sup>	8 <sup>ος</sup>	9 <sup>ος</sup>	10 <sup>ος</sup>	11 <sup>ος</sup>	12 <sup>ος</sup>
28	27	28	34	25	22	22	15	19	23	23	28

Πίνακας 16.13: Τιμές σε ωριαία βάση [57]

Διοξειδίο του Αζώτου (τιμές σε 24ωρη βάση σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέση	Διάμεση	98% τιμών < από	Αριθμός ημερησίων τιμών > από 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	109	20	62	0

### 16.3.3 Αιωρούμενα Σωματίδια

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ετήσιας (2018) Έκθεσης [57], η μέση ετήσια τιμή σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  είναι 29. Η τιμή εξάγεται από τις ωριαίες τιμές. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η εκτιμώμενη συνεισφορά μεταφοράς σκόνης σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  από απομακρυσμένες ξηρές περιοχές (π.χ. Σαχάρα) στη μετρούμενη συγκέντρωση της μέσης τιμής. Για το 2018 υπήρχαν οκτώ (8) περιπτώσεις μεταφοράς σκόνης.

Οι μέσες μηνιαίες τιμές έχουν σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 16.14: Μέσες Μηνιαίες Τιμές [57]

1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	3 <sup>ος</sup>	4 <sup>ος</sup>	5 <sup>ος</sup>	6 <sup>ος</sup>	7 <sup>ος</sup>	8 <sup>ος</sup>	9 <sup>ος</sup>	10 <sup>ος</sup>	11 <sup>ος</sup>	12 <sup>ος</sup>
27	23	41	39	30	29	28	26	25	31	23	25

Πίνακας 16.15: Τιμές σε 24ωρη βάση [57]

Αιωρούμενα Σωματίδια (τιμές σε 24ωρη βάση σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέση	Διάμεση	98% τιμών < από
	245	26	61

Πίνακας 16.16: Τιμές σε ωριαία βάση [57]

Αιωρούμενα Σωματίδια (τιμές σε 24ωρη βάση σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Μέση	Διάμεση	98% τιμών < από
	388	25	79



## 17. Οριακές Συνθήκες Εργασίας – Αδιάστατοι Αριθμοί

Στους πεπερασμένους όγκους ελέγχου, οι οριακές συνθήκες εισάγονται με τη μορφή ενός όρου πηγής (ψευδοπηγή). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει ακριβέστερη προσομοίωση των οριακών συνθηκών.

Οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση της ορμής είναι:

- Είσοδος. Διατήρηση των τιμών από τις αρχικές συνθήκες, στα όρια του πεδίου.
- Εκροή. Ορίζονται οι κλίσεις των μεταβλητών, κατά την διεύθυνση της ροής ίσες με μηδέν.
- Στερεά όρια. Η συνιστώσα της ταχύτητας που είναι παράλληλη στον τοίχο ορίζεται ίση με μηδέν.

### 17.1 Οριακές Συνθήκες Στερεών Ορίων Πλέγματος

Στα στερεά όρια στο πλέγμα γίνεται χρήση των συναρτήσεων τοίχου (wall functions), όπου τα μεγέθη στα οριακά κελιά ορίζονται με βάση τις εξισώσεις που ισχύουν σε ροή παράλληλη σε λεία πλάκα. Η παράλληλη προς το τοίχωμα ταχύτητα και η διατμητική τάση που ασκείται στο τοίχωμα, υπολογίζονται από διαφορετικές συσχετίσεις στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα.

Οι συναρτήσεις τοίχου ακολουθούν το λογαριθμικό νόμο που δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\varphi}{\varphi^0} = \frac{\sigma_\varphi}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z^0}\right) \quad 17.1$$

Όπου:

$\sigma_\varphi$ : ο τυρβώδης αριθμός Prandtl

$\kappa$ : η σταθερά Von Karman (=0.416)

$\Phi$ : το φυσικό μέγεθος

Επιπρόσθετα χρησιμοποιείται για τις συναρτήσεις τοίχου ως κριτήριο, η αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα:

$$y^+ = \frac{\rho y}{\mu} \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad 17.2$$

Όπου  $y$  η απόσταση από το τοίχωμα.

Όταν το πλεγματικό σημείο βρίσκεται μέσα στο υπόστρωμα της στρωτής ροής θα ισχύει:

$$u^+ = y^+ \quad 17.3$$

$$u^+ = \frac{u_p}{u^*} \quad 17.4$$

Όπου:



$u^+$ : η αδιάστατη ταχύτητα

$u^*$ : η ταχύτητα τύρβης

$u_p$ : η ταχύτητα στο σημείο P του πλέγματος

Ο λογαριθμικός νόμος δίνει συντελεστή τριβής:

$$s = \left(\frac{u^*}{U}\right)^2 \quad 17.5$$

Όπου: U η ταχύτητα στον πρώτο κόμβο.

Ο συντελεστής τριβής για τυρβώδη ροή είναι:

$$s = \left(\frac{\kappa}{\ln(ER_\varepsilon s^{1/2})}\right)^2 \quad 17.6$$

Αν το σημείο του πλέγματος, βρίσκεται έξω από το υπόστρωμα της στρωτής ροής, ισχύει:

$$s = \frac{1}{R} \quad 17.7$$

Όπου:

$\kappa$ : η σταθερά Von Karman (=0.416)

$\varepsilon$ : η παράμετρος τραχύτητας η οποία είναι συνάρτηση της τραχύτητας και των διατμητικών τάσεων.

Για τους παραμέτρους  $\kappa$  και  $\varepsilon$  του τυρβώδους μοντέλου που χρησιμοποιείται, οι συναρτήσεις τοίχου δίνονται από τις σχέσεις:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad 17.8$$

Και για το  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{0.1643k^{3/2}}{0.41y} \quad 17.9$$

## 17.2 Οριακές Συνθήκες Πεδίου Ροής

Εκτός από τις οριακές συνθήκες τοίχου, θα πρέπει να εφαρμοστούν και οι κατάλληλες οριακές συνθήκες που θα περιγράφουν το πεδίο ροής.

Η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο του πεδίου δίνεται από τον λεγόμενο εκθετικό νόμο μέχρι το ύψος του οριακού στρώματος και παραμένει σταθερή για μεγάλα ύψη. Παράλληλα η ταχύτητα τριβής δίνεται από τον παρακάτω τύπο.



$$u^* = \frac{u_{10} \kappa}{\ln\left(\frac{10}{h_0}\right)} \quad 17.10$$

Όπου:

$u^*$ : ταχύτητα τριβής

$u_{10}$ : η ταχύτητα του αέρα σε ύψος ίσο με 10m

$h_0$ : το ενεργό ύψος τραχύτητας του εδάφους

$\kappa$ : είναι η σταθερά Von Karman (= 0,416)

Επομένως η ταχύτητα του αέρα στο πεδίο ροής δίνεται ως εξής:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{y}{h_0} \quad 17.11$$

Όπου:

$u^*$ : ταχύτητα τριβής, όπως έχει υπολογιστεί από τον τύπο 17.10.

$u$ : η ταχύτητα του αέρα σε διάφορα ύψη  $y$

$h_0$ : το ενεργό ύψος τραχύτητας του εδάφους

$\kappa$ : είναι η σταθερά Von Karman (= 0,416)

Για το τυρβώδες ιξώδες έχουμε:

$$V_t = C_D \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 17.12$$

Όπου:

$V_t$ : τυρβώδες ιξώδες

$C_D$ : Εμπειρική παράμετρος ίση με 0,09

$k$ : Κινητική ενέργεια τύρβης

$\varepsilon$ : Ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας από μεγάλες δίνες στις μικρές

Για το μήκος ανάμειξης ιξώδες έχουμε:

$$l_m = \kappa y \quad 17.13$$

Όπου:

$l_m$ : χαρακτηριστικό μήκος ανάμειξης σε διάφορα ύψη  $y$  του πεδίου ροής.

$\kappa$ : Σταθερά Von Karman = 0,416

Για τον ρυθμό μεταφοράς της ενέργειας έχουμε την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon = \frac{u^*{}^3}{l_m} \quad 17.14$$

Όπου:



$u^*$ : ταχύτητα τριβής

$l_m$ : χαρακτηριστικό μήκος ανάμιξης σε διάφορα ύψη  $y$  του πεδίου ροής.

Για την κινητική ενέργεια ισχύει:

$$k = \frac{u_*^2}{C_\mu^{\frac{1}{2}}} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 \quad 17.15$$

Όπου:

$u^*$ : ταχύτητα τριβής

$y$ : ύψος πεδίου ροής

$\delta$ : το ύψος του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος

$C_\mu$ : είναι σταθερά (= 0,0845)

Η πίεση θεωρείται ομοιόμορφη σε όλο το πεδίο, όπως και η θερμοκρασία. Στην έξοδο του πεδίου θεωρούμε, ότι η μεταβολή των μεταβλητών που επιλύονται είναι μηδενική.

### 17.3 Οριακές Συνθήκες Συγκεντρωτικά

Στον πίνακα 17.1 που ακολουθεί υπάρχουν συγκεντρωτικά οι οριακές συνθήκες.

Πίνακας 17.1: Οριακές Συνθήκες Εργασίας

Μεταβλητή	Είσοδος Πεδίου	Στερεά Όρια	Άνω Όριο	Πλευρικά Όρια	Έξοδος
w	0	Συναρτήσεις τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
v	0	Συναρτήσεις τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
u	$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{y}{h_0}$	Συναρτήσεις τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
k	$k = \frac{u_*^2}{C_\mu^{\frac{1}{2}}} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2$ για $y \leq 0,9\delta$ $k = 0,01 \frac{u_*^2}{C_\mu^{\frac{1}{2}}}$ για $y > 0,9\delta$ [30]	$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}$	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
$\varepsilon$	$\varepsilon = \frac{u_*^3}{l_m}$ $l_m = 0.416y,$ $l_{m \max} = 0.09\delta$ $y_{m \max} = 0.22\delta$	$\varepsilon = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{1,5}}{l_m}$	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
$P_{\text{dyn}}$	-	-	-	-	0



#### 17.4 Τραχύτητα Εδάφους

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 7.3 - Υποδιαίρεση Α.Ο.Σ - η τραχύτητα της επιφάνειας εδάφους επηρεάζει την τύρβη της ροής αέρα. Τυπικά μήκη τραχύτητας εδάφους δίνονται στο πίνακα που ακολουθεί [50].

Πίνακας 17.2: Τυπικά μήκη τραχύτητας εδάφους

Τύπος του πεδίου ροής	Μήκος Τραχύτητας (m)
Πόλεις - Δάση	0,7
Προάστια, Άλσος	0,3
Χωριά - Εξοχή με δένδρα και χαμηλή βλάστηση	0,1
Ανοιχτές γεωργικές εκτάσεις, λίγα δέντρα και κτίρια	0,03
Επίπεδες πεδιάδες με πολύ χαμηλή βλάστηση	0,01
Επίπεδη έρημος, θάλασσα	0,001

Στα πλαίσια της εργασίας ελήφθησαν υπόψη δύο μήκη τραχύτητας το 0,1 m και 0,3 m. Το μήκος που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα είναι το 0,3 m, μια και οι πόλεις της Ελευσίνας και της Μάνδρας έχουν χαμηλή οικιστική ανάπτυξη ως προς το ύψος και κατηγοριοποιούνται σαν "προάστια" σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα.

#### 17.5 Αδιάστατοι Αριθμοί

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αδιάστατος αριθμός συγκέντρωσης, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση [43]:

$$C_{non\ dimensional} = \frac{\rho C w L^2}{Q} \quad 17.16$$

όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα

$C$ : η συγκέντρωση του ρύπου εκφρασμένη σαν kgf ρύπου ανά kgf αέρα

$w$ : η οριζόντια ταχύτητα αέρα

$L$ : το μήκος της καμινάδας

$Q$ : Ρυθμός έκλυσης καυσαερίων



## 18. Ανάπτυξη Αριθμητικού Μοντέλου

### 18.1 Δεδομένα Αναφοράς - Παραδοχές

Στην συγκεκριμένη εργασία, ο κώδικας έχει λάβει υπόψη τα παρακάτω δεδομένα αναφοράς (reference data):

- Air Reference density ( $\text{kg/m}^3$ ) είναι 1,184 στους 25°C.
- Reference temperature είναι 19,9 °C ή 292,90 °K.
- Air Reference enthalpy είναι 294.657 J/kg
- Air thermal capacity είναι 1006 J/kg°K
- Η σταθερά R ( $\text{Kg}/(\text{mol}^\circ\text{K})$ ) είναι 0,848
- Μοριακό Βάρος Αέρα ( $\text{kg/mol}$ ) είναι 0,02897
- Ατμοσφαιρική πίεση σε κανονικές συνθήκες ( $\text{Kg/m}^2$ ) είναι 10.332,00
- Μοριακό βάρος SO<sub>2</sub> ( $\text{g/mol}$ ) είναι 64, του NO<sub>2</sub> είναι 46 και του NO είναι 30
- Σχετικά με το μοριακό βάρος των αιρουμένων σωματιδίων ( $\text{g/mol}$ ), έχει ληφθεί υπόψη αυτό του άνθρακα που είναι 12
- Στις Πρότυπες (ή Κανονικές) Συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης ο γραμμομοριακός όγκος ενός ιδανικού αερίου είναι 0,224 m<sup>3</sup>.

Επιπλέον έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

- Οι αέριοι ρύποι και τα καυσαέρια έχουν την συμπεριφορά ιδανικού αερίου σε Κανονικές Συνθήκες.
- Οι προσομοιώσεις έγιναν σε συνθήκες αδιαβατικής ατμόσφαιρας, δηλαδή δεν υπάρχει μεταβολή της θερμοκρασίας και της πίεσης περιβάλλοντος συνάρτηση του ύψους του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος. Όπως καταγράφηκε στο Κεφάλαιο 6, η θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται γραμμικά με κλίση περίπου 6°C για κάθε χιλιόμετρο ύψους. Οπότε οι μεταβολές της θερμοκρασίας ανά μέτρο είναι ελάχιστες, ενώ παράλληλα αν ληφθούν υπόψη στον κώδικα, προκαλούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος χωρίς παράλληλα να δώσουν το απαιτούμενο επίπεδο ακρίβειας.
- Η ατμόσφαιρα είναι ομογενής ως προς τις συνθήκες ευστάθειας.
- Οι προσομοιώσεις που έγιναν δεν έλαβαν υπόψη θερμοκρασιακές αναστροφές. Το μεγάλο ύψος των καμινάδων και η ταχύτητα εξόδου καυσαερίων, θεωρήθηκε ότι είναι ικανή να δώσει κατάλληλα ύψη πλουμίου. Επίσης οι θερμοκρασιακές αναστροφές εμφανίζονται σε μικρές συγκεκριμένες περιόδους κατά την διάρκεια της ημέρας. Οπότε η επίδραση που έχουν στην διασπορά των ρύπων σε ημερήσια και ετήσια βάση θεωρείται μη σημαντική.
- Οι ρύποι δεν μετασχηματίζονται, δεν υπάρχουν δηλαδή χημικές αντιδράσεις.
- Οι ρύποι "ανακλώνται" από το έδαφος.
- Στις προσομοιώσεις, η καμινάδα εξετάζεται μόνη της χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι υπόλοιπες καμινάδες του διυλιστηρίου και λοιπός γειτονικός εξοπλισμός.
- Η παροχή εξόδου της καμινάδας είναι σταθερή, δηλαδή έχουμε σταθερές λειτουργικές συνθήκες του φούρνου.
- Δεν θεωρούμε ότι υπάρχει ιξώδες υπόστρωμα λόγω ύπαρξης τραχύτητας του εδάφους.





## 18.2 Δεδομένα Εισόδου Ταχύτητας Ανέμου στο πεδίο ροής

Η ταχύτητα του ανέμου καθορίζει αν το πλούμιο των ρυπαντών [15], [63] θα ανυψωθεί ή θα παραμείνει σε μικρό ύψος πάνω από το έδαφος. Όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μικρή, το πλούμιο ανυψώνεται σχεδόν κατακόρυφα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μικρή συγκέντρωση ρύπων στην περιοχή κοντά στην καμινάδα, αλλά το πλούμιο μεταφέρεται σε μεγαλύτερη απόσταση.

Αντίθετα στην περίπτωση ισχυρού ανέμου το πλούμιο των ρύπων κινείται σε μικρό ύψος από το έδαφος και επομένως παρουσιάζονται μεγάλες συγκεντρώσεις στην περιοχή γύρω από το σημείο της καμινάδας και προς την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ η διασπορά περιορίζεται σε μικρότερο ύψος.

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 17.2, η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο του πεδίου μεταβάλλεται εκθετικά μέχρι το ύψος του οριακού στρώματος και παραμένει σταθερή για μεγάλα ύψη.

$$\frac{u}{u^*} = \frac{\ln\left(\frac{y}{h_0}\right)}{\kappa} \quad \text{ή} \quad u = u_\delta \left(\frac{y}{\delta}\right)^\alpha \quad 18.2$$

Όπου:

$u$ : η ταχύτητα σε ύψος  $y$

$u_\delta$ : η ταχύτητα του αέρα σε ύψος ίσο με το οριακό στρώμα

$y$ : το ύψος που υπολογίζεται η ταχύτητα

$h_0$ : το ενεργό ύψος τραχύτητας του εδάφους

$\delta$ : το ύψος του οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας

$\alpha$ : ο εκθέτης, οι τιμές του οποίου επιλέγονται ανάλογα με την μορφολογία του εδάφους και της κλάσης της ευστάθειας.

$\kappa$ : είναι η σταθερά von Karman (= 0,41)

Ενδεικτικές τιμές του εκθέτη  $\alpha$  δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί [60].

Πίνακας 18.1: Τιμές εκθέτη "α" συνάρτηση κλάσης ευστάθειας και τραχύτητας

Ύψος Τραχύτητας (m)	Κλάσεις ευστάθειας					
	A	B	C	D	E	F
0,01	0,05	0,06	0,06	0,12	0,34	0,53
0,1	0,08	0,09	0,11	0,16	0,32	0,54
1,0	0,17	0,17	0,20	0,27	0,38	0,61
3,0	0,27	0,28	0,31	0,37	0,47	0,69

Στην εργασία έχουν εξεταστεί προσομοιώσεις διασποράς με διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (0,5, 2, 4, 6, 9 m/s) σε διαφορετικές τιμές τραχύτητας 0,1 και 0,3.



Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα τραχύτητας και ταχύτητας ανέμου, καθώς και τον τύπο 17.10 για την ταχύτητα τριβής έχουμε τον παρακάτω πίνακα.

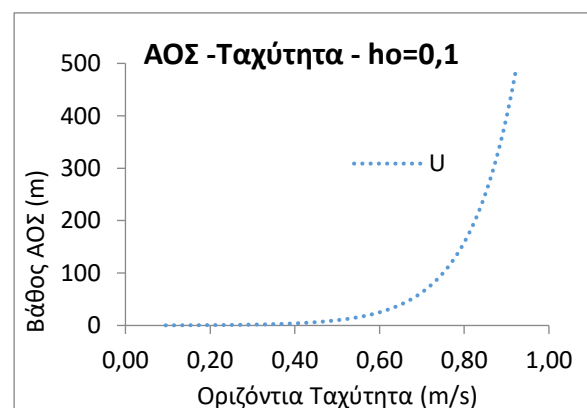
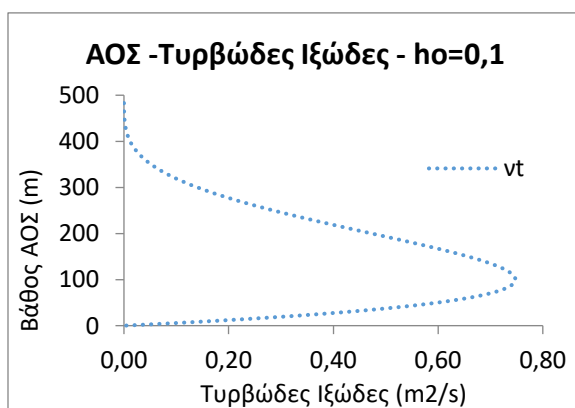
Πίνακας 18.2: Ταχύτητα Τριβής σε διάφορες τιμές έντασης ανέμου και τραχύτητας

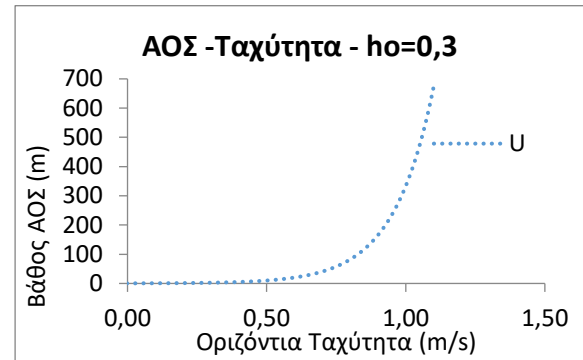
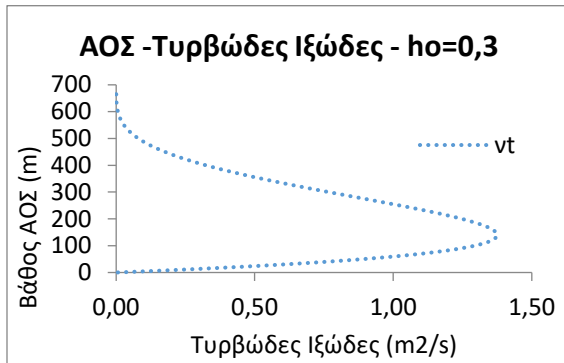
Ύψος Α.Ο.Σ.	Ύψος Τραχύτητας	Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας σε ύψος 10 m	Ταχύτητα Τριβής σε ύψος 10 m
$\delta$	$h_o$	$u_{10}$	$u^*$
500	0,1	0,5	0,0445
500	0,1	2	0,1780
500	0,1	4	0,3561
500	0,1	6	0,5341
500	0,1	9	0,8012
700	0,3	0,5	0,0584
700	0,3	2	0,2338
700	0,3	4	0,4676
700	0,3	6	0,7015
700	0,3	9	1,0523

Όταν η τραχύτητα εδάφους είναι 0,1 θεωρούμε ύψος Α.Ο.Σ. τα 500 m και σε τιμές τραχύτητας 0,3 έχουμε ύψος Α.Ο.Σ. τα 700 m για να πετύχουμε καλύτερες συνθήκες σύγκλισης.

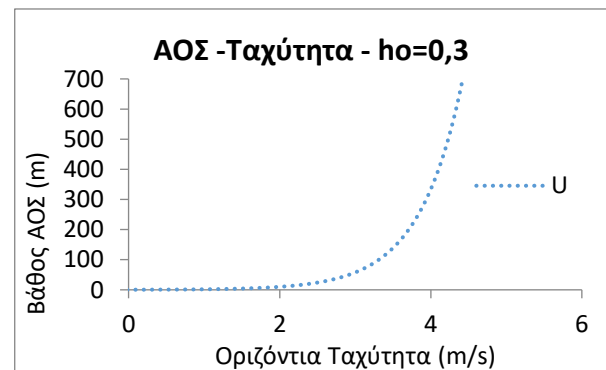
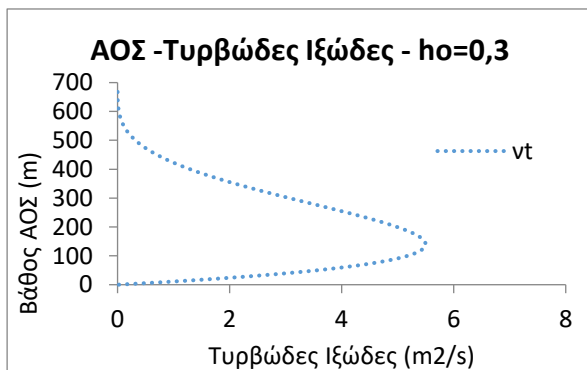
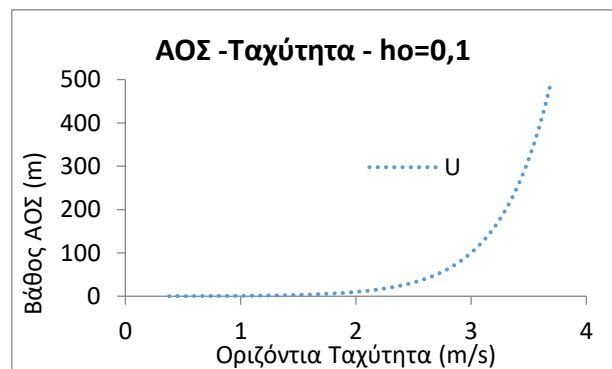
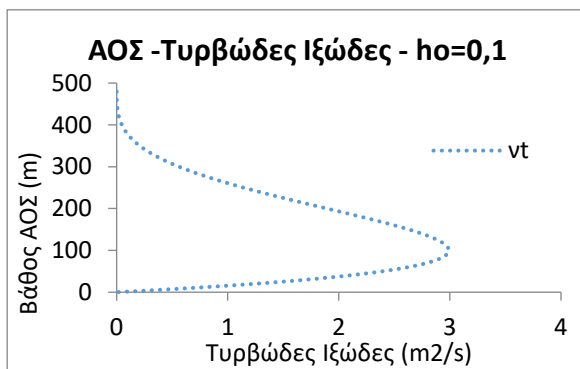
Εφαρμόζοντας τους τύπους 17.11 και 17.12 για την ταχύτητα και τυρβώδες ιξώδες συνάρτηση του ύψους (βάθους) του Α.Ο.Σ., προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.

Διαγράμματα 18.1: Τυρβώδες Ιξώδες και Ταχύτητα για τιμές Τραχύτητας 0,1 – 0,3 m και Ταχύτητας εδάφους τα 0,5 m/s

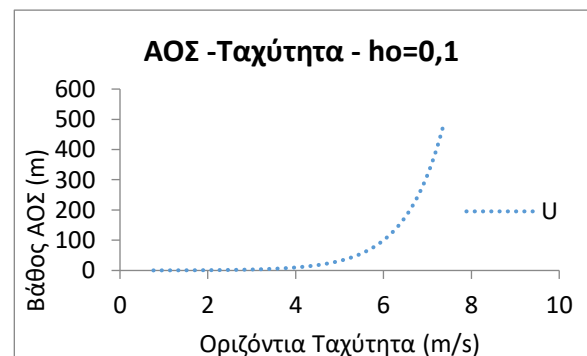
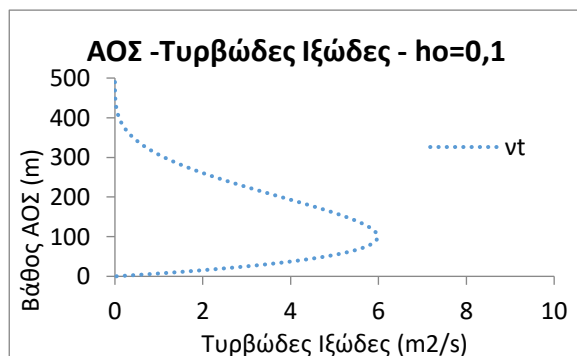


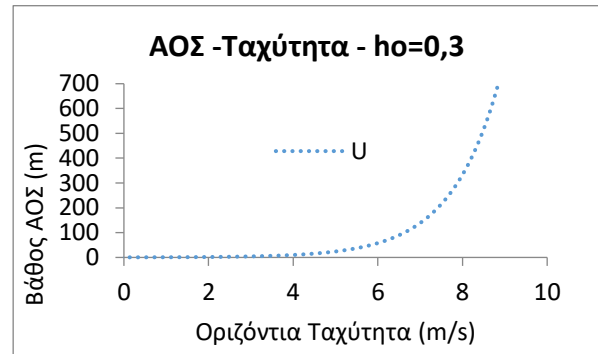
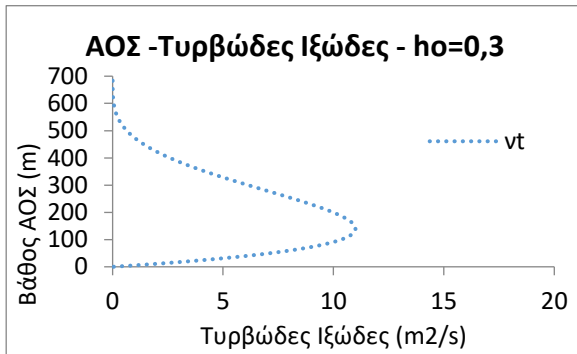


Διαγράμματα 18.2: Τυρβώδες Ιξώδες και Ταχύτητα για τιμές Τραχύτητας 0,1 – 0,3 m και Ταχύτητας εδάφους τα 2 m/s

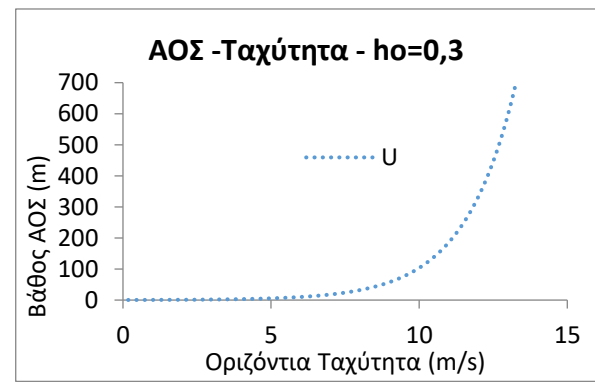
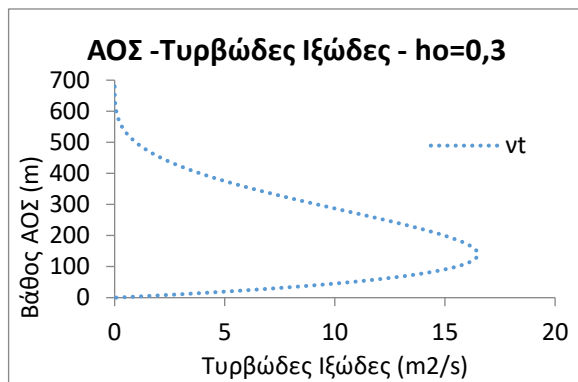
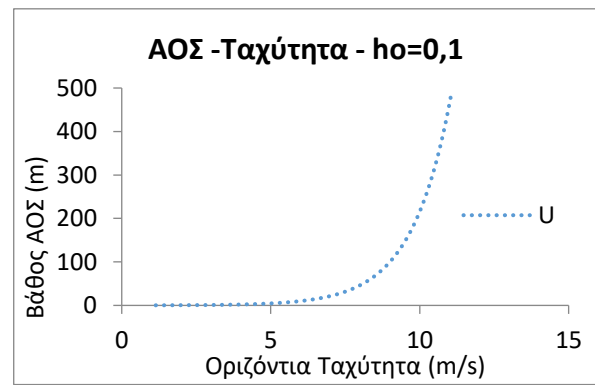
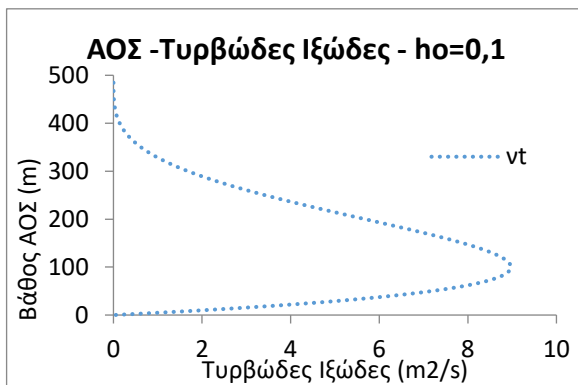


Διαγράμματα 18.3: Τυρβώδες Ιξώδες και Ταχύτητα για τιμές Τραχύτητας 0,1 – 0,3 m και Ταχύτητας εδάφους τα 4 m/s

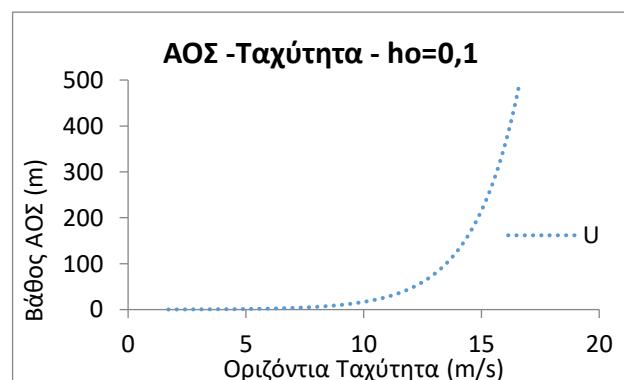
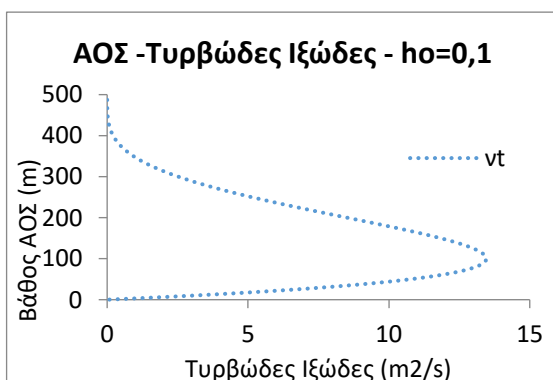


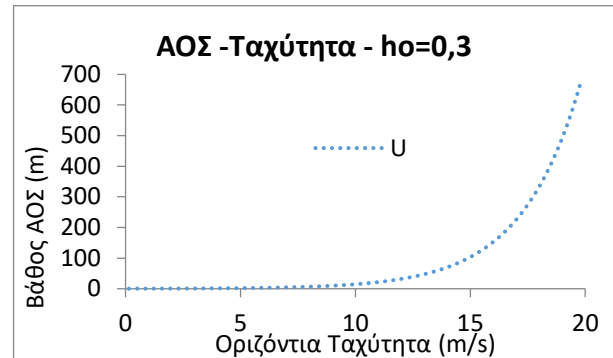
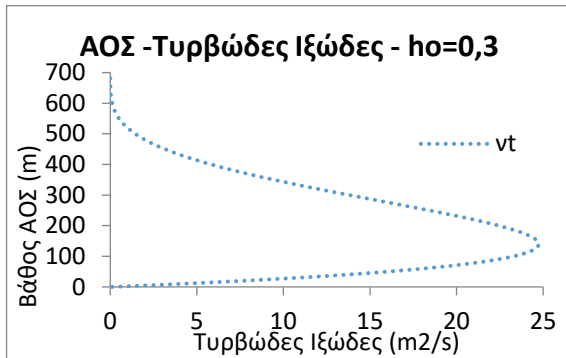


Διαγράμματα 18.4: Τυρβώδες Ιξώδες και Ταχύτητα για τιμές Τραχύτητας 0,1 – 0,3 m και Ταχύτητας εδάφους τα 6 m/s



Διαγράμματα 18.5: Τυρβώδες Ιξώδες και Ταχύτητα για τιμές Τραχύτητας 0,1 – 0,3 m και Ταχύτητας εδάφους τα 9 m/s





Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα.

- Όσο αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου και η τραχύτητα του εδάφους, αυξάνεται και η τιμή του τυρβώδους ιξώδους.
- Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνονται και οι αδρανειακές δυνάμεις που υπερισχύουν των δυνάμεων του ιξώδους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να οδηγούν σε πιο ισχυρά φαινόμενα τύρβης.
- Αυξημένες τιμές του τυρβώδους ιξώδους οδηγούν αντίστοιχα σε αυξημένες τιμές κινητικής ενέργειας τύρβης. Έτσι δημιουργούνται διαταραχές (δίνες που όσο αυξάνεται η ταχύτητα είναι μεγαλύτερες) οι οποίες αφαιρούν από τη ροή κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα να δημιουργούνται και άλλες διαταραχές (δίνες) μικρότερου πλάτους. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται και η κινητική ενέργεια όσο μεγαλώνει το ύψος - βάθος του Α.Ο.Σ.. Αυτός ο μηχανισμός βοηθά στην μεγαλύτερη διασπορά συγκεντρώσεων των ρυπαντών και την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών στο επίπεδο του εδάφους. Σύμφωνα με το κεφάλαιο 5.6, όσο μεγαλώνουν οι δίνες, αυτοί περιορίζονται στη μεταφορά των ρυπασμένων αερίων μαζών χωρίς να διευκολύνεται σημαντικά η αραίωσή τους.
- Ως προς τις μέγιστες τιμές ιξώδους, αυτές παρατηρούνται για τραχύτητα 0,1 στα 101 m και στα 140 m για τραχύτητα 0,3, στις διάφορες ταχύτητες ανέμου.
- Στην μέγιστη τιμή του τυρβώδους ιξώδους συμβαίνει η μέγιστη μεταφορά ορμής λόγω του φαινομένου της τύρβης. Σε μεγαλύτερα ύψη Α.Ο.Σ. συμβαίνει εκφυλισμός ή απορρόφηση της Τυρβώδους Κινητικής Ενέργειας. Δηλαδή το ιξώδες επενεργεί διαχυτικά (δυνάμεις ιξώδους υπερισχύουν των αντίστοιχων αδρανειακών), με το να μετατρέπει κινητική ενέργεια σε θερμότητα. Επειδή η ροή του πεδίου δεν τροφοδοτείται συνεχώς με μηχανική ενέργεια, η ενέργεια της τύρβης εκφυλίζεται και στο τέλος μετατρέπεται σε θερμότητα, με επακόλουθο την εξαφάνιση (εκφυλισμό) της τύρβης [52].

### 18.3 Γεωμετρικά στοιχεία του πεδίου ροής

#### 18.3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής του χώρου για τον οποίο γίνεται η προσομοίωση, στη γεωμετρία της καμινάδας και στη γεωμετρία της πηγής των ρύπων που ουσιαστικά είναι η επιφάνεια εξόδου της καμινάδας (με ή χωρίς κώνο).



### 18.3.2 Γεωμετρία Πεδίου Ροής Χώρου Προσομοίωσης

Το πεδίο ροής είναι τρισδιάστατο με διαστάσεις σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 18.3: Διαστάσεις του πεδίου ροής του πεδίου προσομοίωσης

Διάσταση	Μήκος (Z)	Πλάτος (X)	Ύψος (Y)
Τιμή (m)	6.250	600	500 (για τραχύτητα 0,1) 700 (για τραχύτητα 0,3)

Η επιλογή των διαστάσεων του πεδίου ροής έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα εξής, θεωρώντας στο σημείο (0,0) την καμινάδα:

Σχετικά με το μήκος (Z) απόσταση 6.250 m που:

- ανατολικά που καλύπτει όλον τον οικιστικό ιστό της πόλης της Ελευσίνας.
- δυτικά που καλύπτει τον οικιστικό ιστό του Λουτρόφυργου.
- βόρεια που καλύπτει τον οικιστικό ιστό της πόλης της Μάνδρας.
- νότια που καλύπτει τις ακτές του Νησιού της Σαλαμίνας.

Το ύψος (Y) είναι το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) για αδιαβατική κατάσταση της ατμόσφαιρας, με αποστάσεις 500 και 700 m για τιμές τραχύτητας εδάφους 0,1 m και 0,3 m αντίστοιχα. Αυτές οι αποστάσεις είναι οι κατάλληλες για την πλήρη ανάπτυξη του τυρβώδους ιξώδους όπως φαίνεται στα διαγράμματα 18.1 έως 18.5.

Στο χάρτη της περιοχής που ακολουθεί (google map) απεικονίζεται σχηματικά η γεωμετρία του πεδίου ροής με κατεύθυνση δυτική.

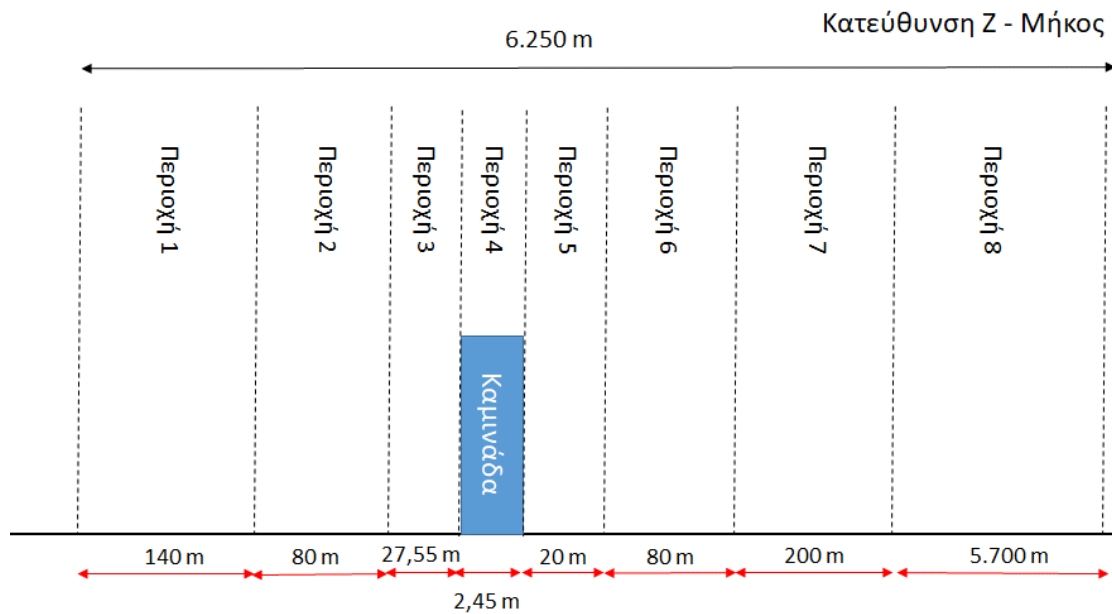


Σχήμα 18.1: Σχηματική Απεικόνιση του Πεδίο Ροής

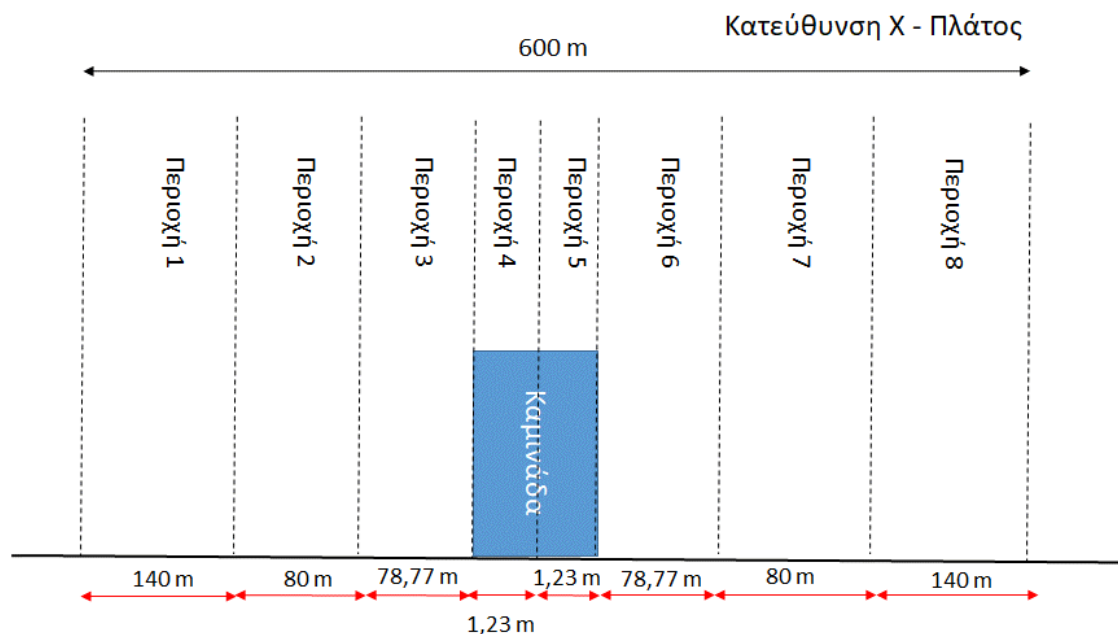


### Καμινάδα χωρίς Κώνο

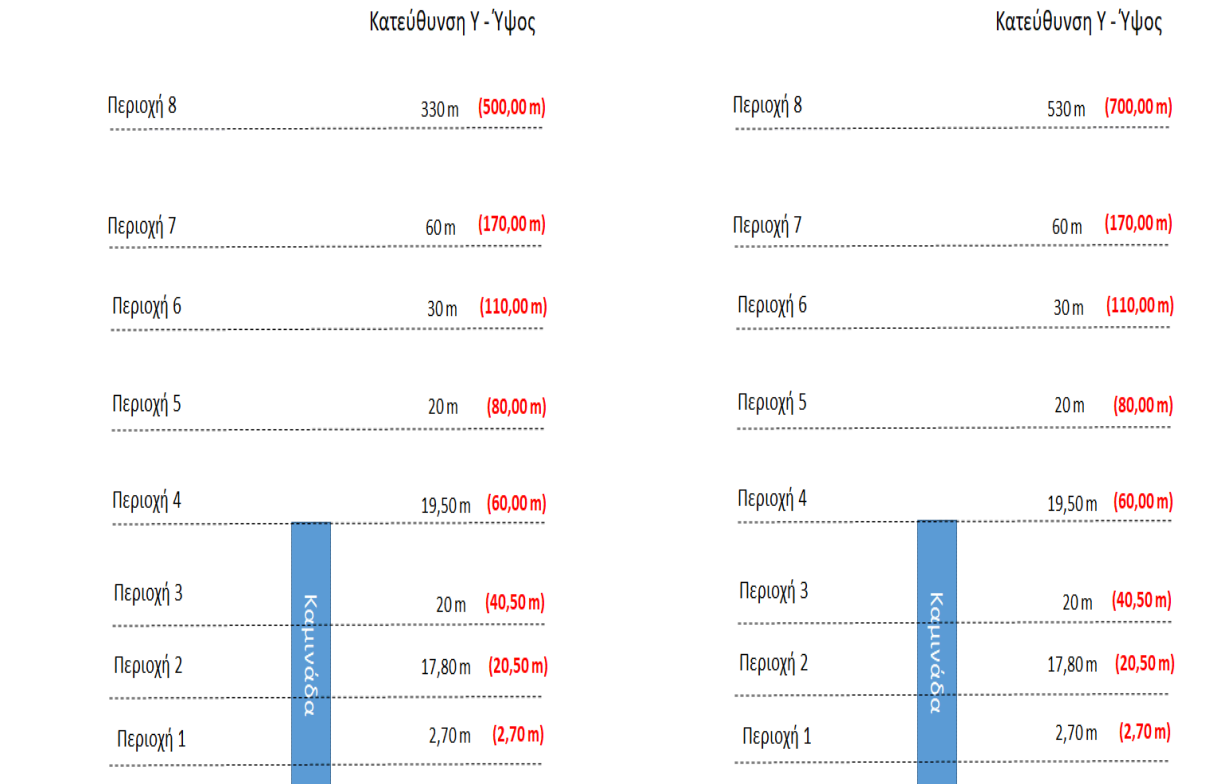
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γεωμετρία του πεδίου ροής για κάθε μία κατεύθυνση Z, X, Y.



Σχήμα 18.2: Γεωμετρία Πεδίου Ροής κατά τη φορά του ανέμου σε οριζόντιο επίπεδο (εδάφους) κατά τη διεύθυνση Z

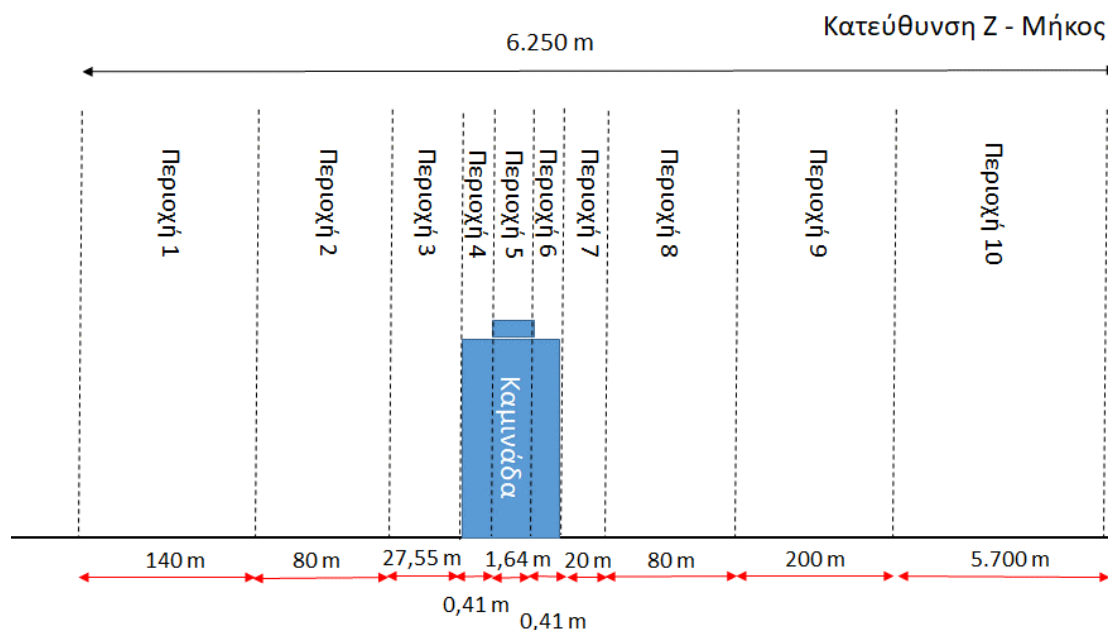


Σχήμα 18.3: Γεωμετρία Πεδίου Ροής σε οριζόντιο επίπεδο κατά την διεύθυνση X



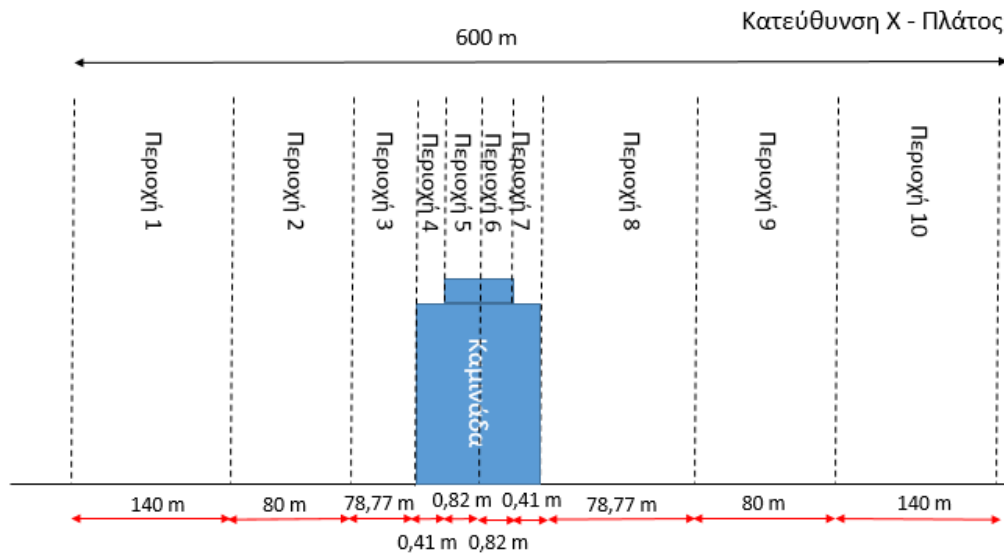
Σχήμα 18.4: Γεωμετρία Πεδίου Ροής σε κατακόρυφο επίπεδο κατά την διεύθυνση Υ για τραχύτητα 0,1 και 0,3

### Καμινάδα με Κώνο

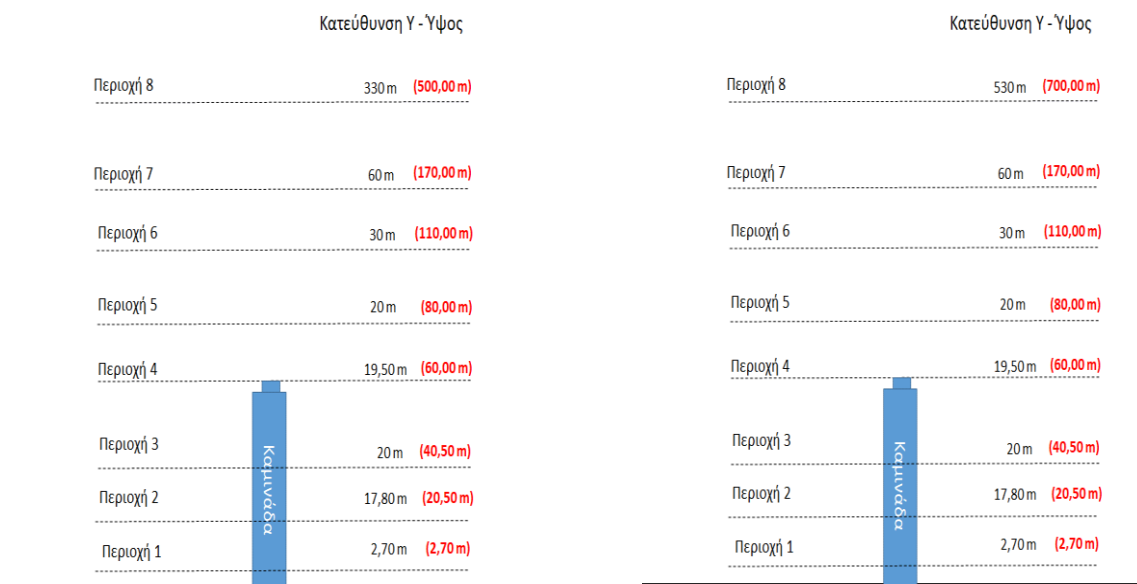


Σχήμα 18.5: Γεωμετρία Πεδίου Ροής κατά τη φορά του ανέμου σε οριζόντιο επίπεδο (εδάφους) κατά την διεύθυνση Z





Σχήμα 18.6: Γεωμετρία Πεδίου Ροής σε οριζόντιο επίπεδο κατά την διεύθυνση X



Σχήμα 18.7: Γεωμετρία Πεδίου Ροής σε κατακόρυφο επίπεδο κατά την διεύθυνση Y για τραχύτητα 0,1 και 0,3

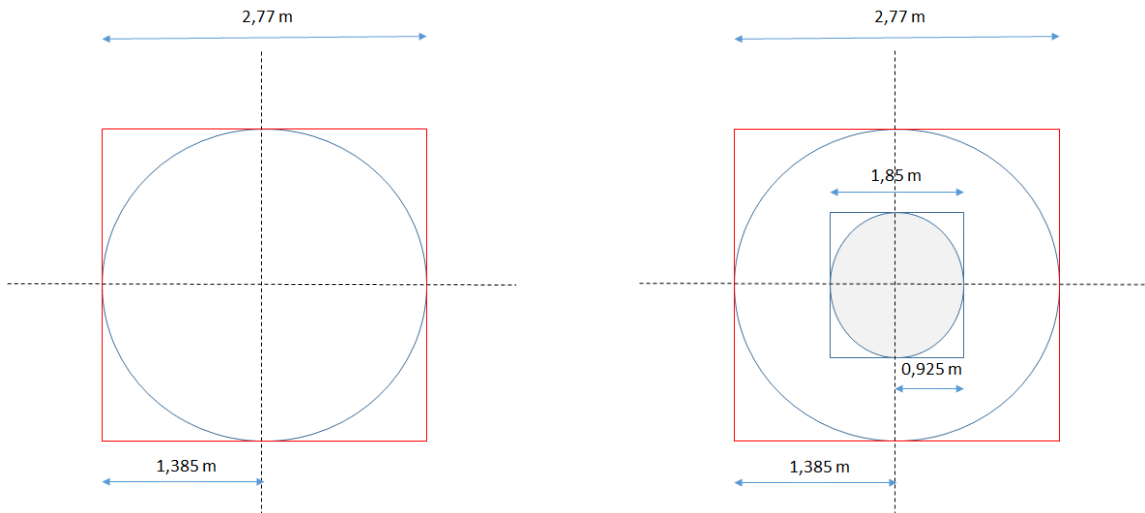
Ο διαχωρισμός σε περιοχές εκτός ότι χρειάζεται προκειμένου να θέσουμε τον αριθμό των κελιών της αριθμητικής ανάλυσης για την πυκνωση του πλέγματος, μας επιτρέπει να κατανοήσουμε τις φάσεις που εξελίσσονται κατά τη ροή του ρευστού μέσα στο πεδίο ροής. Επιδιώκεται η πυκνωση των γραμμών του αριθμητικού πλέγματος στις περιοχές που υπάρχουν μεγάλες κλίσεις των εξαρτημένων μεταβλητών [15], [63].

### 18.3.3 Γεωμετρία Καμινάδας Προσομοίωσης

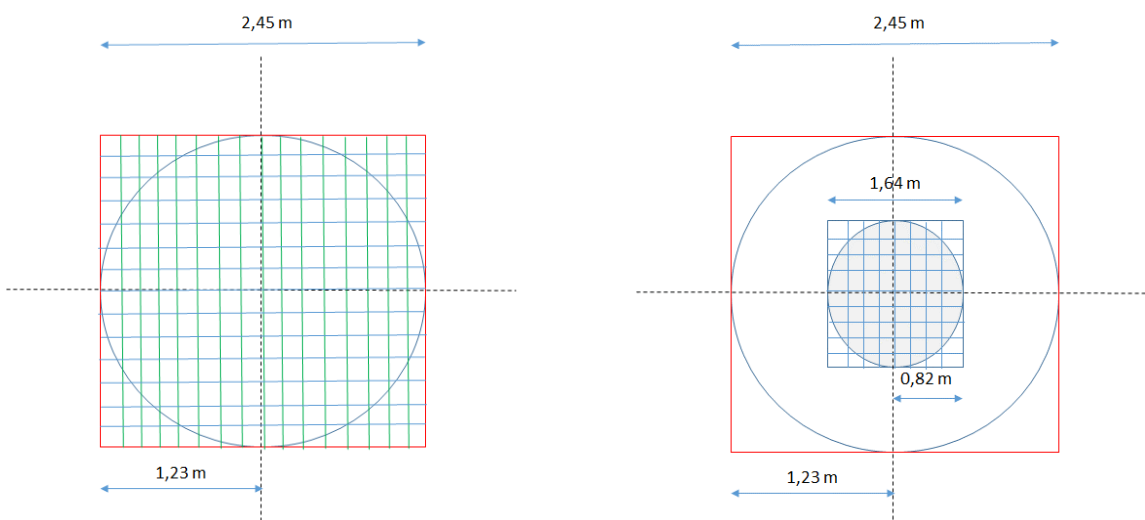
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 16, πρόκειται για καμινάδα ύψους 60 m και εσωτερικής διαμέτρου 2,77 m. Στην έξοδο της καμινάδας έχει τοποθετηθεί κώνος διαστάσεων (ύψος 0,66 m και τελικής διαμέτρου οπής εξόδου καυσαερίων τα 1,85 m). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κάτοψη της καμινάδας για την οποία θα γίνει η



προσομοίωση. Η καμινάδα εξετάζεται μόνη της χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι υπόλοιπες καμινάδες του διυλιστηρίου και λοιπός γειτονικός εξοπλισμός.



Σχήμα 18.8: Κάτοψη της καμινάδας με τις πραγματικές διαστάσεις με ή χωρίς κώνο  
Ιδιαίτερη σημασία στην προσομοίωση της εργασίας έχει η γεωμετρία της πηγής ρύπων που ουσιαστικά πρόκειται για την επιφάνεια εξόδου της καμινάδας. Η αντιμετώπιση στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 18.9. Στην επιφάνεια της πηγής χρησιμοποιούμε κελιά τόσο στη διεύθυνση X όσο και στη διεύθυνση Z ίδιου μεγέθους. Ενώ ταυτόχρονα η διάταξη των κελιών τοποθετείται έτσι ώστε να πάρουμε σε κάποιο βαθμό το κυκλικό σχήμα. Για αυτό το λόγο, εδώ χρησιμοποιούμε τις ισοδύναμες διαστάσεις ώστε να έχουμε τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά εκπομπής με τον κύκλο.



Σχήμα 18.9: Κάτοψη του όρου πηγής με ισοδύναμες διαστάσεις για καμινάδα με ή χωρίς κώνο



#### 18.4 Ανεξαρτησία Πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 18.3.2, το πεδίο ροής είναι τρισδιάστατο με διαστάσεις σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 18.4: Διαστάσεις του πεδίου ροής του πεδίου προσομοίωσης

Διάσταση	Μήκος (Z)	Πλάτος (X)	Ύψος (Y)
Τιμή (m)	6.250	600	500 (για τραχύτητα 0,1) 700 (για τραχύτητα 0,3)

Λόγω του γεγονότος ότι η ταχύτητα του ανέμου ταυτίζεται με την διεύθυνση Z του υπολογιστικού πεδίου, προκύπτει ένα επίπεδο συμμετρίας παράλληλο στην διεύθυνση Z και κάθετο στην διεύθυνση X, που διέρχεται από την μέση της καμινάδας. Οπότε υπάρχει η δυνατότητα να περιοριστεί η ανάλυση στο μισό πεδίο ροής. Με αυτό το τρόπο το υπολογιστικό πεδίο είναι το μισό και έτσι επιτυγχάνεται αντίστοιχη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Δηλαδή το πλάτος του πεδίου ροής θα γίνει 300 m.

Για την ανάπτυξη του πλέγματος έχει θεωρηθεί ότι πριν και μετά την καμινάδα, στην διεύθυνση Z, δεν υπάρχουν εμπόδια που να δημιουργούν συνθήκες τύρβης στο πεδίο ροής της οριζόντιας ταχύτητας. Έτσι δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι μηχανικές αναταράξεις (Κεφάλαιο 5.6) στην προσομοίωση της εργασίας.

Η σωστή επιλογή του πλέγματος είναι αυτή που καθορίζει την ακριβή επίλυση και την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου [15], [63].

Ο όρος ανεξαρτησία της λύσης πλέγματος, αναφέρεται στην πύκνωση εκείνων των περιοχών του πλέγματος οι οποίες εμφανίζουν τη μεγαλύτερη κλίση των μετρούμενων μεγεθών. Κάθε φορά πυκνώνεται μια περιοχή και ελέγχεται εάν η λύση που προκύπτει ταυτίζεται με την λύση του αραιότερου πλέγματος. Εάν οι δύο λύσεις είναι ίδιες τότε επιλέγεται το πιο αραιό πλέγμα, εάν όχι, τότε επιλέγεται το πιο πυκνό.

Η διαδικασία της ανεξαρτησίας σταματά όταν για οποιαδήποτε πύκνωση οποιασδήποτε περιοχής, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ταυτίζονται.

Στην εργασία έγινε χρήση τριών πλεγμάτων διαφορετικών διαστάσεων, προκειμένου να εξεταστεί η ανεξαρτησία λύσης στο πλέγμα. Η διάσταση των κελιών που μεταβλήθηκε ήταν:

- προς την διεύθυνση X, ενώ οι αντίστοιχες διαστάσεις προς τις διευθύνσεις Y και Z παρέμειναν σταθερές.
- προς την διεύθυνση Z, ενώ οι αντίστοιχες διαστάσεις προς τις διευθύνσεις Y και X παρέμειναν σταθερές.
- προς την διεύθυνση Y, ενώ οι αντίστοιχες διαστάσεις προς τις διευθύνσεις X και Z παρέμειναν σταθερές.

Για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος, στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν: **ταχύτητα ανέμου 4 m/s, τραχύτητα εδάφους 0,1, καμινάδα χωρίς κώνο, μοντέλο τύρβης RNG derived k-ε και υβριδικό σχήμα διακριτοποίησης.**



Η αρχική επιλογή του πλέγματος είναι σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 18.5: Αριθμός Κελιών Αρχικού Πλέγματος

Χαρακτηριστικά Βασικού Πλέγματος			
Κατεύθυνση	X	Y	Z
Μέγεθος (m)	300	500	6.250
Αριθμός Κελιών	25	45	80

Αρχικά έγινε πυκνωση πλέγματος στην διεύθυνση X με την επιλογή ενός αραιού πλέγματος (19 X 45 X 80), στη συνέχεια ενός πυκνότερου (βασικό πλέγμα) με διαδοχική πυκνωση στις υπό περιοχές του πεδίου όπου υπάρχουν έντονες κλίσεις (25 X 45 X 80), και στο τέλος ένα ακόμα πιο πυκνό πλέγμα (31 X 45 X 80), ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

Ο αριθμός των κελιών του πλέγματος για τα τρία ανωτέρω πλέγματα είναι 68.400, 90.000 και 111.600 αντίστοιχα.

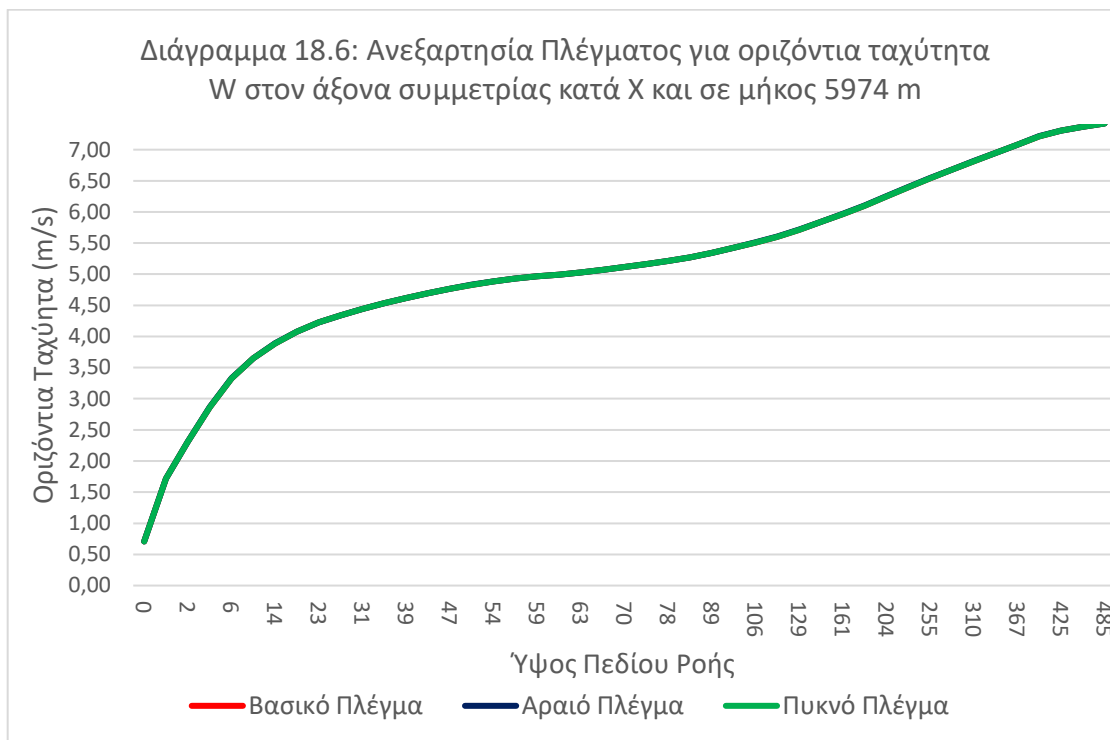
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνεται η δομή των τριών πλεγμάτων ως προς τις διευθύνσεις X, και Y.

Σχήμα 18.10: Δομή Πλεγμάτων (X, Y)

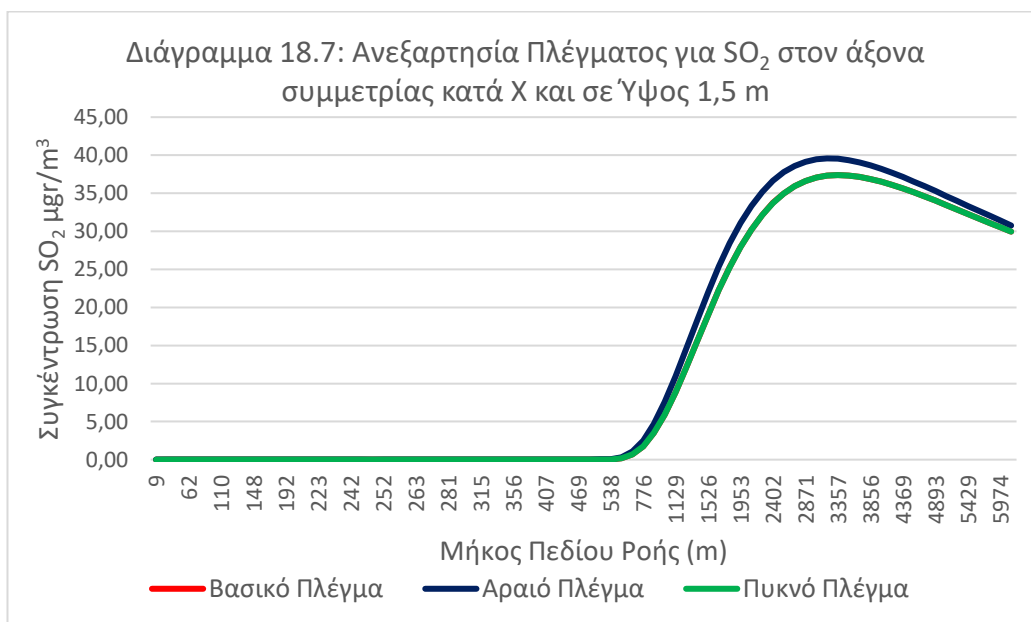


Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν τα εξής διαγράμματα:

- Διάγραμμα 18.6 - οριζόντιας ταχύτητας ( $W - m/s$ ) στον άξονα συμμετρίας της καμινάδας και στο τέλος του μήκους του πεδίου ροής (5.974 m).
- Διάγραμμα 18.7 - συγκέντρωσης  $SO_2$  ( $\mu g/m^3$ ) στον άξονα συμμετρίας της καμινάδας και σε ύψος 1,5 m από το έδαφος.



Παρατηρούμε την πλήρη ταύτιση των αποτελεσμάτων της οριζόντιας ταχύτητας και στα τρία είδη πλεγμάτων.

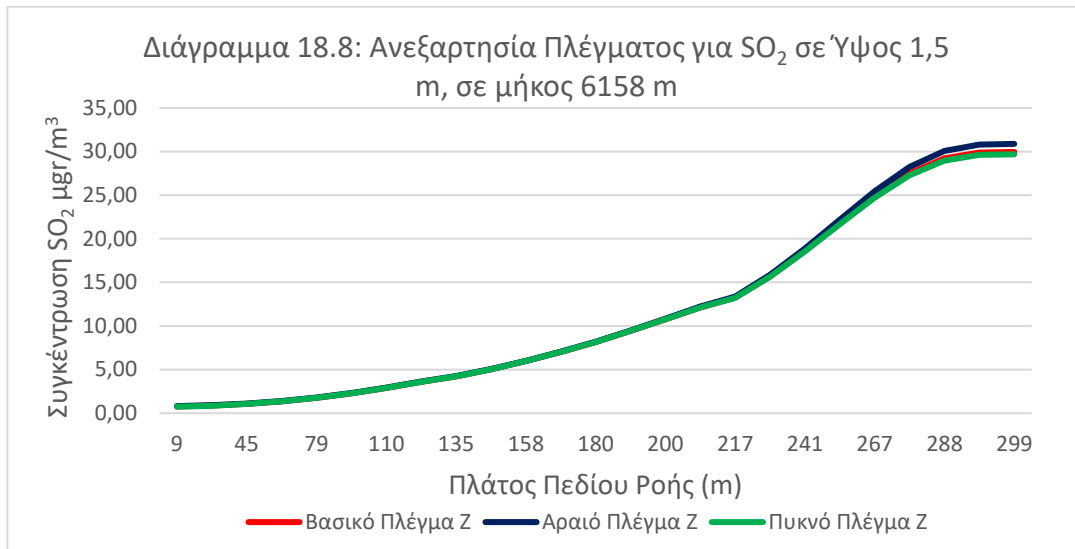


Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε την πλήρη ταύτιση των αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στο βασικό και πυκνό πλέγμα. Αν λάβουμε υπόψη μόνο την εξέταση του πλέγματος στην διεύθυνση X, επιλέγουμε το βασικό πλέγμα.

Στην συνέχεια έγινε πυκνωση πλέγματος στην διεύθυνση Z με την επιλογή ενός αραιού πλέγματος (25 X 45 X 61), στη συνέχεια ενός πυκνότερου (βασικό πλέγμα) με διαδοχική πυκνωση στις υπό περιοχές του πεδίου όπου υπάρχουν έντονες κλίσεις (25 X 45 X 80), και στο τέλος ένα ακόμα πιο πυκνό πλέγμα (25 X 45 X 99), ώστε να



συγκριθούν τα αποτελέσματα. Ο αριθμός των κελιών του πλέγματος για τα τρία ανωτέρω πλέγματα είναι 68.625, 90.000 και 111.375 αντίστοιχα. Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε το διάγραμμα 18.8 της συγκέντρωσης  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ ) σε ύψος 1,5 m από το έδαφος και σε μήκος 6.158 m του πεδίου ροής.



Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε και εδώ την πλήρη ταύτιση των αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στο βασικό και πυκνό πλέγμα. Αν λάβουμε υπόψη μόνο την εξέταση του πλέγματος στην διεύθυνση Z, επιλέγουμε το βασικό πλέγμα.

Η πύκνωση πλέγματος στην διεύθυνση Y αποτελεί την πιο σημαντική πύκνωση πλέγματος γιατί σε αυτή την διεύθυνση γίνονται οι κύριες διεργασίες ανύψωσης και ανάπτυξης του πλουμίου.

Στην αρχή έγινε επιλογή ενός αραιού πλέγματος (25 X 39 X 80), στη συνέχεια ενός πυκνότερου (βασικό πλέγμα) με διαδοχική πύκνωση στις υπό περιοχές του πεδίου όπου υπάρχουν έντονες κλίσεις (25 X 45 X 80), και στο τέλος ένα ακόμα πιο πυκνό πλέγμα (25 X 78 X 80), ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

Ο αριθμός των κελιών του πλέγματος για τα τρία ανωτέρω πλέγματα είναι 78.000, 90.000 και 156.000 αντίστοιχα.

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνεται η δομή των τριών πλεγμάτων ως προς τις διευθύνσεις Y, X και Z.

Σχήμα 18.11: Δομή Πλεγμάτων (Y, Z)



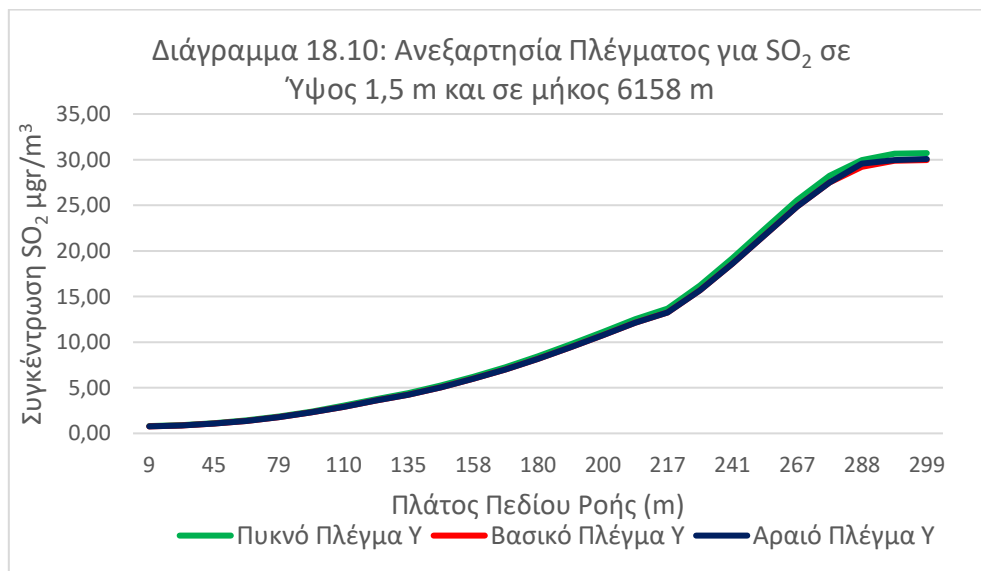
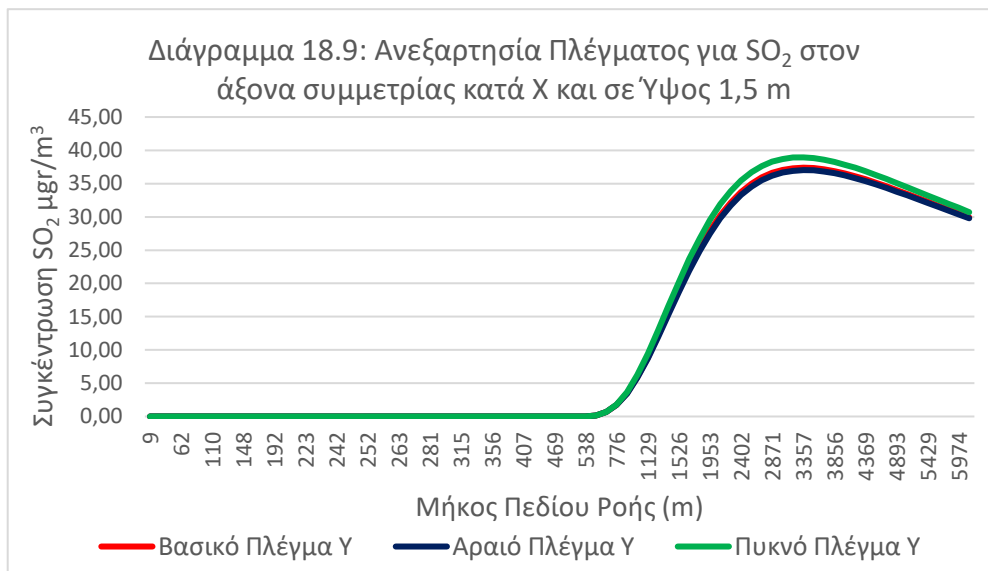


Σχήμα 18.12: Δομή Πλεγμάτων (Y, X)



Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν τα εξής διαγράμματα:

- Διάγραμμα 18.9 - της συγκέντρωσης  $SO_2$  ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ ) στον άξονα συμμετρίας κατά X και σε ύψος 1,5 m από το έδαφος.
- Διάγραμμα 18.10 - της συγκέντρωσης  $SO_2$  σε Ύψος 1,5 m και σε μήκος 6.158 m.



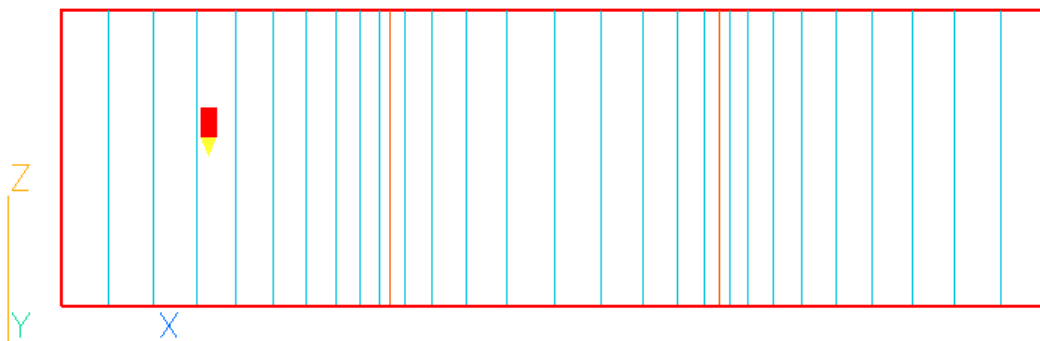


Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε την πλήρη ταύτιση των αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στο βασικό και αραιό πλέγμα. Ανακεφαλαιώνοντας τις πυκνώσεις των πλεγμάτων, ως προς τις διευθύνσεις X και Z έχουμε το βασικό και ως προς την Y, το πυκνό πλέγμα.

Η τελική μας επιλογή είναι το **πυκνό πλέγμα**. Με αυτό έγιναν όλες οι προσομοιώσεις της εργασίας. Το πυκνό πλέγμα που επιλέχθηκε μετά την ανεξαρτησία πλέγματος είναι ένα ανομοιόμορφο καρτεσιανό πλέγμα, όπου ανάλογα με την περιοχή είχε και διαφορετική πυκνωση. Η μεταβολή της πυκνότητας του πλέγματος σε κάθε υπό περιοχή (region) στο PHOENICS γίνεται με την **χρήση** ενός εκθέτη [46].

Ο εκθέτης καθορίζει την μεταβολή των γεωμετρικών διαστάσεων των κελιών. Η προεπιλεγμένη ρύθμιση του 1,0 δίνει ένα ομοιόμορφο πλέγμα. Οι θετικές τιμές σημαίνουν ότι η αύξηση της διάστασης του μήκους των κελιών έχει κατεύθυνση από την αρχή μιας υπό περιοχής προς το τέλος. Οι αρνητικές τιμές σημαίνουν ότι η αντίστοιχη αύξηση αρχίζει στο τέλος και πηγαινει στην αρχή. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα με εκθέτη, όπου στην πρώτη υπό περιοχή ο εκθέτης είναι -1,5, στην δεύτερη και τρίτη είναι 1,5 (συμμετρικός) και +1,5 αντίστοιχα.

Σχήμα 18.13: Επίδραση Εκθέτη στην γεωμετρία των κελιών



Οπότε η τελική επιλογή του πλέγματος είναι σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 18.6: Αριθμός Κελιών Τελικού (Πυκνού) Πλέγματος

Χαρακτηριστικά Πυκνού Πλέγματος			
Κατεύθυνση	X	Y	Z
Μέγεθος (m)	300	500 ή 700 (τραχύτητα 0,1 ή 0,3)	6.250
Αριθμός Κελιών	25	78	80

Τα χαρακτηριστικά του Πυκνού Πλέγματος για Καμινάδα χωρίς Κώνο υπάρχουν στους πίνακες που ακολουθούν, όπου δίνονται για κάθε περιοχή, σε κάθε διεύθυνση του υπολογιστικού πεδίου, το μήκος περιοχής, ο αριθμός των κελιών και η τιμή του εκθέτη.





Πίνακας 18.7: Χαρακτηριστικά Υπολογιστικού Πεδίου στον Άξονα Z

Υπολογιστικό Πεδίο κατά άξονα Z								
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7	8
Μήκος Περιοχής (m)	140,0	80,0	27,55	2,45	20,0	80,0	200,0	5.700,0
Αριθμός Κελιών	9	6	5	1	5	7	10	37
Εκθέτης	-1,2	-1,2	-1,3	1,0	1,3	1,3	1,2	1,2

Πίνακας 18.8: Χαρακτηριστικά Υπολογιστικού Πεδίου στον Άξονα X

Υπολογιστικό Πεδίο κατά άξονα X							
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7
Μήκος Περιοχής (m)	140,0	80,0	78,77	1,23	78,77	80	140
Αριθμός Κελιών	9	8	7	1	7	8	9
Εκθέτης	-1,2	-1,2	-1,3	1,0	-1,3	-1,2	-1,2

Πίνακας 18.9: Χαρακτηριστικά Υπολογιστικού Πεδίου στον Άξονα Y

Υπολογιστικό Πεδίο κατά άξονα Y								
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7	8
Μήκος Περιοχής (m)	2,7	17,8	20,0	19,5	20,0	30,0	60,0	330,0 <sup>(1)</sup>
Αριθμός Κελιών	3	10	10	10	7	10	10	18
Εκθέτης	1,3	1,3	1,0	-1,3	1,3	1,2	1,2	1,1

(1): Για τραχύτητα 0,3, η τιμή είναι 550,0.

Τα χαρακτηριστικά του Πυκνού Πλέγματος για Καμινάδα με Κώνο υπάρχουν στους πίνακες που ακολουθούν, όπου δίνονται για κάθε περιοχή, σε κάθε διεύθυνση του υπολογιστικού πεδίου, το μήκος περιοχής, ο αριθμός των κελιών και η τιμή του εκθέτη.

Πίνακας 18.10: Χαρακτηριστικά Υπολογιστικού Πεδίου στον Άξονα Z

Υπολογιστικό Πεδίο κατά άξονα Z										
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Μήκος Περιοχής (m)	140	80	27,55	0,41	1,64	0,41	20	80	200	5.700
Αριθμός Κελιών	9	6	5	1	1	1	5	7	10	37
Εκθέτης	-1,2	-1,2	-1,3	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,2	1,2



Πίνακας 18.11: Χαρακτηριστικά Υπολογιστικού Πεδίου στον Άξονα Χ

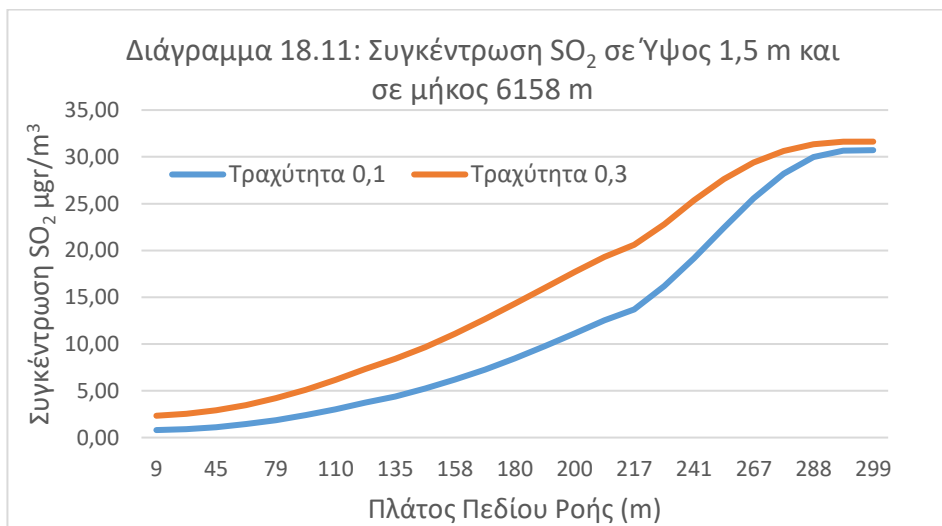
Υπολογιστικό Πεδίο κατά άξονα Χ									
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	4	3	6	7
Μήκος Περιοχής (m)	140	80	78,77	0,41	0,82	0,41	78,77	80	140
Αριθμός Κελιών	9	8	7	1	7	1	7	8	9
Εκθέτης	-1,2	-1,2	-1,3	1,0	1,0	1,0	-1,3	-1,2	-1,2

Πίνακας 18.12: Χαρακτηριστικά Υπολογιστικού Πεδίου στον Άξονα Υ

Υπολογιστικό Πεδίο κατά άξονα Υ								
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7	8
Μήκος Περιοχής (m)	2,7	17,8	20,0	19,5	20,0	30,0	60,0	330,0 <sup>(2)</sup>
Αριθμός Κελιών	3	10	10	10	7	10	10	18
Εκθέτης	1,3	1,3	1,0	-1,3	1,3	1,2	1,2	1,1

(2): Για τραχύτητα 0,3, η τιμή είναι 550,0.

Σχετικά με την επιλογή πλάτους (X) του πεδίου ροής προκύπτει ένα επίπεδο συμμετρίας παράλληλο στην διεύθυνση Z και κάθετο στην διεύθυνση X και που διέρχεται από την μέση της καμινάδας. Έτσι το πλάτος του πεδίου ροής είναι τα 300 m. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής, έγινε με τέτοιο τρόπο που στο τέλος του πεδίου ροής (6.158 m) το πλούμιο του διοξειδίου του θείου να έχει τέτοια ανάπτυξη που να ακολουθεί την "γκαουσιανή" μορφή. Δηλαδή, να εμφανίζει την μέγιστη τιμή στον άξονα συμμετρίας κατά διεύθυνση X και η τιμή αυτή να προσεγγίζει το μηδέν στην αρχή των αξόνων. Στο διάγραμμα 18.11 που ακολουθεί υπάρχει για καμινάδα χωρίς κώνο, αυτή η δομή του πλουμίου για διοξείδιο του θείου, σε πυκνό πλέγμα, ταχύτητα ανέμου 4 m/s και για τις δύο τιμές της τραχύτητας εδάφους.



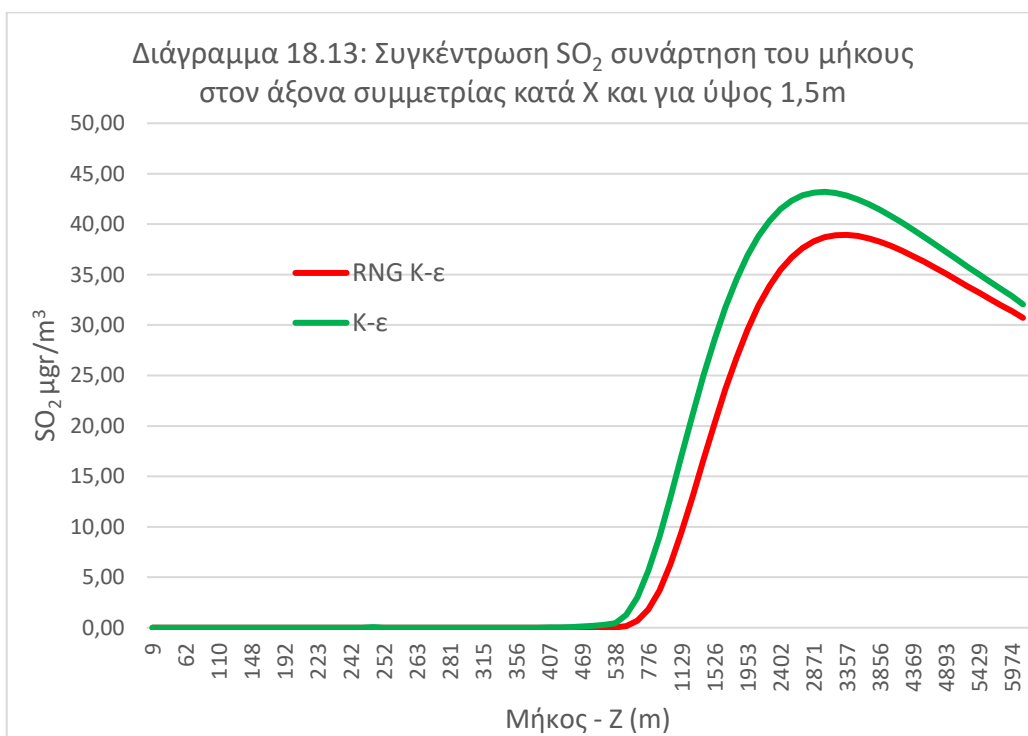


### 18.5 Σύγκριση Μοντέλων Τύρβης και Σχημάτων Διακριτοποίησης

Για τα μοντέλα τύρβης χρησιμοποιήθηκε πυκνό πλέγμα (όπως προέκυψε από την ανεξαρτησία), ταχύτητα ανέμου 4 m/s, καμινάδα χωρίς κώνο, τιμή τραχύτητας εδάφους ίση με 0,1 και υβριδικό σχήμα διακριτοποίησης. Έγινε σύγκριση των μοντέλων τύρβης RNG derived  $k\sim\epsilon$  και  $k\sim\epsilon$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα και διάγραμμα που ακολουθούν.

Πίνακας 18.13: Σύγκριση Μοντέλων Τύρβης

Πλέγμα	Μοντέλο Τύρβης	Επαναλήψεις	Υπολογιστικός Χρόνος
25 X 78 X 80	RNG derived $k\sim\epsilon$	6.000	90 min
25 X 78 X 80	$k\sim\epsilon$	6.000	88 min



Σύμφωνα με τα κεφάλαια 11.6 και 11.7, το μοντέλο  $k\sim\epsilon$  παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα όταν εφαρμόζεται για την πρόβλεψη ροών με περίπλοκα πεδία παραμορφώσεων ή με σημαντικές δυνάμεις σώματος. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί μοντέλα δεύτερης τάξης, με ένα από τα πιο σπουδαία το "RNG derived  $k\sim\epsilon$ ". Το πλεονέκτημα του μοντέλου RNG derived  $k\sim\epsilon$  έγκειται στο ότι περιέχει ένα διορθωτικό όρο στη σταθερά  $C_{\epsilon 1}$  της εξίσωσης του, που εξαρτάται από την παραμόρφωση και δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε περιοχές κοντά σε στερεά όρια όπου αναπτύσσονται έντονες διατμητικές τάσεις. Λόγω των ανωτέρω, επιλέχθηκε το μοντέλο RNG derived  $k\sim\epsilon$  για τις προσομοιώσεις της εργασίας.

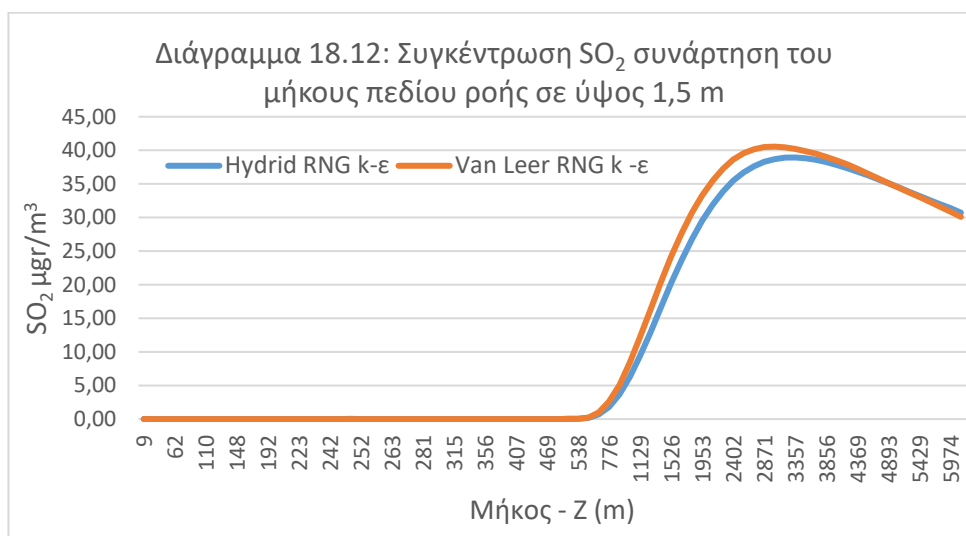
Ως προς τα σχήματα διακριτοποίησης χρησιμοποιήθηκε πυκνό πλέγμα (όπως προέκυψε από την ανεξαρτησία), ταχύτητα ανέμου 4 m/s, καμινάδα χωρίς κώνο, τιμή τραχύτητας εδάφους ίση με 0,1 και μοντέλο τύρβης το RNG derived  $k\sim\epsilon$ . Έγινε σύγκριση του



Υβριδικού και του Van Leer σχήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα και διάγραμμα που ακολουθούν.

Πίνακας 18.14: Σύγκριση Σχημάτων Διακριτοποίησης

Πλέγμα	Σχήμα Διακριτοποίησης	Επαναλήψεις	Υπολογιστικός Χρόνος
25 X 78 X 80	Υβριδικό (Hybrid)	6.000	90 min
25 X 78 X 80	Van Leer	6.000	115 min



Από τις δοκιμές της αριθμητικής προσομοίωσης προέκυψε ότι το σχήμα Van Leer είχε αρκετή δυσκολία στο να συγκλίνει, δηλαδή ήταν υπολογιστικά ασταθές που οδήγησε στο να δαπανήσει περισσότερο υπολογιστικό χρόνο. Αυτός ήταν ο κύριος λόγος που επιλέχθηκε το υβριδικό σχήμα διακριτοποίησης για τις προσομοιώσεις της εργασίας.



## 19. Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

### 19.1 Εισαγωγή

Όπως τονίστηκε στην Εισαγωγή, σκοπός της εργασίας εκτός από την αριθμητική προσομοίωση του πλουμίου ρυπαντών από καμινάδα διυλιστηρίου, είναι και η εκτίμηση των επιπτώσεων που προέρχονται από την διασπορά των παραγόμενων ρυπαντών ( $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $PM$ ) στο επίπεδο της αναπνοής, δηλαδή σε ύψος 1,5 m από το έδαφος. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν διαγράμματα των ρυπαντών και των ταχυτήτων συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) του πεδίου ροής.

Σημαντική παράμετρος είναι η πρόβλεψη του ύψους του πλουμίου καθώς και οι επιδράσεις που έχει, η αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου και της τραχύτητας του εδάφους στην συγκέντρωση των ρύπων. Εξίσου σημαντικής σημασίας είναι, η επίδραση του ρυθμού έκλυσης ισχύος από την καμινάδα και το ύψος αυτής.

Ως προς την αξιολόγηση σημεία ενδιαφέροντος είναι οι πόλεις της Ελευσίνας (στα ανατολικά της εγκατάστασης) και της Μάνδρας (βόρεια της εγκατάστασης).

Σχετικά με τους ρύπους το κύριο βάρος στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις αριθμητικές προσομοιώσεις, δίνεται στο διοξείδιο του θείου σαν πρωτογενής ρύπος και στα οξείδια του αζώτου εκφρασμένα σαν  $NO_2$ . Για τα αιωρούμενα σωματίδια εξαιτίας της πληθώρας των πηγών εκπομπής των, της δυσκολίας προσδιορισμού του μοριακού βάρους των και των εξωτερικών παραγόντων (π.χ. μεταφορά από Αφρική), η εκτίμηση των επιπτώσεων τους δεν θα έχει την απαιτούμενη αξιοπιστία.

Η επιλογή των δεδομένων έγινε με στόχο την πληρέστερη μελέτη των προσομοιώσεων. Οι πίνακες που ακολουθούν περιγράφουν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις διάφορες προσομοιώσεις.

Πίνακας 19.1: Βασικά Δεδομένα Προσομοιώσεων

Πλέγμα	Μοντέλο Τύρβης	Σχήμα Διακριτοποίησης
25 X 78 X 80	RNG derived $k\sim\epsilon$	Υβριδικό

Πίνακας 19.2: Παραμετρικά Δεδομένα στις Προσομοιώσεις Διασποράς

Τραχύτητα Εδάφους	Ταχύτητα Ανέμου στην Διεύθυνση Z (m/s)				
	Καμινάδα χωρίς Κώνο				
0,1	0,5	2	4	6	9
0,3	0,5	2	4	6	9
	Καμινάδα με Κώνο				
0,1	0,5	2	4	6	9
0,3	0,5	2	4	6	9



Πίνακας 19.3: Παραμετρικά Δεδομένα στην Αριστοποίηση Ύψους Καμινάδας

Τραχύτητα Εδάφους	Ύψος Καμινάδας (m)	Ταχύτητα Ανέμου στην Διεύθυνση Z (m/s)	
Καμινάδα με Κώνο			
0,3	60	4	6
0,3	70	4	6
0,3	80	4	6
0,3	90	4	6

Πίνακας 19.4: Παραμετρικά Δεδομένα για Αδιάστατη Συγκέντρωση με Συγκεκριμένη Παροχή

Τραχύτητα Εδάφους	Παροχή Q (Kg SO <sub>2</sub> /s)	Ταχύτητα Ανέμου στην Διεύθυνση Z (m/s)							
Καμινάδα χωρίς Κώνο									
0,3	30,46	2	4	6	9				
Καμινάδα με Κώνο									
0,3	30,46	2	3	4	5	6	7	8	9

Πίνακας 19.5: Παραμετρικά Δεδομένα για Αδιάστατη Συγκέντρωση με Διαφορετικές Παροχές

Τραχύτητα Εδάφους	Παροχή Q (Kg SO <sub>2</sub> /s)	Ταχύτητα Ανέμου στην Διεύθυνση Z (m/s)							
Καμινάδα με Κώνο									
0,3	25	2	3	4	5	6	7	8	9
0,3	30	2	3	4	5	6	7	8	9
0,3	35	2	3	4	5	6	7	8	9
0,3	40	2	3	4	5	6	7	8	9
0,3	45	2	3	4	5	6	7	8	9
0,3	50	2	3	4	5	6	7	8	9

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 18, όπου η τραχύτητα εδάφους λαμβάνει τιμή 0,1 το οριακό στρώμα έχει τιμή 500 m, ενώ σε τραχύτητα 0,3 λαμβάνει τη τιμή 700m. Λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 19.2 σε κάθε περίπτωση έχει γίνει μελέτη για την ανύψωση του πλουμίου και τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα για κάθε προσομοίωση.



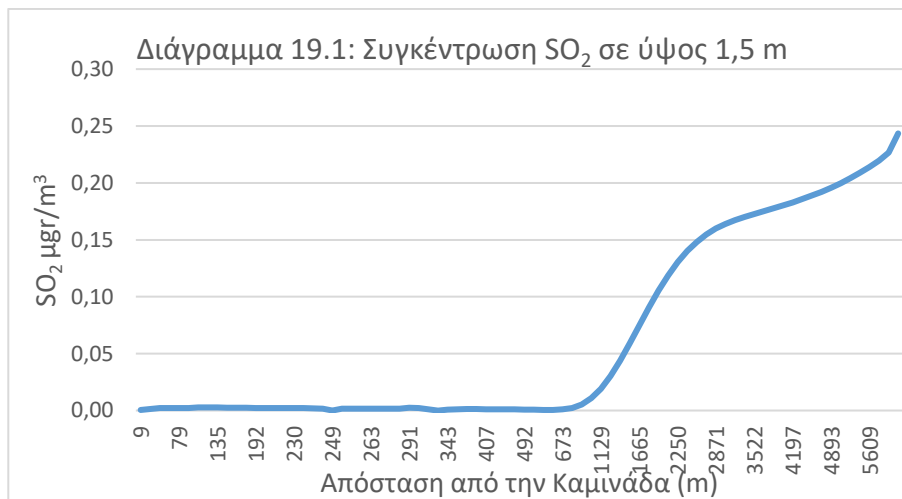
## 19.2 Καμινάδα χωρίς Κώνο

Σε όλα τα διαγράμματα με τις κατανομές της συγκέντρωσης και την ανύψωση του πλουμίου του διοξειδίου του θείου, το ύψος του πεδίου ροής είναι εκφρασμένο ως προς ύψη της καμινάδας, δηλαδή είναι ένα πολλαπλάσιος αριθμός των 60 m που είναι το ύψος της καμινάδας. Σε τραχύτητα 0,3 όλα τα διαγράμματα συγκέντρωσης διοξειδίου του θείου σε ύψος 1,5 m από το επίπεδο του εδάφους και στα αντίστοιχα της κατανομής συγκέντρωσης και ανύψωσης πλουμίου του ίδιου ρύπου, περιλαμβάνουν και τα αντίστοιχα για τιμή τραχύτητας ίση με 03.

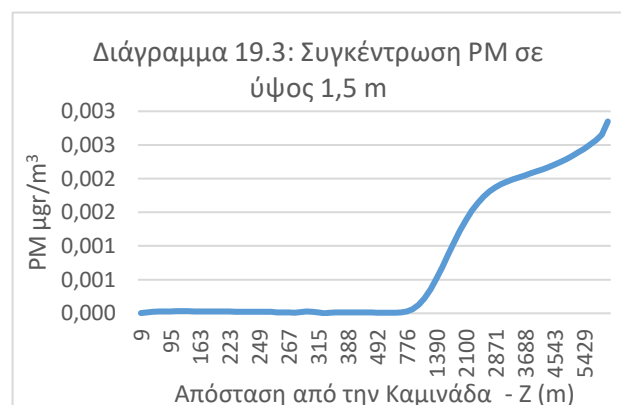
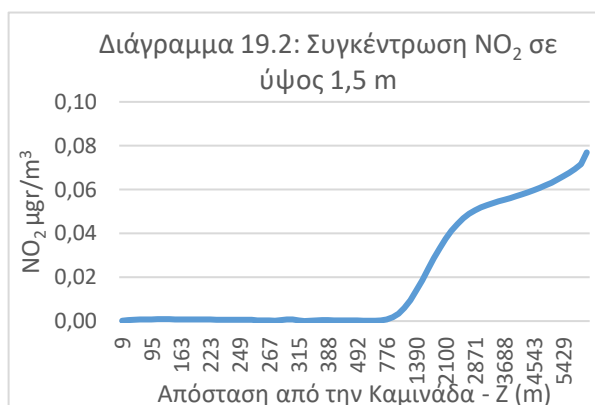
### 19.2.1 Ταχύτητα Ανέμου 0,5 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε:

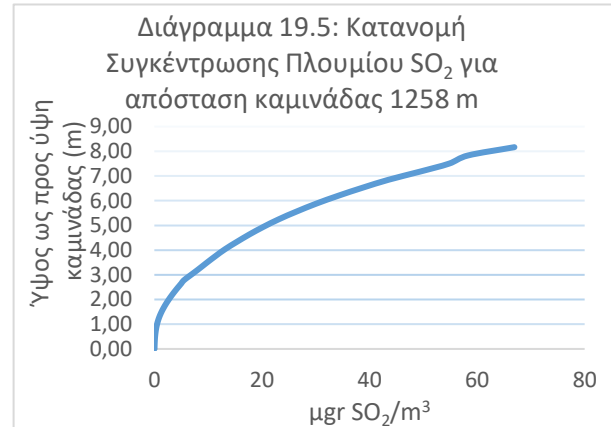
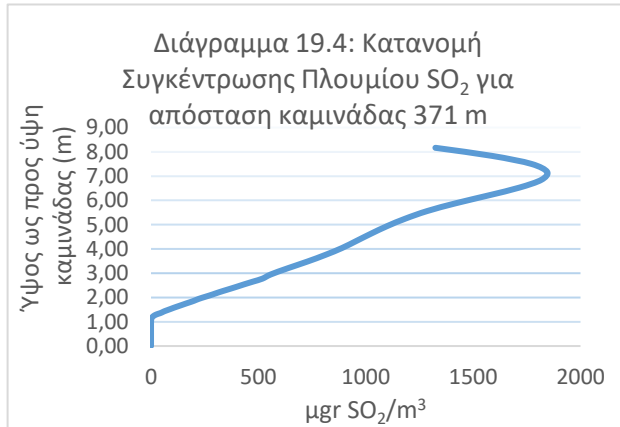


Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν ελάχιστες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από την αυξητική πορεία της συγκέντρωσης, και για μεγάλες ακόμα αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας, ότι το πλούμιο έχει πολύ μεγάλη ανύψωση. Για αυτό το λόγο η παρουσία της μέγιστης συγκέντρωσης στο έδαφος, συμβαίνει σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις από την καμινάδα που είναι εκτός των ορίων που έχουν τεθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



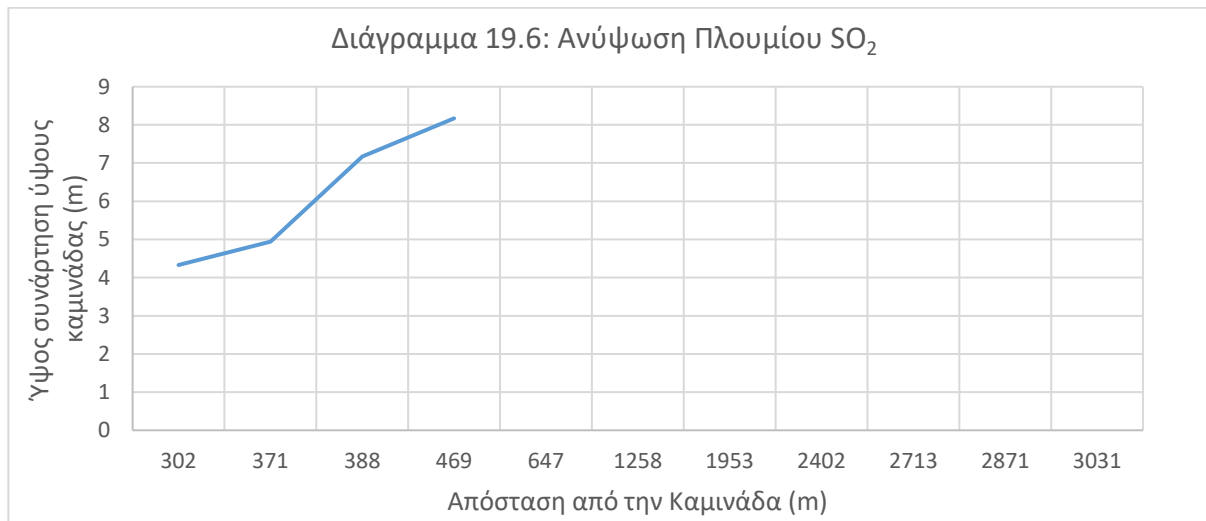


Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Από το διάγραμμα 19.4 που δείχνει την κατανομή σε μήκος πολύ κοντά στο σημείο της καμινάδας, παρατηρούμε ότι η μέγιστη συγκέντρωση εμφανίζεται σε πολύ μεγάλο ύψος του πεδίου, γεγονός που επιβεβαιώνει την πολύ μεγάλη ανύψωση του πλουμίου. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.5), η ανύψωση συνεχίζεται, με αποτέλεσμα ακόμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από την καμινάδα, δίνεται στο διάγραμμα 19.6.

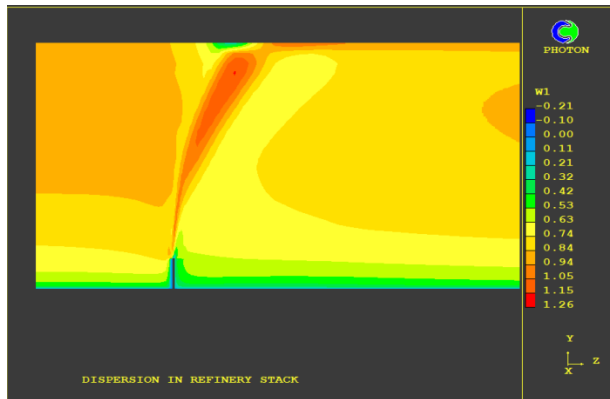


Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα η ανύψωση συνεχίζεται και εκτός της μέγιστης τιμής (9) του ύψους του πεδίου συνάρτηση του ύψους καμινάδας. Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

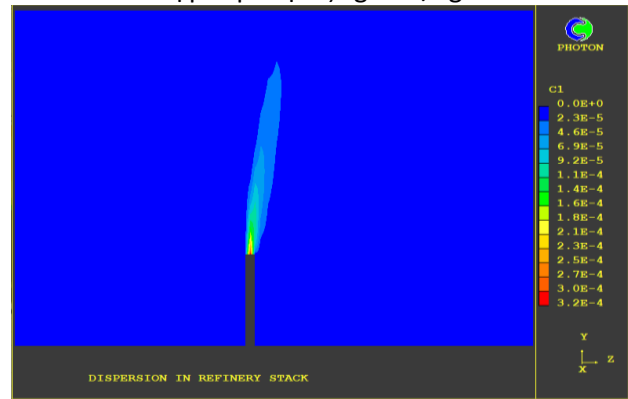




Σχήμα 19.1: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

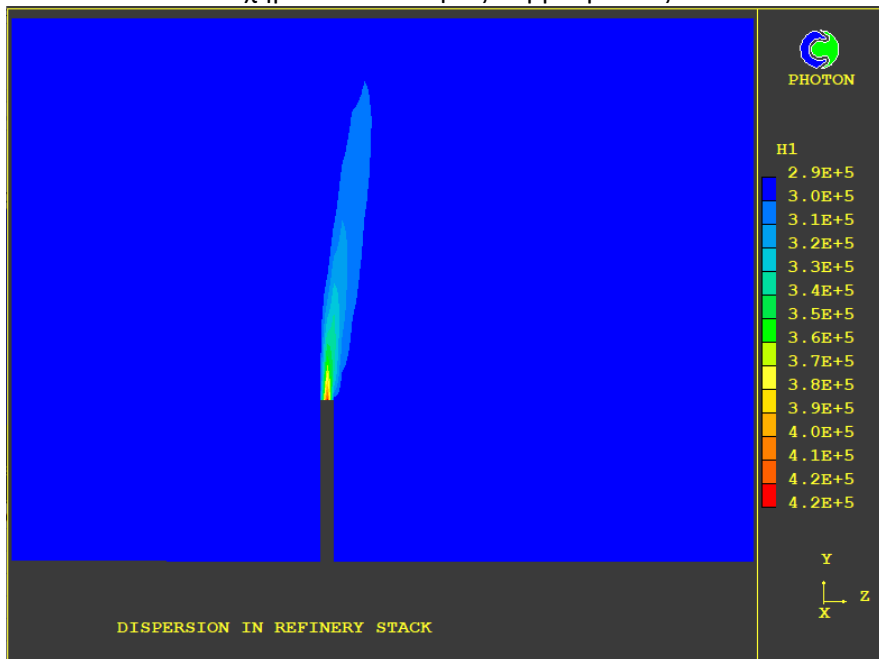


Σχήμα 19.2: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub>  
εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.1, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει έντονη κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων.

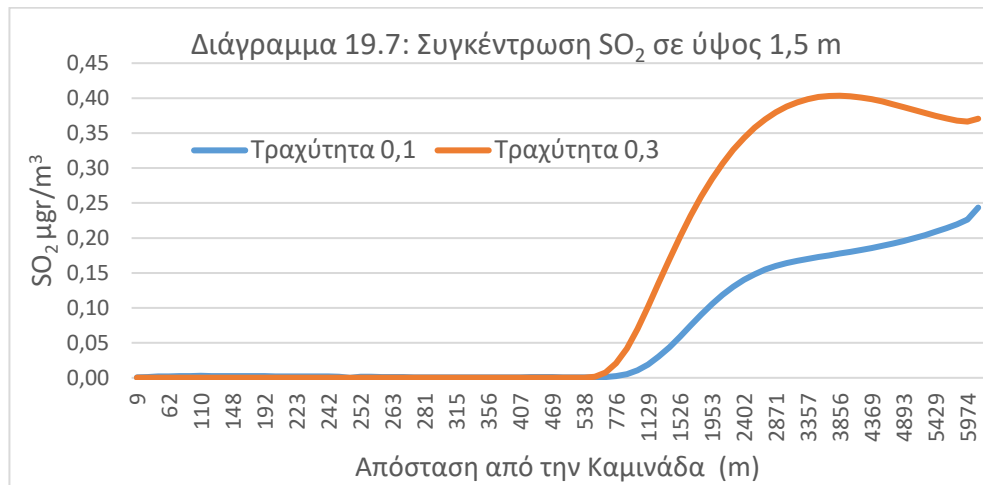
Σχήμα 19.3: Ισοψείς Θερμοκρασίας



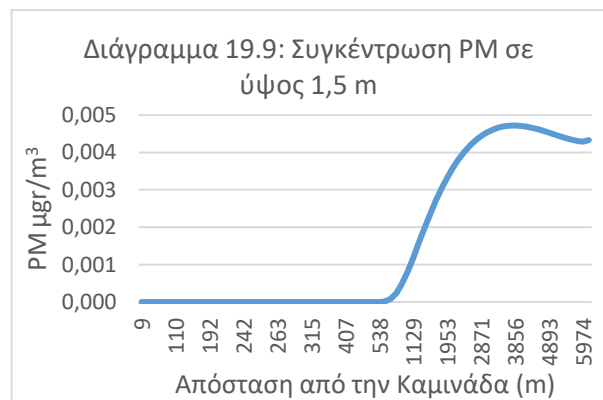
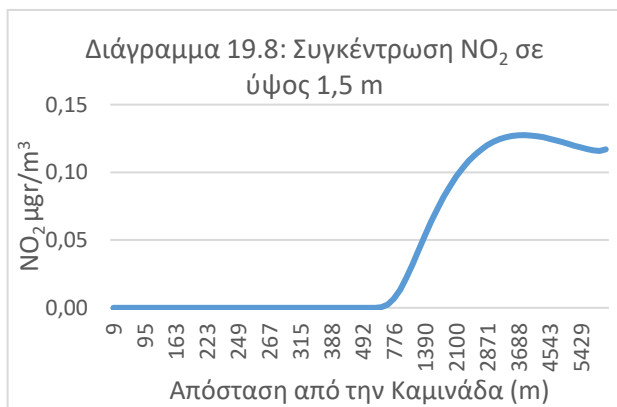
T	H1
15	2,90E+05
25	3,00E+05
35	3,10E+05
45	3,20E+05
55	3,30E+05
65	3,40E+05
75	3,50E+05
85	3,60E+05
95	3,70E+05
105	3,80E+05
115	3,90E+05
124	4,00E+05
134	4,10E+05
144	4,20E+05
154	4,30E+05

### Τραχύτητα 0,3

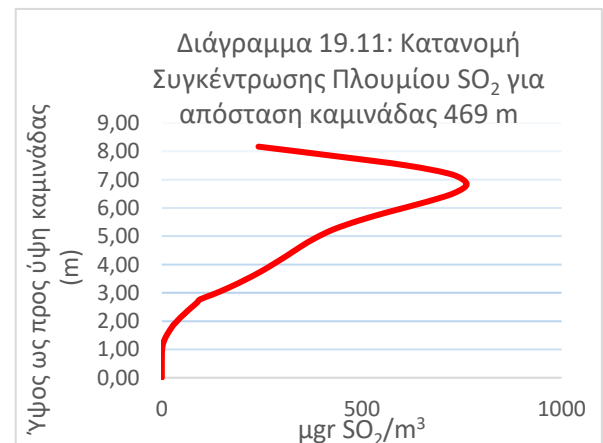
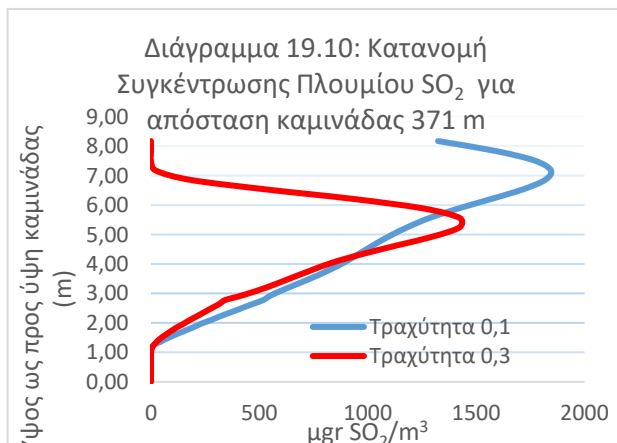
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 17.4, η τιμή της τραχύτητας εδάφους που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα της προσομοίωσης, είναι η 0,3. Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X, έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Και εδώ προκύπτουν ελάχιστες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, τουλάχιστον διπλάσιες από τις αντίστοιχες σε τραχύτητα 0,1, λαμβάνοντας υπόψη την ίδια απόσταση από την καμινάδα. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση σε σχέση αυτής με τραχύτητα 0,1, λόγω εμφάνισης μέγιστης τιμής. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 3.856 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 0,40  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ . Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



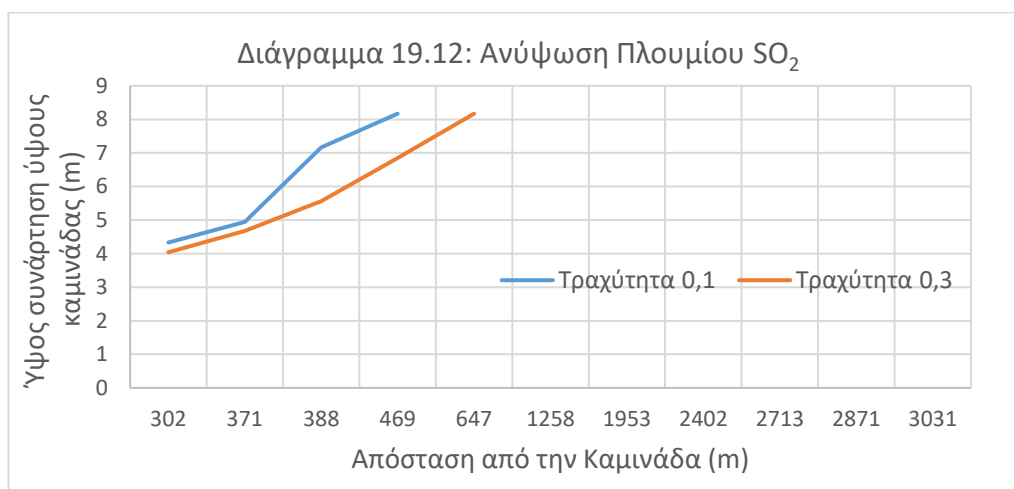
Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.





Από τα διαγράμματα 19.10 και 19.11 που δείχνουν την κατανομή σε μήκος πολύ κοντά στο σημείο της καμινάδας, παρατηρούμε την μεγάλη ανύψωση του πλουμίου. Δηλαδή σε υψηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις κατά μήκος του πεδίου ροής, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι πολύ μεγάλες. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από την καμινάδα, η ανύψωση και η διασπορά συνεχίζεται, με αποτέλεσμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

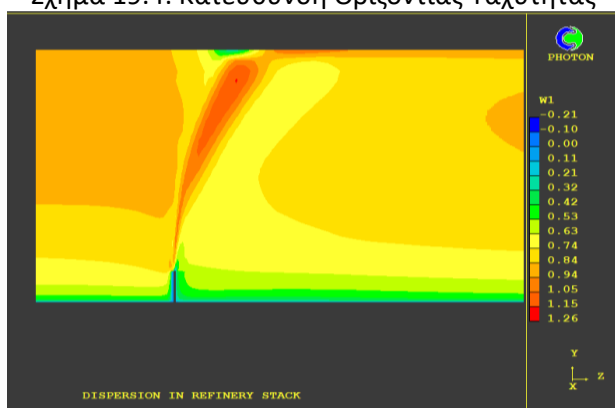
Βέβαια συγκρίνοντας τις δύο τραχύτητες 0,3 και 0,1 παρατηρούμε ότι η αυτή με τη μεγαλύτερη τιμή, έχει μικρότερο ύψος ανύψωσης, δηλαδή οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται σε χαμηλότερα ύψη του πεδίου ροής και λόγω της καλύτερης διασποράς έχουν μικρότερες τιμές. Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από την καμινάδα, δίνεται στο διάγραμμα 19.12.



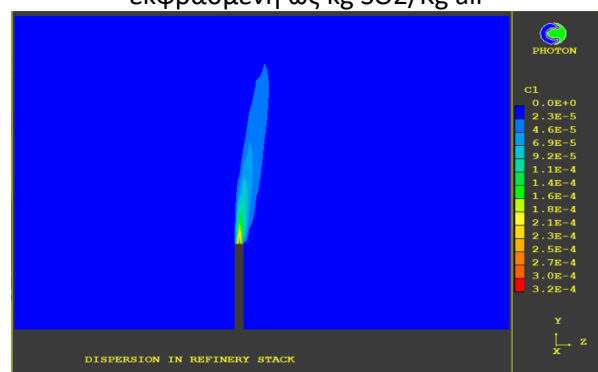
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής. Αυτό το διάγραμμα επιβεβαιώνει τα αναγραφόμενα ανωτέρω για χαμηλότερη ανύψωση του πλουμίου σε σχέση με αυτή για τραχύτητα 0,1.

Ακολουθούν και εδώ σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.4: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



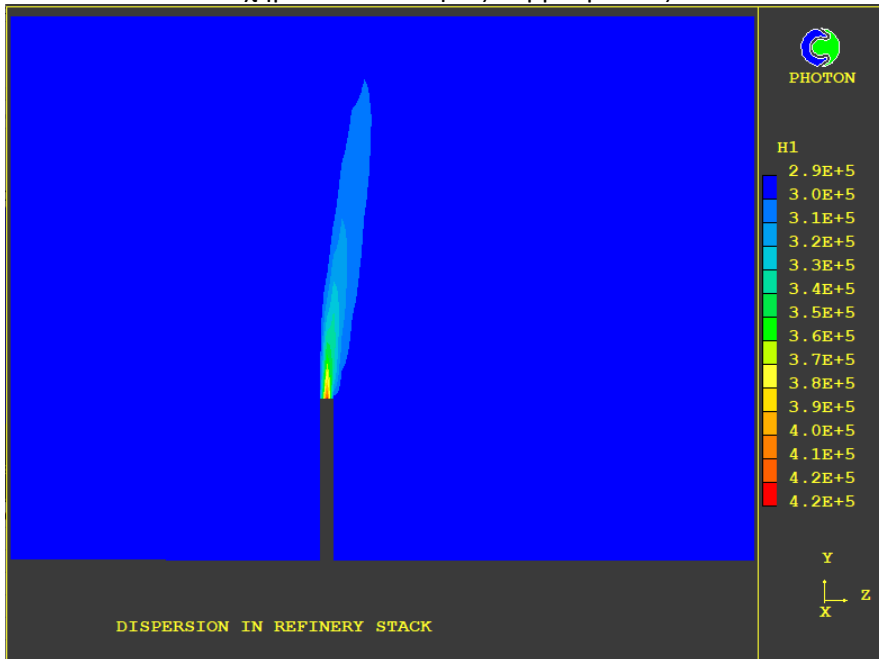
Σχήμα 19.5: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air





Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.4, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει έντονη κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Η κλίση αυτή συγκρινόμενη με αυτή του σχήματος 19,1 για τραχύτητα 0,1, είναι ελαφρώς λιγότερη.

Σχήμα 19.6: Ισοψείς Θερμοκρασίας

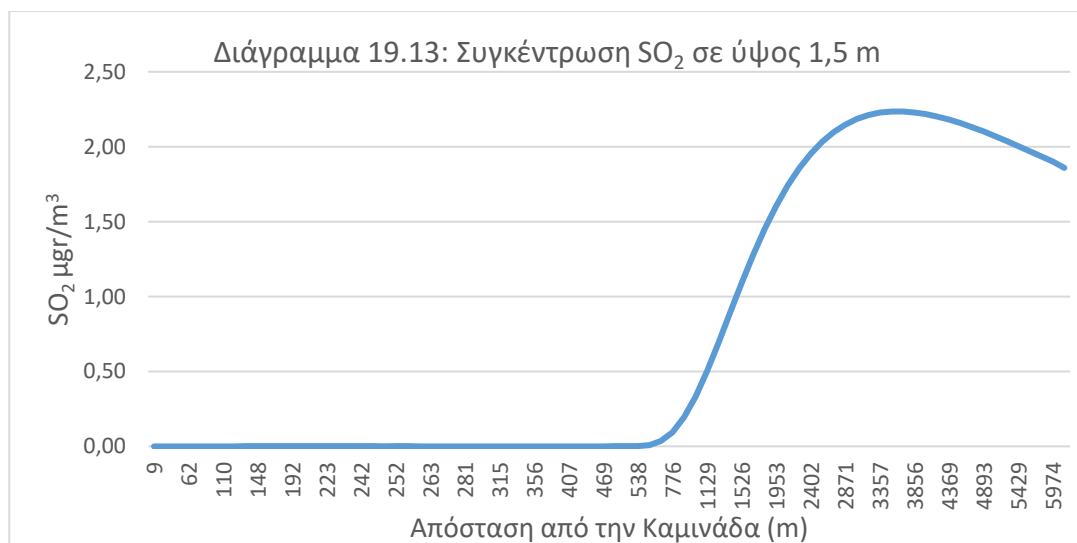


T	H1
15	2,90E+05
25	3,00E+05
35	3,10E+05
45	3,20E+05
55	3,30E+05
65	3,40E+05
75	3,50E+05
85	3,60E+05
95	3,70E+05
105	3,80E+05
115	3,90E+05
124	4,00E+05
134	4,10E+05
144	4,20E+05
154	4,30E+05

### 19.2.2 Ταχύτητα Ανέμου 2 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

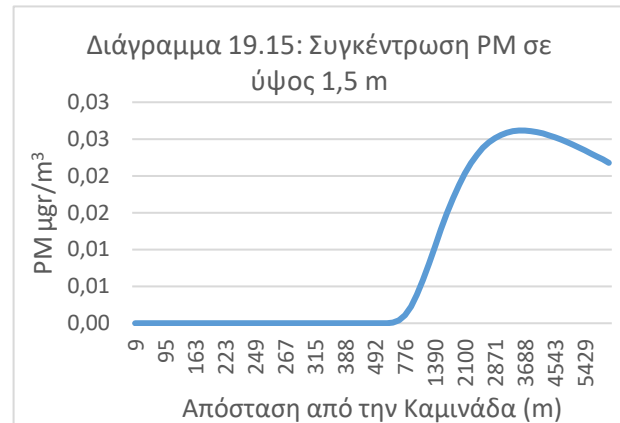
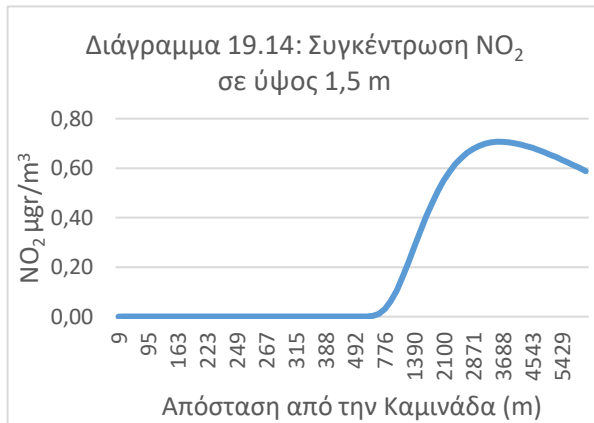
Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε:



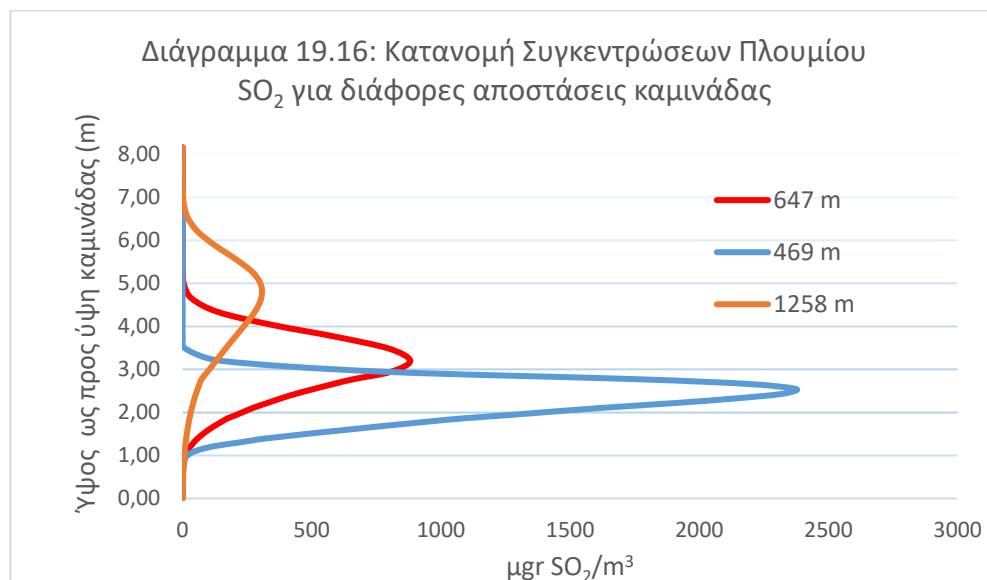
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν πολύ μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας, το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση. Δηλαδή



υπάρχει καλύτερη διασπορά και παρουσιάζονται για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 3.522 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με  $2,24 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ . Συγκρίνοντας με το αντίστοιχο διάγραμμα για ταχύτητα  $0,5 \text{ m/s}$ , η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται σε μεγαλύτερες τιμές απόστασης από την καμινάδα. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.

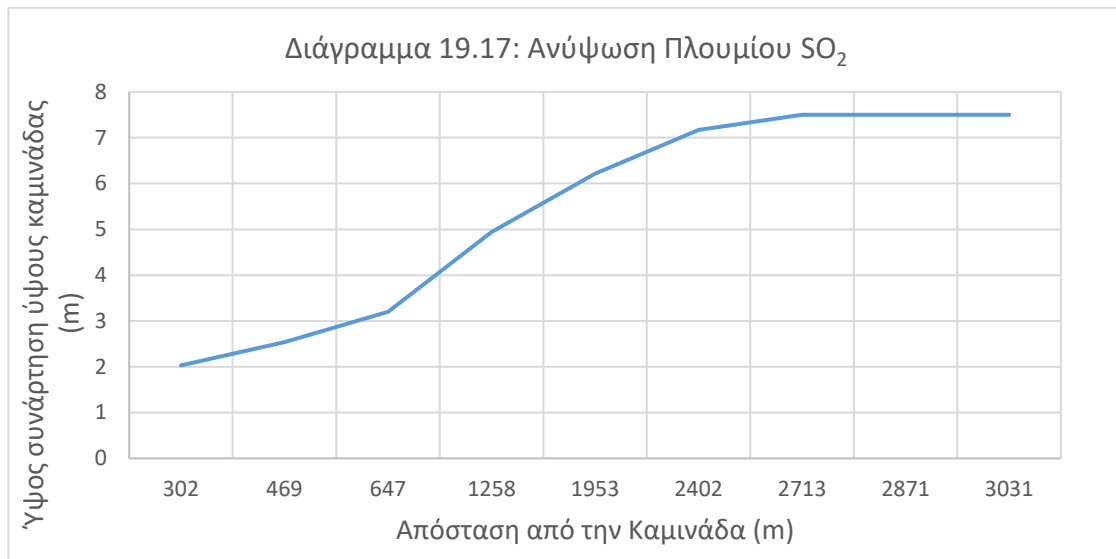


Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις κατά μήκος του πεδίου, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

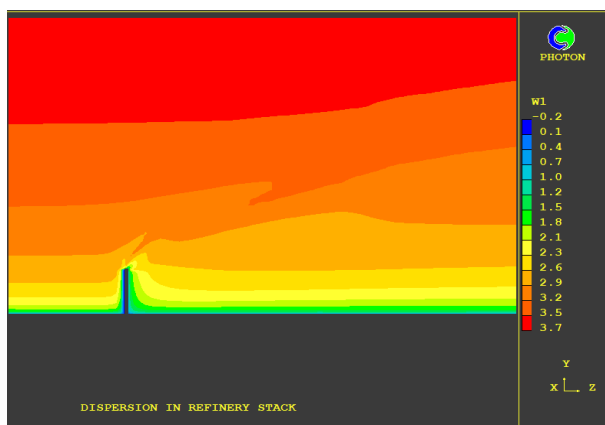
Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.17.



Και εδώ οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σχεδόν κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλούμιου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

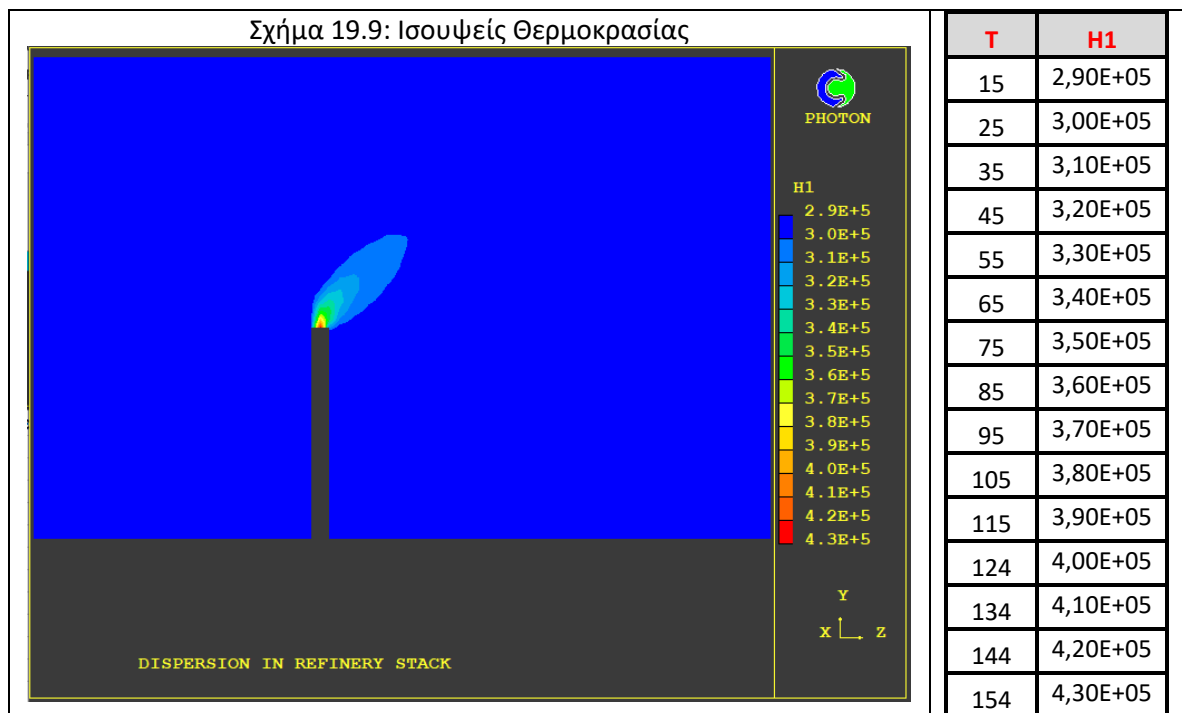
Σχήμα 19.7: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



Σχήμα 19.8: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air

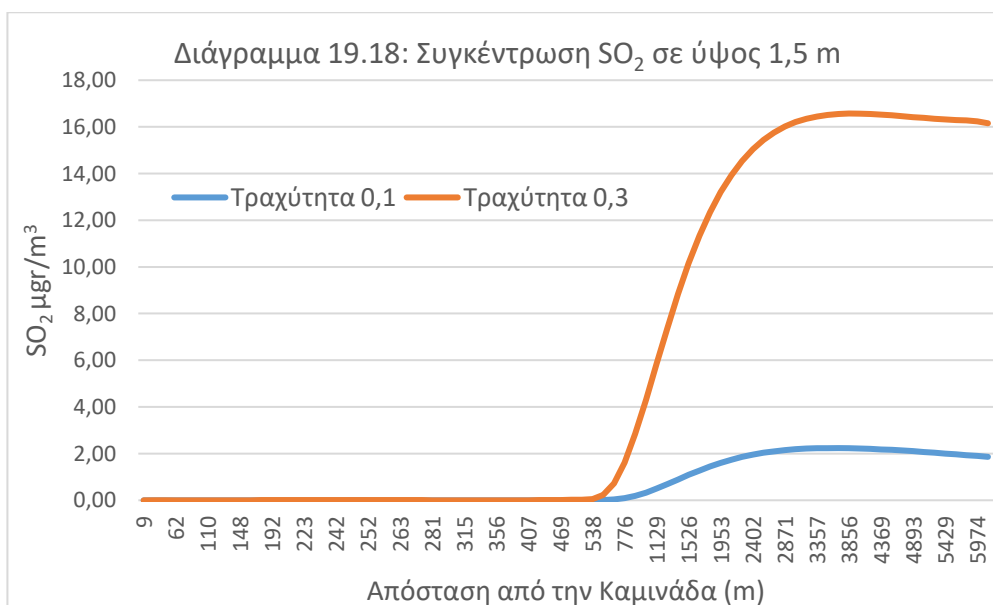


Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.7, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα. Επιπλέον σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



### Τραχύτητα 0,3

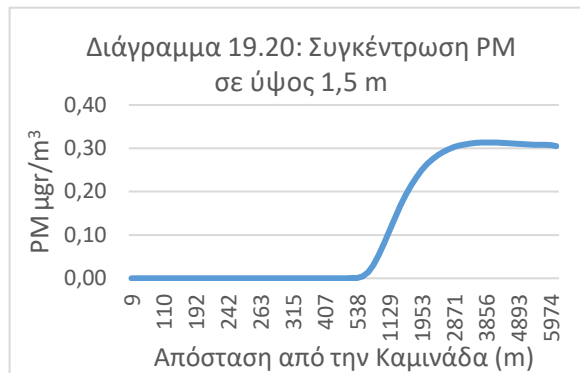
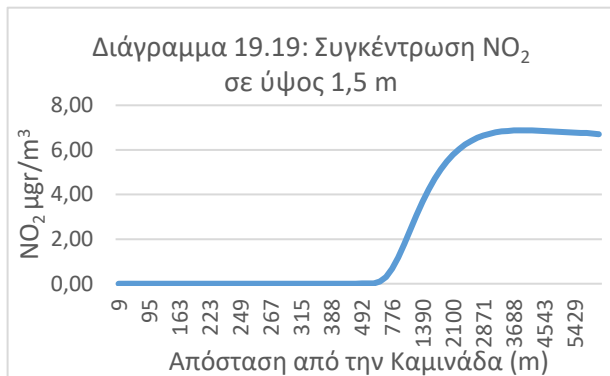
Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



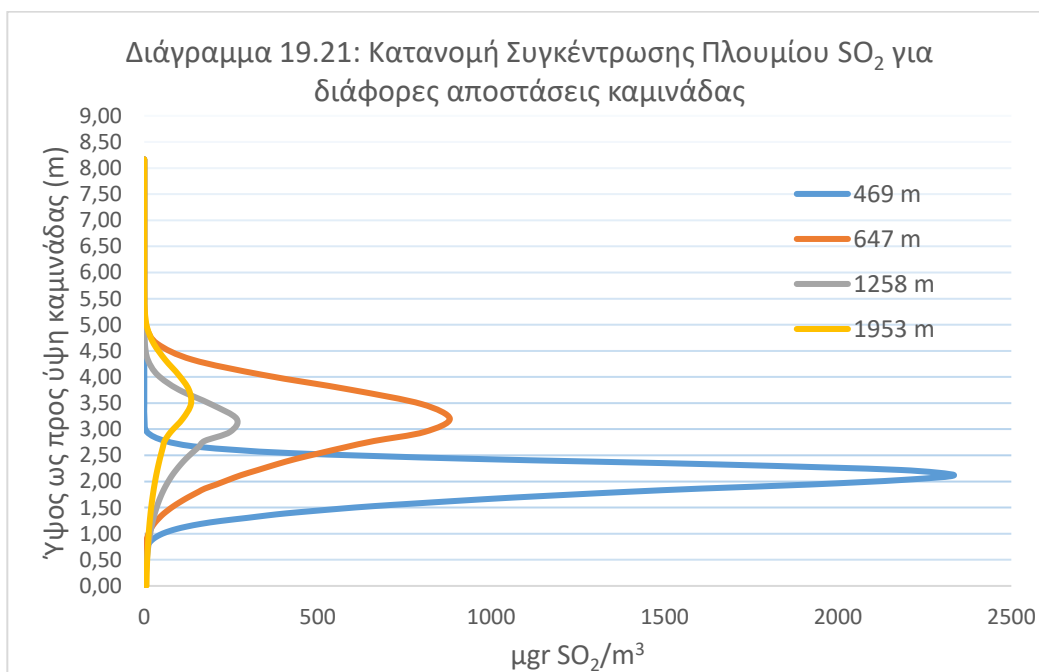
Και εδώ προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, αλλά πολλαπλάσιες από τις αντίστοιχες σε τραχύτητα 0,1, για την ίδια απόσταση από την καμινάδα. Σε απόσταση από την καμινάδα 3.856 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 16,57 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση για τραχύτητα 0,1 έχει τιμή 2,23 μgr/m<sup>3</sup>. Αυτό συμβαίνει επειδή το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση σε σχέση αυτής με τραχύτητα 0,1. Αντίστοιχα



αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής και για διάφορες αποστάσεις από την καμινάδα, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

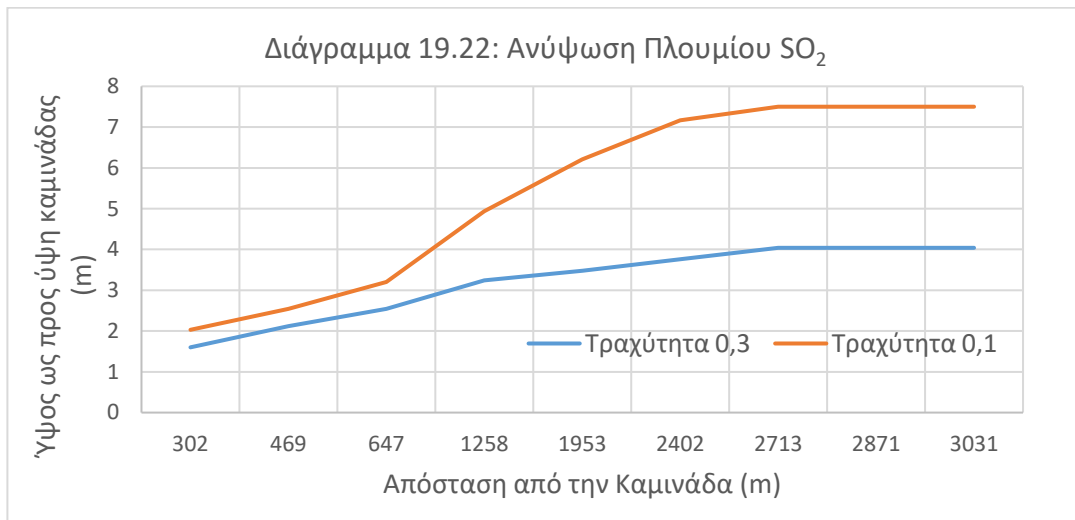


Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από τις καμινάδες, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

Λαμβάνοντας υπόψη το διάγραμμα 19.16, συγκρίνοντας τις δύο τραχύτητες παρατηρούμε ότι για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, για την τιμή ίση με 0,3 παρατηρούνται παρόμοιες μέγιστες συγκεντρώσεις σε μικρότερο ύψος του πεδίου ροής.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.22.



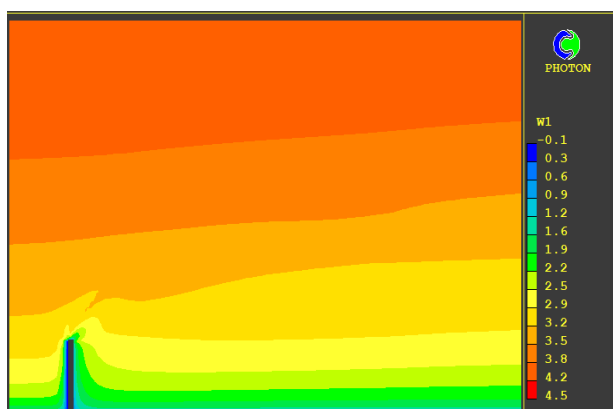


Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερεισχύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό το διάγραμμα επιβεβαιώνει τα αναγραφόμενα ανωτέρω για χαμηλότερη ανύψωση του πλουμίου σε σχέση με αυτή για τραχύτητα 0,1.

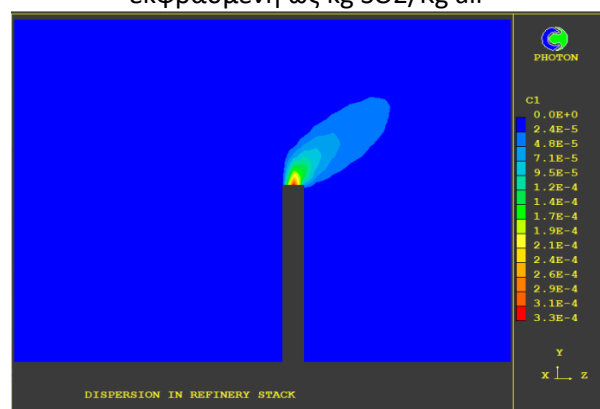
Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 18.2 αυξημένες τιμές τραχύτητας εδάφους οδηγούν σε αυξημένες τιμές τυρβώδους ιξώδους και κινητικής ενέργειας (ισχυρότερα τυρβώδη φαινόμενα), καλύτερη διασπορά ρύπων με παράλληλη μεγαλύτερη ανάπτυξη πλουμίου.

Ακολουθούν και εδώ σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.10: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



Σχήμα 19.11: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.10, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα. Παράλληλα λόγω των τυρβωδών αναταράξεων φαίνονται πιο έντονα και η καθοδική πορεία των



ισοϋψών της ταχύτητας μετά το σημείο καμινάδας. Η κλίση αυτή συγκρινόμενη με αυτή του σχήματος 19,7 για ταχύτητα 0,1, είναι ελαφρώς λιγότερη.

Σχήμα 19.12: Ισουψείς Θερμοκρασίας

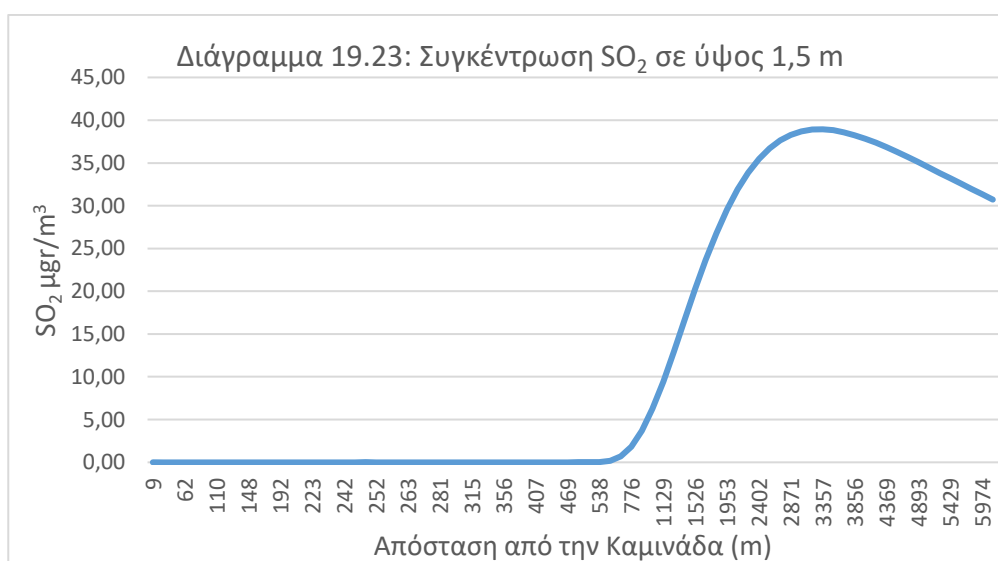


T	H1
15	2,90E+05
25	3,00E+05
35	3,10E+05
45	3,20E+05
55	3,30E+05
65	3,40E+05
75	3,50E+05
85	3,60E+05
95	3,70E+05
105	3,80E+05
115	3,90E+05
124	4,00E+05
134	4,10E+05
144	4,20E+05
154	4,30E+05

### 19.2.3 Ταχύτητα Ανέμου 4 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε:



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε περαιτέρω αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας, το πλούμιο έχει ακόμα μικρότερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Συγκρίνοντας με τα αντίστοιχα διαγράμματα για μικρότερες ταχύτητες,

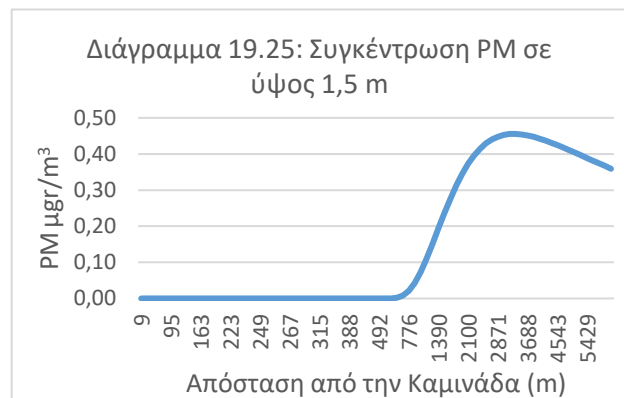
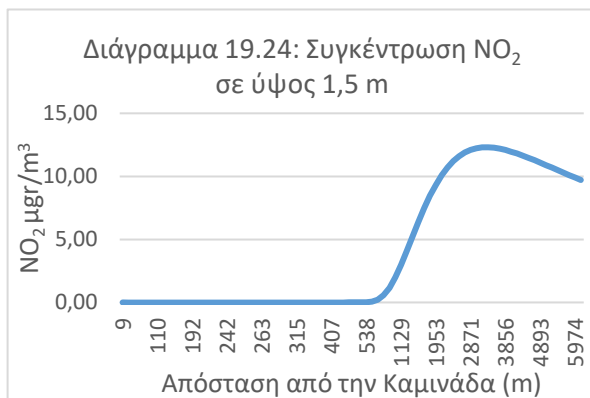


η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται σε μικρότερες τιμές αποστάσεων από την καμινάδα. Σε απόσταση από την καμινάδα 3.357 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με  $38,94 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ . Για το συγκεκριμένο μήκος του πεδίου ροής, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

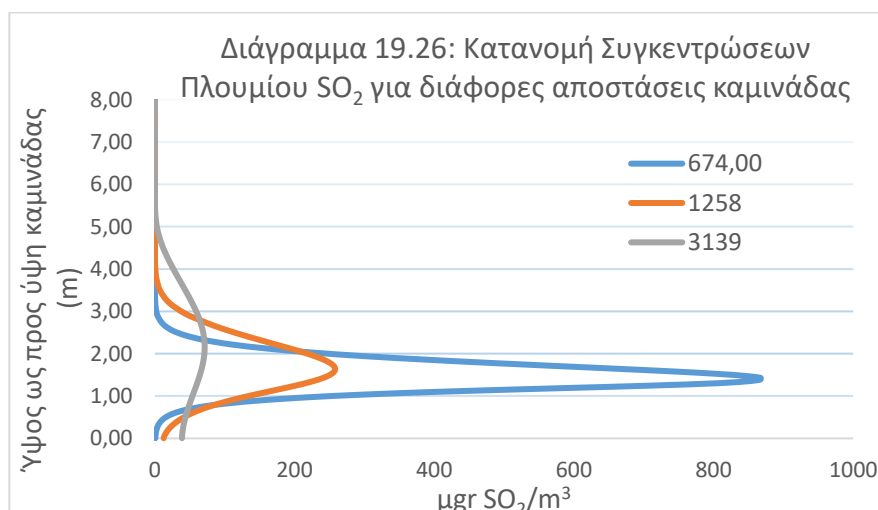
Πίνακας 19.6: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση καμινάδας.

Απόσταση καμινάδας: 3.357 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,17
2	2,23
4	38,94

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

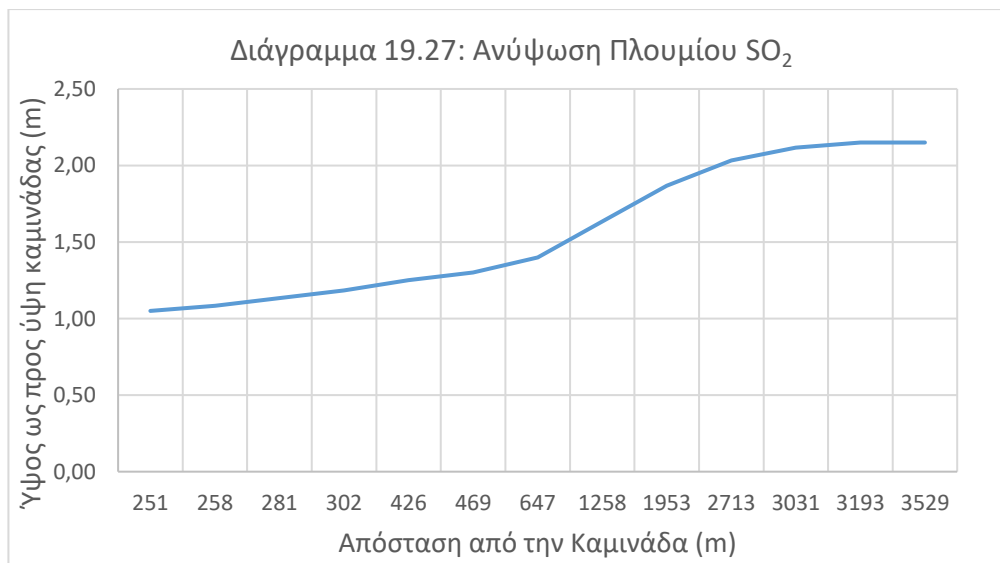




Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

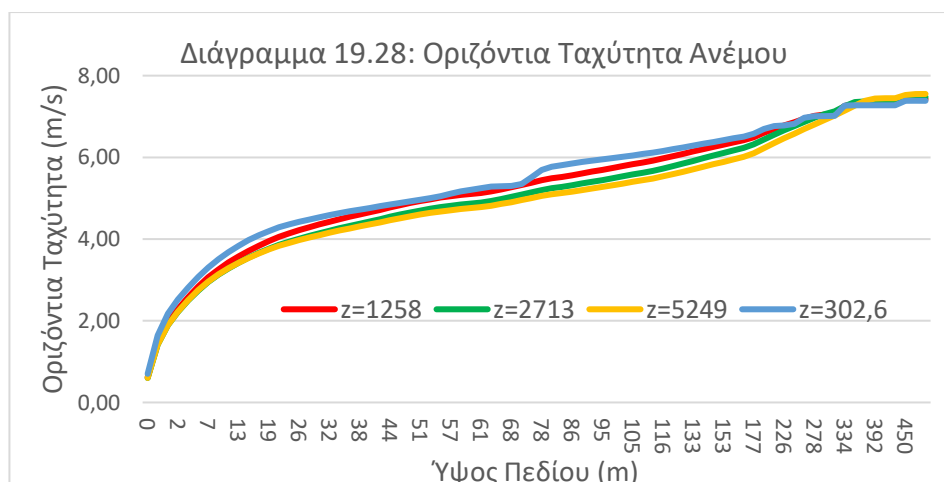
Συγκρίνοντας με το αντίστοιχο διάγραμμα 19.16, για τραχύτητα 0,1 παρατηρούμαι ότι για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται σε χαμηλότερο ύψος.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.27.



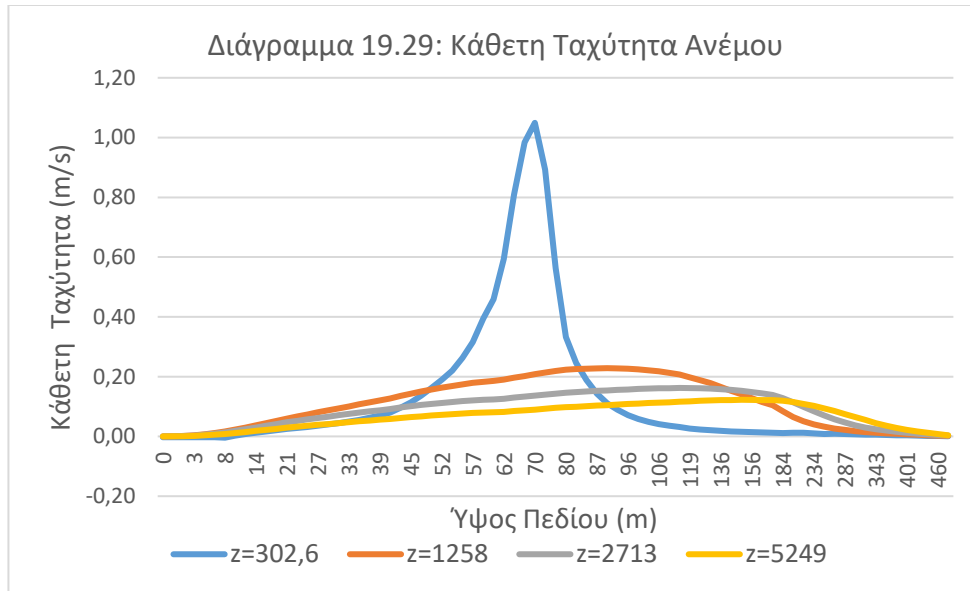
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Εδώ αρχίζει και φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ανύψωση του πλουμίου δεν είναι τόσο έντονη όσο στις μικρότερες ταχύτητες του ανέμου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζεται η σχέση της οριζόντιας και κάθετης ταχύτητας ( $W$ ), ( $V$ ) στον άξονα συμμετρίας για διάφορα μήκη ( $Z$ ) του πεδίου ροής.



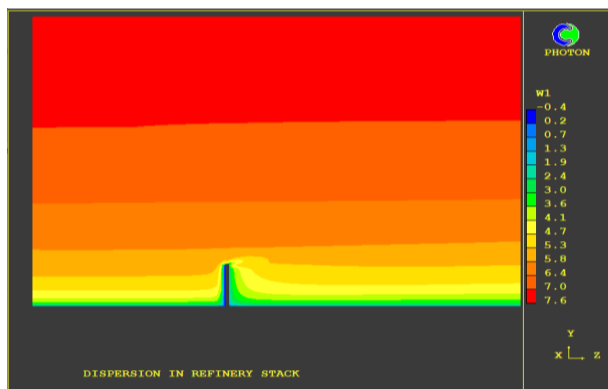


Παρατηρούμε ότι σε ύψος 68 m και μήκος 302,6 m που είναι πολύ κοντά κατάντη της καμινάδας, η ταχύτητα παρουσιάζει διακυμάνσεις που οφείλονται στο φαινόμενο της τυρβώδους ροής που αναπτύσσεται μετά την καμινάδα. Αυτό είναι πιο διακριτό στο Διάγραμμα 19.29 που ακολουθεί.

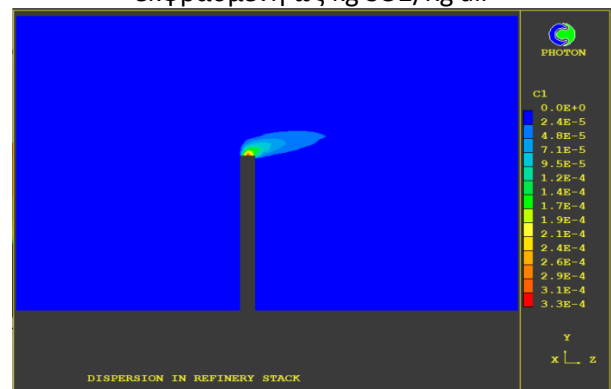


Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.13: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



Σχήμα 19.13: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.13, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει ελαφριά κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



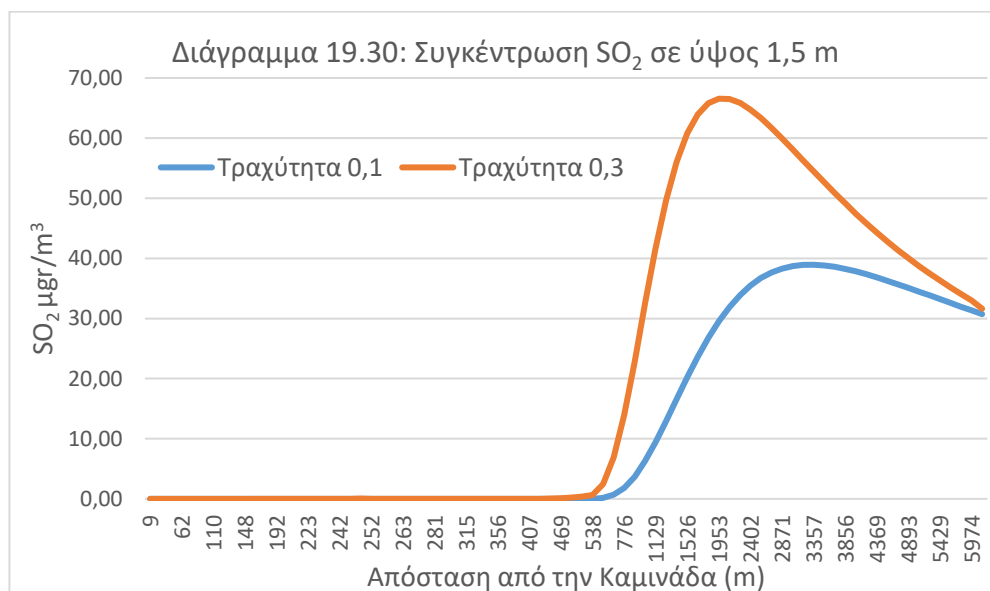
Σχήμα 19.14: Ισοψείς Θερμοκρασίας



T	H1
15	2,90E+05
25	3,00E+05
35	3,10E+05
45	3,20E+05
55	3,30E+05
65	3,40E+05
75	3,50E+05
85	3,60E+05
95	3,70E+05
105	3,80E+05
115	3,90E+05
124	4,00E+05
134	4,10E+05
144	4,20E+05
154	4,30E+05

### Τραχύτητα 0,3

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Και εδώ προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, αλλά σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες σε τραχύτητα 0,1, για την ίδια απόσταση από την καμινάδα. Σε απόσταση από την καμινάδα 1.953 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 66,56 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση για τραχύτητα 0,1 έχει τιμή 29,54 μgr/m<sup>3</sup>. Αυτό συμβαίνει επειδή το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση σε σχέση αυτής με τραχύτητα 0,1, λόγω αυξημένου τυρβώδους ιξώδους. Συγκρίνοντας τις δύο τραχύτητες για τον ίδια ταχύτητα ανέμου, η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται σε μικρότερες τιμές απόστασης από την καμινάδα

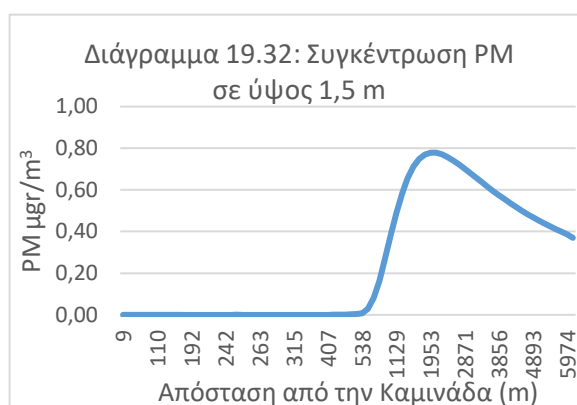
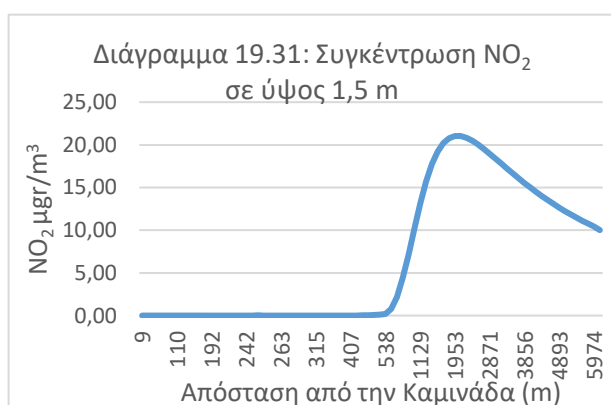


για αυτή με τιμή 0,3. Για συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

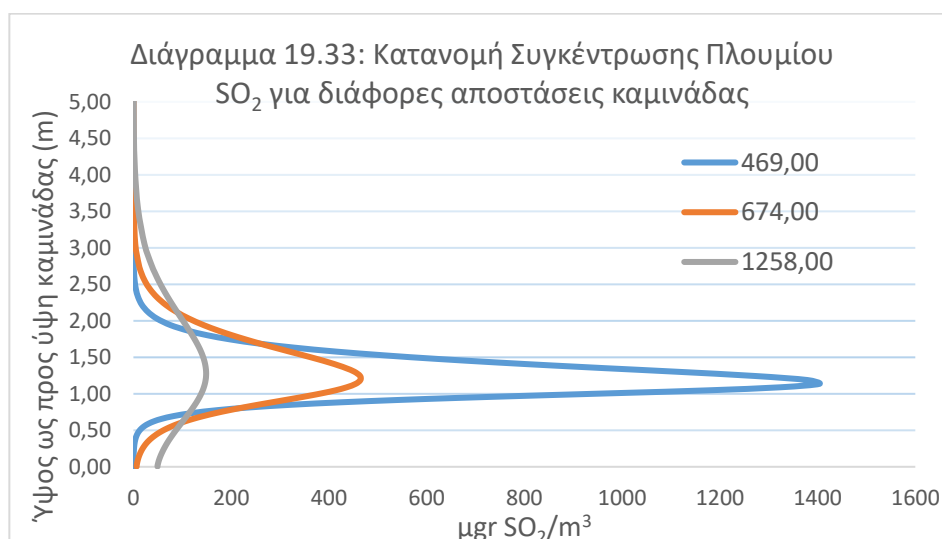
Πίνακας 19.7: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από Καμινάδα.

Απόσταση καμινάδας: 1.953 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,28
2	13,21
4	66,56

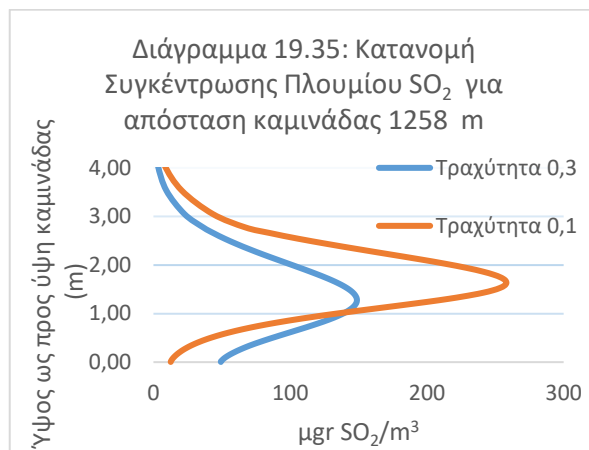
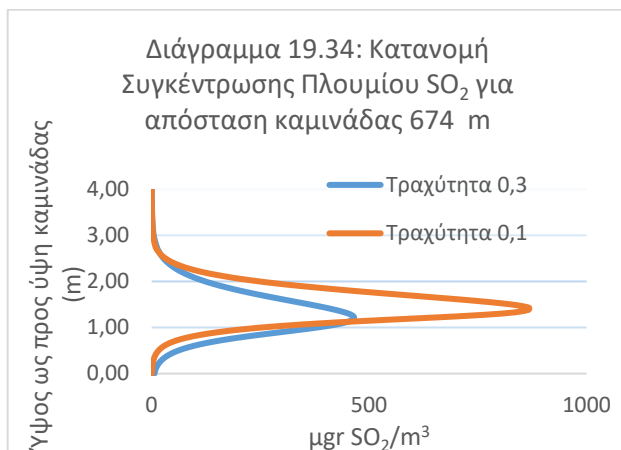
Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής και για διάφορες αποστάσεις από την καμινάδα, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

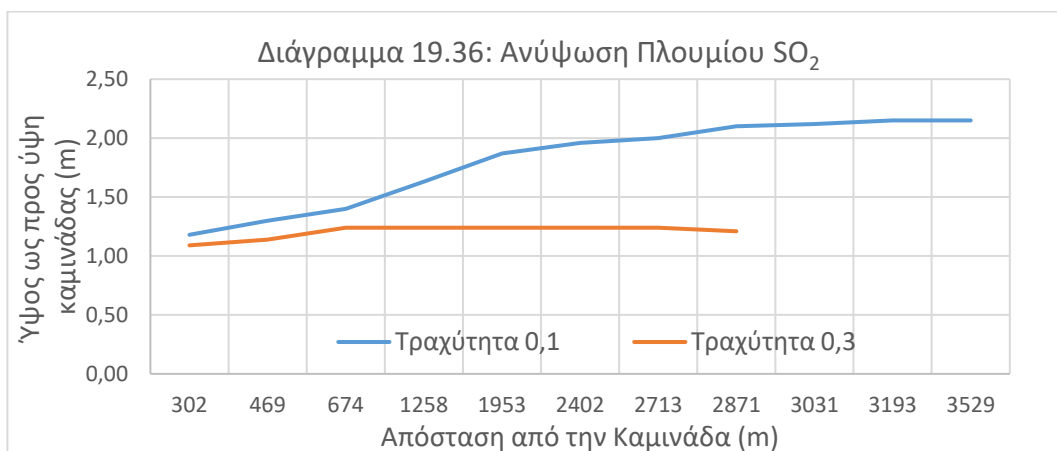


Επίσης οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου για συγκεκριμένες αποστάσεις από την καμινάδα, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις μειώνονται. Βέβαια συγκρίνοντας τις δύο τραχύτητες παρατηρούμε ότι για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, για την τιμή ίση με 0,3 παρατηρούνται οι μέγιστες συγκεντρώσεις σε μικρότερο ύψος του πεδίου ροής.

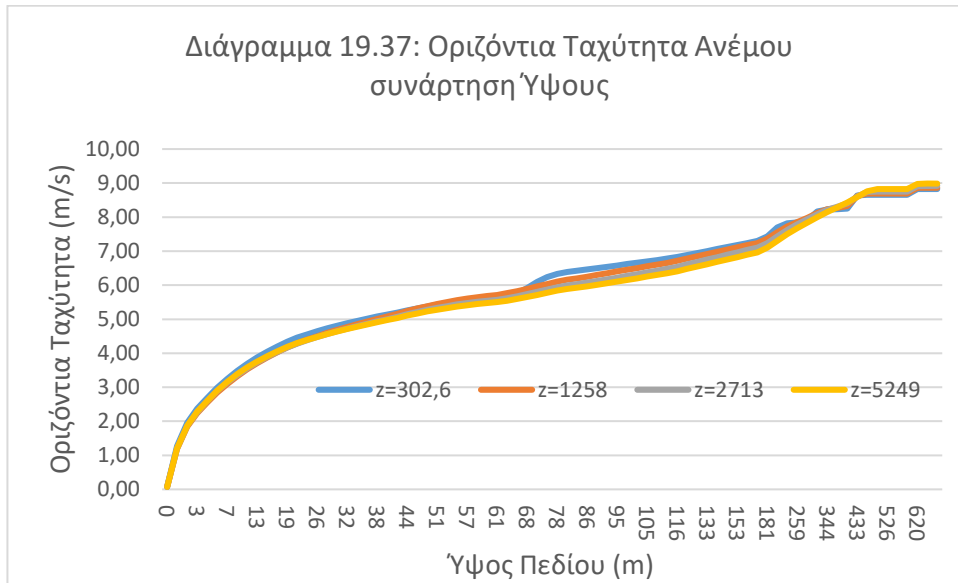
Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.36.



Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Η επίδραση της ταχύτητας ανέμου είναι ισχυρή στην επίδραση της ανύψωσης του πλουμίου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό το διάγραμμα επιβεβαιώνει τα αναγραφόμενα ανωτέρω για χαμηλότερη ανύψωση του πλουμίου σε σχέση με αυτή για τραχύτητα 0,1.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η σχέση της οριζόντιας ταχύτητας ( $W$ ) στον άξονα συμμετρίας για διάφορα μήκη ( $Z$ ) του πεδίου ροής.

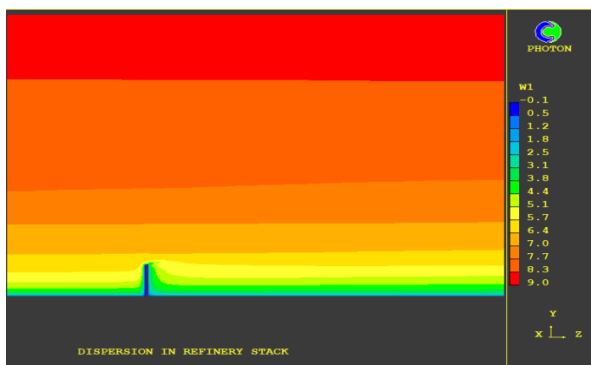




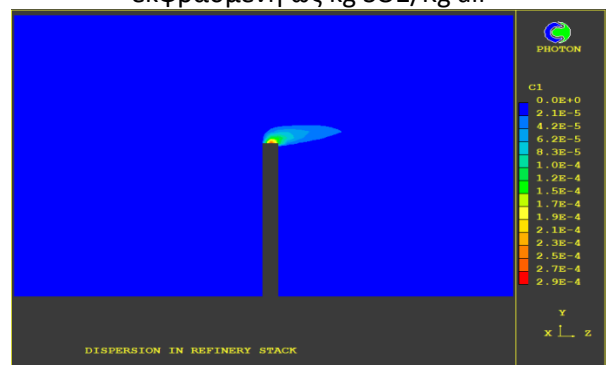
Παρατηρούμε ότι σε ύψος 78 m και μήκος 302,6 m που είναι πολύ κοντά κατάντη της καμινάδας, η ταχύτητα παρουσιάζει διακυμάνσεις που οφείλονται στο φαινόμενο της τυρβώδους ροής που αναπτύσσεται μετά την καμινάδα.

Ακολουθούν και εδώ σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.15: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

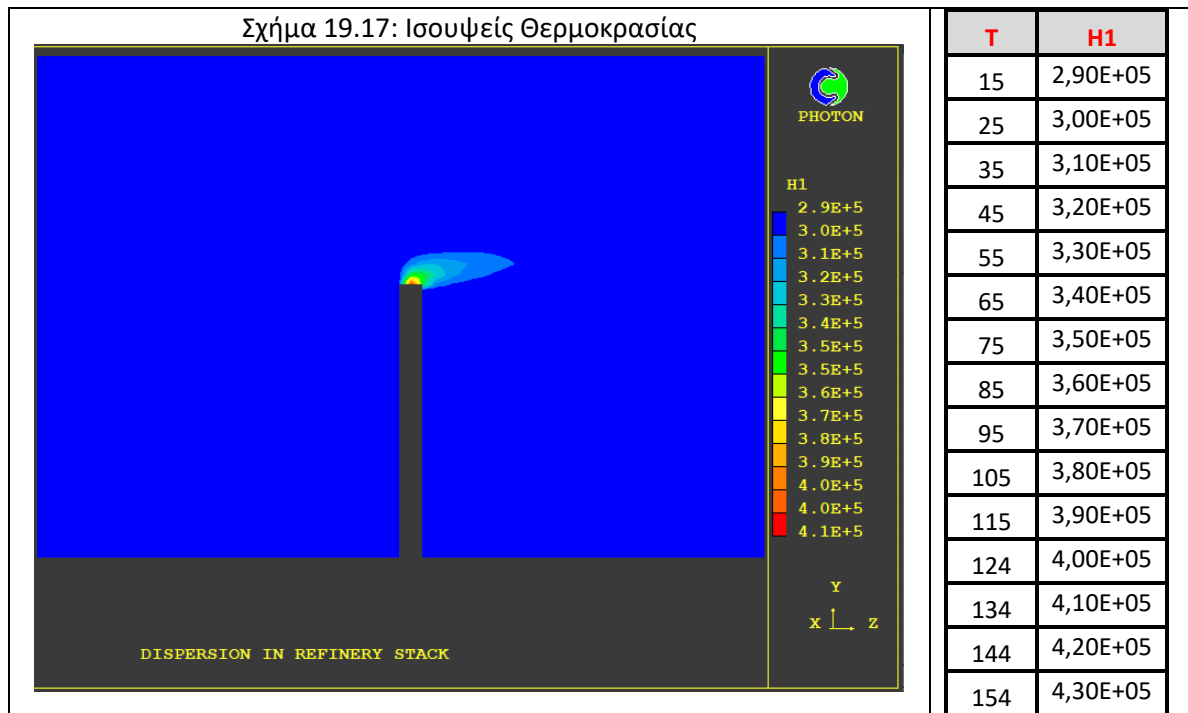


Σχήμα 19.16: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.15, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

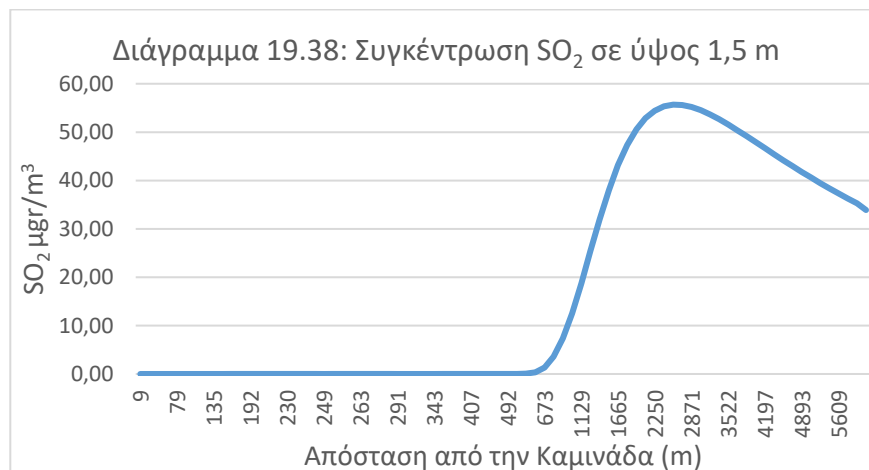
Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας (πιο έντονες από αυτές της τραχύτητας 0,1 και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



19.2.4 Ταχύτητα Ανέμου 6 m/s

Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε:



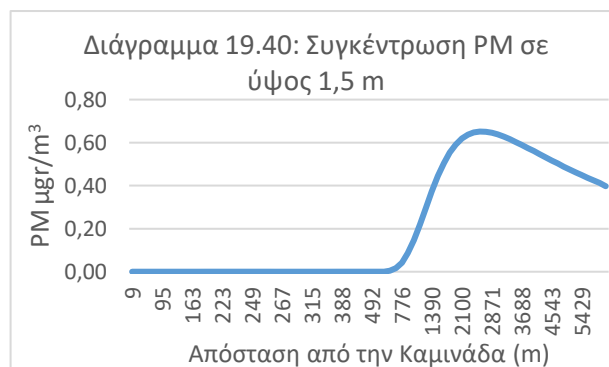
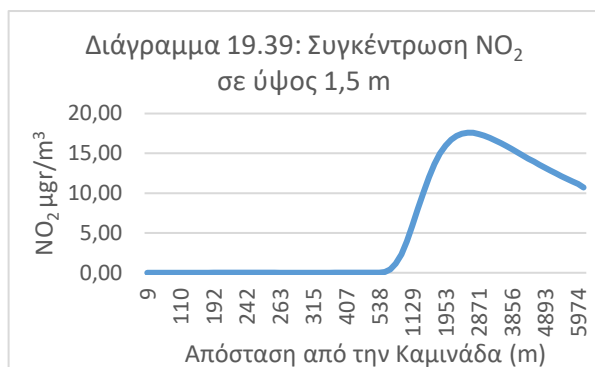
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας, το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 2.557 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 55,68 μgr/m<sup>3</sup>. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ένταση του ανέμου, τόσο πιο κοντά προς το σημείο καμινάδας, έχουμε τις μέγιστες συγκεντρώσεις. Για συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.



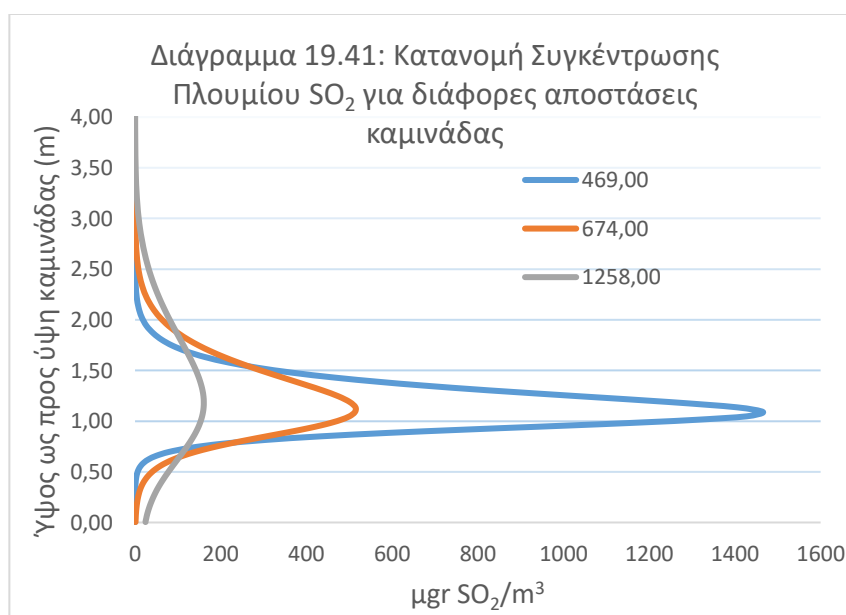
Πίνακας 19.8: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την Καμινάδα.

Απόσταση καμινάδας: 3.357 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,17
2	2,23
4	38,94
6	52,66

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

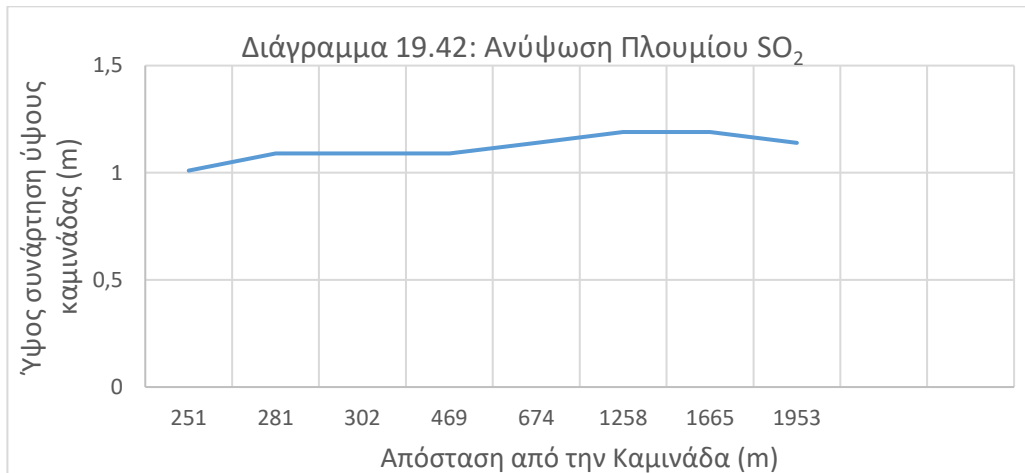


Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι



ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

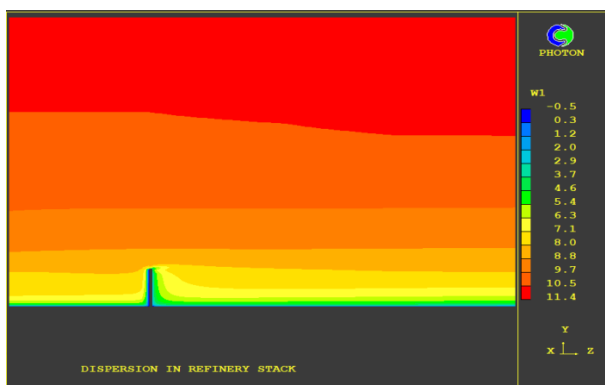
Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.42.



Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται πιο καθαρά η επίδραση του ανέμου. Αν και οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο δεν ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής, αλλά ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

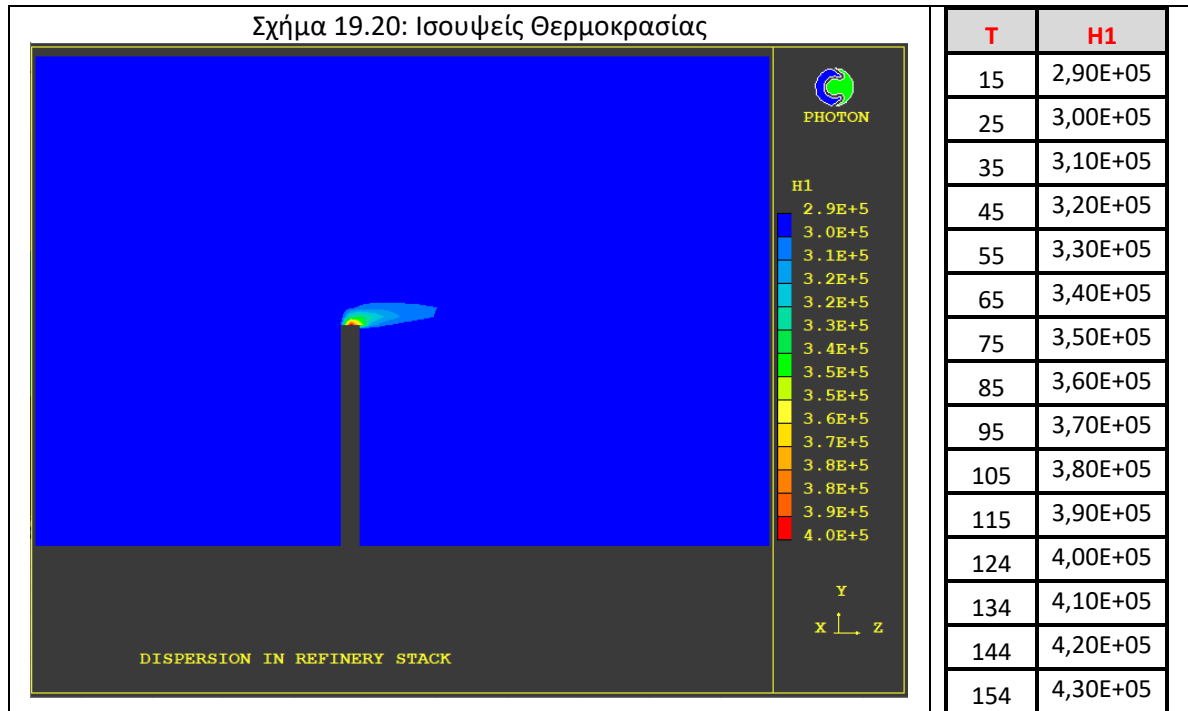
Σχήμα 19.18: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



Σχήμα 19.19: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air

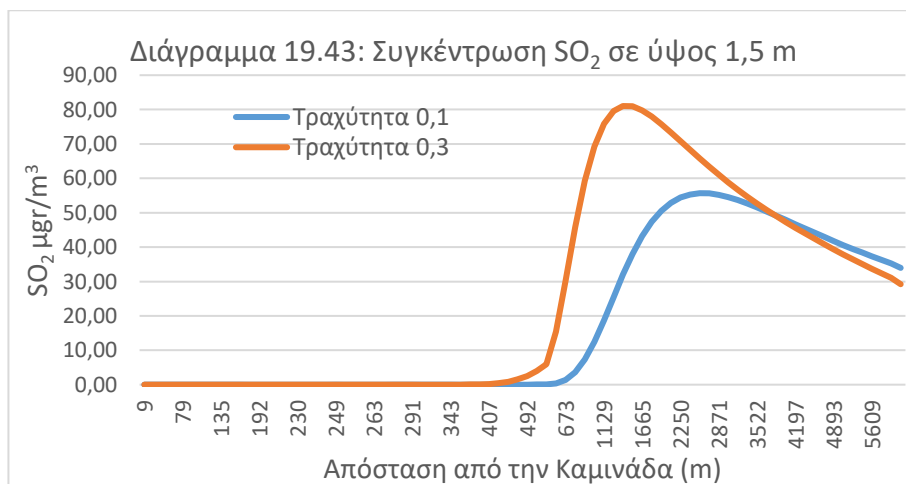


Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.18, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει μικρή κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων και της μεγάλης ταχύτητας του ανέμου. Κατόπιν εμφανίζονται έντονες καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα άνυσμα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Και εδώ σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



### Τραχύτητα 0,3

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



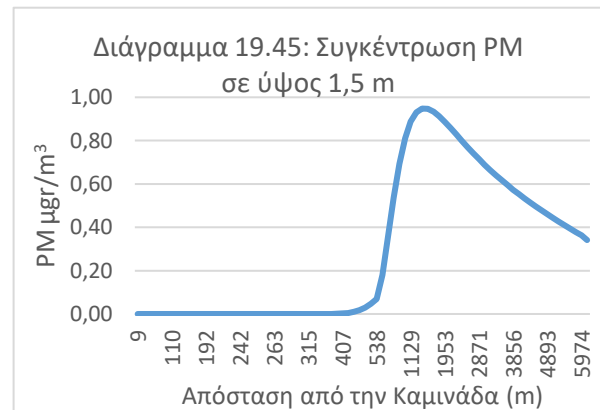
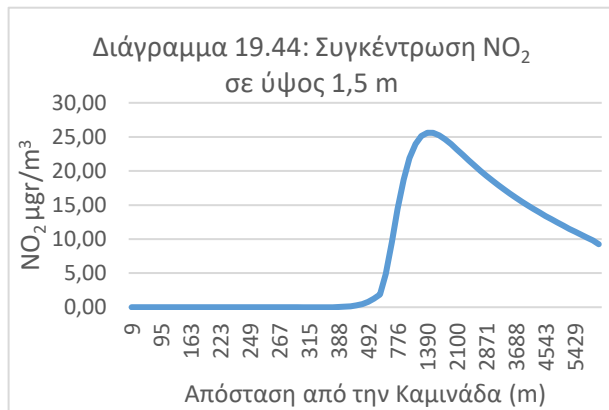
Και εδώ προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, αλλά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες σε τραχύτητα 0,1, για συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα. Σε απόσταση από την καμινάδα 1.953 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 75,75 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση για τραχύτητα 0,1 έχει τιμή 50,55 μgr/m<sup>3</sup>. Αυτό συμβαίνει επειδή το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση σε σχέση αυτής με τραχύτητα 0,1. Και εδώ επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι σε μεγαλύτερη τραχύτητα και για την ίδια ταχύτητα ανέμου, η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα. Για συγκεκριμένες αποστάσεις από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.



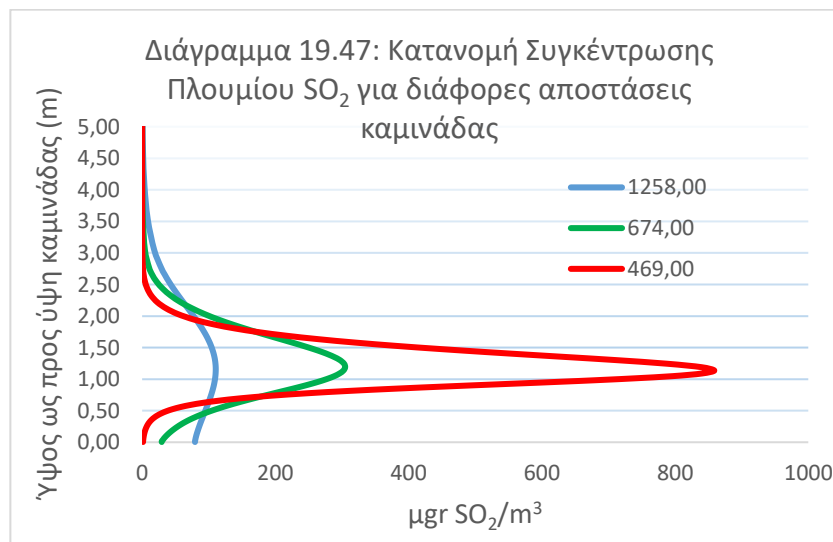
Πίνακας 19.9: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την Καμινάδα.

Απόσταση από την καμινάδα: 1.953 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,28
2	13,21
4	66,56
6	75,75

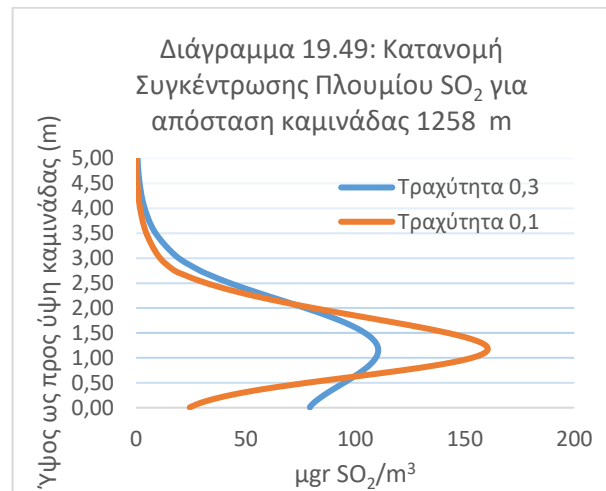
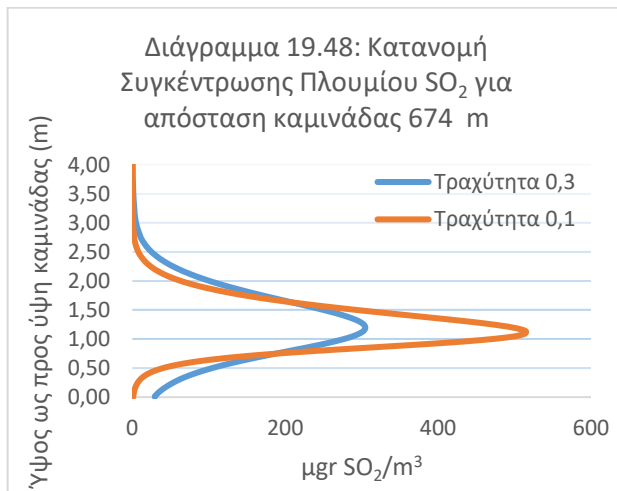
Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής και για διάφορες αποστάσεις από την καμινάδα, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

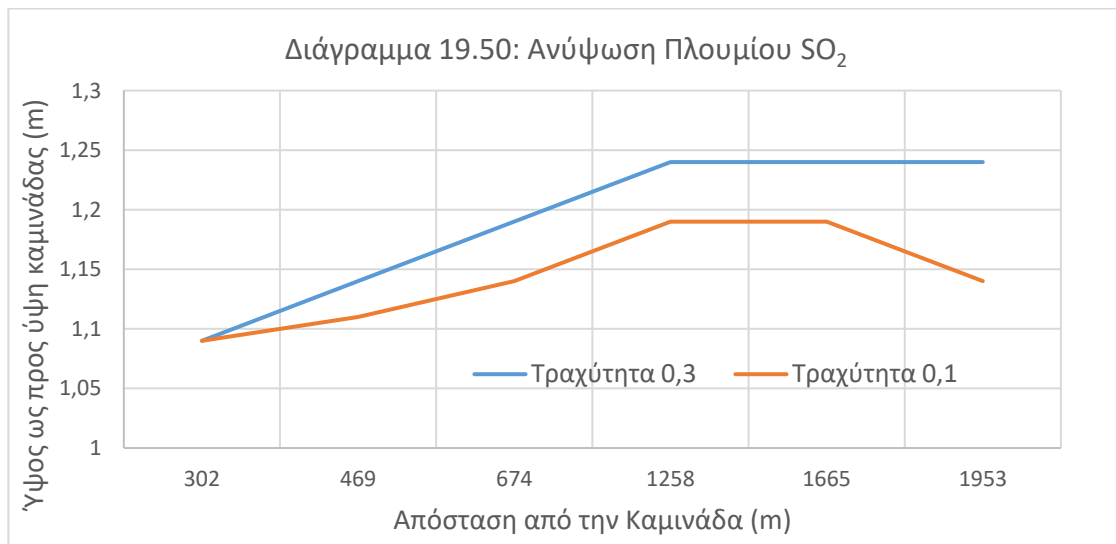


Επίσης οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου για συγκεκριμένα μήκη του πεδίου ροής, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις μειώνονται. Βέβαια συγκρίνοντας τις δύο τραχύτητες παρατηρούμε ότι για το ίδιο απόσταση από την καμινάδα, για την τιμή ίση με 0,3 παρατηρούνται μέγιστες συγκεντρώσεις σε μικρότερο ύψος του πεδίο ροής.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.36.



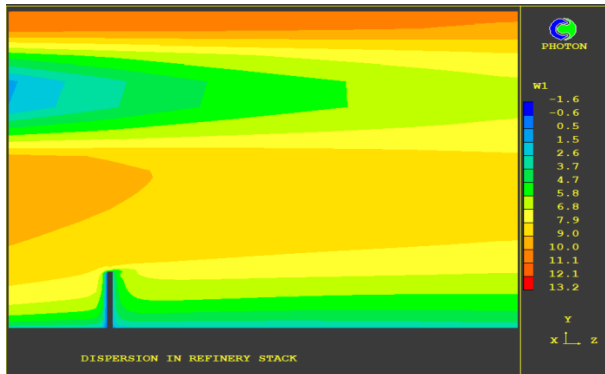
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε λίγο μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Η άνοδος δεν είναι σημαντική λόγω της επίδρασης του ισχυρού ανέμου και της μεγαλύτερης διασποράς που προκαλείται από τα τυρβώδη φαινόμενα (πολύ αυξημένο τυρβώδες ιξώδες). Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिσχύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό το διάγραμμα επιβεβαιώνει τα αναγραφόμενα ανωτέρω για χαμηλότερη ανύψωση του πλουμίου σε σχέση με αυτή για τραχύτητα 0,1.

Ακολουθούν και εδώ σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της

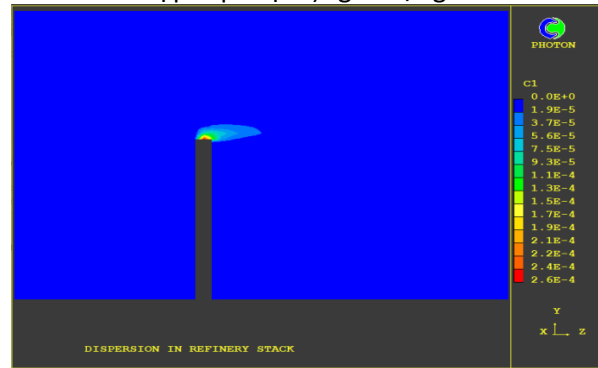


συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.21: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

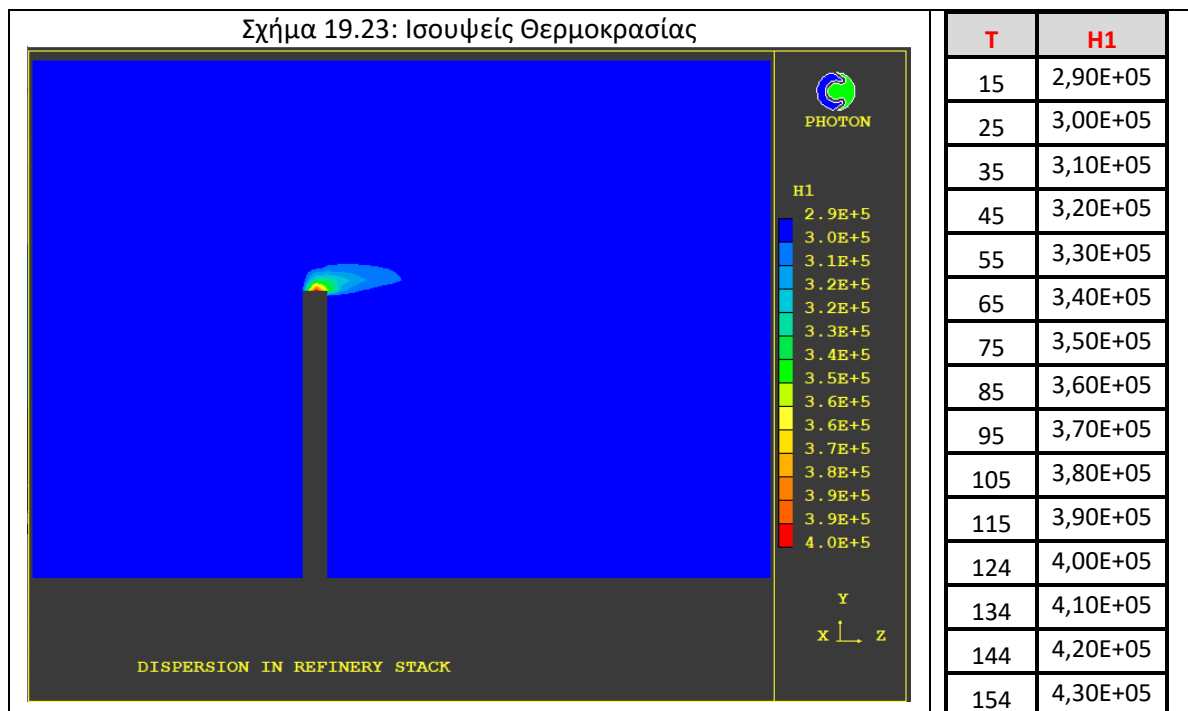


Σχήμα 19.22: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub>  
εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.21, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει ελάχιστη κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων αλλά κυρίως της έντασης του ανέμου. Κατόπιν εμφανίζονται έντονες καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Και εδώ σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.

Σχήμα 19.23: Ισοψείς Θερμοκρασίας

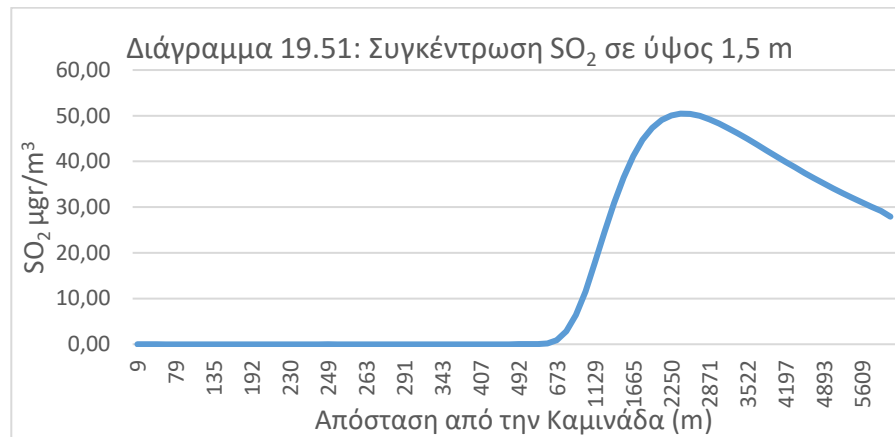


### 19.2.5 Ταχύτητα Ανέμου 9 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε:



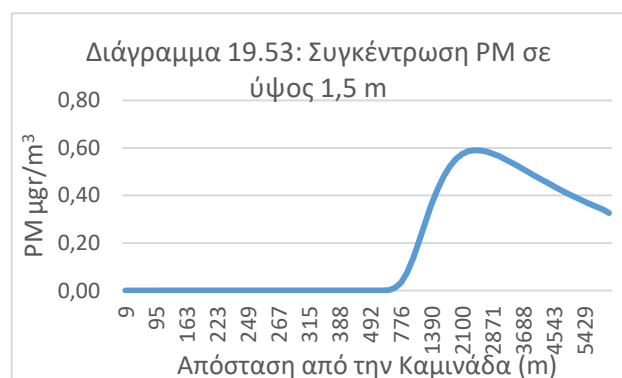
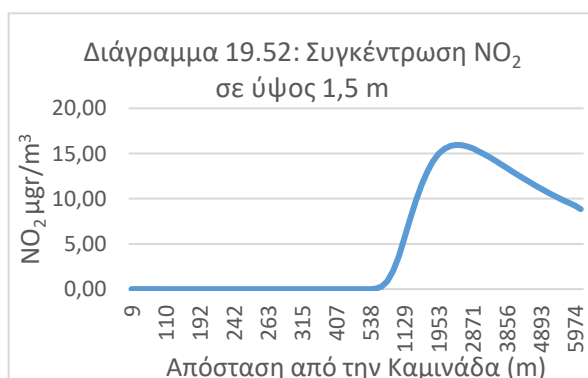


Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας (από 6 σε 9 m/s), το πλούμιο παρουσιάζει περίπου την ίδια ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, περίπου ίδιες συγκεντρώσεις. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 2.402 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 50,46 μgr/m<sup>3</sup>. Για συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

Πίνακας 19.10: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

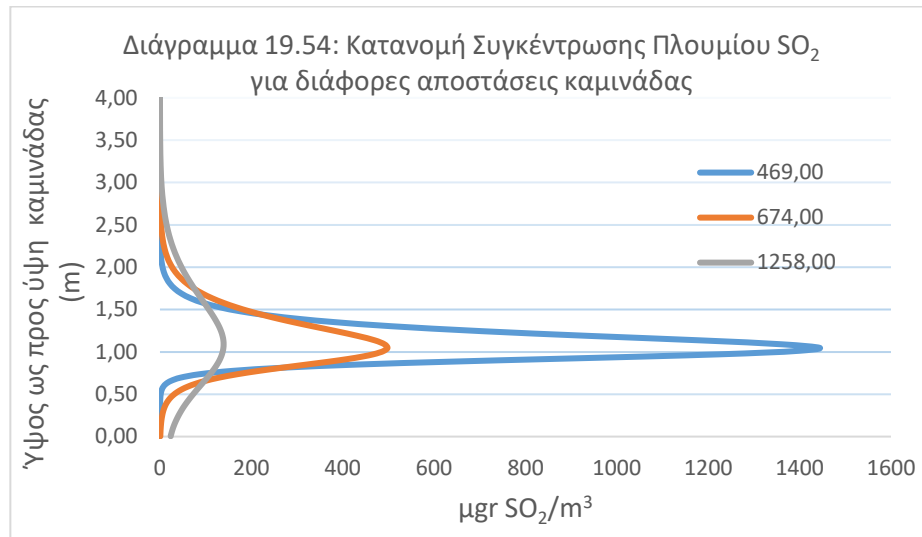
Απόσταση από την καμινάδα: 3.357 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση (μgr/m <sup>3</sup> )
0,5	0,17
2	2,23
4	38,94
6	52,66
9	46,12

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



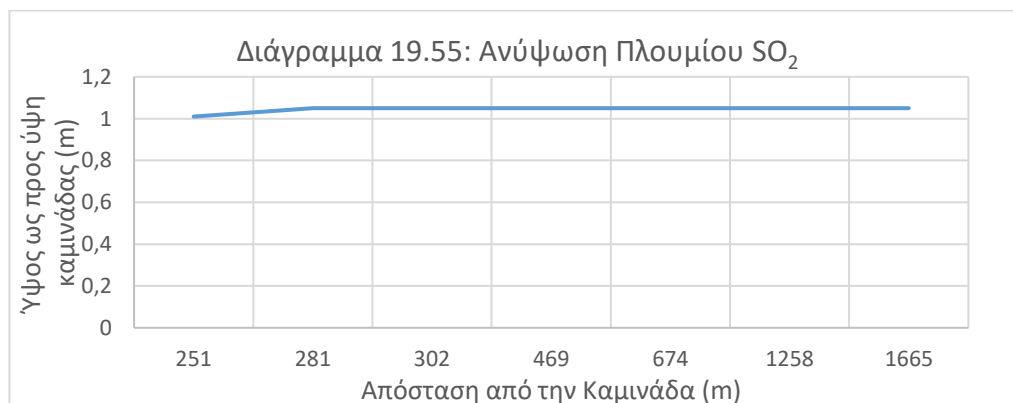


Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.55.

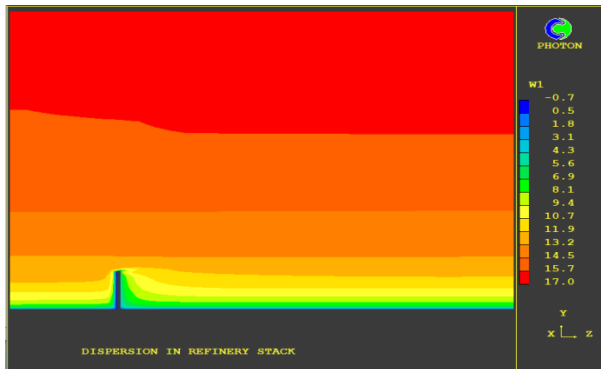


Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται πιο καθαρά η επίδραση του ανέμου. Αν και οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο δεν ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής, αλλά ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

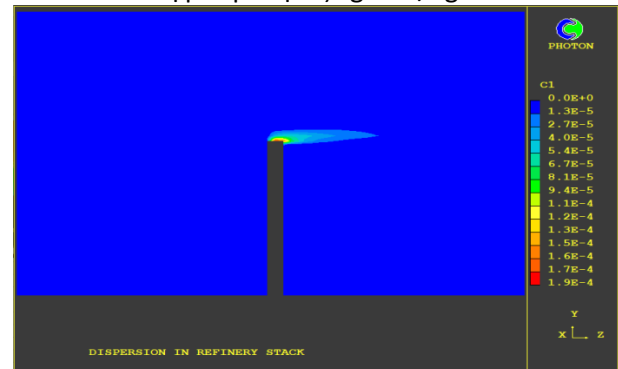
Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).



Σχήμα 19.24: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

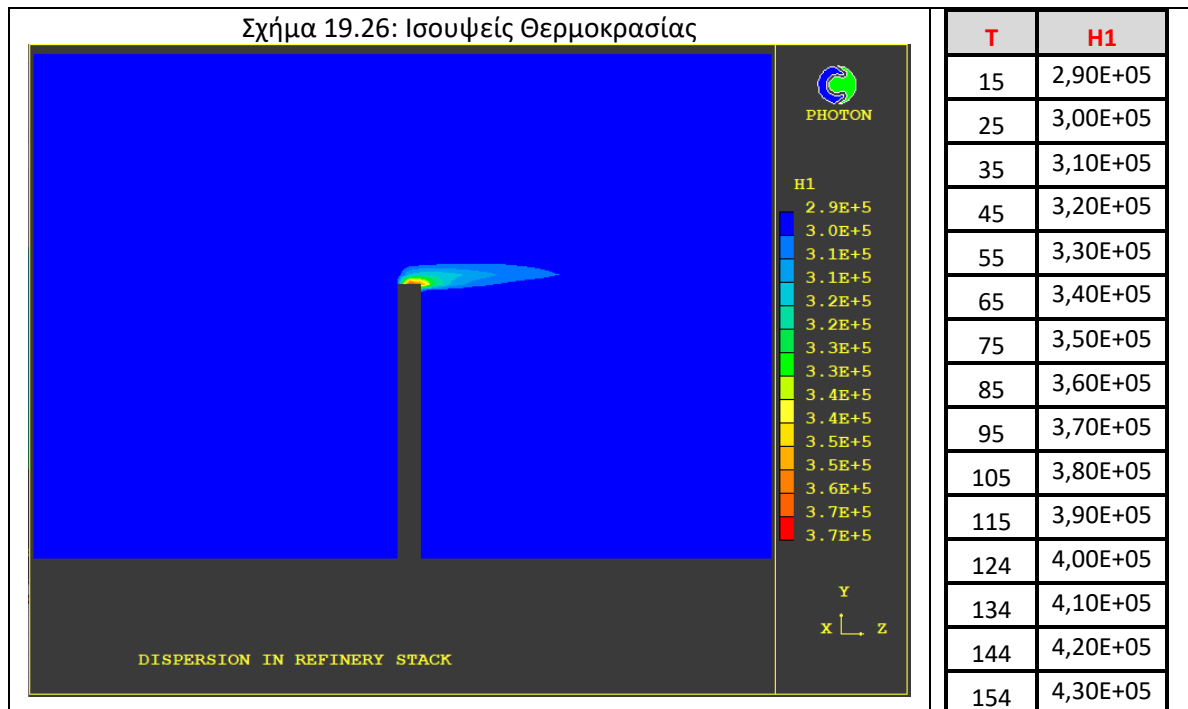


Σχήμα 19.25: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub>  
εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/kg air



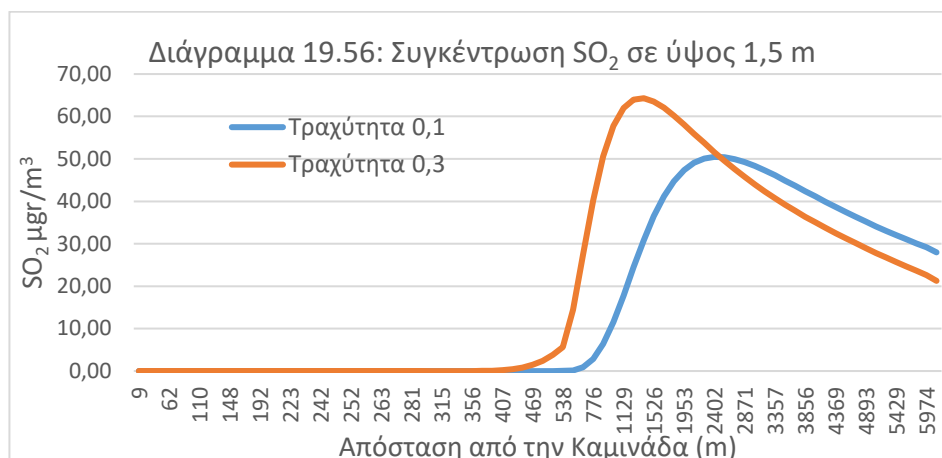
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.24, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει ελάχιστη κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων και της μεγάλης ταχύτητας του ανέμου. Κατόπιν εμφανίζονται έντονες καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Και εδώ σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.

Σχήμα 19.26: Ισοψείς Θερμοκρασίας



### Τραχύτητα 0,3

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης καμινάδας και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.

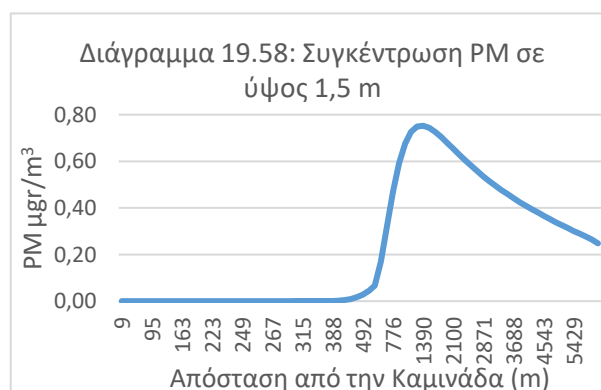
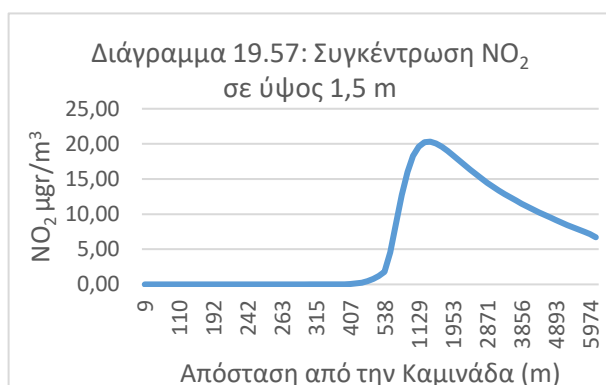


Και εδώ προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, αλλά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες σε τραχύτητα 0,1, για συγκεκριμένες αποστάσεις από την καμινάδα. Σε απόσταση από την καμινάδα 1.390 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 64,30 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση για τραχύτητα 0,1 έχει τιμή 30,86 μgr/m<sup>3</sup>. Και εδώ επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι σε μεγαλύτερη τραχύτητα και για την ίδια ταχύτητα ανέμου, η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα. Για συγκεκριμένες αποστάσεις από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

Πίνακας 19.11: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

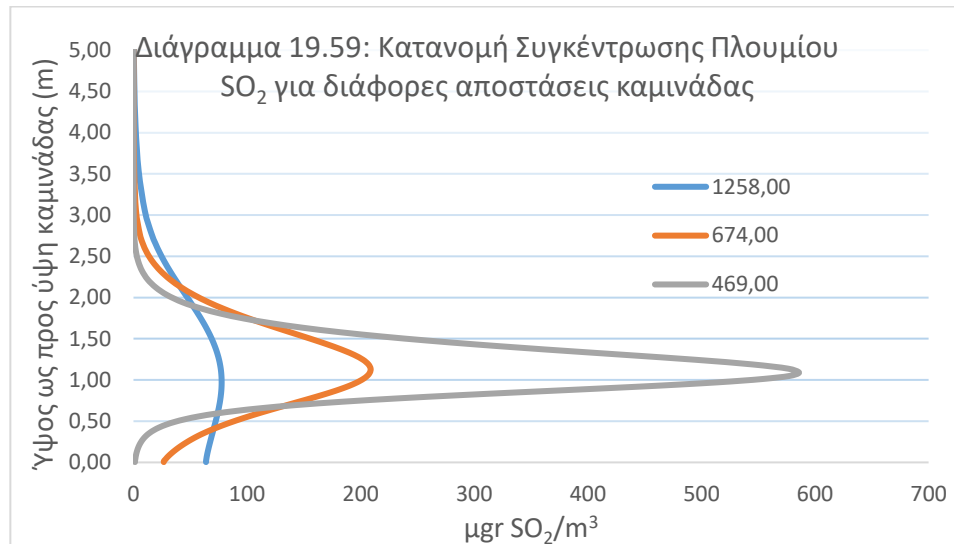
Απόσταση από την καμινάδα: 1.953 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση (μgr/m <sup>3</sup> )
0,5	0,28
2	13,21
4	66,56
6	75,75
9	58,08

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.

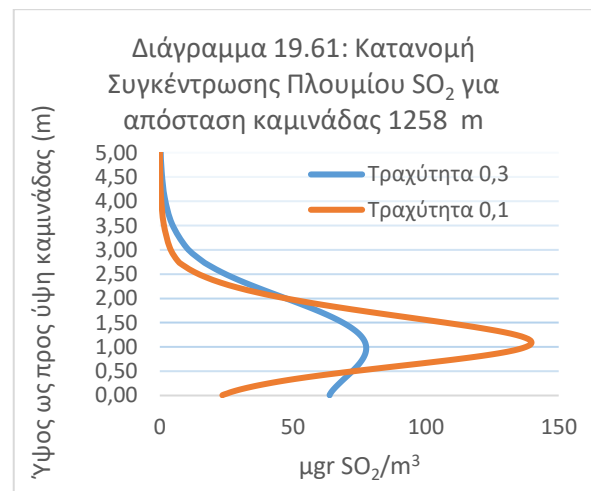
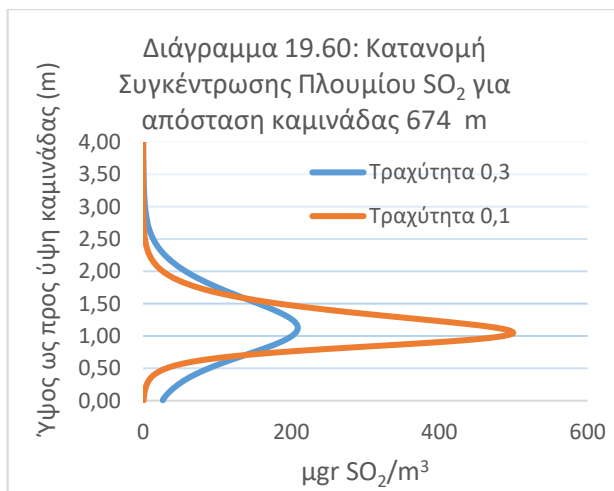




Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής και για διάφορες αποστάσεις από την καμινάδα, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

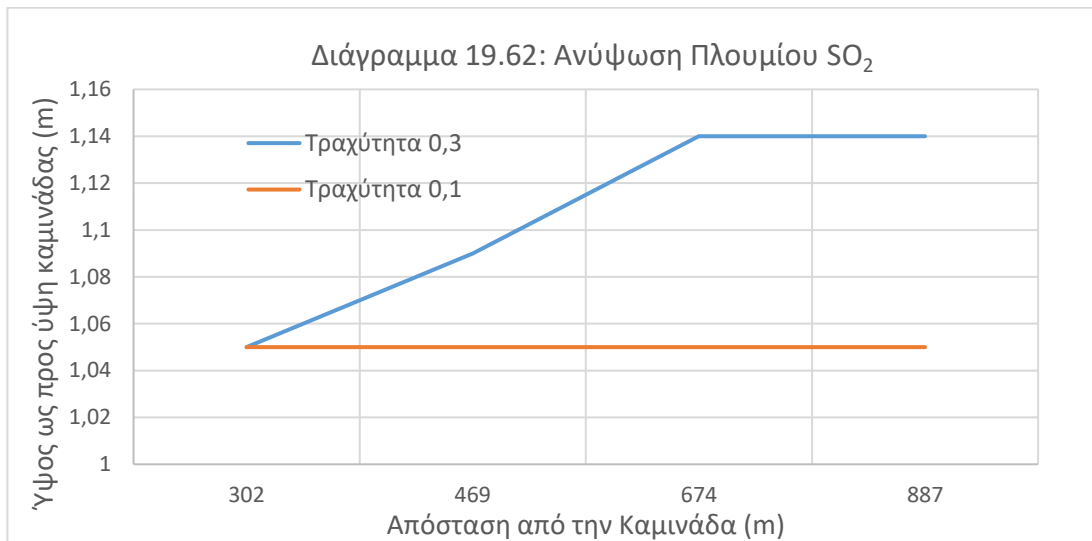


Επίσης οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου για συγκεκριμένες αποστάσεις από την καμινάδα, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



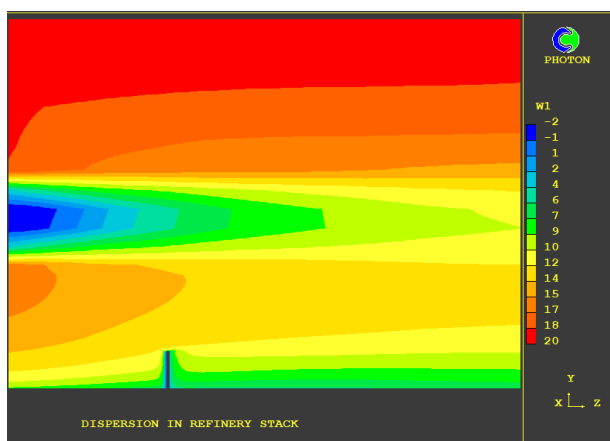
Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις μειώνονται. Βέβαια συγκρίνοντας τις δύο τραχύτητες παρατηρούμε ότι για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα, για την τιμή ίση με 0,3 παρατηρούνται μέγιστες συγκεντρώσεις σε μικρότερο ύψος του πεδίου ροής.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.62.



Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε λίγο μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Η άνοδος δεν είναι σημαντική λόγω της επίδρασης του ισχυρού ανέμου. Όταν οι αδρανειακές δυνάμεις υπερισχύουν των ανωστικών, το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου. Ακολουθούν και εδώ σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.27: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

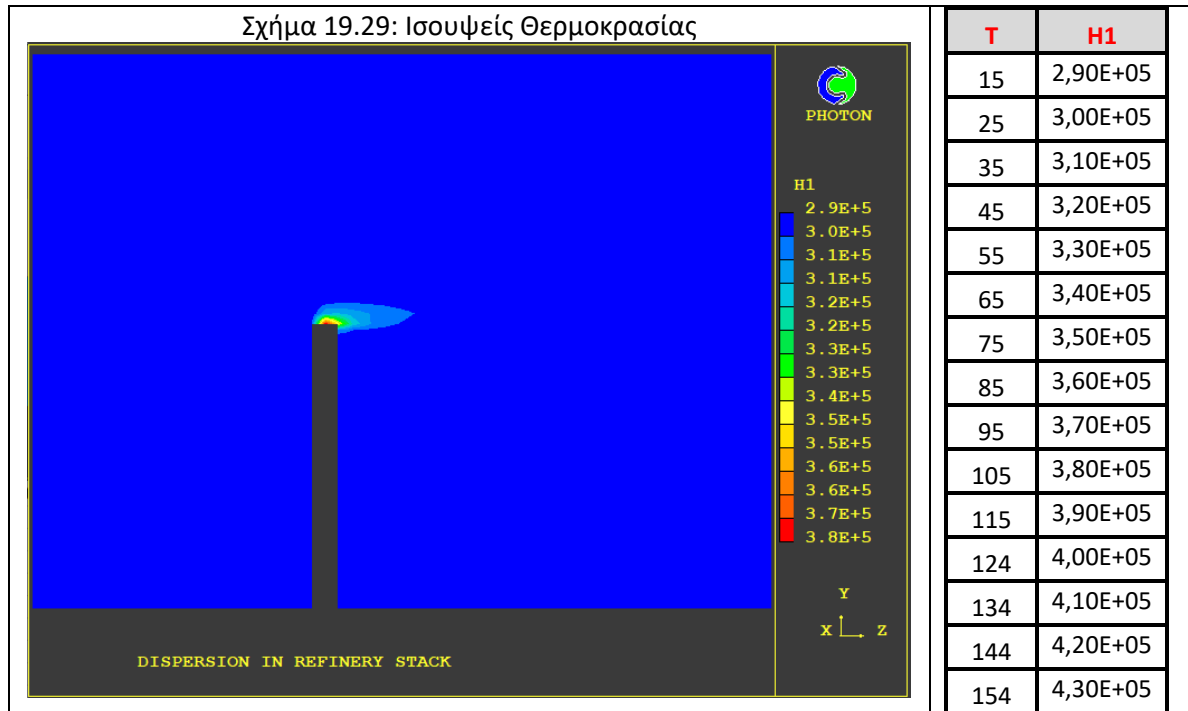


Σχήμα 19.28: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air



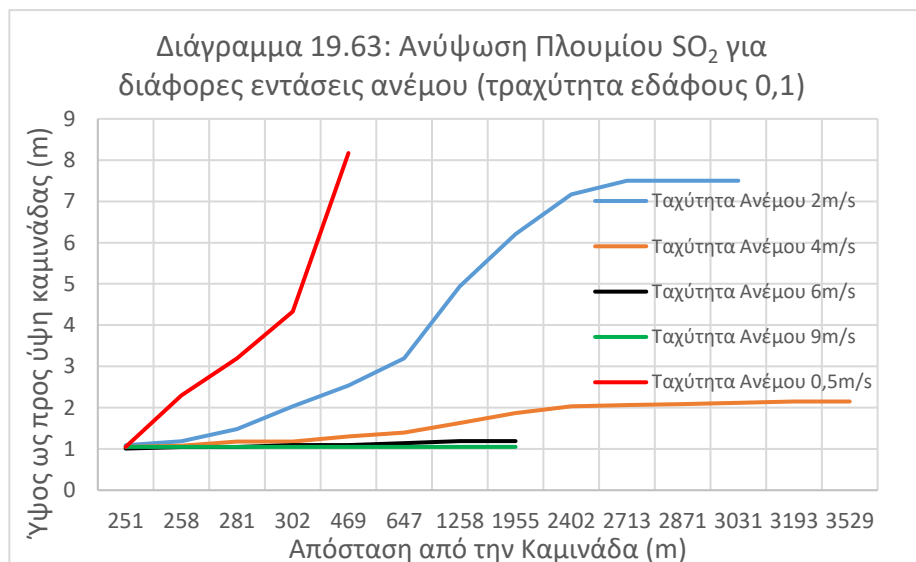
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.27, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει ελάχιστη κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων αλλά κυρίως της έντασης του ανέμου.

Κατόπιν εμφανίζονται έντονες καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα άνυσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Και εδώ σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



### 19.2.6 Ανύψωση Πλουμίου Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

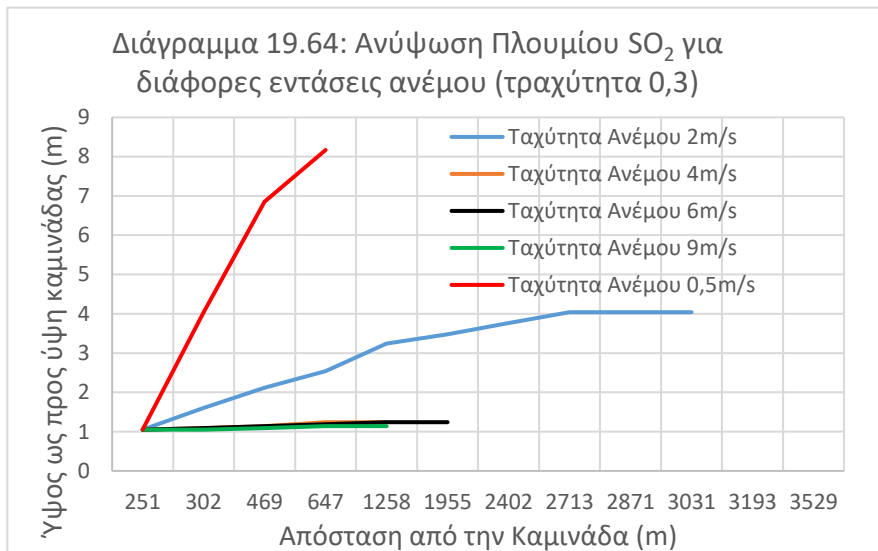
Τα δύο διαγράμματα που ακολουθούν μας δίνουν την συνολική εικόνα της ανύψωσης του πλουμίου διοξειδίου του θείου, στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ, σε απόσταση από την καμινάδα. Το ένα διάγραμμα αφορά τραχύτητα εδάφους 0,1 και το άλλο 0,3.



Από το ανωτέρω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζει αρνητικά την ανύψωση του πλουμίου. Πολύ μεγάλες εντάσεις ανέμου (> 6m/s) δίνουν μεγάλες αδρανειακές δυνάμεις που υπερिशύουν των αντίστοιχων ανωστικών, με αποτέλεσμα να έχουμε σχεδόν μηδενική ανύψωση και το πλούμιο να ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.



Όσο αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου, αυξάνεται και η τιμή του τυρβώδους ιξώδους. Οι αυξημένες τιμές του τυρβώδους ιξώδους οδηγούν αντίστοιχα σε αυξημένες τιμές κινητικής ενέργειας τύρβης, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διασπορά συγκεντρώσεων των ρυπαντών και την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών στο επίπεδο του εδάφους. Επίσης μεγαλύτεροι στρόβιλοι (αυξημένο τυρβώδες ιξώδες), οδηγούν στη μεταφορά των ρυπασμένων αερίων μαζών χωρίς να διευκολύνεται σημαντικά η αραιώσή τους.



Αυξημένες τιμές τραχύτητας εδάφους σε συνδυασμό με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζουν περισσότερο αρνητικά την ανύψωση του πλουμίου. Ουσιαστικά για εντάσεις ανέμου ( $> 4\text{m/s}$ ) οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών, με αποτέλεσμα να έχουμε σχεδόν μηδενική ανύψωση και το πλούμιο να ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Επίσης αύξηση της τραχύτητας σε συνδυασμό με μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου, οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της τιμής του τυρβώδους ιξώδους. Έτσι οδηγούμαστε σε καλύτερες συνθήκες διασποράς αλλά όχι σε μεγάλο πλάτος ανάπτυξης του πλουμίου με αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου στο επίπεδο του εδάφους.

### 19.3 Καμινάδα με Κώνο

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 16, η προς προσομοίωση καμινάδα έχει ύψος 60 m και εσωτερική διάμετρο 2,77 m. Στην έξοδο της καμινάδας υπάρχει κώνος διαστάσεων (ύψος 0,66 m και τελικής διαμέτρου οπής εξόδου καυσαερίων τα 1,85 m). Στα παρακάτω αποτελέσματα θα υπάρχει παράλληλη σύγκριση με αυτά της καμινάδας χωρίς το κώνο. Στο κεφάλαιο αυτό δεν θα υπάρχουν διαγράμματα σύγκρισης των δύο τραχυτήτων εδάφους 0,1 και 0,3, λόγω ότι τα αποτελέσματα αυτής, έχουν αξιολογηθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 19.3 "Καμινάδα χωρίς κώνο.

Και εδώ στα διαγράμματα κατανομής και ανύψωσης πλουμίου της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου, το ύψος εκφράζεται ως προς ύψη καμινάδας.

Επίσης η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εργασίας θα βασιστεί σε αυτά της καμινάδας με κώνο και τραχύτητας εδάφους 0,3 που αντικατοπτρίζουν πιστότερα τις πραγματικές συνθήκες.

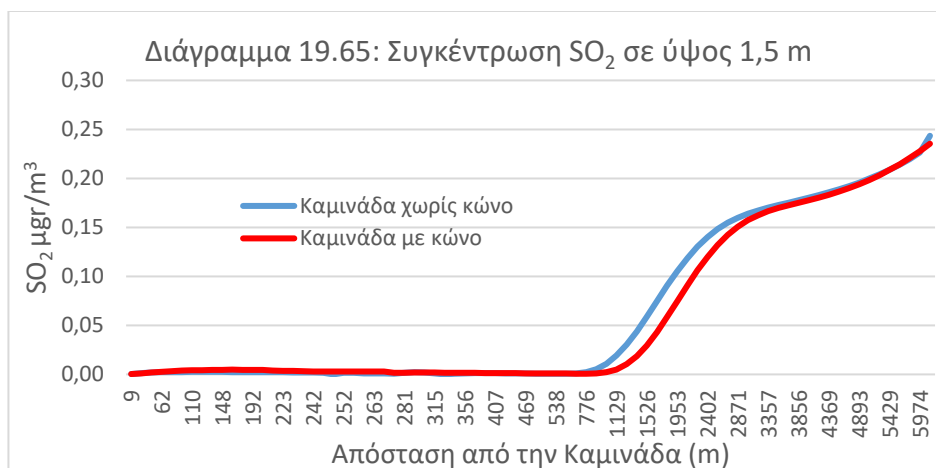




### 19.3.1 Ταχύτητα Ανέμου 0,5 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

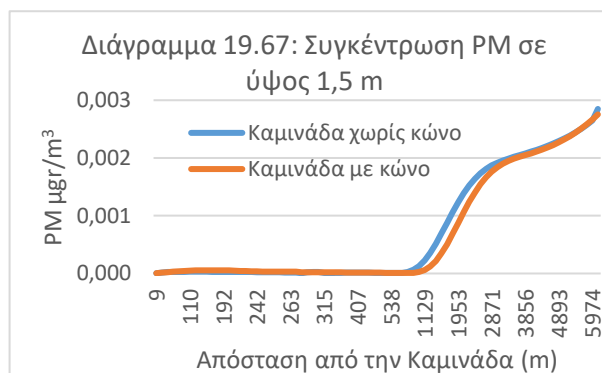
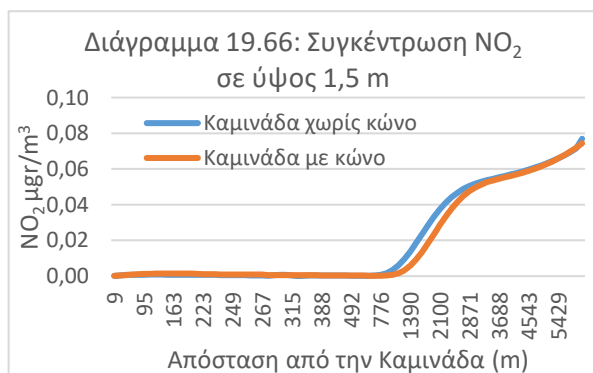
Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ, έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



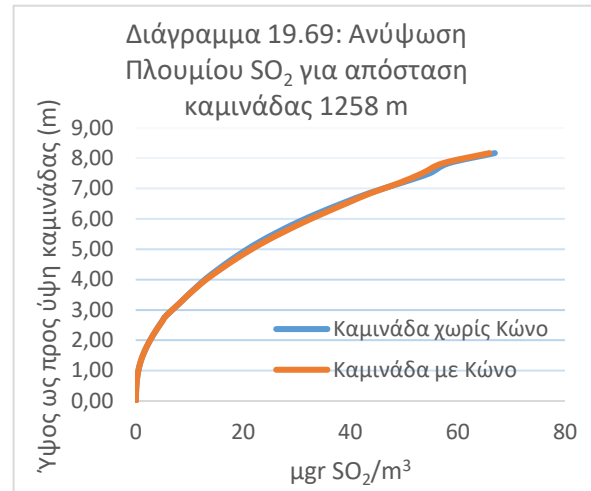
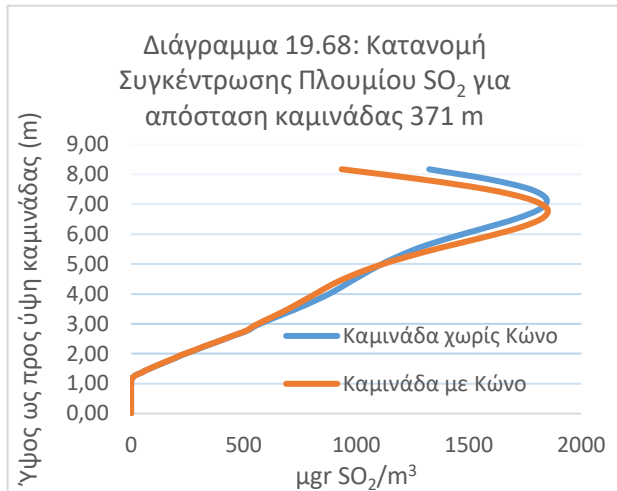
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν ελάχιστες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από την αυξητική πορεία της συγκέντρωσης, και για μεγάλες ακόμα αποστάσεις από το σημείο καμινάδας, ότι το πλούμιο έχει πολύ μεγάλη ανύψωση. Για αυτό το λόγο η παρουσία της μέγιστης συγκέντρωσης στο έδαφος, συμβαίνει σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις από την καμινάδα που είναι εκτός των ορίων που έχουν τεθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

Σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα για την καμινάδα χωρίς κώνο παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την καμινάδα. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.

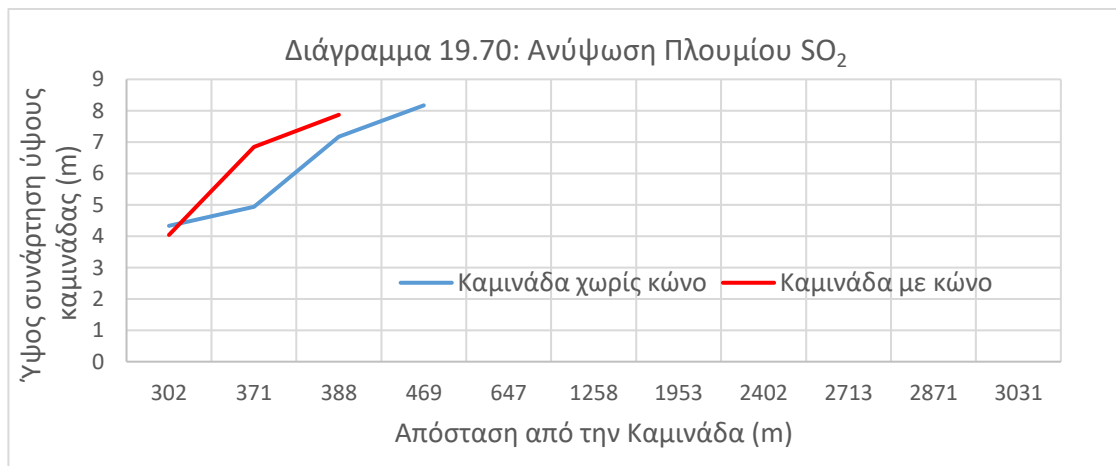


Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Από το διάγραμμα 19.68 που δείχνει την κατανομή σε μήκος πολύ κοντά στο σημείο της καμινάδας, παρατηρούμε ότι η μέγιστη συγκέντρωση εμφανίζεται σε πολύ μεγάλο ύψος του πεδίου, γεγονός που επιβεβαιώνει την πολύ μεγάλη ανύψωση του πλουμίου. Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο είναι παρόμοια με αυτή χωρίς. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.69), η ανύψωση συνεχίζεται, η διασπορά είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα ακόμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.70.

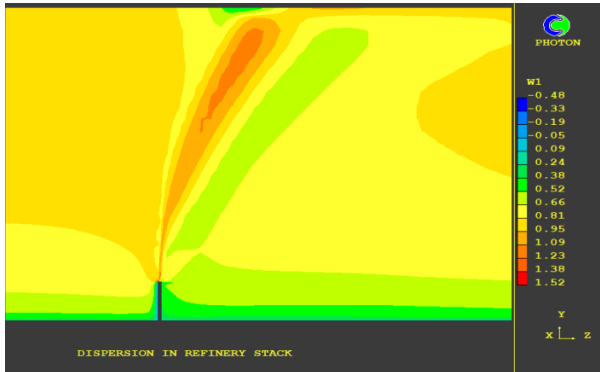


Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα η ανύψωση συνεχίζεται και εκτός της μέγιστης τιμής (9) του ύψους του πεδίου συνάρτηση του ύψους καμινάδας. Σε σχέση με την καμινάδα χωρίς κώνο παρατηρούμε μεγαλύτερη ανύψωση πλουμίου λόγω της αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων.

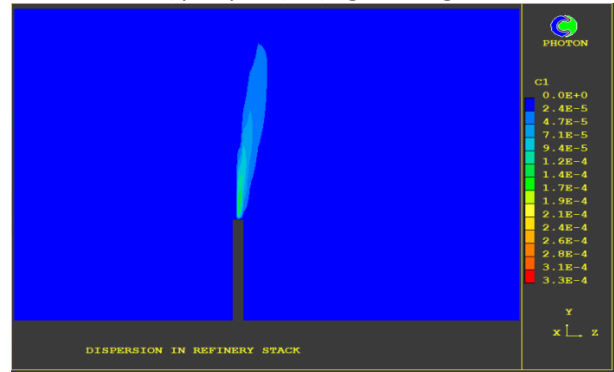
Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).



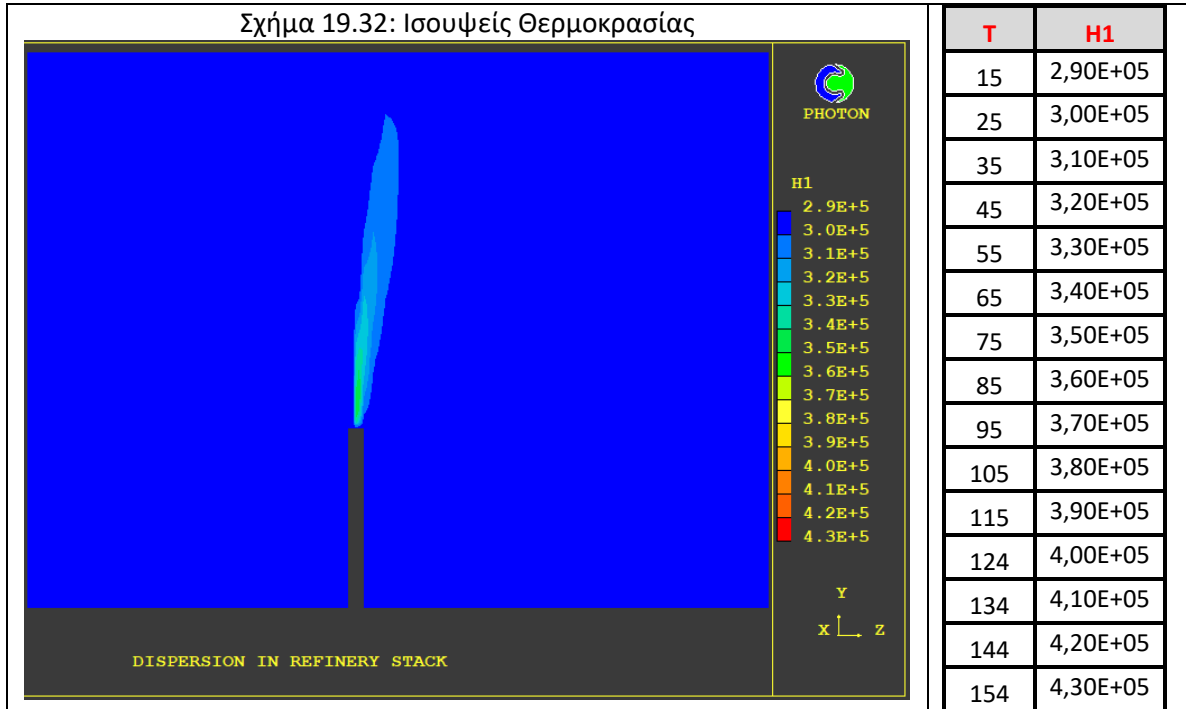
Σχήμα 19.30: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



Σχήμα 19.31: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air

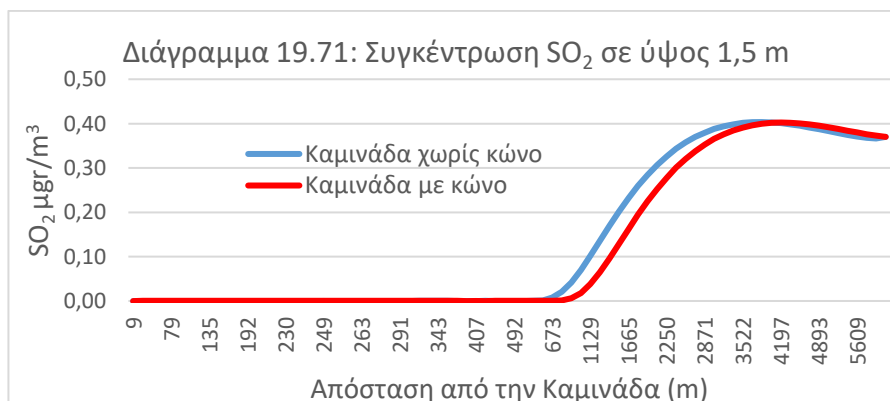


Σχήμα 19.32: Ισοψείς Θερμοκρασίας



Τραχύτητα 0,3

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ, έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.

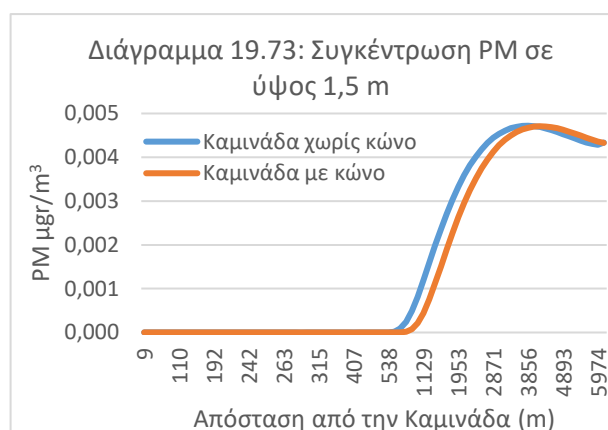
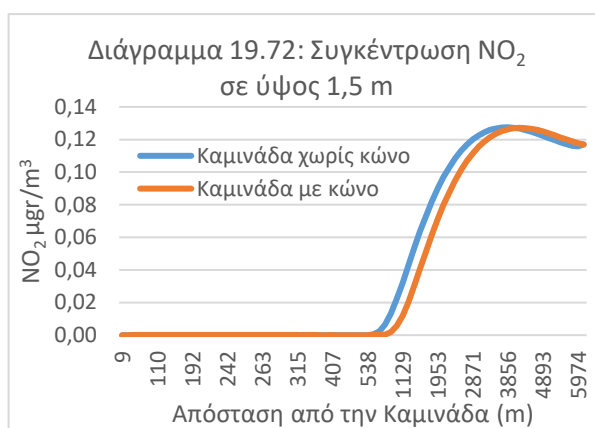




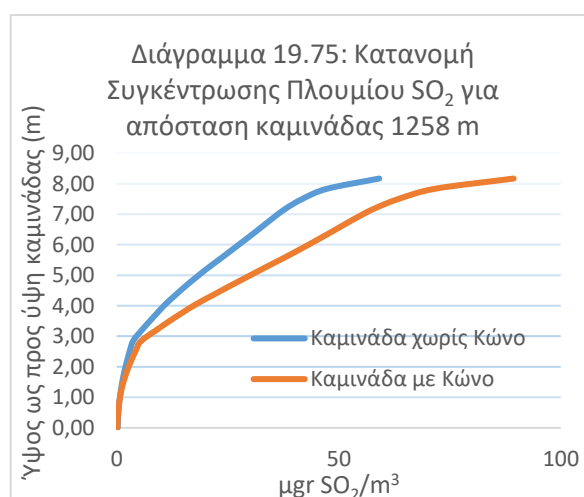
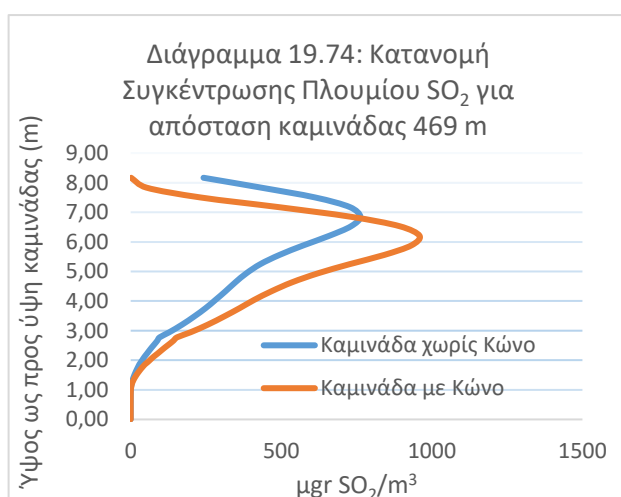
Προκύπτουν ελάχιστες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, σχεδόν ίδιες από τις αντίστοιχες με καμινάδα χωρίς κώνο. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι το πλούμιο έχει μεγαλύτερη ανύψωση σε σχέση αυτής στην καμινάδα χωρίς κώνο. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 4.543 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής, έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με  $0,40 \mu\text{gr}/\text{m}^3$  που είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις της καμινάδας.

Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα χωρίς κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



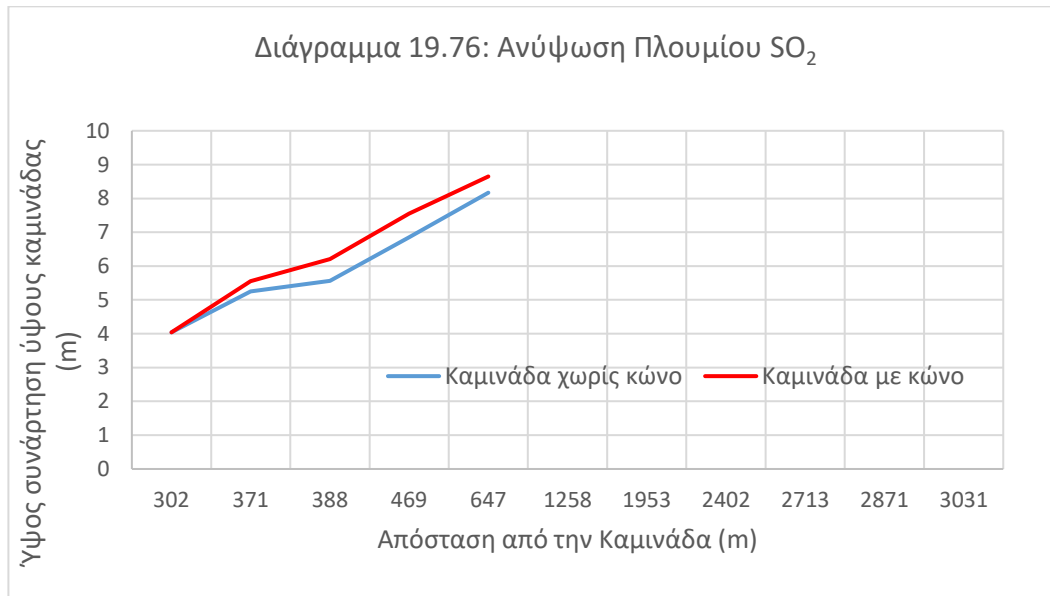
Από το διάγραμμα 19.74 που δείχνει την κατανομή σε μήκος κοντά στο σημείο της καμινάδας, παρατηρούμε ότι η μέγιστη συγκέντρωση εμφανίζεται σε πολύ μεγάλο ύψος του πεδίου, γεγονός που επιβεβαιώνει την πολύ μεγάλη ανύψωση του πλουμίου.

Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει μεγαλύτερη ανύψωση. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.75), η



ανύψωση συνεχίζεται, η διασπορά είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα ακόμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.76.

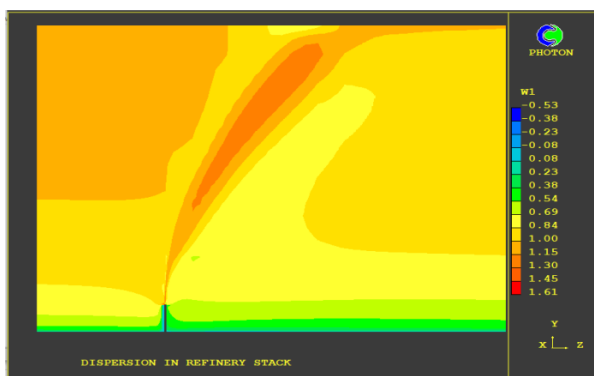


Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής.

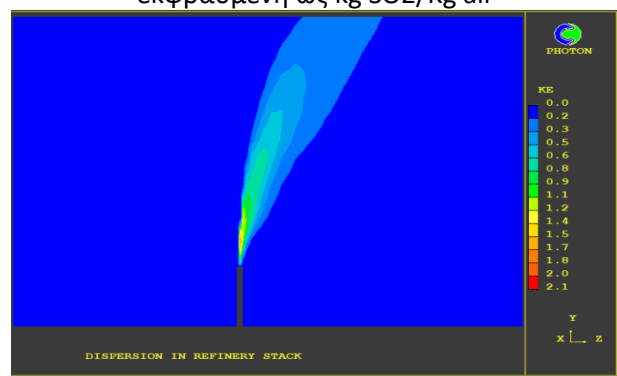
Στο συγκεκριμένο διάγραμμα η ανύψωση συνεχίζεται και εκτός της μέγιστης τιμής (9) του ύψους του πεδίου συνάρτηση του ύψους καμινάδας. Σε σχέση με την καμινάδα χωρίς κώνο παρατηρούμε μεγαλύτερη ανύψωση πλουμίου λόγω της αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων.

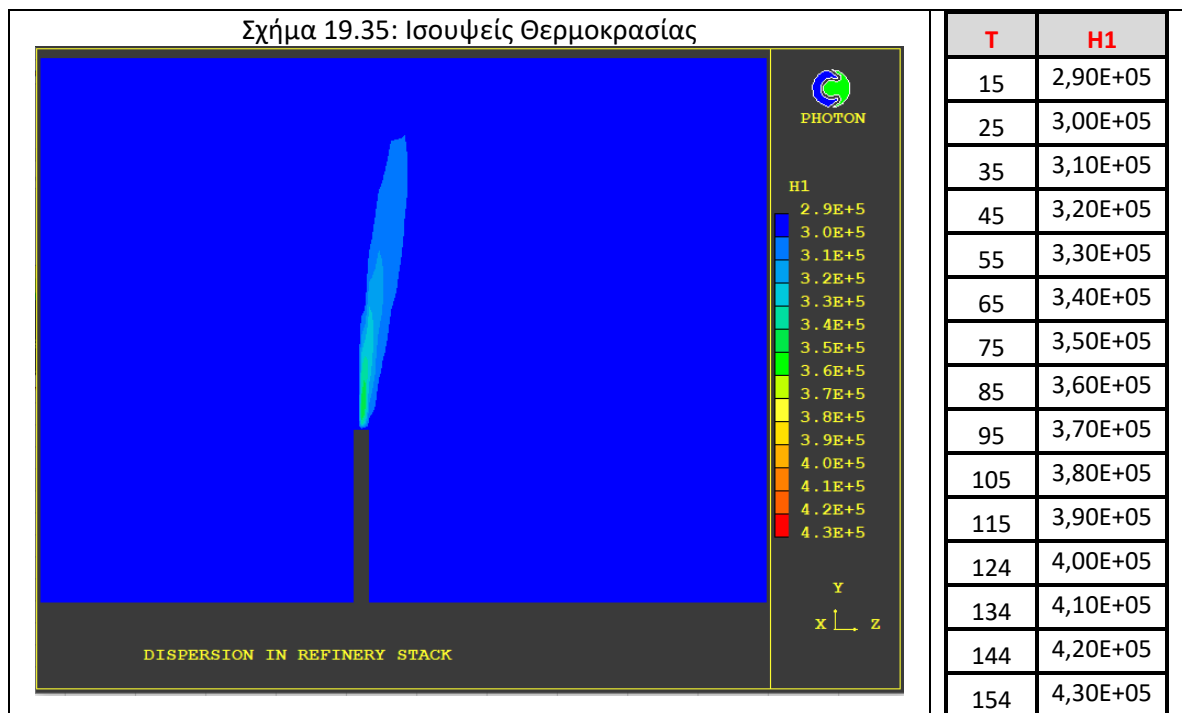
Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.33: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



Σχήμα 19.34: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air

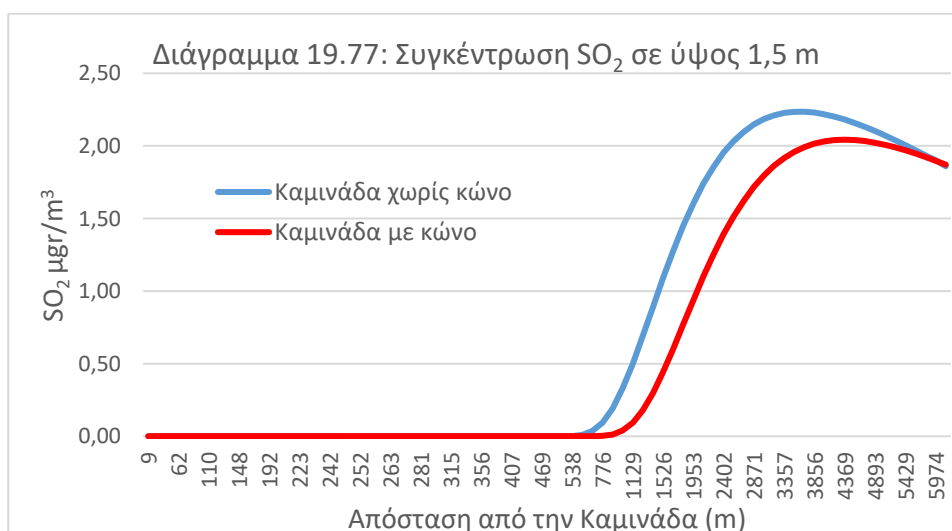




### 19.3.2 Ταχύτητα Ανέμου 2 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.

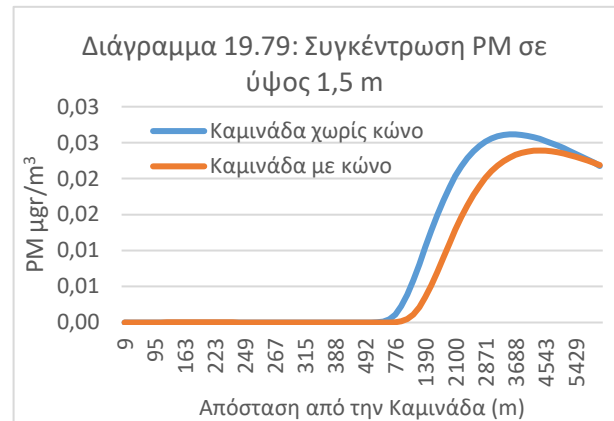
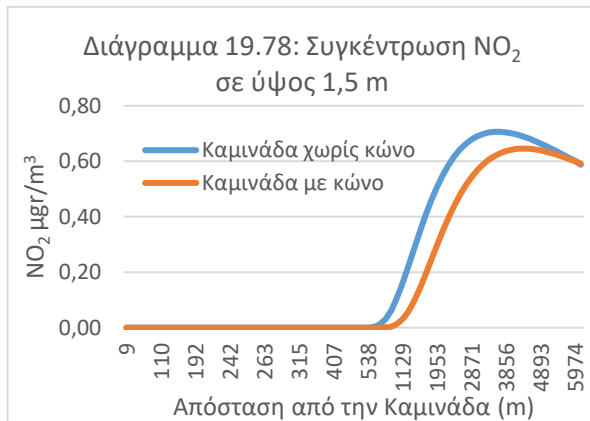


Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν πολύ μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας, το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 4.542 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 2,04 μgr/m<sup>3</sup>.

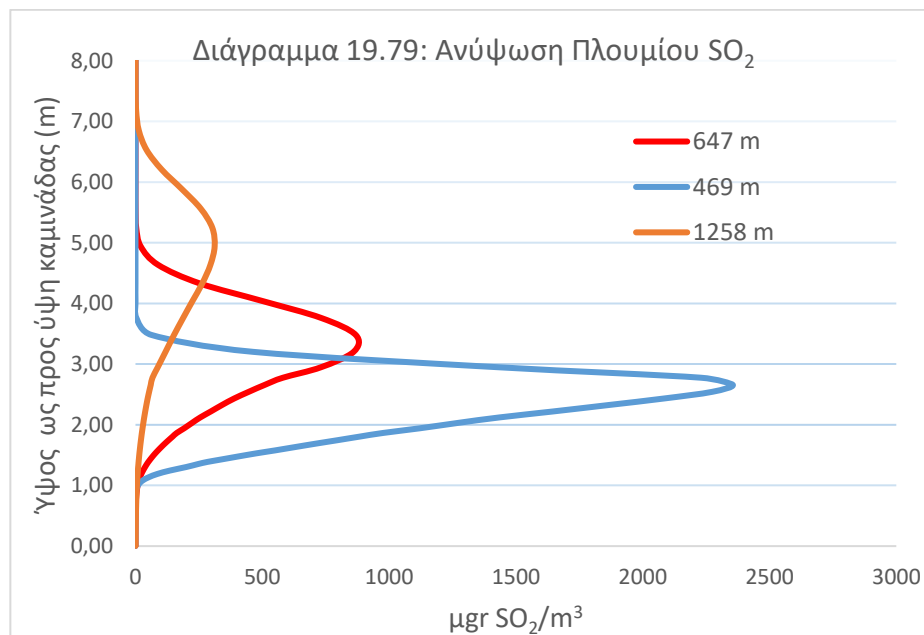


Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.

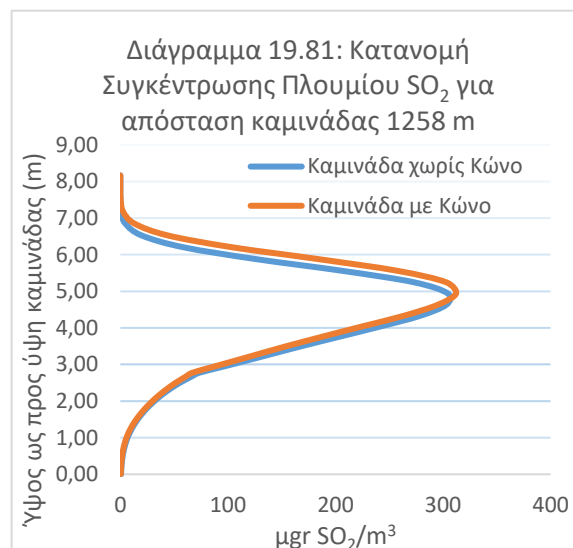
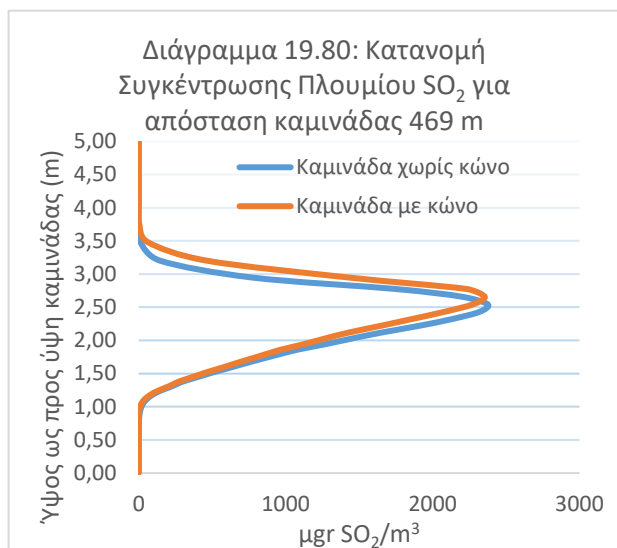


Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



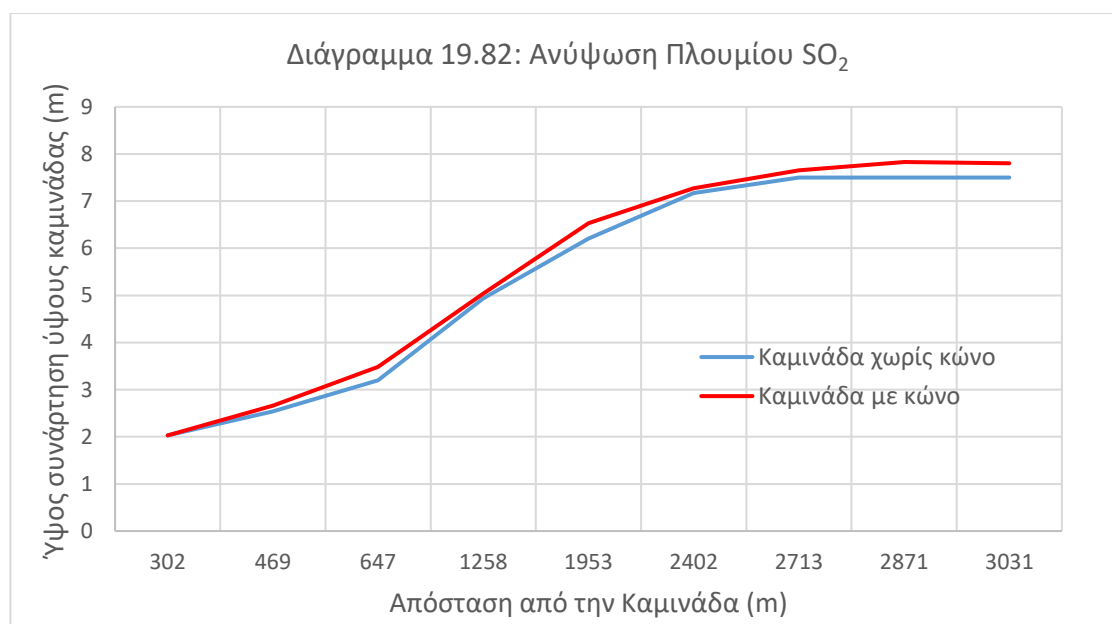
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

Επίσης δύο επιμέρους κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Και από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για συγκεκριμένες αποστάσεις από την καμινάδα, το πλούμιο για καμινάδα με κώνο έχει ελάχιστη μεγαλύτερη ανύψωση σε σχέση με το αντίστοιχο για καμινάδα χωρίς κώνο.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.82.



Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σχεδόν κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Σε σχέση με την καμινάδα χωρίς κώνο παρατηρούμε ελάχιστα μεγαλύτερη ανύψωση πλουμίου λόγω της αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων.

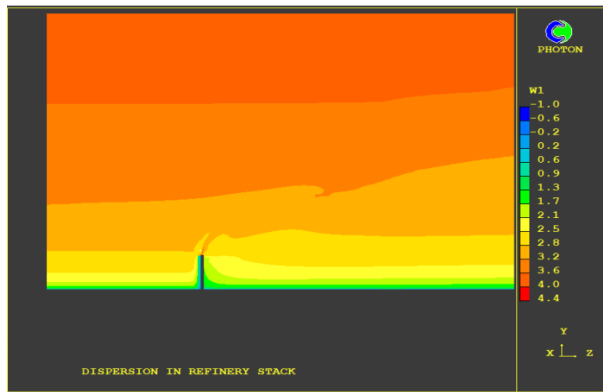
Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης



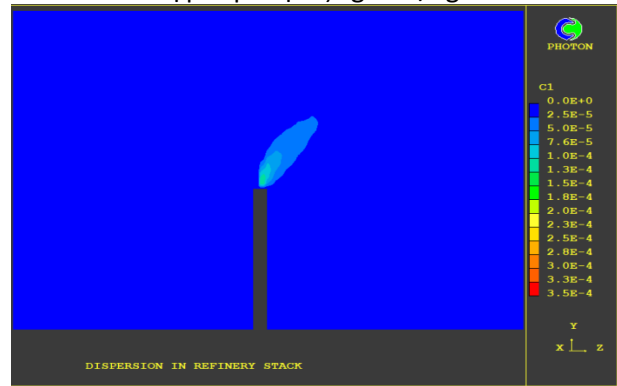


του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.36: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

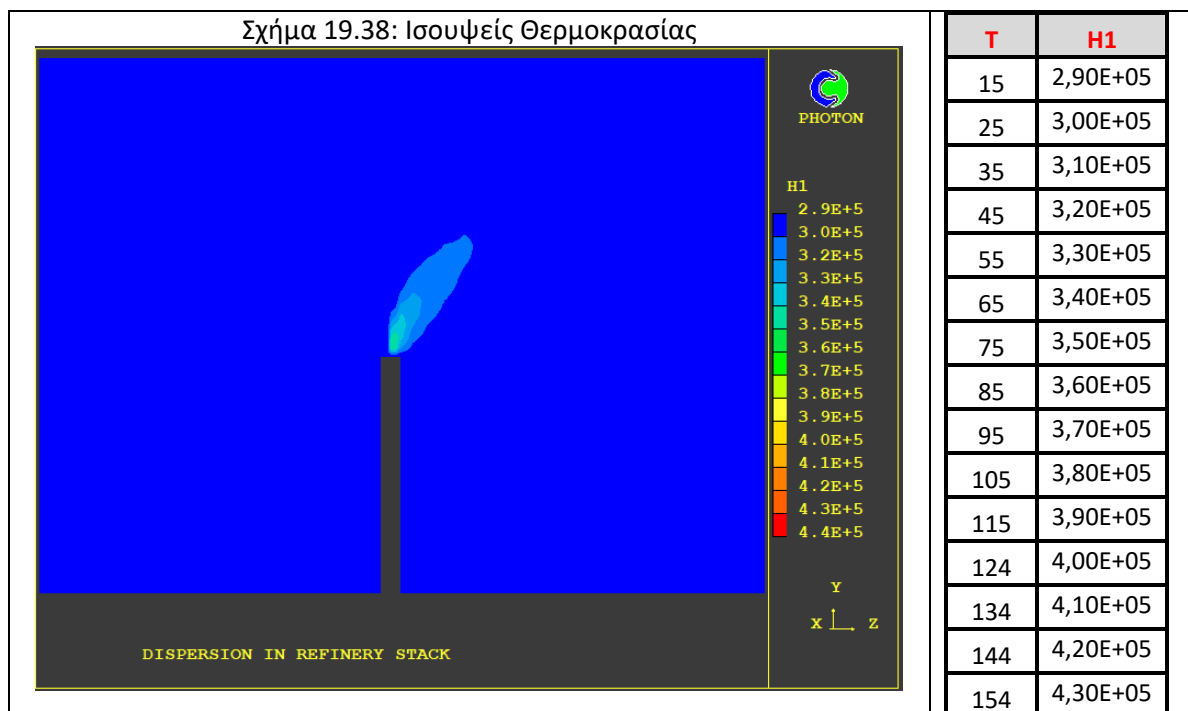


Σχήμα 19.37: Ισουψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/kg air



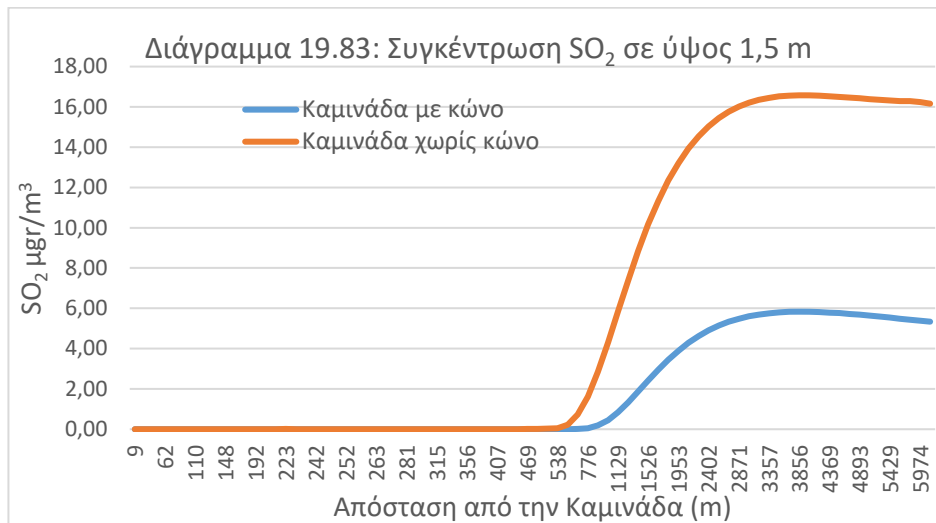
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.36, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα. Επιπλέον σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.

Σχήμα 19.38: Ισουψείς Θερμοκρασίας



### Τραχύτητα 0,3

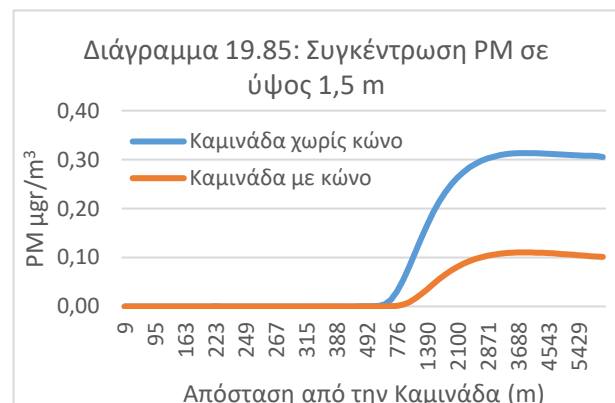
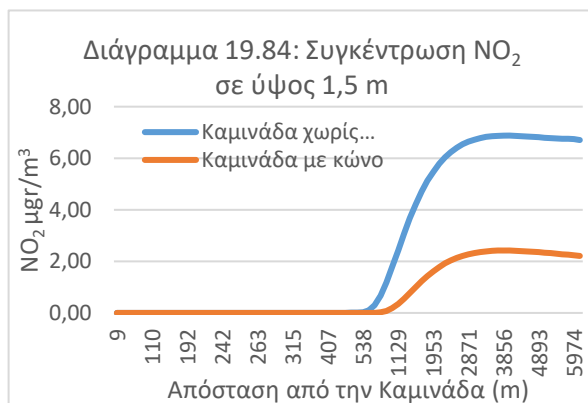
Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X, έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



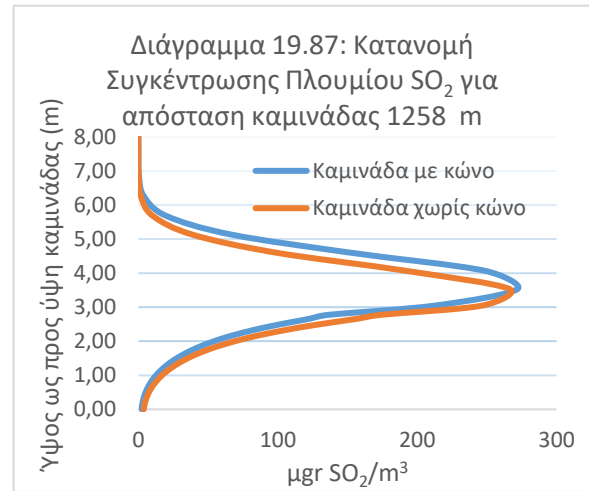
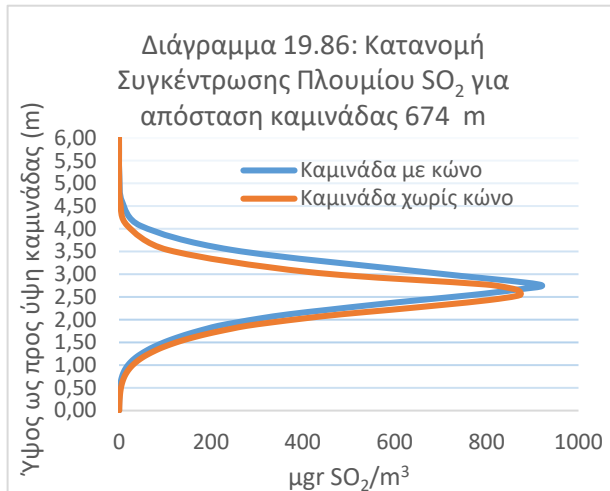
Προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου, σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες με καμινάδα χωρίς κώνο. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι το πλούμιο έχει μεγαλύτερη ανύψωση σε σχέση αυτής στην καμινάδα χωρίς κώνο. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 4.543 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 5,76 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη για καμινάδα χωρίς κώνο είναι 16,50 μgr/m<sup>3</sup>.

Επίσης παρατηρούμε μία μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



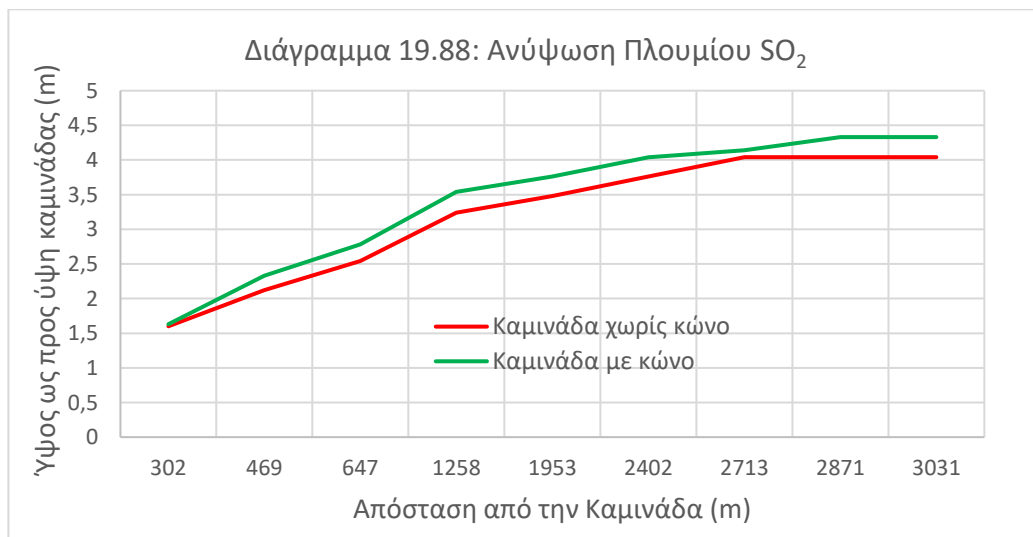
Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Από το διάγραμμα 19.86 που δείχνει την κατανομή σε μήκος κοντά στο σημείο της καμινάδας, παρατηρούμε ότι η μέγιστη συγκέντρωση εμφανίζεται σε πολύ μεγάλο ύψος του πεδίου, γεγονός που επιβεβαιώνει την πολύ μεγάλη ανύψωση του πλουμίου.

Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει ελαφριά μεγαλύτερη ανύψωση. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.87), η ανύψωση συνεχίζεται, η διασπορά είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα ακόμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.88.



Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει κατακόρυφα σε μεγάλα ύψη του πεδίου ροής.

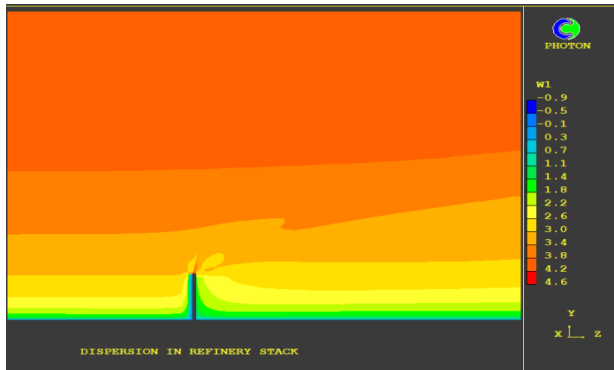
Σε σχέση με την καμινάδα χωρίς κώνο παρατηρούμε ελαφριά ανύψωση πλουμίου λόγω της αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης

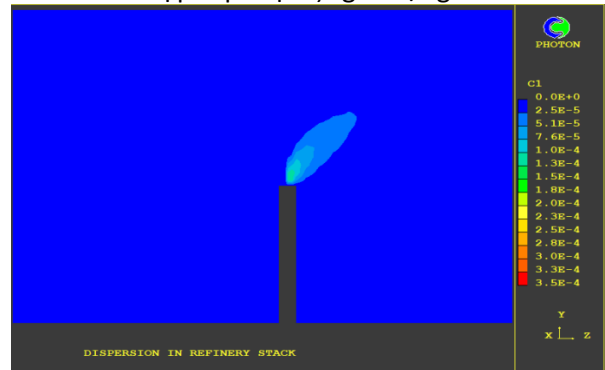


του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.39: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



Σχήμα 19.40: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/kg air



Σχήμα 19.41: Ισοψείς Θερμοκρασίας

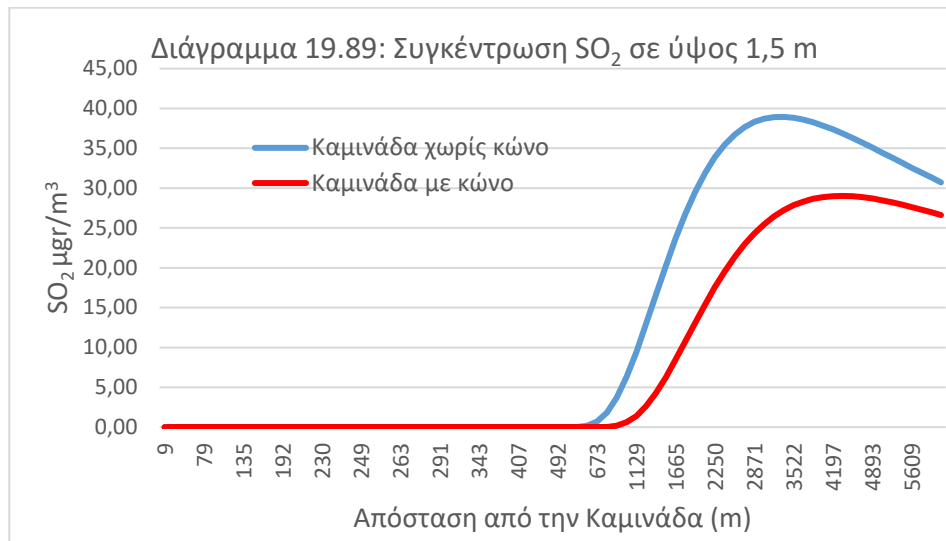


T	H1
15	2,90E+05
25	3,00E+05
35	3,10E+05
45	3,20E+05
55	3,30E+05
65	3,40E+05
75	3,50E+05
85	3,60E+05
95	3,70E+05
105	3,80E+05
115	3,90E+05
124	4,00E+05
134	4,10E+05
144	4,20E+05
154	4,30E+05

### 19.3.3 Ταχύτητα Ανέμου 4 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας, το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 4.542 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 28,97 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη για καμινάδα χωρίς κώνο είναι 36,28 μgr/m<sup>3</sup>.

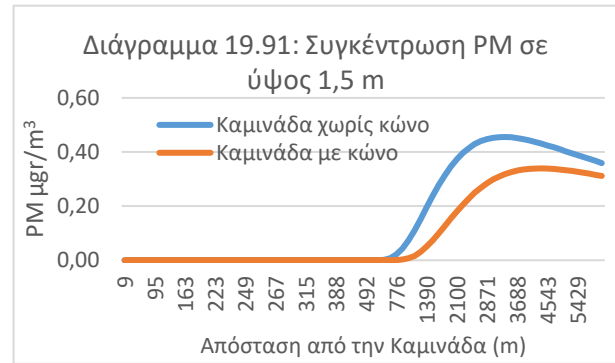
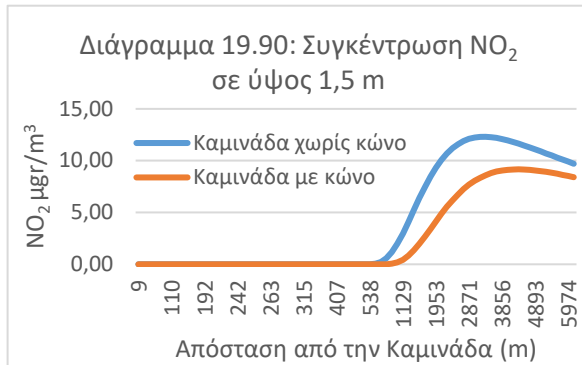
Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Για το συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

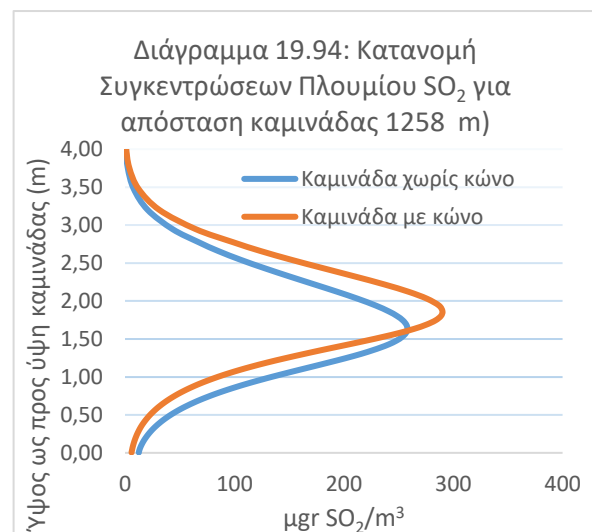
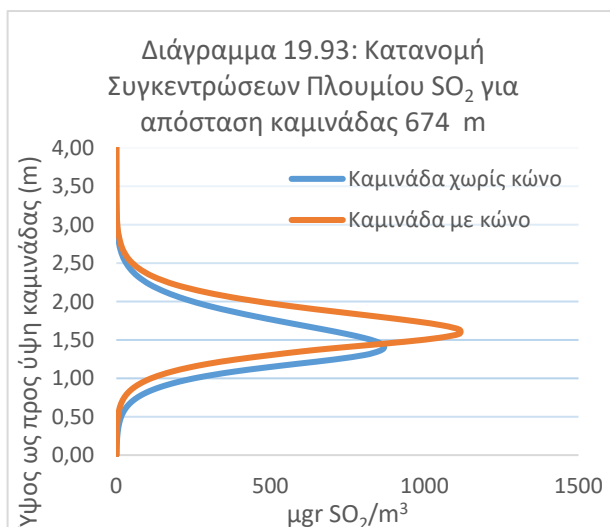
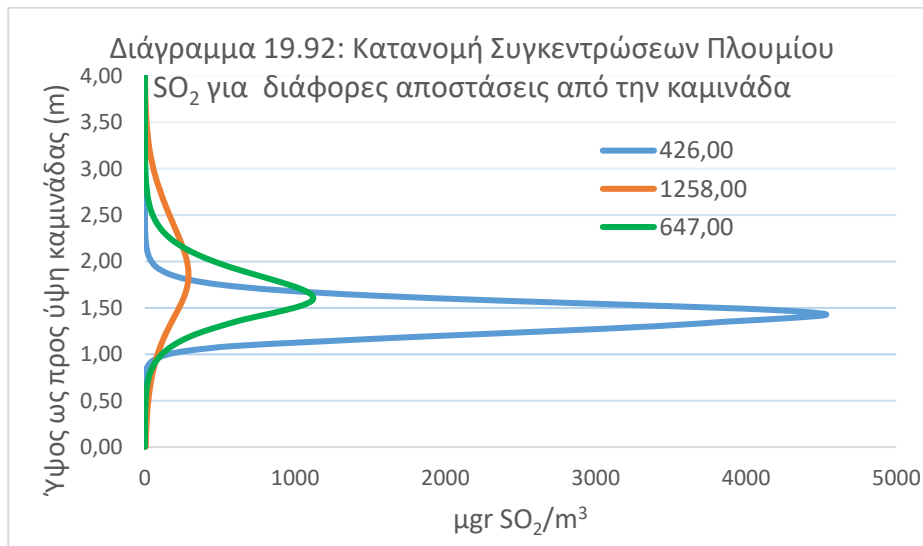
Πίνακας 19.12: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

Απόσταση από την καμινάδα: 4.543 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση (μgr/m <sup>3</sup> )
0,5	0,19
2	2,04
4	36,28

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

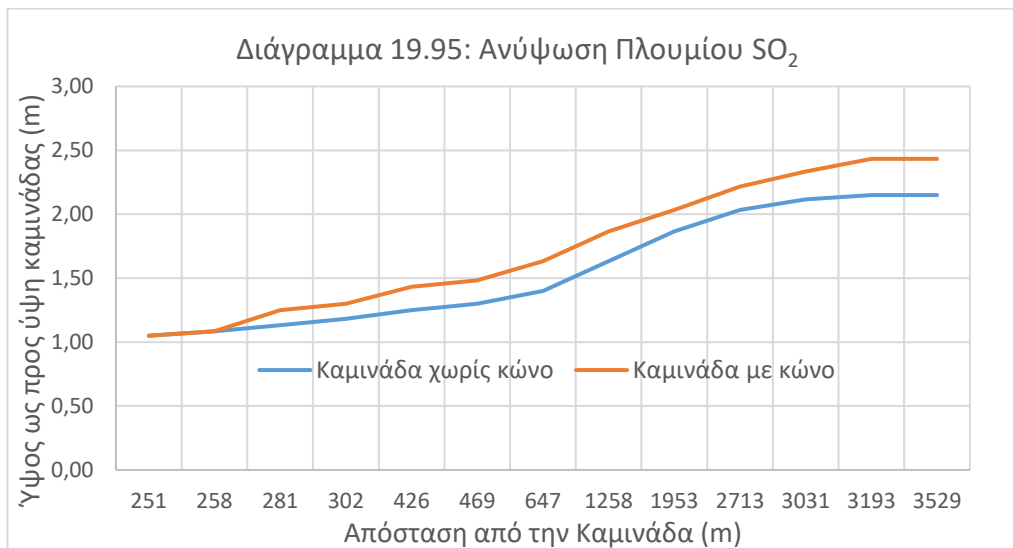


Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.



Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει μεγαλύτερη ανύψωση για τα ίδια μήκη του πεδίου ροής. Μεγαλύτερες μέγιστες συγκεντρώσεις για τα ίδια μήκη ροής. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.94), η ανύψωση συνεχίζεται, η διάχυση είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα ακόμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

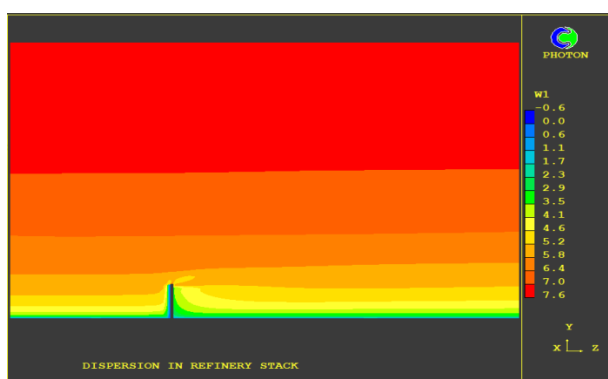
Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.95. Και εδώ το ύψος του πεδίου ροής είναι εκφρασμένο ως προς ύψη της καμινάδας.



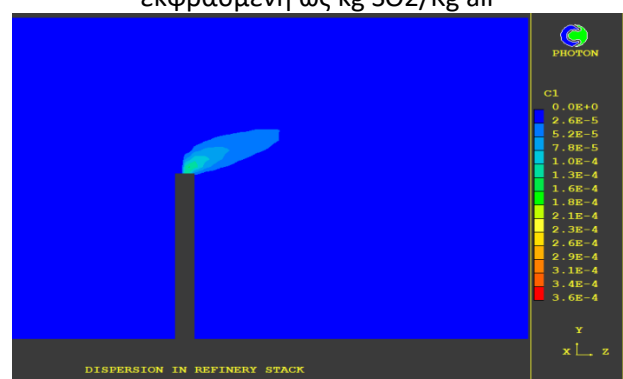
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Εδώ αρχίζει και φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ανύψωση του πλουμίου δεν είναι τόσο έντονη όσο στις μικρότερες ταχύτητες του ανέμου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.42: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



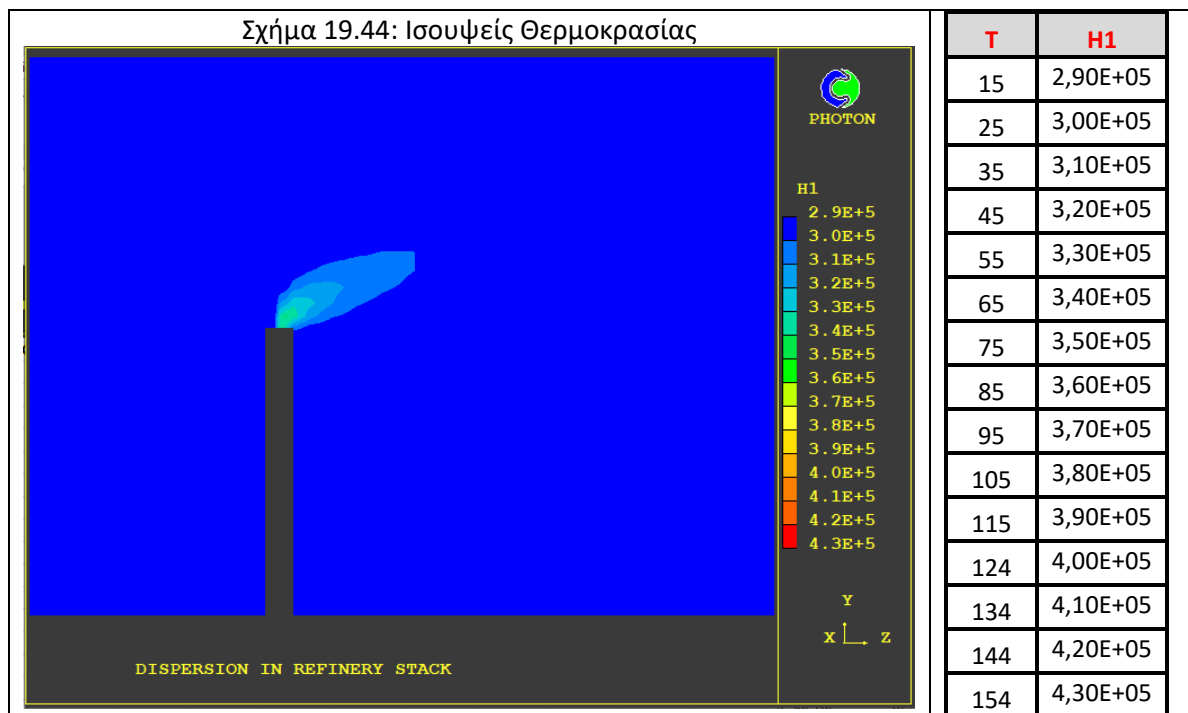
Σχήμα 19.43: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air





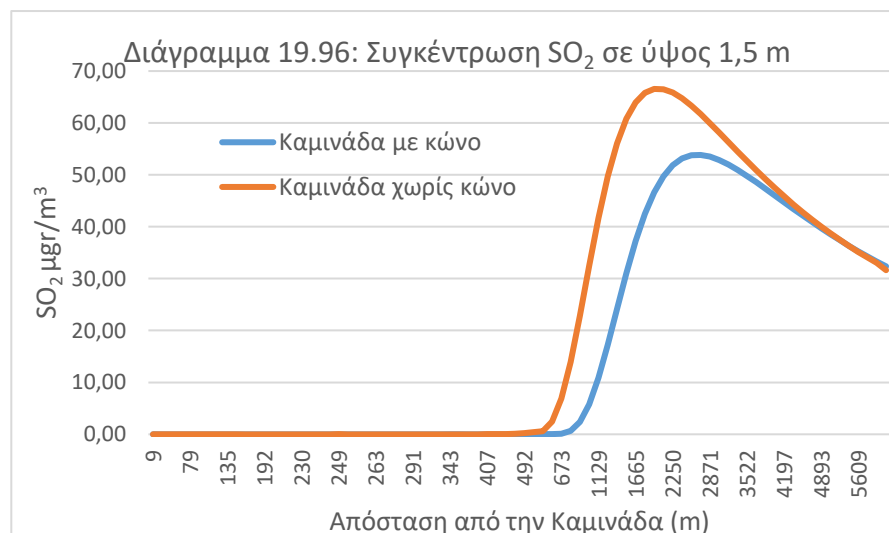
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.42, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωσικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωσικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



### Τραχύτητα 0,3

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.







Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε καμινάδα με κώνο, το πλούμιο έχει μεγαλύτερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, μικρότερες συγκεντρώσεις. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 2.713 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με  $53,83 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ , ενώ η αντίστοιχη για καμινάδα χωρίς κώνο είναι  $61,71 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ .

Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

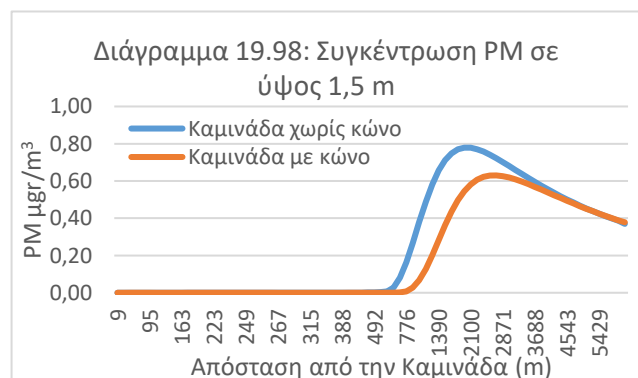
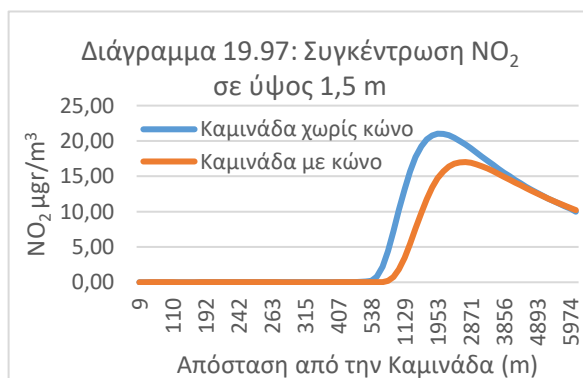
Επιπρόσθετα για την ίδια τραχύτητα, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα, λόγω της μικρότερης ανύψωσης του πλουμίου σε μεγαλύτερες ταχύτητες του ανέμου. Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Για το συγκεκριμένο μήκος του πεδίου ροής, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

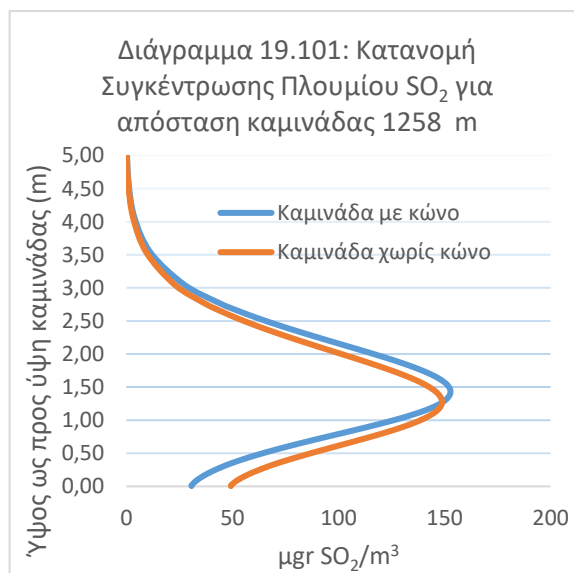
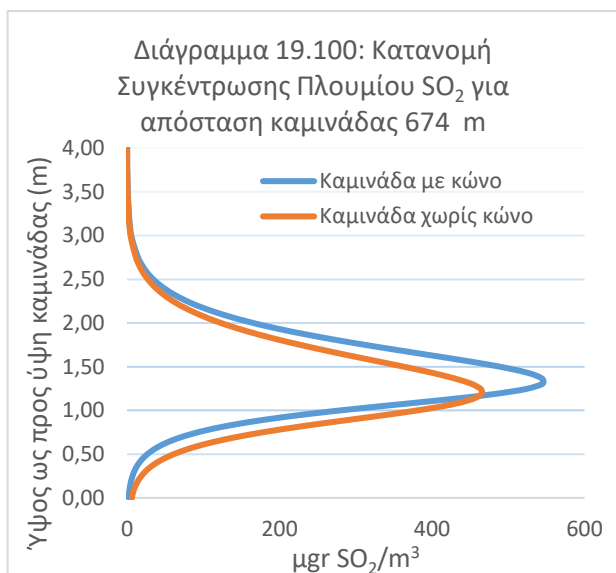
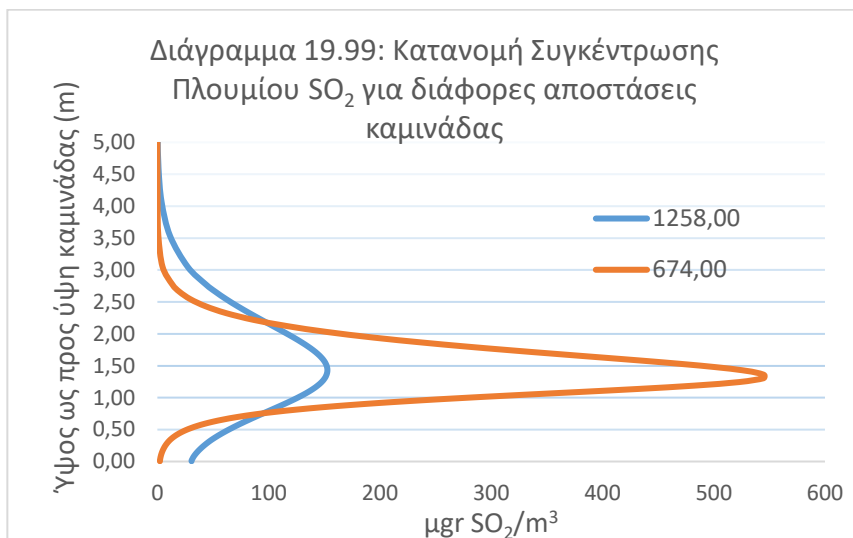
Πίνακας 19.13: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

Απόσταση από την καμινάδα: 2.713 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,34
2	5,34
4	53,83

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



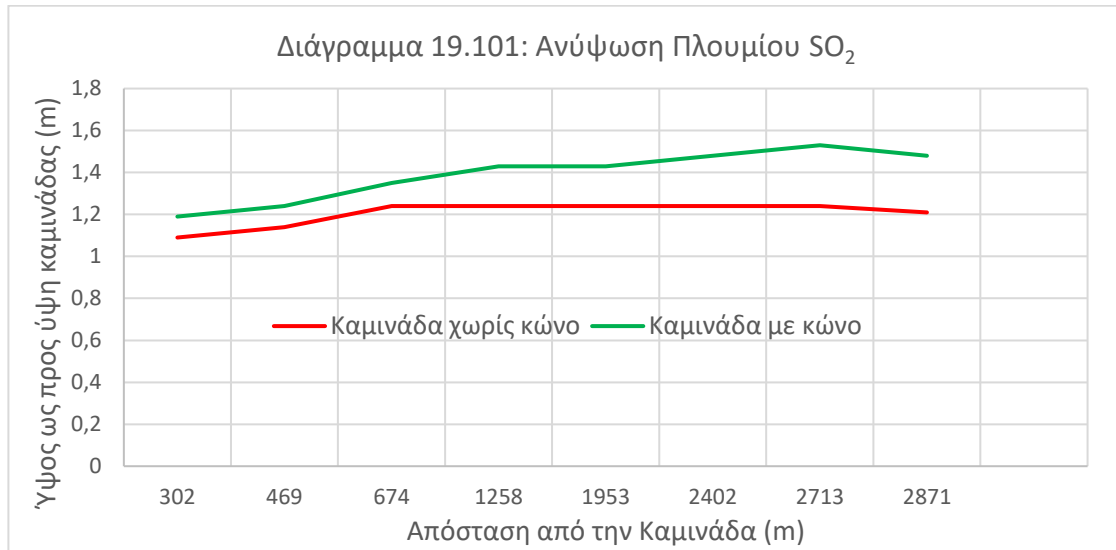
Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει μεγαλύτερη ανύψωση για ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα. Μεγαλύτερες μέγιστες συγκεντρώσεις για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.101), η ανύψωση συνεχίζεται με όχι ισχυρή τάση, η διασπορά είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα ακόμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

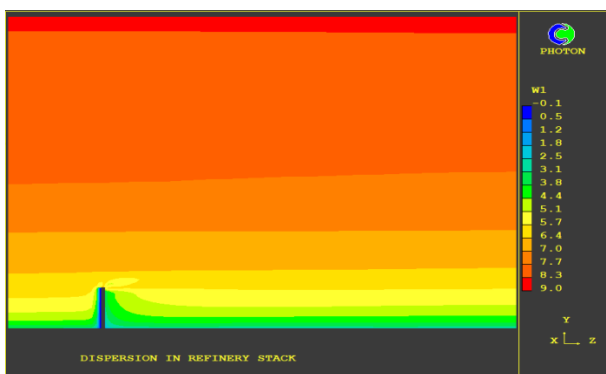
Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.101.



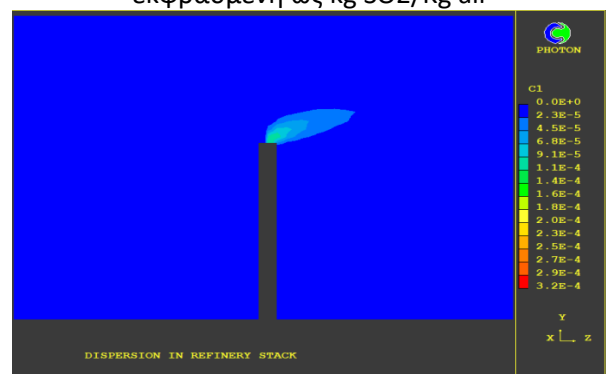
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Εδώ αρχίζει και φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ανύψωση του πλουμίου δεν είναι τόσο έντονη όσο στις μικρότερες ταχύτητες του ανέμου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.45: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

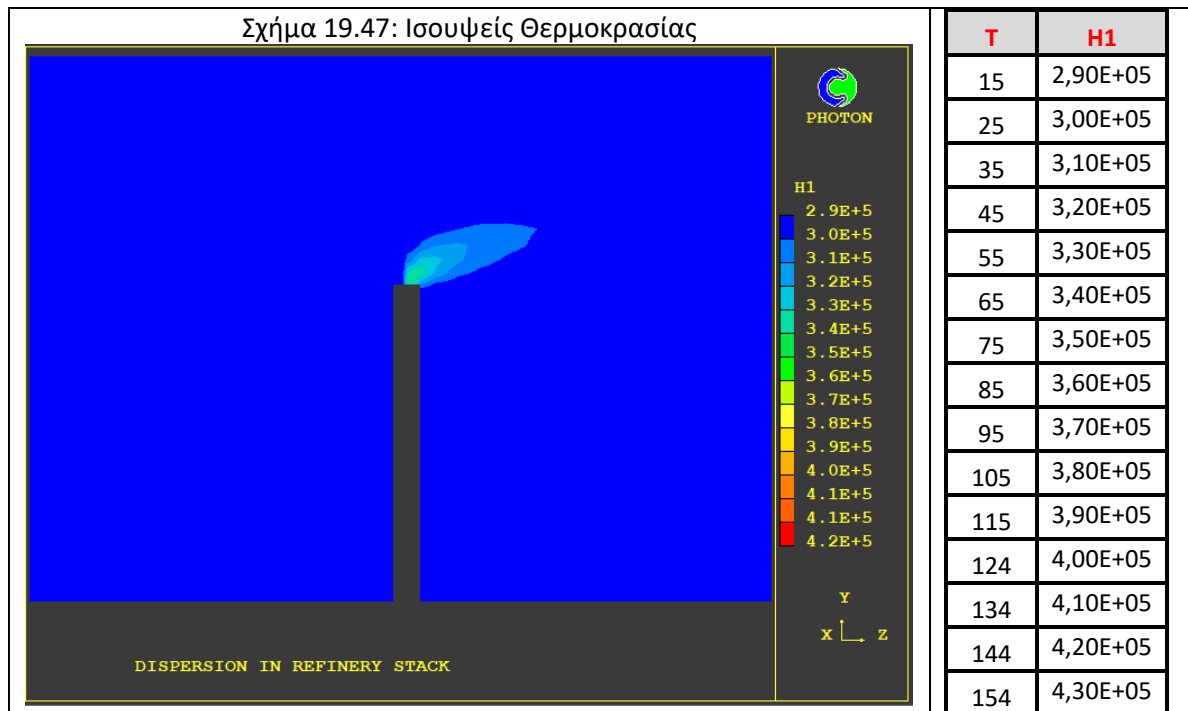


Σχήμα 19.46: Ισουψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.45, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

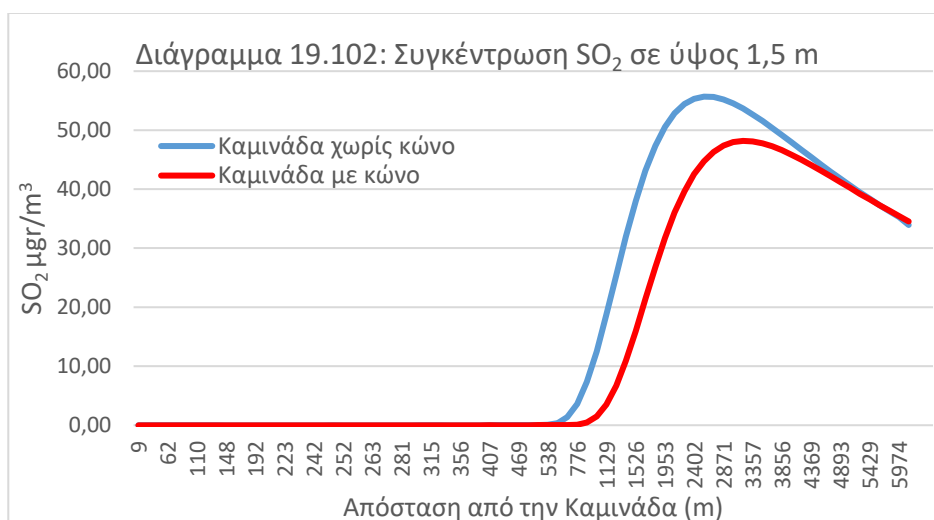
Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



#### 19.3.4 Ταχύτητα Ανέμου 6 m/s

##### Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας, το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι σχεδόν ταυτόσημες. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 4.543 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 43,13 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη για καμινάδα χωρίς κώνο είναι 44,18 μgr/m<sup>3</sup>.



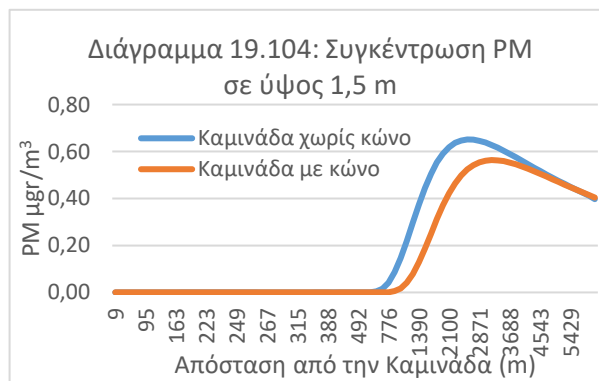
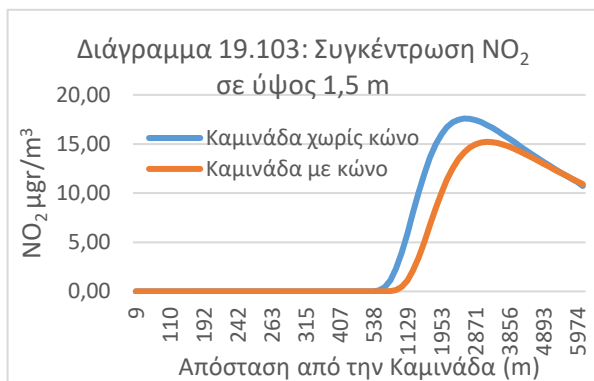
Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Για το συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

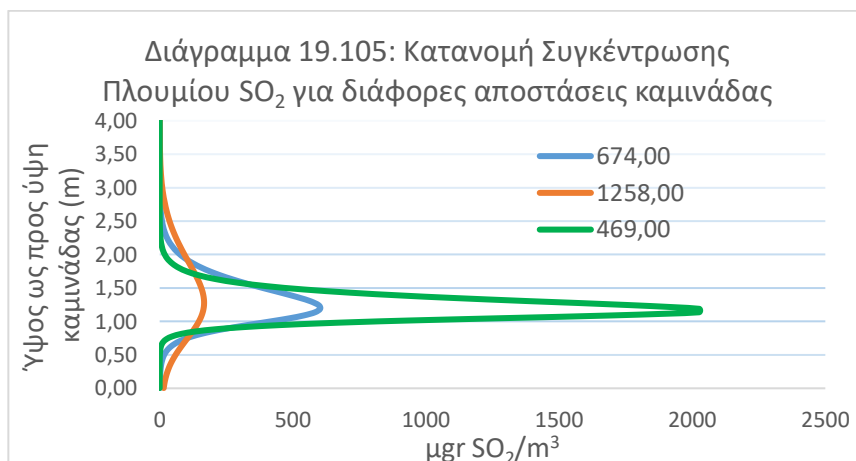
Πίνακας 19.14: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

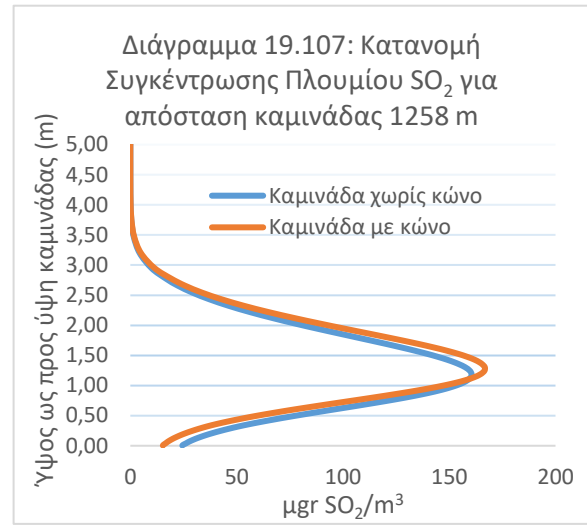
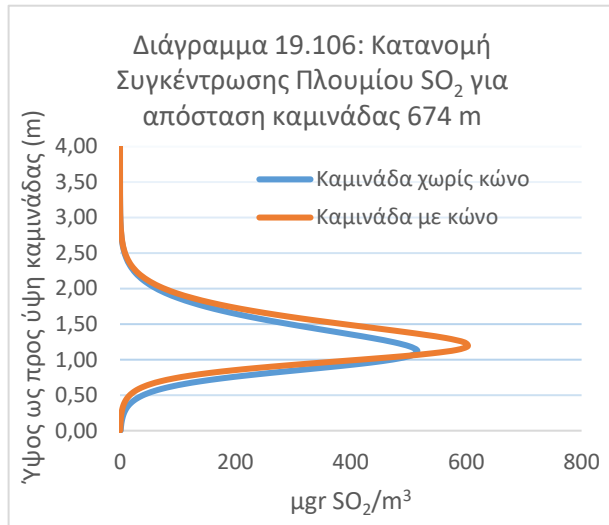
Απόσταση από την καμινάδα: 4.543 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,19
2	2,04
4	36,28
6	43,13

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

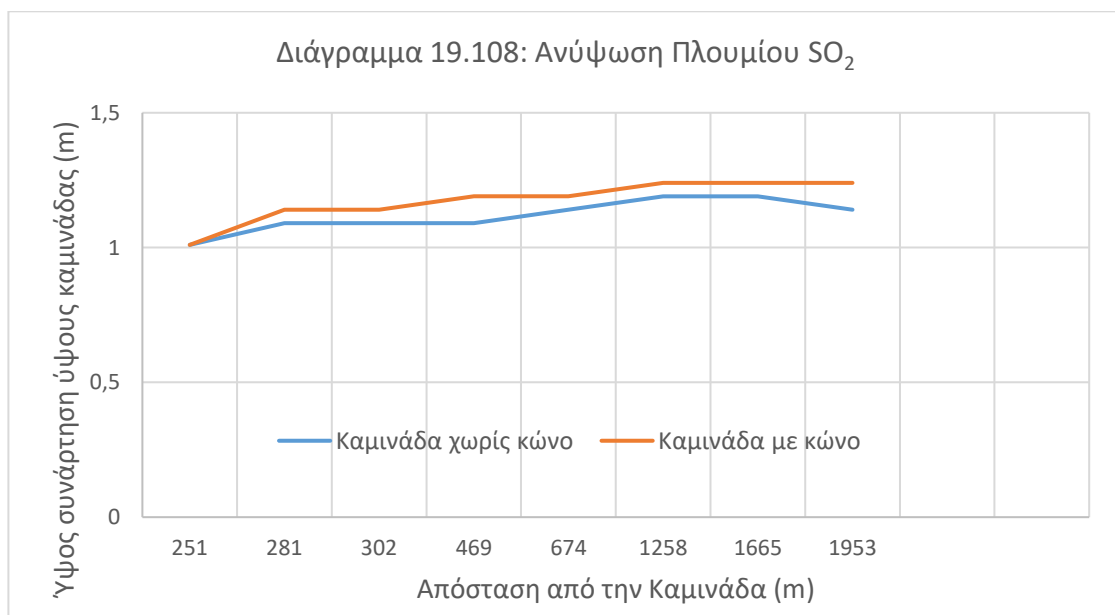




Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει μεγαλύτερη ανύψωση για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα. Μεγαλύτερες μέγιστες συγκεντρώσεις για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.107), η ανύψωση συνεχίζεται με πολύ ελαφριά τάση, η διάχυση είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα ακόμα μικρότερα επίπεδα συγκεντρώσεων.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.108.



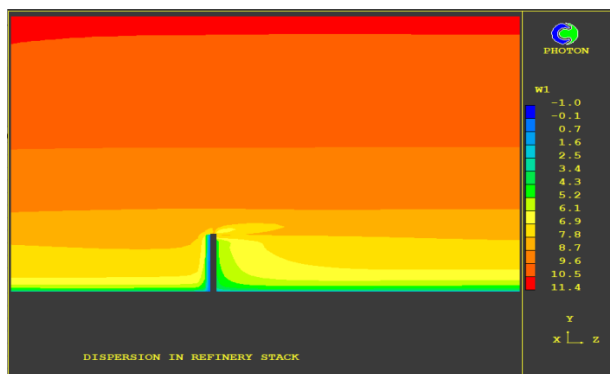
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Εδώ αρχίζει και φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ανύψωση του πλουμίου δεν είναι τόσο έντονη όσο



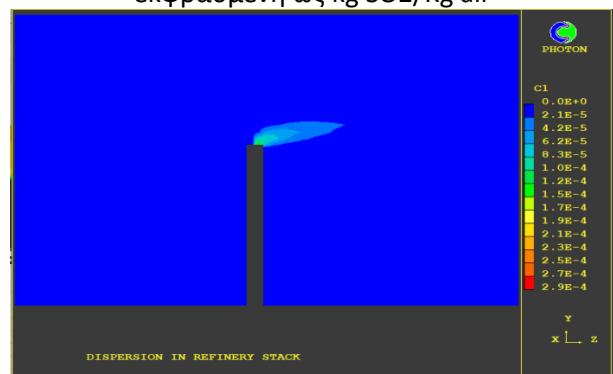
στις μικρότερες ταχύτητες του ανέμου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερیشχύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.48: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



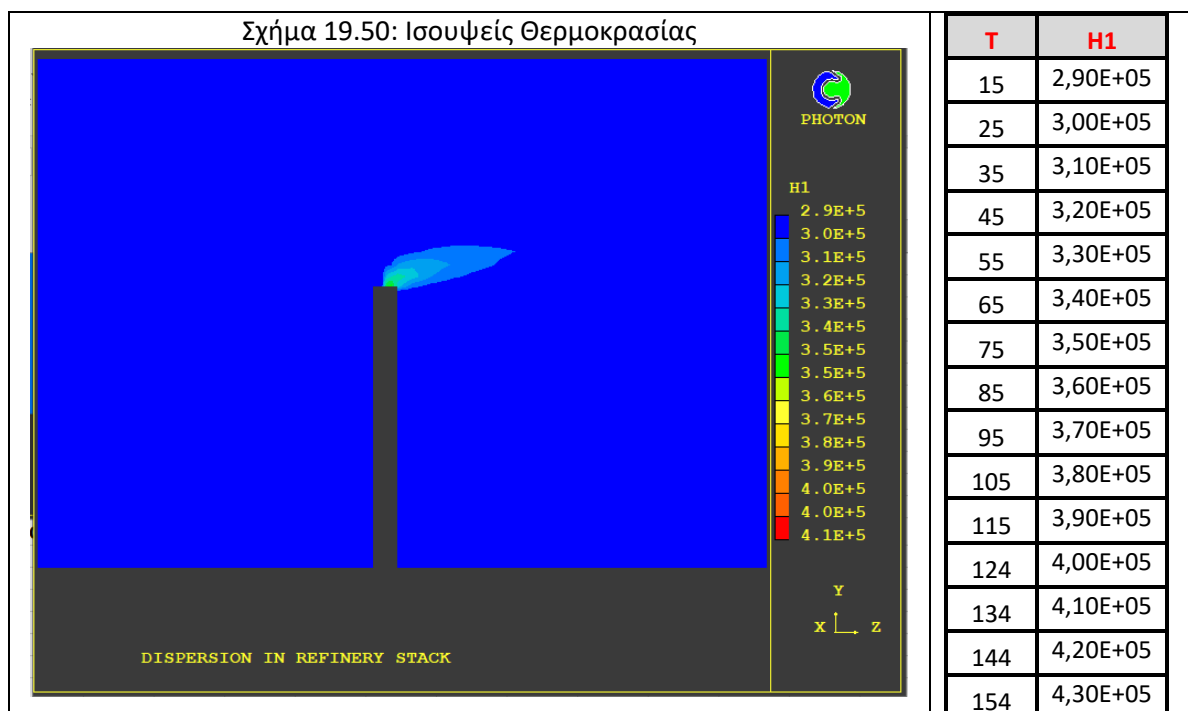
Σχήμα 19.49: Ισοϋψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub>  
εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.48, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατόντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.

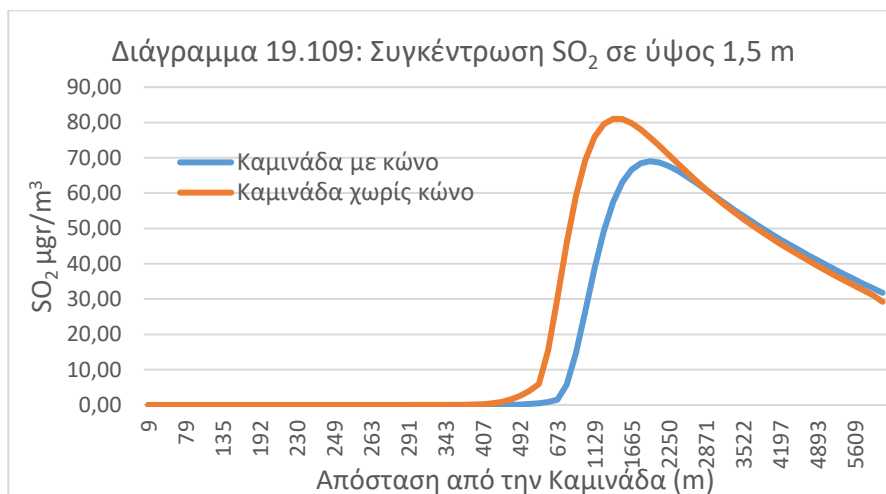
Σχήμα 19.50: Ισοϋψείς Θερμοκρασίας





### Τραχύτητα 0,3

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε καμινάδα με κώνο, το πλούμιο έχει μεγαλύτερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα, οι μέγιστες συγκεντρώσεις. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου, είναι σχεδόν ταυτόσημες. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 2.713 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 62,80 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη για καμινάδα χωρίς κώνο είναι 63,88 μgr/m<sup>3</sup>.

Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Για το συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

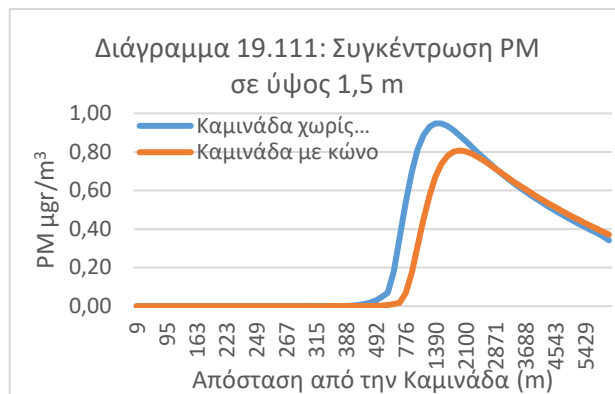
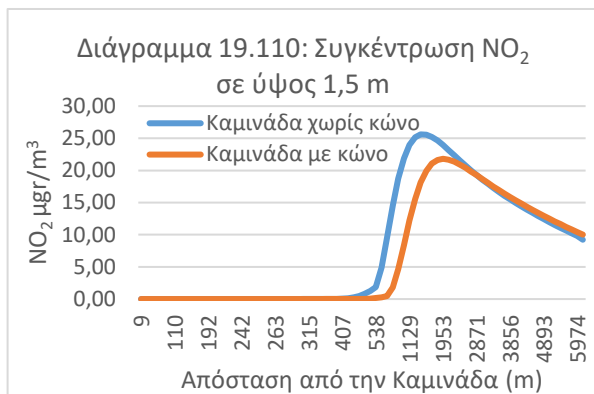
Πίνακας 19.15: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

Απόσταση από την καμινάδα: 2.713 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση (μgr/m <sup>3</sup> )
0,5	0,34
2	5,34
4	53,83
6	62,80

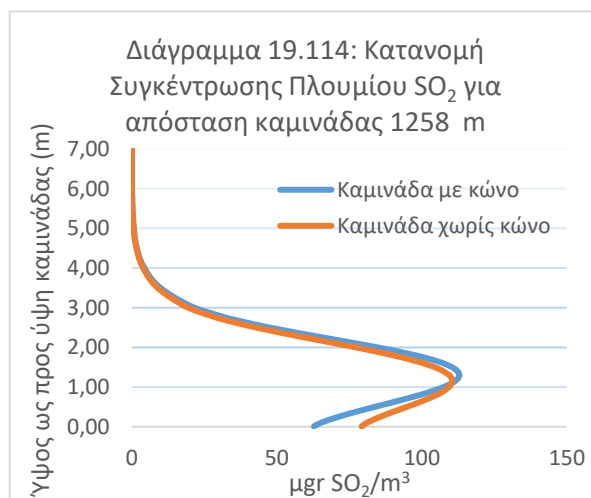
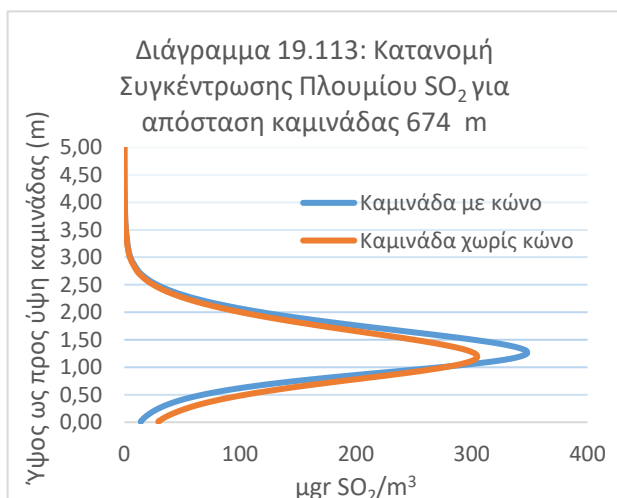
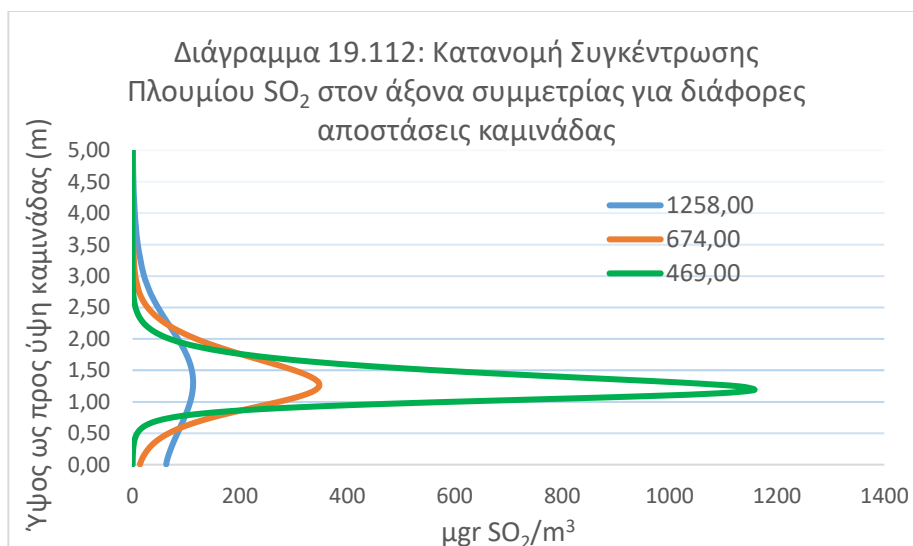




Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

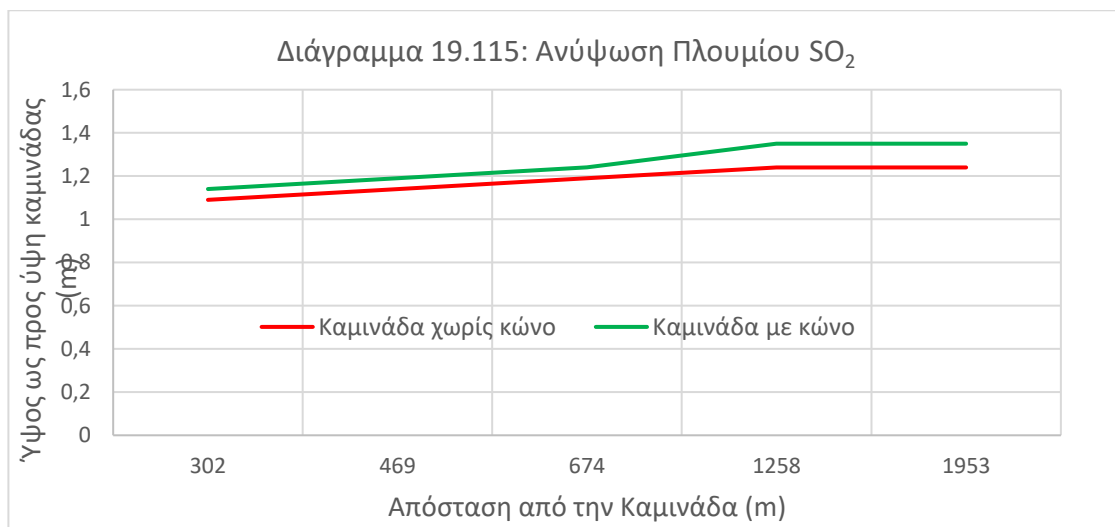


Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι



ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

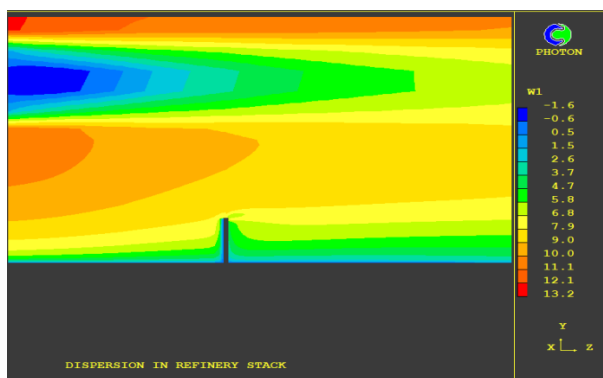
Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει μεγαλύτερη ανύψωση για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα. Μεγαλύτερες μέγιστες συγκεντρώσεις για τις ίδιες αποστάσεις. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.114), η ανύψωση είναι ελαφρώς μεγαλύτερη με αυτή της καμινάδας χωρίς κώνο. Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.115.



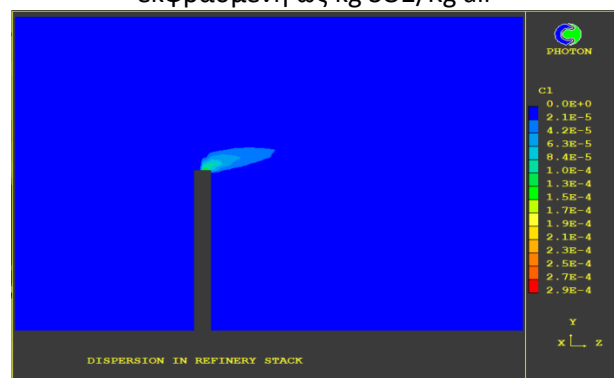
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Εδώ αρχίζει και φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ανύψωση του πλουμίου δεν είναι τόσο έντονη όσο στις μικρότερες ταχύτητες του ανέμου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.51: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



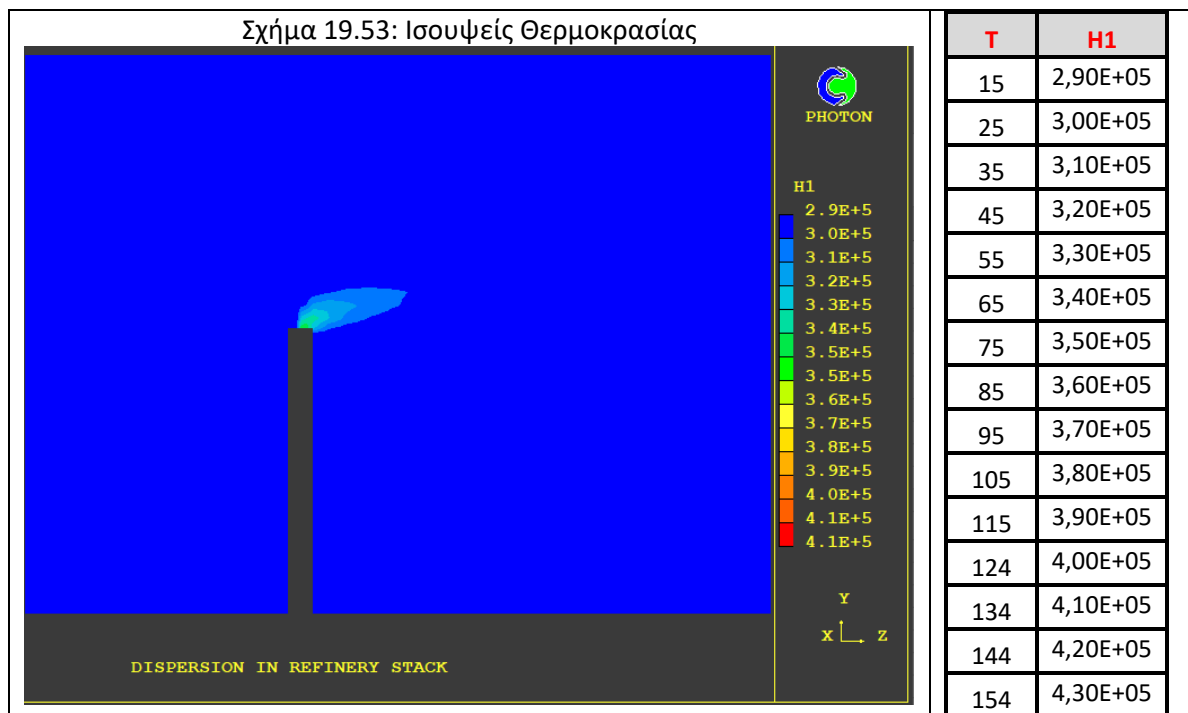
Σχήμα 19.52: Ισουψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/kg air





Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.51, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωσικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωσικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

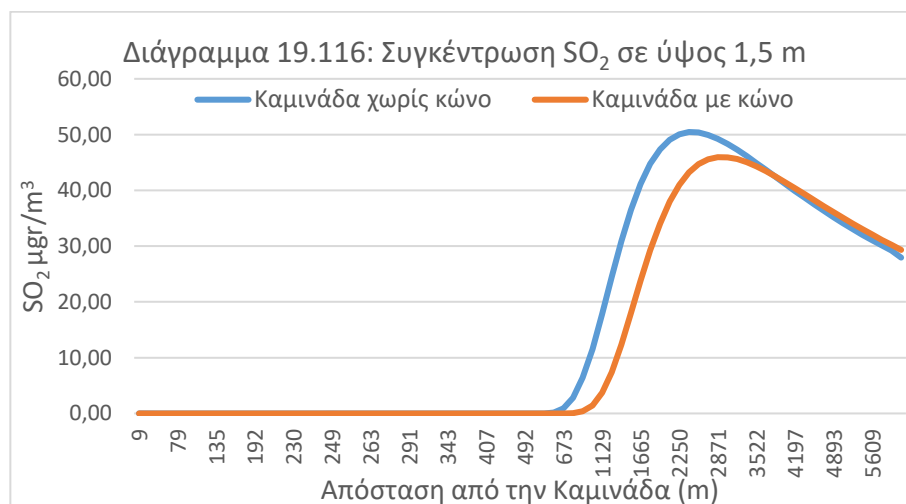
Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



### 19.3.5 Ταχύτητα Ανέμου 9 m/s

#### Τραχύτητα 0,1

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.





Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε αύξηση της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας από 6 σε 9 m/s, το πλούμιο έχει μικρότερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για την ίδια απόσταση από την καμινάδα, μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Σε μεγάλες αποστάσεις από την καμινάδα οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ταυτόσημες. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 4.543 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 37,43  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ , ενώ η αντίστοιχη για καμινάδα χωρίς κώνο είναι 38,22  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ .

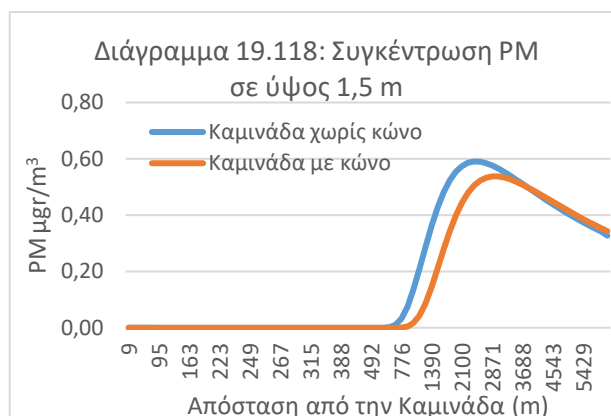
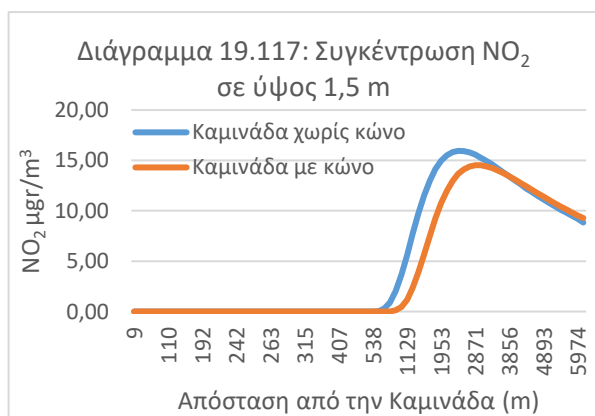
Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

Για συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

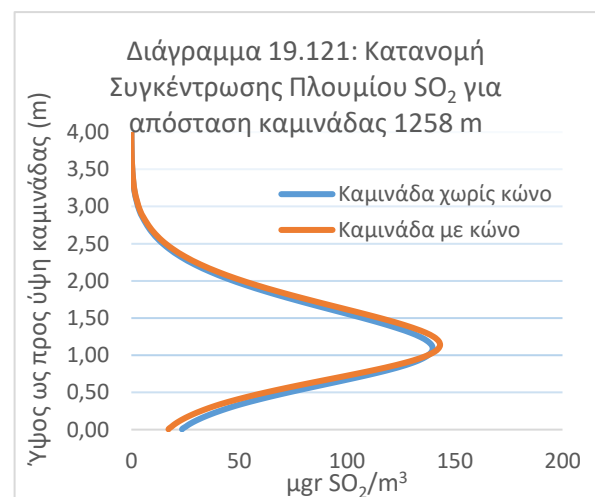
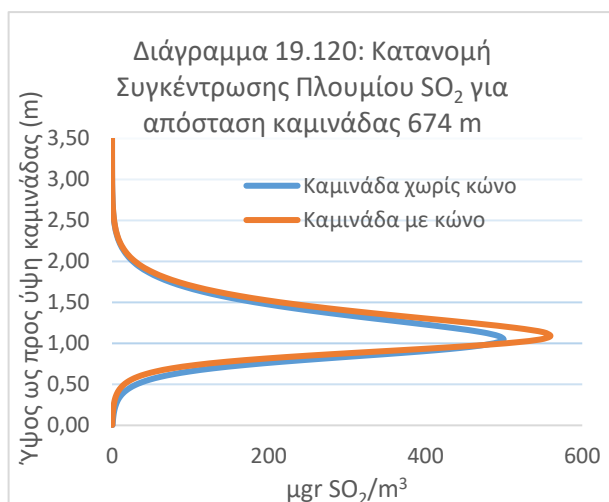
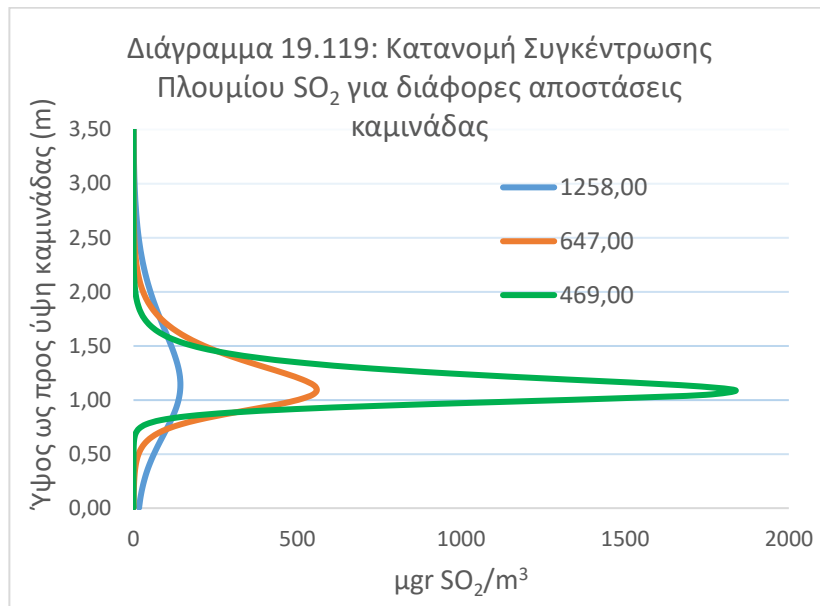
Πίνακας 19.16: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

Απόσταση από την καμινάδα: 4.543 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,19
2	2,04
4	36,28
6	43,13
9	37,43

Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



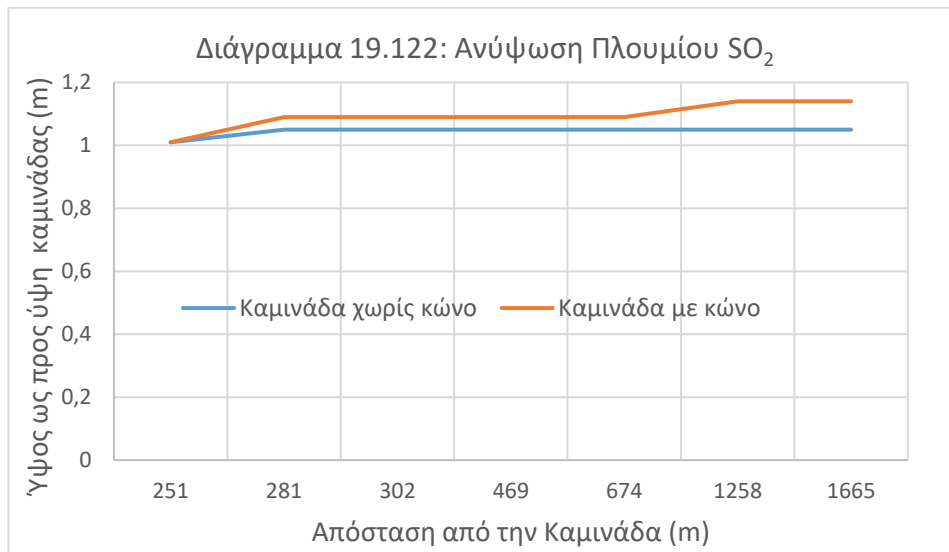
Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει μεγαλύτερη ανύψωση για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα. Μεγαλύτερες μέγιστες συγκεντρώσεις για τις ίδιες αποστάσεις. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.121), η ανύψωση παραμένει σχεδόν η ίδια.

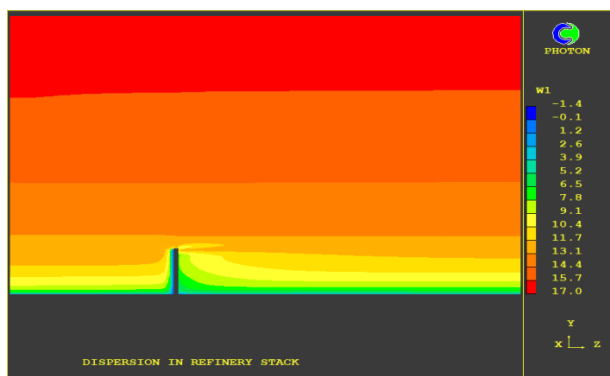
Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.122.



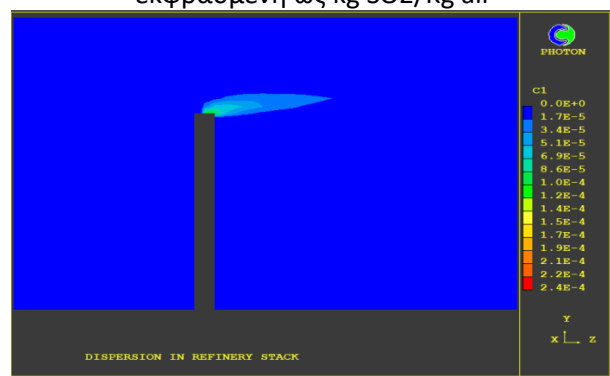
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Εδώ αρχίζει και φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ανύψωση του πλουμίου δεν είναι τόσο έντονη όσο στις μικρότερες ταχύτητες του ανέμου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.54: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας

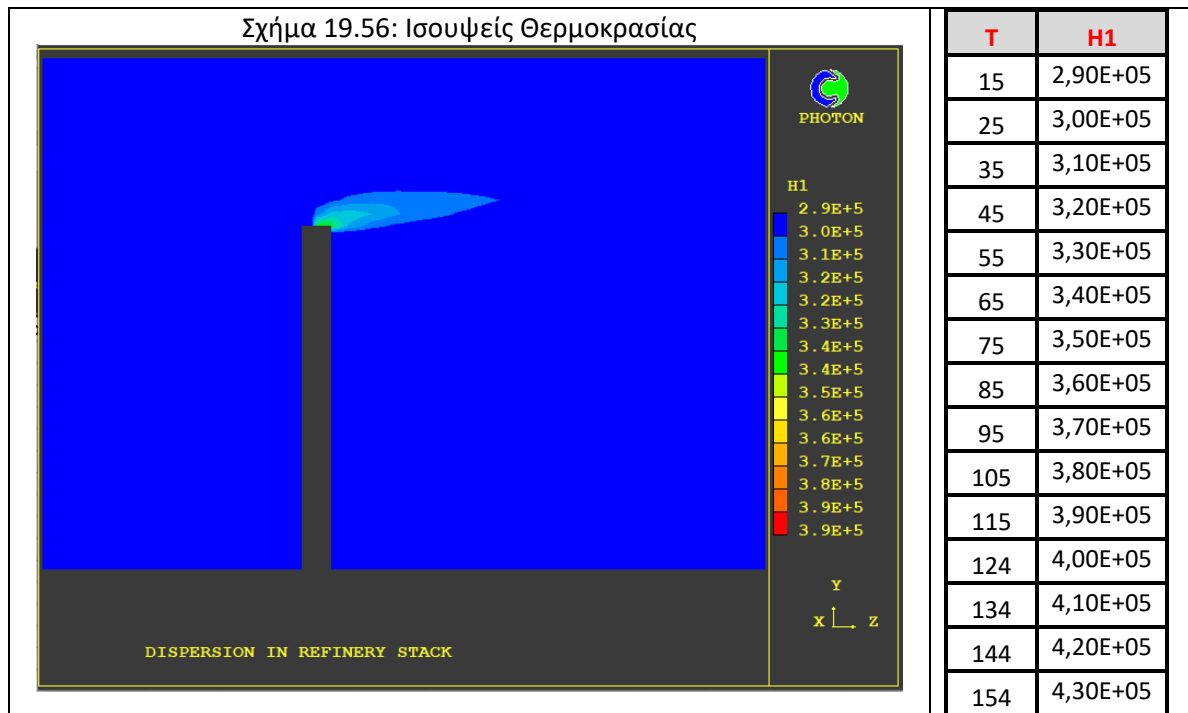


Σχήμα 19.55: Ισουψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/Kg air



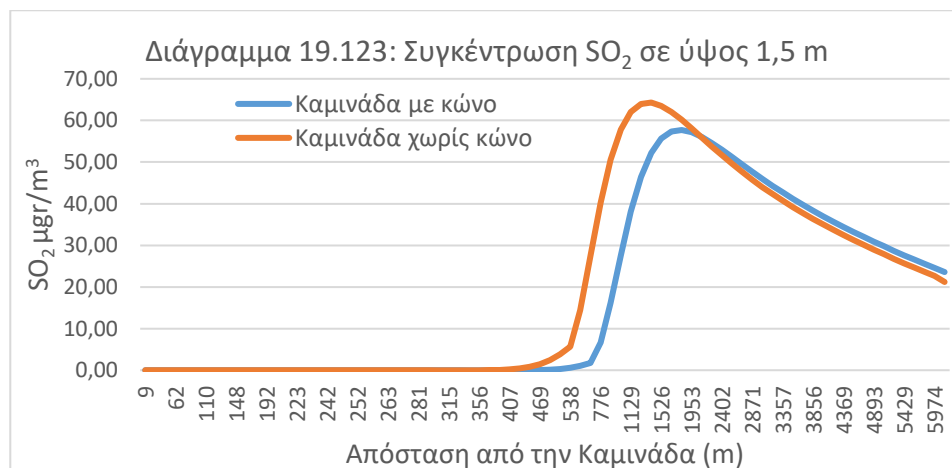
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.54, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.



### Τραχύτητα 0,3

Για την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο της αναπνοής, συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα και στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X έχουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μικρές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης παρατηρούμε από το διάγραμμα της συγκέντρωσης, ότι σε καμινάδα με κώνο, το πλούμιο έχει μεγαλύτερη ανύψωση. Δηλαδή παρουσιάζονται για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα, μικρότερες συγκεντρώσεις που σε μεγάλα μήκη ροής εξομοιώνονται. Έτσι σε απόσταση από την καμινάδα 2.713 m η συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής έχει την μέγιστη τιμή της, ίση με 49,42 μgr/m<sup>3</sup>, ενώ η αντίστοιχη για καμινάδα χωρίς κώνο είναι 47,62 μgr/m<sup>3</sup>.

Επίσης παρατηρούμε μία ελαφριά μετατόπιση του πλουμίου σε μεγαλύτερες αποστάσεις για την καμινάδα με κώνο. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ανύψωση λόγω αυξημένης ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων από την καμινάδα.

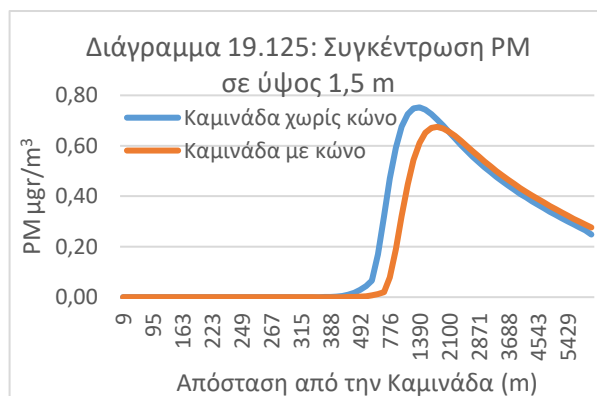
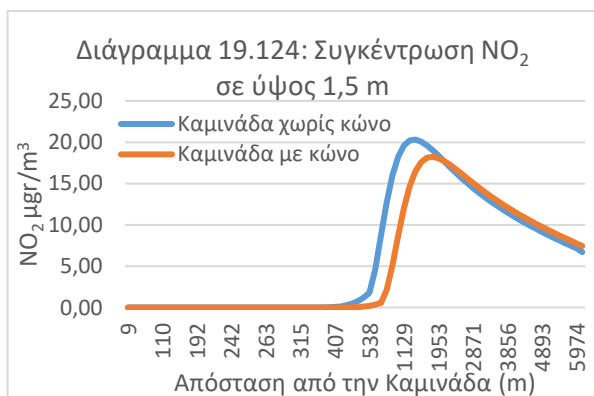


Για συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα, έχουμε τον παρακάτω πίνακα για διάφορες εντάσεις της οριζόντιας ταχύτητας.

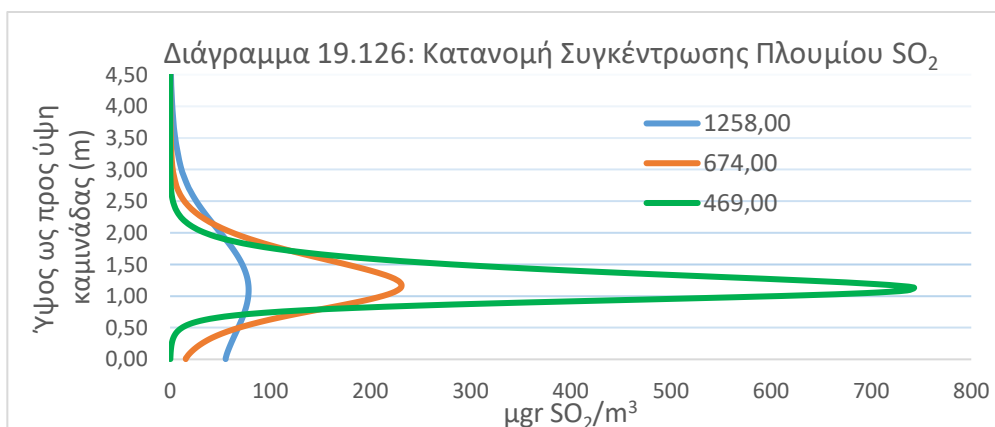
Πίνακας 19.17: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε ίδια απόσταση από την καμινάδα.

Απόσταση από την καμινάδα: 2.713 m	
Ένταση Οριζόντιας Ταχύτητας (m/s)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )
0,5	0,34
2	5,34
4	53,83
6	62,80
9	49,42

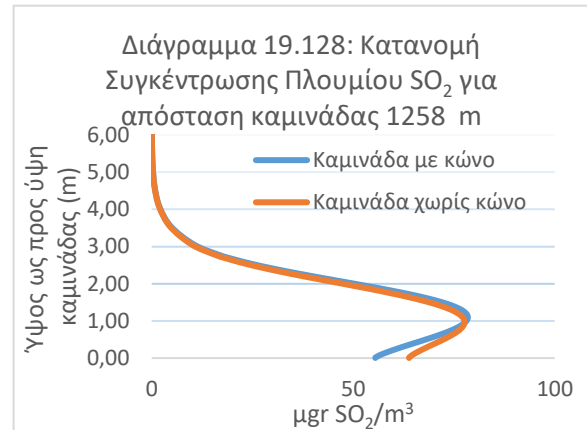
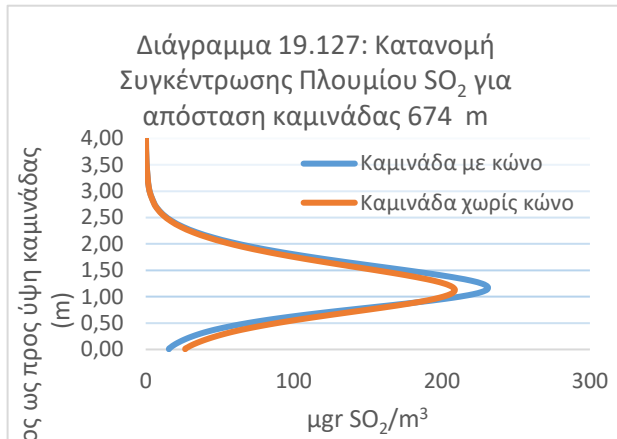
Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουμε και για τους άλλους δύο ρύπους το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση X) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



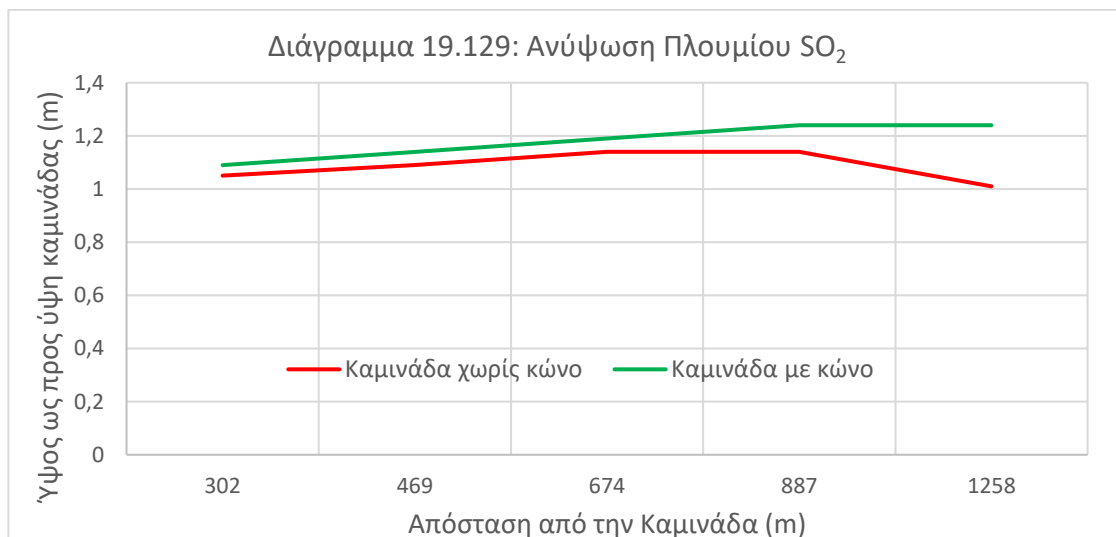




Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις κατά μήκος του πεδίου ροής, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Όσο αυξάνει το ύψος και παράλληλα μεγαλώνουν οι αποστάσεις κατά μήκος του πεδίου, οι συγκεντρώσεις μειώνονται.

Η συμπεριφορά του πλουμίου σε καμινάδα με κώνο δείχνει μεγαλύτερη ανύψωση για τις ίδιες αποστάσεις από την καμινάδα. Μεγαλύτερες μέγιστες συγκεντρώσεις για τις ίδιες αποστάσεις. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο της καμινάδας (διάγραμμα 19.128, η ανύψωση είναι περίπου η ίδια με αυτή της καμινάδας χωρίς κώνο.

Η ανύψωση του πλουμίου διοξειδίου του θείου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της καμινάδας, δίνεται στο διάγραμμα 19.129.



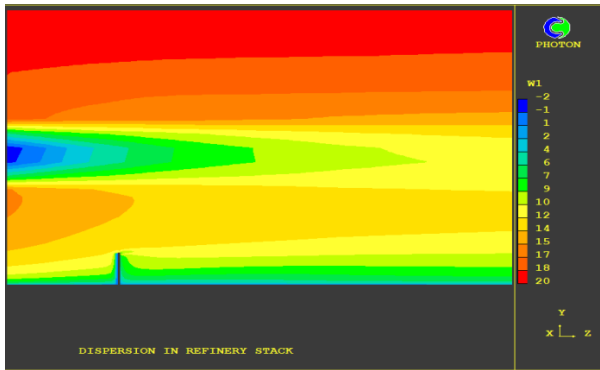
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από την θερμότητα των καυσαερίων, το πλούμιο ανεβαίνει σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής. Εδώ αρχίζει και φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ανύψωση του πλουμίου δεν είναι τόσο έντονη όσο στις μικρότερες ταχύτητες του ανέμου. Μετά από ένα ορισμένο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερिशύουν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Ακολουθούν σχηματικές παραστάσεις απεικόνισης των ισοϋψών της έντασης της οριζόντιας ταχύτητας. Επίσης ισοϋψείς της ανάπτυξης του πλουμίου της συγκέντρωσης



του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα και της θερμοκρασίας (εξάγεται από την ενθαλπία σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί).

Σχήμα 19.57: Κατεύθυνση Οριζόντιας Ταχύτητας



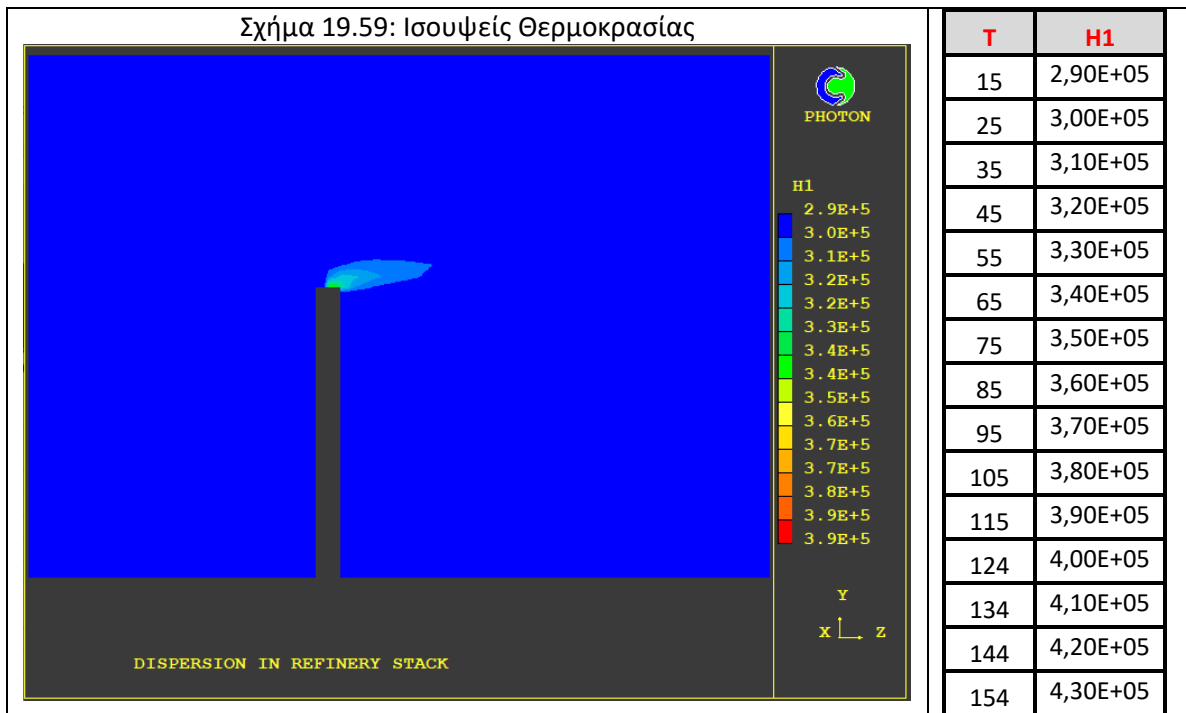
Σχήμα 19.58: Ισοψείς Συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> εκφρασμένη ως kg SO<sub>2</sub>/kg air



Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 19.57, παρατηρούμε ότι πολύ κοντά (κατάντη) της καμινάδας, το άνυσμα της ταχύτητας παρουσιάζει κλίση προς τα άνω λόγω της επίδρασης των ανωστικών δυνάμεων. Στην συνέχεια όσο οι ανωστικές δυνάμεις μειώνονται οι ανοδικές κλίσεις της ταχύτητας ελαχιστοποιούνται αντίστοιχα.

Κατόπιν εμφανίζονται καθοδικές κλίσεις της ταχύτητας και μετά τα ανύσματα αυτής ακολουθούν την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον και σε μεγαλύτερα ύψη του πεδίου ροής οι κλίσεις της ταχύτητας είναι μηδενικές.

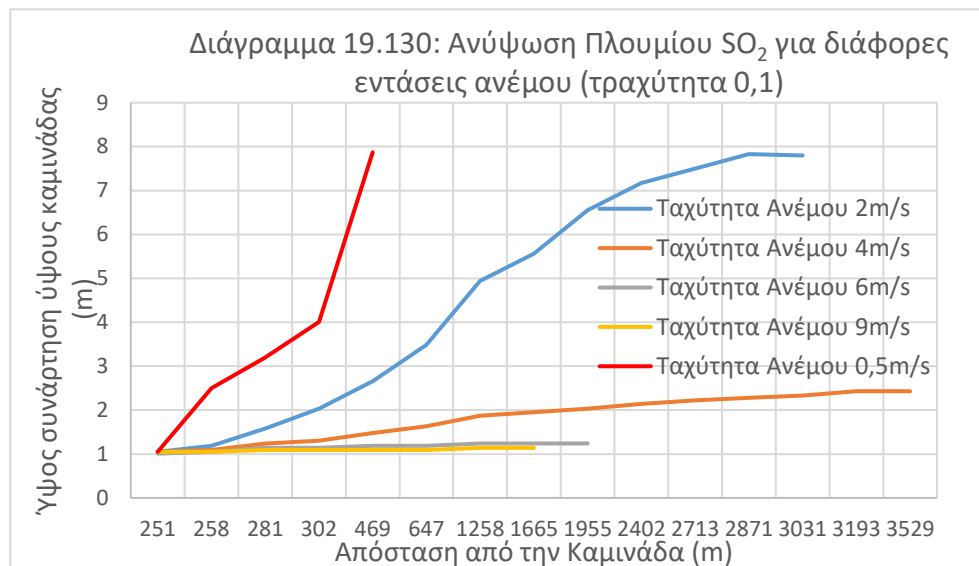
Σχήμα 19.59: Ισοψείς Θερμοκρασίας





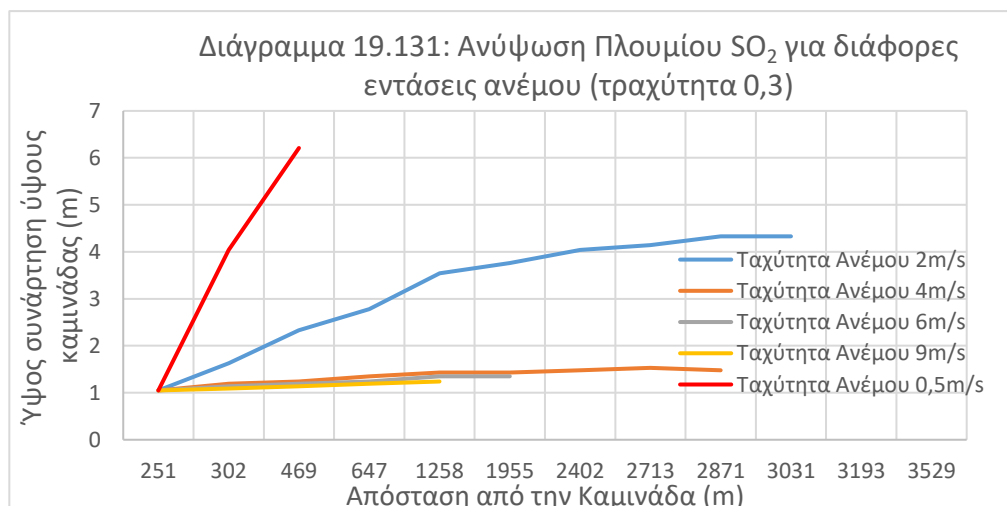
### 19.3.6 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Ανύψωσης Πλουμίου

Τα δύο διαγράμματα που ακολουθούν μας δίνουν την συνολική εικόνα της ανύψωσης του πλουμίου διοξειδίου του θείου, στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ, σε απόσταση από την καμινάδα. Το ένα διάγραμμα αφορά τραχύτητα εδάφους 0,1 και το άλλο 0,3.



Από το ανωτέρω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζει αρνητικά την ανύψωση του πλουμίου. Πολύ μεγάλες εντάσεις ανέμου (> 6m/s) δίνουν μεγάλες αδρανειακές δυνάμεις που υπερिशύχουν των ανωστικών δυνάμεων, με αποτέλεσμα να έχουμε σχεδόν μηδενική ανύψωση και το πλούμιο να ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Όσο αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου, αυξάνεται και η τιμή του τυρβώδους ιξώδους. Οι αυξημένες τιμές του τυρβώδους ιξώδους οδηγούν αντίστοιχα σε αυξημένες τιμές κινητικής ενέργειας τύρβης, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διασπορά συγκεντρώσεων των ρυπαντών και την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών στο επίπεδο του εδάφους. Επίσης μεγαλύτεροι στρόβιλοι (αυξημένο τυρβώδες ιξώδες), οδηγούν στη μεταφορά των ρυπασμένων αερίων μαζών χωρίς να διευκολύνεται σημαντικά η αραιώσή τους.





Αυξημένες τιμές τραχύτητας εδάφους σε συνδυασμό με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζουν περισσότερο αρνητικά την ανύψωση του πλούμιου. Ουσιαστικά για εντάσεις ανέμου ( $> 4\text{m/s}$ ) αυτές υπερισχύουν των ανωστικών δυνάμεων, με αποτέλεσμα να έχουμε σχεδόν μηδενική ανύψωση και το πλούμιο να ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου.

Επίσης αύξηση της τραχύτητας σε συνδυασμό με μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου, οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της τιμής του τυρβώδους ιξώδους. Έτσι οδηγούμαστε σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου στο επίπεδο του εδάφους.

### 19.3.7 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Τραχύτητας 0,1 και 0,3

Στους παρακάτω πίνακες υπάρχουν οι συγκεντρώσεις των ρύπων για συγκεκριμένες αποστάσεις από την καμινάδα με κώνο. Επίσης καταγράφονται και οι αποστάσεις που δίνουν τις μέγιστες συγκεντρώσεις ρύπου σε διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Σε όλους τους πίνακες τα νούμερα με έντονη κόκκινη γραμματοσειρά, αντιστοιχούν στις μέγιστες συγκεντρώσεις συνάρτηση των αποστάσεων από την καμινάδα.

Πίνακας 19.18: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου ( $\mu\text{gr SO}_2/\text{m}^3$ ) στο εδάφος

Απόσταση από Καμινάδα (m)	Ταχύτητα Ανέμου									
	0,5		2		4		6		9	
	Τραχύτητα Εδάφους									
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
1.006	0,01	0,02	0,04	0,45	0,6	5,79	1,49	26,5	1,44	27,56
1.808										<b>57,70</b>
1.953	0,11	0,22	0,94	3,90	13,13	46,62	31,69	<b>69,02</b>	34,05	57,17
2.557	0,15	0,32	1,52	5,15	21,35	53,75	44,75	64,59	44,69	51,20
2.713						<b>53,83</b>				
2.871									<b>45,95</b>	
3.031	0,16	0,37	1,80	5,61	25,47	52,85	47,96	59,06	45,94	45,96
3.193							<b>48,18</b>			
3.856	0,18	<b>0,40</b>	<b>2,02</b>	<b>5,83</b>	28,65	47,30	46,60	50,14	42,46	38,33
4.362					<b>29,02</b>					
4.543	0,19	0,40	2,04	5,76	28,97	42,18	43,13	43,86	38,22	33,22
5.071	0,20	0,39	2,01	5,64	28,48	38,57	40,20	39,56	35,04	29,78
5.974	0,23	0,37	1,90	5,39	26,96	33,29	35,44	34,24	30,22	24,56



Πίνακας 19.19: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Αζώτου ( $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$ ) στο εδάφος

Απόσταση από Καμινάδα (m)	Ταχύτητα Ανέμου									
	0,5		2		4		6		9	
	Τραχύτητα Εδάφους									
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
1.006	0,00	0,02	0,01	0,19	0,19	1,83	0,47	8,37	0,46	8,71
1.808										<b>18,23</b>
1.953	0,03	0,09	0,30	1,62	4,15	14,73	10,02	<b>21,81</b>	10,76	18,07
2.557	0,05	0,11	0,48	2,13	6,75	16,99	14,14	20,41	14,12	16,18
2.713						<b>17,01</b>				
2.871									<b>14,52</b>	
3.031	0,05	0,12	0,57	2,33	8,05	16,70	15,16	18,66	14,52	14,52
3.193							<b>15,23</b>			
3.856	0,06	<b>0,13</b>	<b>0,64</b>	<b>2,42</b>	9,05	14,95	14,73	15,85	13,42	12,11
4.362					<b>9,17</b>					
4.543	0,06	0,12	0,64	2,39	9,15	13,33	13,63	13,86	12,08	10,50
5.071	0,06	0,12	0,63	2,34	9,00	12,19	12,70	12,50	11,07	9,41
5.974	0,07	0,12	0,60	2,24	8,52	10,52	11,20	10,42	9,55	7,76

Πίνακας 19.20: Συγκεντρώσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων ( $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$ ) στο εδάφος

Απόσταση από Καμινάδα (m)	Ταχύτητα Ανέμου									
	0,5		2		4		6		9	
	Τραχύτητα Εδάφους									
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
1.006	0,000	0,001	0,000	0,01	0,01	0,07	0,02	0,31	0,02	0,32
1.808										<b>0,68</b>
1.953	0,001	0,003	0,01	0,07	0,15	0,55	0,37	<b>0,81</b>	0,40	0,67
2.557	0,002	0,004	0,02	0,10	0,25	0,63	0,52	0,76	0,52	0,60
2.713						<b>0,63</b>				
2.871									<b>0,54</b>	
3.031	0,002	0,005	0,02	0,11	0,30	0,62	0,56	0,69	0,54	0,54
3.193							<b>0,56</b>			
3.856	0,002	<b>0,005</b>	<b>0,02</b>	<b>0,11</b>	0,34	0,55	0,55	0,59	0,50	0,45
4.362					<b>0,34</b>					
4.543	0,002	0,005	0,02	0,11	0,34	0,49	0,50	0,51	0,45	0,39
5.071	0,002	0,004	0,02	0,11	0,33	0,45	0,47	0,46	0,41	0,35
5.974	0,003	0,004	0,02	0,10	0,32	0,39	0,41	0,39	0,35	0,29



### Μικρές Ταχύτητες Ανέμου (έως 2 m/s)

Όταν οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρές, οι ανωστικές δυνάμεις είναι ισχυρότερες των αδρανειακών οπότε οδηγούμαστε σε ισχυρή ανύψωση του πλουμίου, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των ρύπων στο επίπεδο του εδάφους να είναι πολύ μικρές.

Όταν αυξάνεται η τραχύτητα εδάφους, αυξάνεται το τυρβώδες ιξώδες και η κινητική ενέργεια τύρβης, όχι όμως σε τέτοια επίπεδα που να οδηγούν στην δημιουργία ισχυρών δινών ή διαταραχών. Οι συνθήκες αυτές βελτιώνουν την διασπορά του πλουμίου των ρύπων, μειώνοντας την ανύψωσή του και κατά συνέπεια οδηγούν στην παρουσία μεγαλύτερων συγκεντρώσεων στο επίπεδο του εδάφους.

### Μέτριες Ταχύτητες Ανέμου (2 έως 4 m/s)

Σε αυτή τη περίπτωση οι δυνάμεις αδράνειας υπερिशύουν των αντίστοιχων ιξώδους, δίνοντας τυρβώδη φαινόμενα. Υπάρχει καλή διασπορά των ρύπων από την καμινάδα και καλή ανάπτυξη του πλουμίου. Μεγαλύτερες δυνάμεις αδράνειας μειώνουν την ανύψωση του πλουμίου και οι συγκεντρώσεις των ρύπων στο έδαφος αυξάνονται. Ως προς την τραχύτητα του εδάφους ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή αυξάνουν το τυρβώδες ιξώδες, μειώνουν την ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ρύπων στο επίπεδο του εδάφους.

Επιπλέον αυτό επιβεβαιώνεται και από τους προηγούμενους πίνακες, όπου οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα για αυξημένη τραχύτητα. Πιο συγκεκριμένα για τραχύτητα 0,3 η μέγιστη συγκέντρωση ρύπων είναι σε μήκος 2.713 m του πεδίου ροής, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τραχύτητα 0,1 είναι στα 4.369 m. Σε όλα τα μήκη του πεδίου ροής παρατηρούνται αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων ρύπων για μεγαλύτερες ταχύτητες.

### Ισχυρές Ταχύτητες Ανέμου (4 έως 6 m/s)

Οι δυνάμεις αδράνειας είναι πολύ ισχυρές που δίνουν έντονα τυρβώδη φαινόμενα. Υπάρχει καλή διασπορά ρύπων αλλά μη επαρκής ανάπτυξη του πλουμίου λόγω των ισχυρών ανέμων. Η ανύψωση του πλουμίου μειώνεται περαιτέρω και το επίπεδο των συγκεντρώσεων στο έδαφος αυξάνεται περισσότερο.

Και σε αυτά τα επίπεδα του ανέμου, η αύξηση της τραχύτητας, δίνει μεγαλύτερες τιμές του τυρβώδους ιξώδους μειώνοντας ακόμα περισσότερα την ανύψωση του πλουμίου σε σύγκριση με την αντίστοιχη για τραχύτητα 0,1. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα για αυξημένη τραχύτητα. Δηλαδή για τραχύτητα 0,3, η μέγιστη συγκέντρωση είναι σε απόσταση 1.953 m ενώ η αντίστοιχη τιμή για τραχύτητα 0,1 είναι στα 3.193 m. Σε μεγάλες αποστάσεις (> 4.000 m) παρατηρείται εξίσωση των συγκεντρώσεων για τις δύο τιμές τραχύτητας. Δηλαδή τα δύο πλούμια έχουν παρόμοια συμπεριφορά "ταξιδεύοντας" στην κατεύθυνση του ανέμου.

### Πολύ Ισχυρές Ταχύτητες Ανέμου (6 έως 9 m/s)

Ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, με πολύ καλή διασπορά ρύπων αλλά σχεδόν καθόλου ανάπτυξη του πλουμίου. Η ανύψωση του είναι αμελητέα και το επίπεδο των συγκεντρώσεων στο έδαφος είναι ελαφρά μικρότερο. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται σε ακόμα μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα για αυξημένη τραχύτητα. Για τραχύτητα 0,3, η μέγιστη συγκέντρωση είναι σε απόσταση 1.808 m και για τιμή 0,1 σε απόσταση 2.871 m. Σε μεγάλες αποστάσεις (> 3.000 m)



οι συγκεντρώσεις για τραχύτητα 0,3 είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες για τραχύτητα 0,1. Εδώ έχουμε το γεγονός, ότι δεν υπάρχει καθόλου ανύψωση και ανάπτυξη του πλουμίου, το οποίο ταξιδεύει προς την κατεύθυνση του ανέμου και με άξονα συμμετρίας το ύψος της καμινάδας. Έτσι παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά μήκος του ύψους της καμινάδας και χαμηλότερες στο επίπεδο του εδάφους.

### 19.3.8 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Καμινάδας με Κώνο και χωρίς

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες αφορούν προσομοιώσεις για καμινάδα με ή χωρίς κώνο σε τραχύτητα εδάφους 0,3 και σε διάφορες ταχύτητες ανέμου. Η παροχή καυσαερίων από την καμινάδα θεωρείται ότι είναι σταθερή.

Σε συνέχεια των όσων αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο αυξάνονται οι αδρανειακές δυνάμεις οι οποίες δίνουν τυρβώδη φαινόμενα. Αυτό συντελεί σε καλύτερες συνθήκες διασποράς, αλλά σε ισχυρούς ανέμους η ανάπτυξη του πλουμίου δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Σε αύξηση της ταχύτητας ανέμου παρουσιάζεται μείωση της ανύψωσης του πλουμίου των ρύπων. Δηλαδή οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα. Όταν στην καμινάδα υπάρχει ο κώνος έχουμε μείωση της επιφάνειας της με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων και κατά συνέπεια των ανωστικών δυνάμεων. Σε σύγκριση με την καμινάδα χωρίς κώνο έχουμε μεγαλύτερη ανύψωση του πλουμίου και χαμηλότερες συγκεντρώσεις στο επίπεδο του εδάφους. Σε μέτριες και ισχυρές ταχύτητες ανέμου και σε μεγάλα μήκη (> 4.000 m) του πεδίου ροής, παρατηρείται εξίσωση των συγκεντρώσεων του πλουμίου των ρύπων για τις δύο περιπτώσεις της καμινάδας. Σε καμινάδες με κώνο η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρείται σε μεγαλύτερες αποστάσεις, επιβεβαιώνοντας την μεγαλύτερη ανύψωση σε σχέση με την καμινάδα χωρίς κώνο.

Πίνακας 19.21: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου ( $\mu\text{gr SO}_2/\text{m}^3$ ) στο εδάφος

Απόσταση από Καμινάδα (m)	Ταχύτητα Ανέμου									
	0,5		2		4		6		9	
	Καμινάδα με Κώνο									
	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
1.006	0,02	0,07	0,45	4,30	5,79	32,48	26,50	69,28	27,56	57,78
1.808									<b>57,70</b>	
1.390								<b>81,03</b>		<b>64,30</b>
1.953	0,22	0,28	3,90	13,21	46,62	<b>66,56</b>	<b>69,02</b>	75,75	57,17	58,08
2.557	0,32	0,36	5,15	15,44	53,75	63,33	64,59	65,79	51,20	49,57
2.713					<b>53,83</b>					
3.031	0,37	0,39	5,61	16,20	52,85	58,15	59,06	58,83	45,96	43,99
3.856	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>5,83</b>	<b>16,57</b>	47,30	49,13	50,14	49,03	38,33	36,38
4.197	0,40	0,40	5,81	16,56	44,72	45,85	49,62	54,62	35,68	33,76
4.543	0,40	0,40	5,76	16,50	42,18	42,81	43,86	42,40	33,22	31,30
5.071	0,39	0,38	5,64	16,38	38,57	38,72	39,56	37,89	29,78	27,85
5.974	0,37	0,37	5,39	16,24	33,29	33,02	32,98	31,04	21,65	21,36



Πίνακας 19.22: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Αζώτου ( $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$ ) στο εδάφος

Απόσταση από Καμινάδα (m)	Ταχύτητα Ανέμου									
	0,5		2		4		6		9	
	Καμινάδα με Κώνο									
	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
1.006	0,01	0,02	0,19	1,78	1,83	10,26	8,37	21,89	8,71	18,26
1.808									<b>18,23</b>	
1.390								<b>25,60</b>		<b>20,32</b>
1.953	0,07	0,09	1,62	5,48	14,73	<b>21,03</b>	<b>21,81</b>	23,94	18,07	18,35
2.557	0,10	0,11	2,13	6,41	16,99	20,01	20,41	20,79	16,18	15,67
2.713					<b>17,01</b>					
3.031	0,12	0,12	2,33	6,72	16,70	18,37	18,66	18,59	14,52	13,90
3.856	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>2,42</b>	<b>6,88</b>	14,95	15,53	15,85	15,49	12,11	11,50
4.197	0,13	0,13	2,41	6,87	14,13	14,49	14,83	14,41	11,28	10,67
4.543	0,13	0,12	2,39	6,85	13,33	13,53	13,86	13,40	10,50	9,89
5.071	0,12	0,12	2,34	6,80	12,19	12,24	12,50	11,97	9,41	8,80
5.974	0,12	0,12	2,24	6,74	10,52	10,44	10,42	9,81	7,76	7,15

Πίνακας 19.23: Συγκεντρώσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων ( $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$ ) στο εδάφος

Απόσταση από Καμινάδα (m)	Ταχύτητα Ανέμου									
	0,5		2		4		6		9	
	Καμινάδα με Κώνο									
	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
1.006	0,00	0,001	0,01	0,08	0,07	0,38	0,31	0,81	0,32	0,68
1.808									<b>0,68</b>	
1.390								<b>0,95</b>		<b>0,75</b>
1.953	0,003	0,003	0,07	0,25	0,55	<b>0,78</b>	<b>0,81</b>	0,89	0,67	0,68
2.557	0,004	0,004	0,10	0,29	0,63	0,74	0,76	0,77	0,60	0,58
2.713					<b>0,63</b>					
3.031	0,004	0,005	0,11	0,31	0,62	0,68	0,69	0,69	0,54	0,51
3.856	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,11</b>	<b>0,31</b>	0,55	0,57	0,59	0,57	0,45	0,43
4.197	0,005	0,005	0,11	0,31	0,52	0,54	0,55	0,53	0,42	0,39
4.543	0,005	0,005	0,11	0,31	0,49	0,50	0,51	0,50	0,39	0,37
5.071	0,005	0,004	0,11	0,31	0,45	0,45	0,46	0,40	0,35	0,33
5.974	0,004	0,004	0,10	0,31	0,39	0,39	0,39	0,36	0,29	0,26





#### 19.4 Βέλτιστο Ύψος Καμινάδας

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η επίδραση που έχει το ύψος της καμινάδας στην διασπορά των ρυπαντών. Οι παράμετροι που έχουν ληφθεί υπόψη είναι καμινάδα με κώνο και τραχύτητα εδάφους 0,3, που προσεγγίζουν περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες των προσομοιώσεων. Ως προς τα ύψη καμινάδας έχουν γίνει προσομοιώσεις για 60 m, 70 m, 80 m και 90 m.

Τα αποτελέσματα αξιολογούνται ως προς το διοξείδιο του θείου στο επίπεδο της αναπνοής. Επίσης έχουν θεωρηθεί ίδιες λειτουργικές παράμετροι στον φούρνο για κάθε προσομοίωση.

Σχετικά με τους ανέμους έχουν ληφθεί υπόψη αυτοί με ένταση 4m/s και 6m/s.

Για λόγους αξιοπιστίας της εργασίας παίρνουμε υπόψη το ανώτερο εύρος ταχύτητας ανέμου, δηλαδή τα 4 m/s. Το εύρος (4 - 6 m/s) έχει σχετικά υπολογίσιμη συχνότητα εμφάνισης με 7,85%. Για τον ίδιο λόγο που εξηγήθηκε ανωτέρω, λαμβάνουμε υπόψη τα 6 m/s που δίνουν μέτριες συγκεντρώσεις σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις από την καμινάδα.

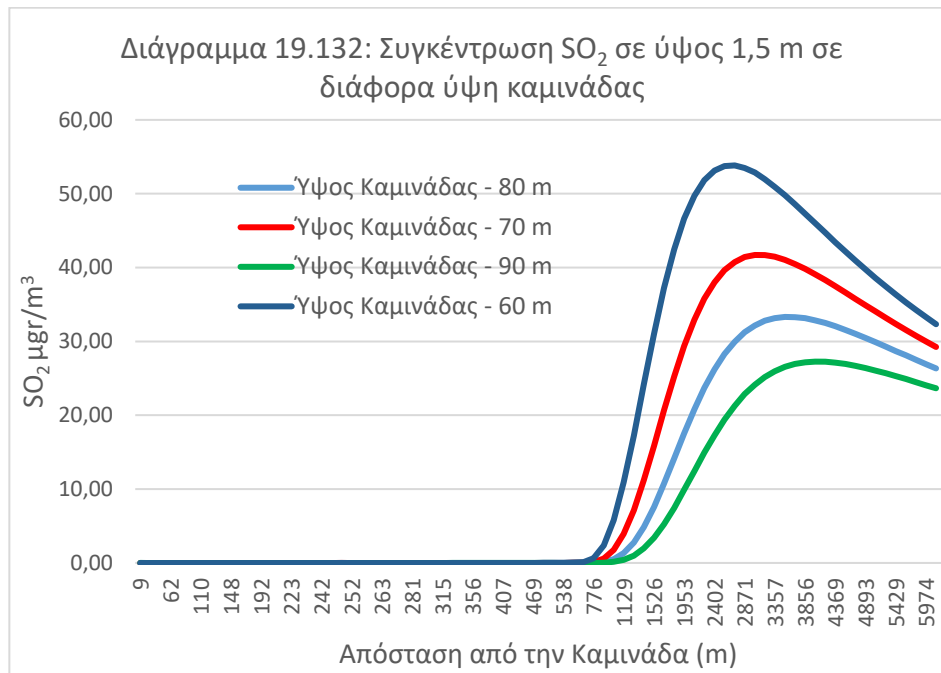
##### 19.4.1 Ταχύτητα Άνεμου 4 m/s

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, έχουμε τον παρακάτω πίνακα σε διάφορα ύψη καμινάδας.

Πίνακας 19.24: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε Ύψος 1,5 m για διάφορες αποστάσεις από την Καμινάδα και Ύψη Καμινάδων.

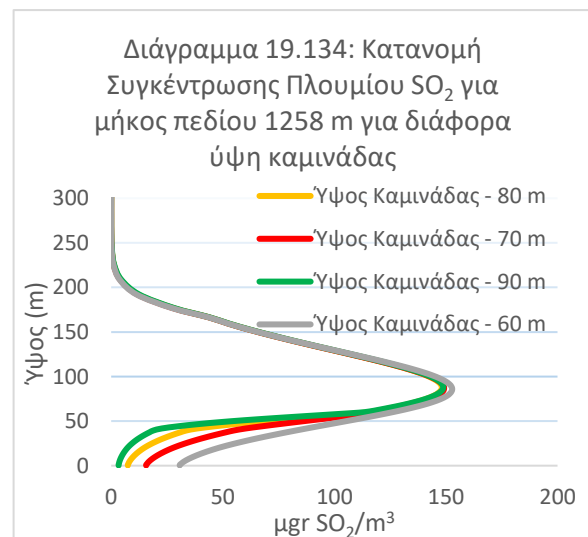
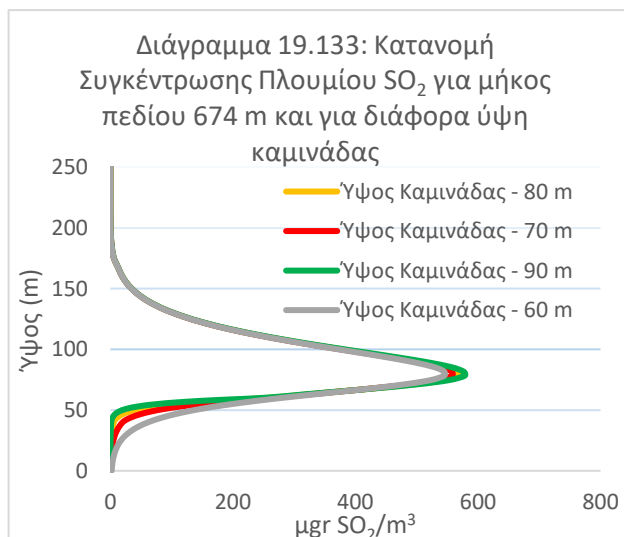
Ταχύτητα Ανέμου 4 m/s				
Απόσταση(m)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )			
	H=60 m	H=70 m	H=80 m	H=90 m
1.006	5,79	1,77	0,51	0,15
1.526	31,02	15,86	7,57	3,39
2.100	49,71	32,92	20,78	12,45
2.713	53,83	40,75	29,95	21,18
3.193	51,98	41,70	32,79	25,18
4.026	46,01	39,08	32,85	27,26
5.071	38,57	34,04	29,89	26,06
5.974	33,29	29,99	26,92	24,07
<b>Διαφορά %</b>				
2.713		24,30	44,36	60,47

Επίσης προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ύψος της καμινάδας, τόσο αυξάνεται η ανύψωση του πλουμίου που δίνει χαμηλότερες συγκεντρώσεις και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την καμινάδα.

Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Στο ίδιο ύψος και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις μειώνονται. Και εδώ επιβεβαιώνεται ότι όσο μεγαλώνει το ύψος της καμινάδας τόσο αυξάνεται και η ανύψωση του πλουμίου.

Αν θεωρήσουμε σαν σημείο αναφοράς μια συγκεκριμένη απόσταση από την καμινάδα (π.χ. τα 2.713 m) παρατηρούμε ότι σε αύξηση κατά 10 m του ύψους της καμινάδας



οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής κατά 20% μέσο όρο περίπου. Η συνολική μείωση είναι της τάξης του 60,47% για καμινάδα ύψους 90 m.

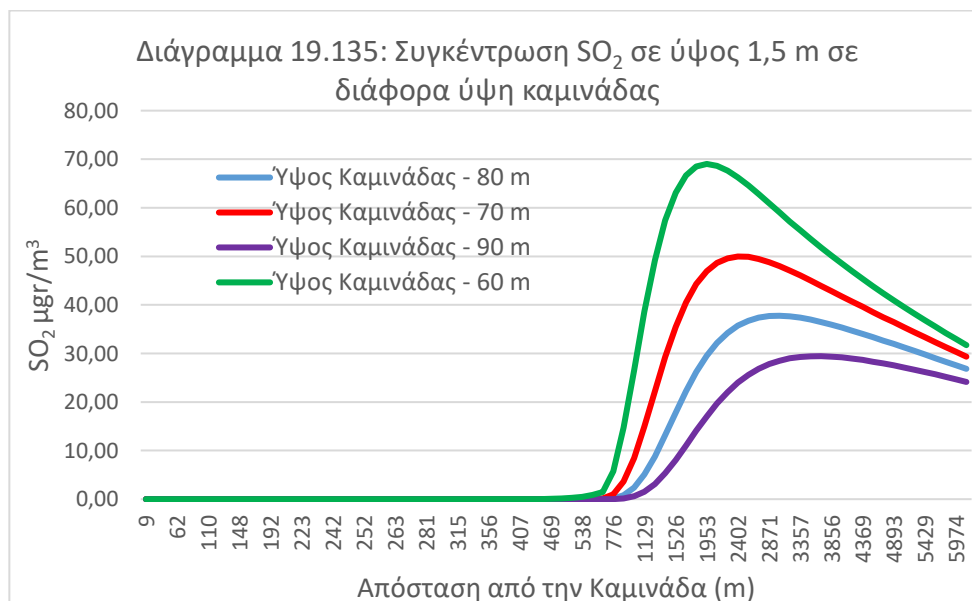
#### 19.4.2 Ταχύτητα Άνεμου 6 m/s

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, έχουμε τον παρακάτω πίνακα σε διάφορα ύψη καμινάδας.

Πίνακας 19.25: Συγκεντρώσεις Διοξειδίου του Θείου σε Ύψος 1,5 m για διάφορες αποστάσεις από Καμινάδα και Ύψη Καμινάδων.

Ταχύτητα Ανέμου 6 m/s				
Απόσταση (m)	Συγκέντρωση ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ )			
	H=60 m	H=70 m	H=80 m	H=90 m
1.006	26,50	8,44	2,35	0,60
1.526	63,13	35,49	17,83	8,03
2.100	68,65	48,66	32,20	19,70
2.713	62,80	49,46	37,38	26,85
3.193	57,19	47,06	37,64	29,00
4.026	48,51	41,77	35,33	29,19
5.071	39,56	35,40	31,23	27,10
5.974	32,98	30,35	27,57	24,67
Διαφορά %				
2.713		21,24	40,48	57,25

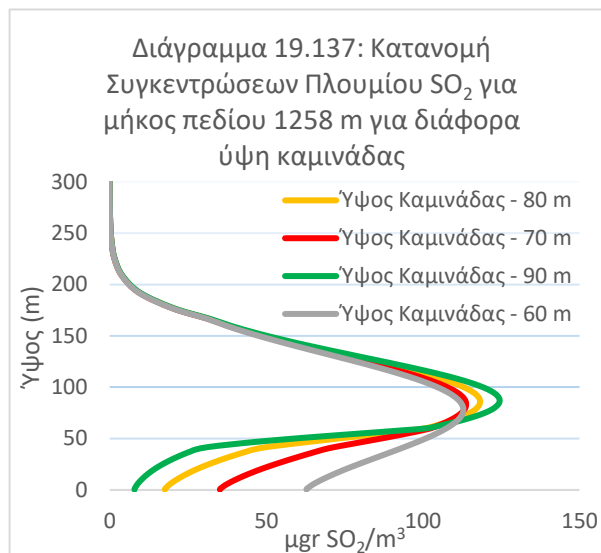
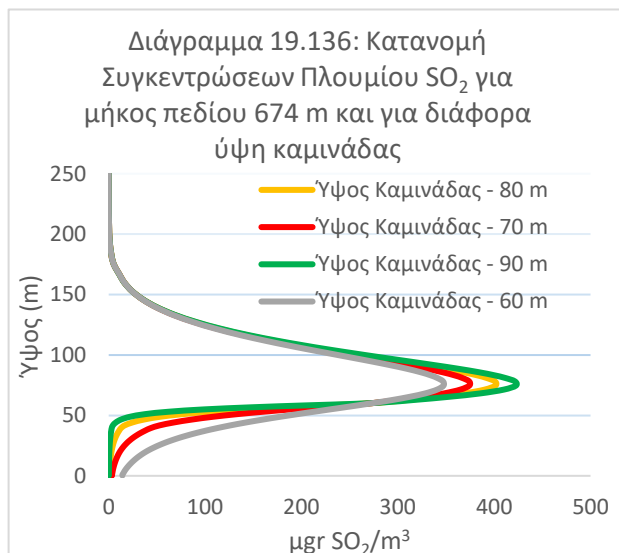
Επίσης προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ύψος της καμινάδας, τόσο αυξάνεται η ανύψωση του πλουμίου που δίνει χαμηλότερες συγκεντρώσεις και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την καμινάδα.



Οι κατανομές της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (στον άξονα συμμετρίας στην διεύθυνση Χ) ως προς το ύψος του πεδίου ροής, φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις από την καμινάδα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Στο ίδιο ύψος και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, οι συγκεντρώσεις μειώνονται. Παράλληλα όσο μεγαλώνει το ύψος της καμινάδας τόσο αυξάνεται και η ανύψωση του πλουμίου.

Αν θεωρήσουμε σαν σημείο αναφοράς ένα συγκεκριμένο μήκος πεδίου ροής (π.χ. τα 2.713 m) παρατηρούμε ότι σε αύξηση κατά 10 m του ύψους της καμινάδας οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής κατά 18 % μέσο όρο περίπου. Η συνολική μείωση είναι της τάξης του 40,48% για καμινάδα ύψους 90 m.

### 19.5 Αδιάστατη Συγκέντρωση

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 15.5, χρησιμοποιήθηκε ο αδιάστατος αριθμός συγκέντρωσης. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις: η πρώτη αφορούσε προσομοιώσεις με σταθερή παροχή καυσαερίων από την έξοδο της καμινάδας σε διαφορετικές ταχύτητες οριζόντιας ταχύτητας, η δεύτερη προσομοιώσεις σε διαφορετικές ταχύτητες και παροχές καυσαερίων.

Η σταθερή παροχή καυσαερίων είναι αυτή που έχει προκύψει από τις μέσες τιμές των λειτουργικών παραμέτρων για το έτος 2018 που έχουν χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις. Σαν τραχύτητα εδάφους έχει ληφθεί υπόψη αυτή με τιμή 0,3 και έχουν εξεταστεί δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή με κώνο και χωρίς. Επίσης στον υπολογισμό της αδιάστατης συγκέντρωσης έχει ληφθεί υπόψη η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου.

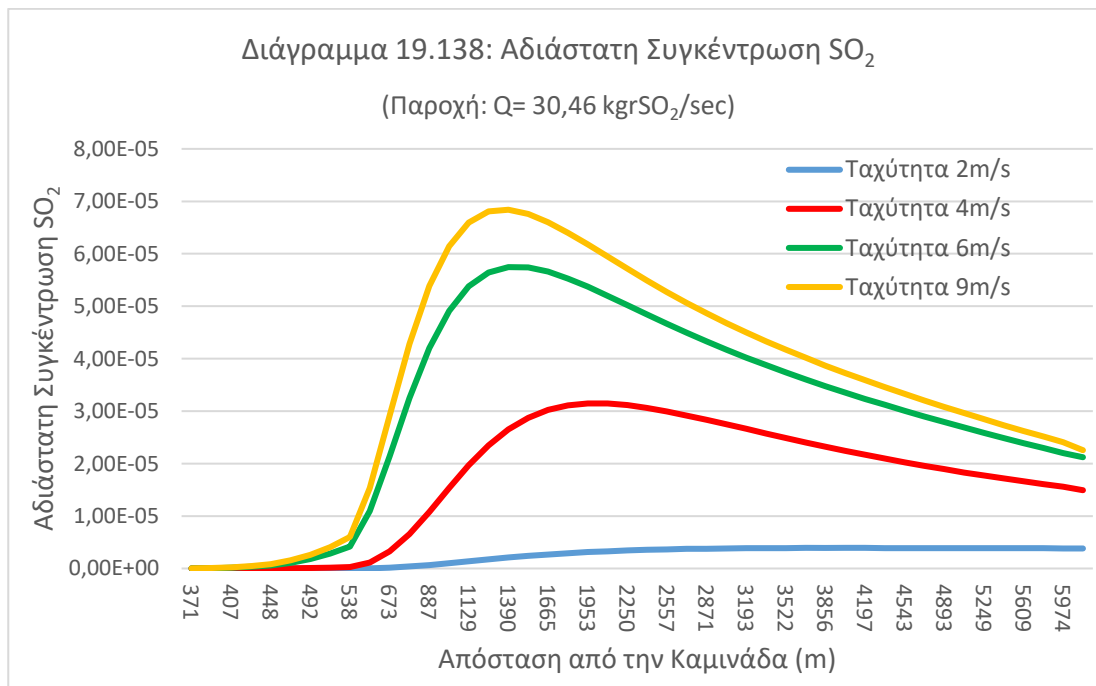
Από τα διαγράμματα που ακολουθούν είναι εύκολο να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις στο επίπεδο της αναπνοής γρήγορα και με μεγάλη αξιοπιστία, χωρίς να χρειαστεί η χρήση υπολογιστικού κώδικα.



### 19.5.1 Αδιάστατη Συγκέντρωση με Συγκεκριμένη Παροχή

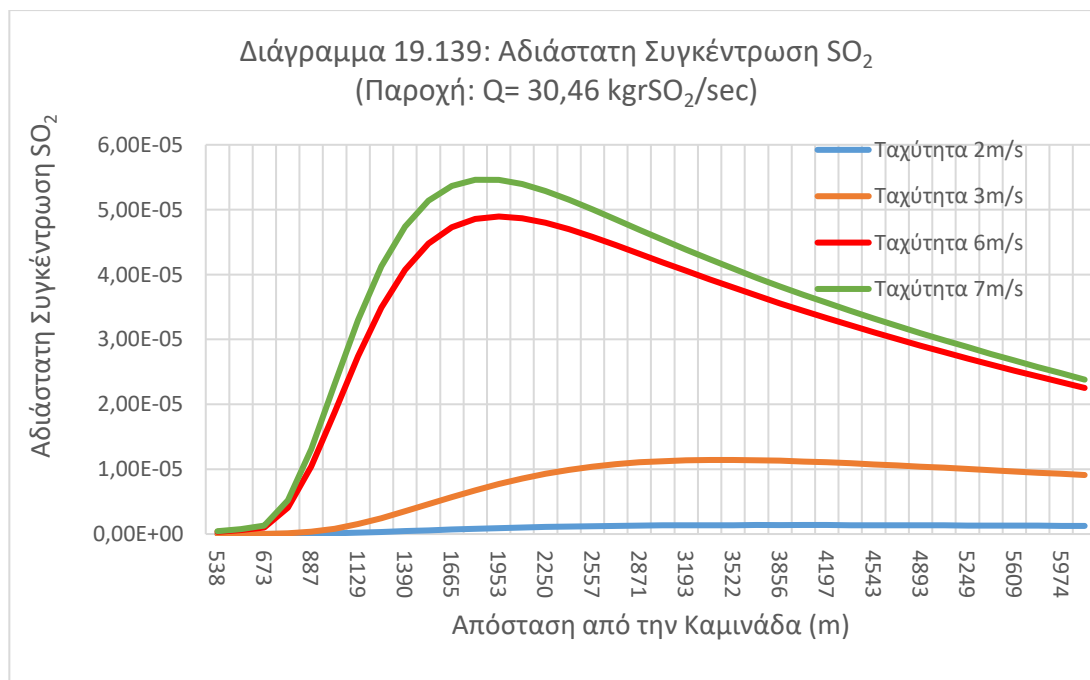
#### Καμινάδα χωρίς Κώνο

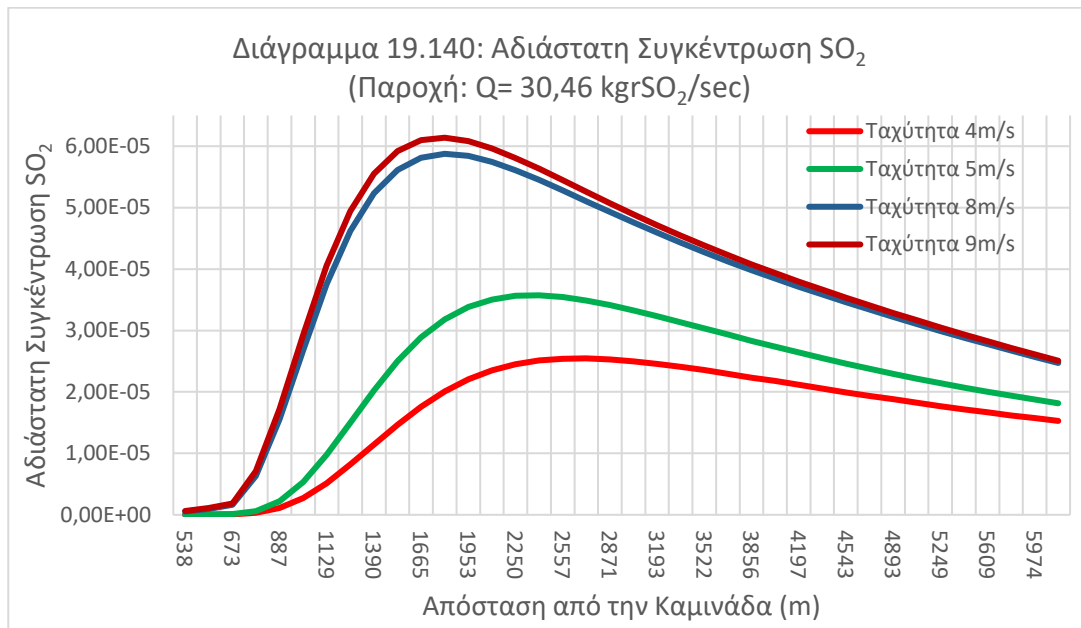
Η σταθερή παροχή της καμινάδας, είναι 30,46 kg<sub>r</sub>/sec και στο διάγραμμα που ακολουθεί περιλαμβάνονται ταχύτητες ανέμου 2, 4, 6 και 9 m/s.



#### Καμινάδα με Κώνο

Προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα με τα ανάλογα του κεφαλαίου 19.6.1.1 συμπεράσματα. Εδώ εξετάστηκαν ταχύτητες ανέμου 2, έως 9 m/s.





### 19.5.2 Υπολογισμός Συγκέντρωσης από την Αδιάστατη Συγκέντρωση

Έχοντας γνωστή από τα παραπάνω διαγράμματα την αδιάστατη συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου σε συγκεκριμένο μήκος του πεδίου ροής, η συγκέντρωση (kgr SO<sub>2</sub> ανά kgr καυσαερίων) προκύπτει από τον παρακάτω τύπο.

$$C = \frac{QC_{non\ dimensional}}{\rho w L^2} \quad 19.1$$

όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα

$C$ : η συγκέντρωση του ρύπου εκφρασμένη σαν kgr ρύπου ανά kgr καυσαερίων

$w$ : η οριζόντια ταχύτητα αέρα

$L$ : το μήκος της καμινάδας

$Q$ : Ρυθμός έκλυσης καυσαερίων

Ο ρυθμός έκλυσης καυσαερίων έχει υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο.

$$Q = \rho v A \quad 19.2$$

όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα των καυσαερίων

$v$ : η ταχύτητα εκροής καυσαερίων από την καμινάδα

$A$ : η επιφάνεια εκροής καυσαερίων από την καμινάδα

Στη συνέχεια από την συγκέντρωση του SO<sub>2</sub> εκφρασμένη σαν kgr SO<sub>2</sub> ανά kgr καυσαερίων, υπολογίζουμε τον ρυθμό εξόδου του διοξειδίου του θείου από τους παρακάτω τύπους.

$$kgr\ SO_2/s = CQ \quad 19.3$$



όπου:

C: η συγκέντρωση του SO<sub>2</sub> εκφρασμένη σαν kgr SO<sub>2</sub> ανά kgr καυσαερίων

Q: Ρυθμός έκλυσης καυσαερίων

$$\frac{kg\ SO_2}{hr} = kg\ SO_2/s * 3600 \quad 19.4$$

Στο τέλος υπολογίζουμε την συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου ως εξής.

$$\frac{mgr\ SO_2}{Nm^3\ καυσαερίων} = \frac{\frac{kg\ SO_2}{hr}}{0,000001 \frac{Nm^3\ καυσαερίων}{hr}} \quad 19.5$$

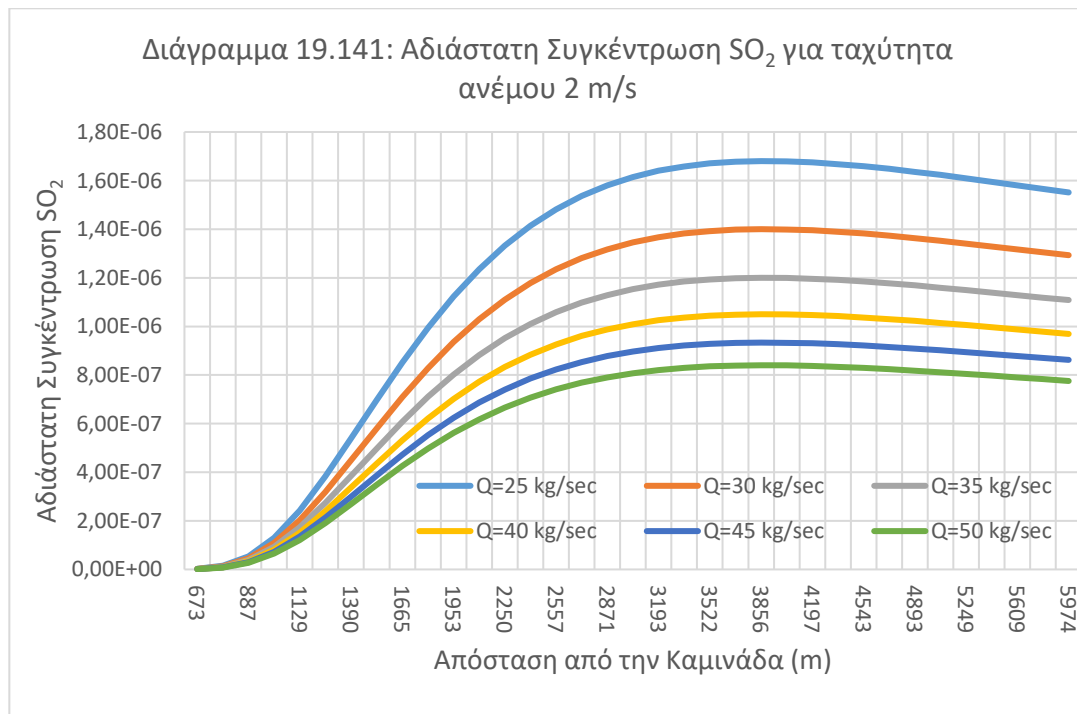
όπου:

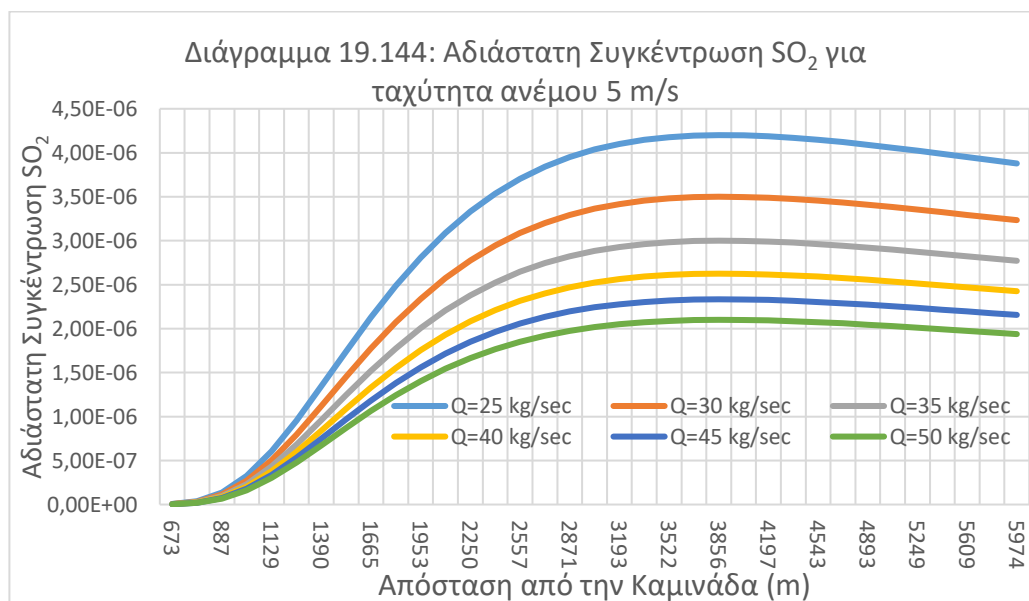
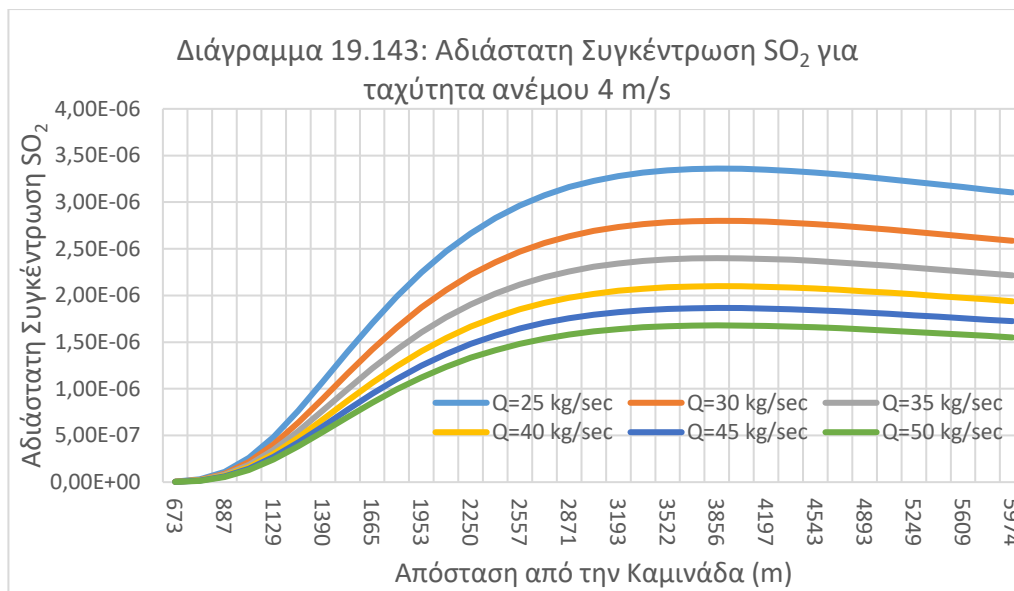
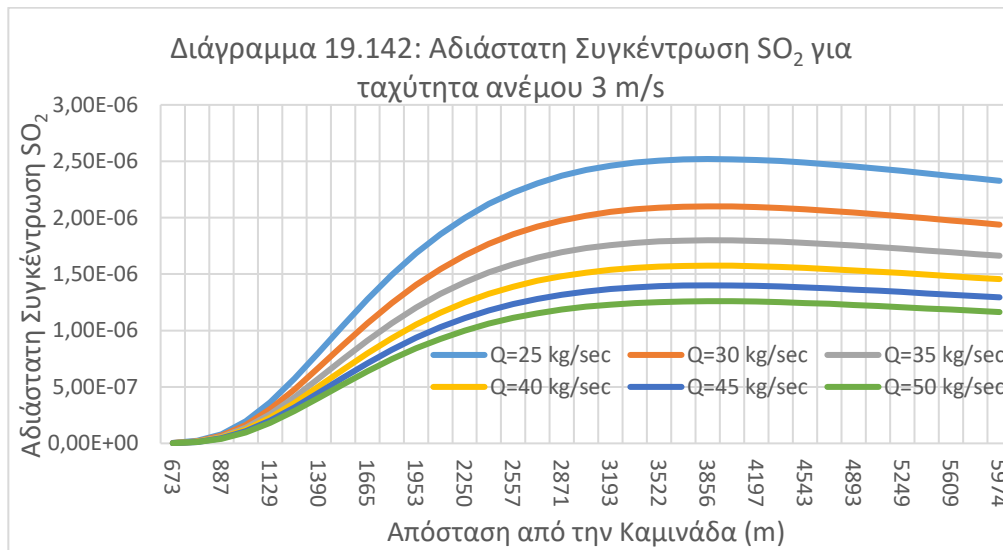
ο ρυθμός εξόδου έχει υπολογιστεί από τις σχέσεις 19.3 και 19.4 και ο ρυθμός εξόδου των καυσαερίων είναι γνωστός από τα δεδομένα της εγκατάστασης.

### 19.5.3 Αδιάστατη Συγκέντρωση με Διαφορετικές Παροχές

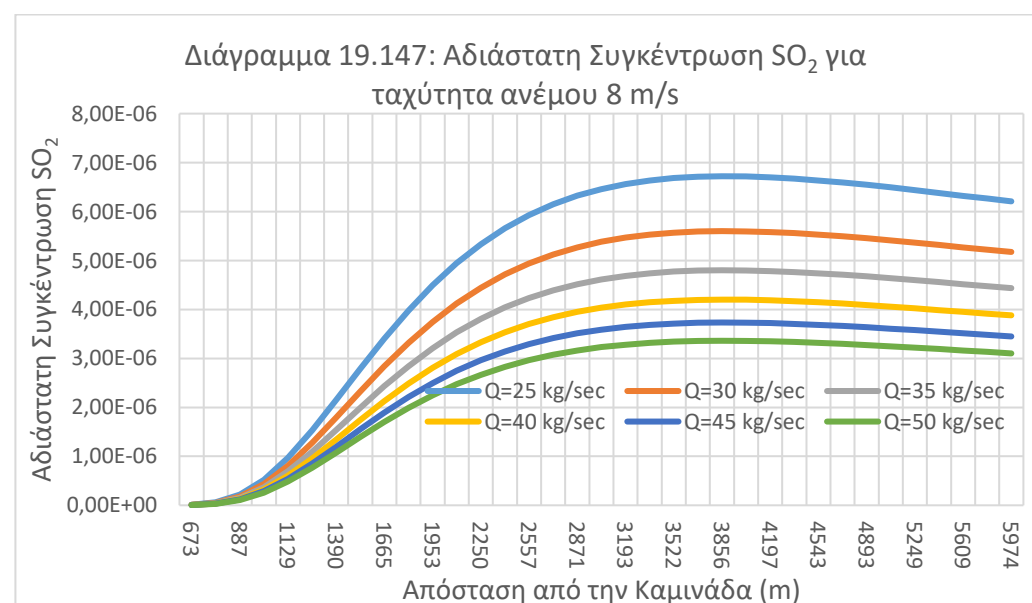
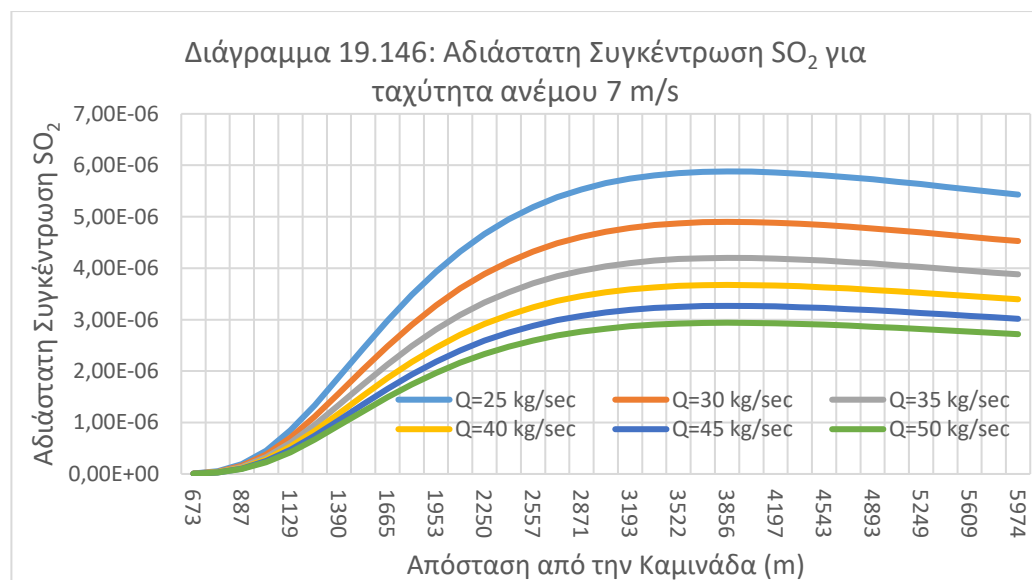
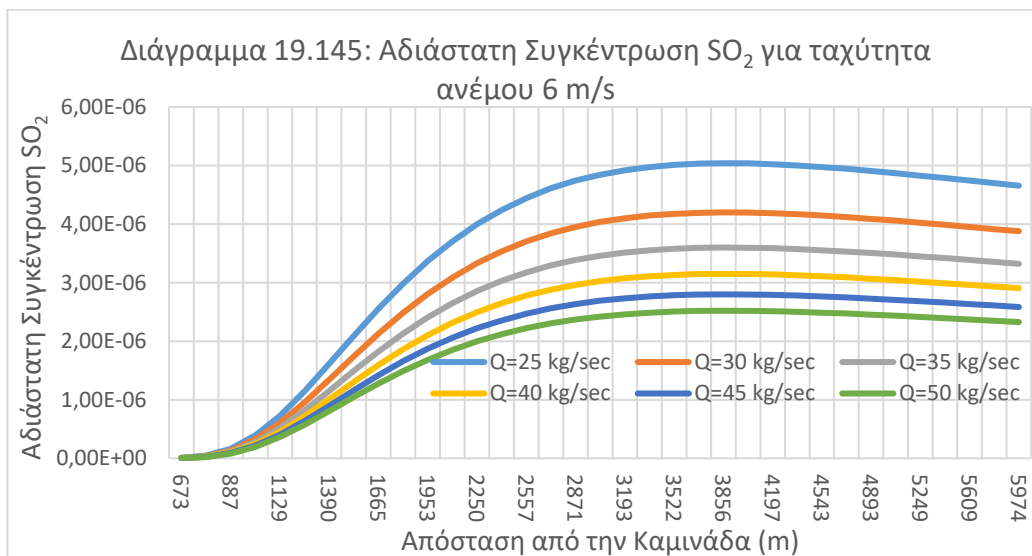
Έχουν γίνει προσομοιώσεις για ταχύτητες ανέμου από 2 έως 9 m/s. Για κάθε ταχύτητα έχουν εξεταστεί διάφορες παροχές καυσαερίων από την καμινάδα. Έχει ληφθεί υπόψη στις προσομοιώσεις μόνο καμινάδα με κώνο και τραχύτητα εδάφους 0,3.

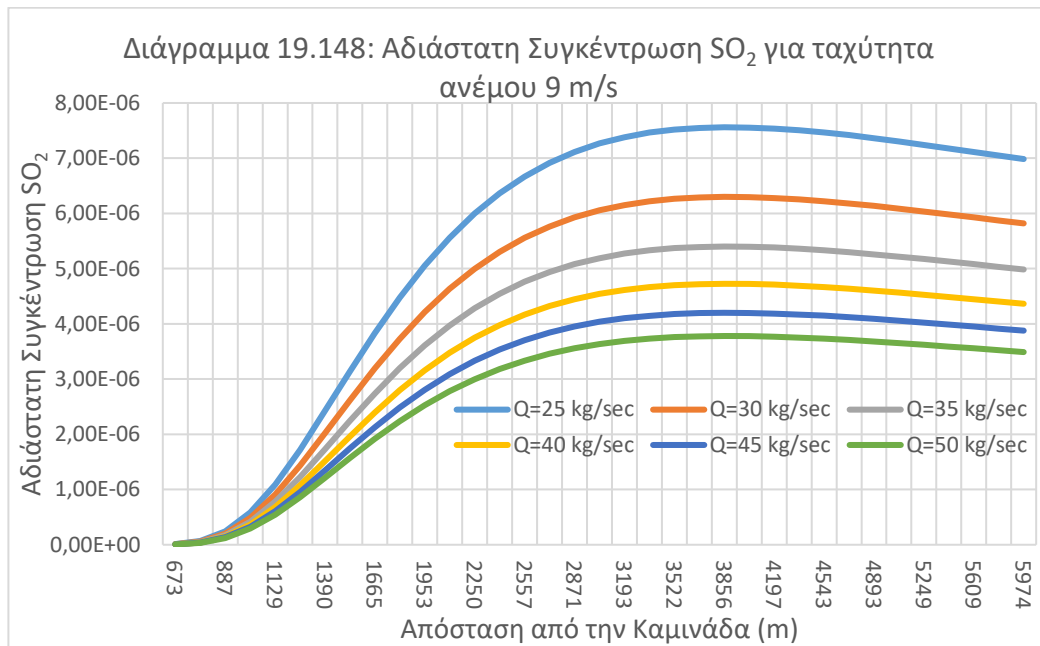
Και εδώ από τα διαγράμματα που ακολουθούν είναι εύκολο να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις στο επίπεδο της αναπνοής γρήγορα και με μεγάλη αξιοπιστία, χωρίς να χρειαστεί η χρήση υπολογιστικού κώδικα.











Έχοντας γνωστή από τα παραπάνω διαγράμματα την αδιάστατη συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου σε συγκεκριμένο μήκος του πεδίου ροής, μπορούμε να υπολογίζουμε την συγκέντρωση του σύμφωνα με όσο αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 19.5.2.

#### 19.5.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Αδιάστατης Συγκέντρωσης

Για καμινάδα χωρίς κώνο και από το διάγραμμα 19.138, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μειώνεται η ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα να δίνει υψηλότερες αδιάστατες συγκεντρώσεις και κατά επέκταση συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Επίσης όσο μειώνεται η ανύψωση του πλουμίου (αύξηση ταχύτητας ανέμου), οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα.

Για την καμινάδα με κώνο από τα διαγράμματα 19.139 και 19.140, καθώς και από τα αντίστοιχα του κεφαλαίου 19.5.3, παρατηρούμε τα εξής:

- Σε σταθερή ταχύτητα ανέμου όσο αυξάνεται η παροχή των καυσαερίων, τόσο αυξάνεται η ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα να δίνει μικρότερες αδιάστατες συγκεντρώσεις και κατά επέκταση συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου. Κρίσιμος παράγοντας για την αύξηση της παροχής καυσαερίων είναι η ταχύτητα εκροής καυσαερίων από την καμινάδα. Αυτή με την σειρά της επηρεάζεται από τον ρυθμό εκροής ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) των καυσαερίων από την καμινάδα – ανάλογα – και από την επιφάνεια εκροής – αντιστρόφως ανάλογα.
- Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου με παράλληλη αύξηση της παροχής εκροής καυσαερίων, τόσο μειώνεται η ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα να δίνει υψηλότερες αδιάστατες συγκεντρώσεις και κατά επέκταση συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου.

#### 19.6 Εκτίμηση Επίδρασης στην δημόσια υγεία στις πόλεις Ελευσίνας και Μάνδρας

Για την εκτίμηση της επίδρασης της υγείας από την διασπορά ρύπων στις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας, έχουν ληφθεί υπόψη τα παρακάτω δεδομένα.



- Απόσταση καμινάδας από την κεντρική πλατεία της Ελευσίνας, ίση με 2.660 m. Οπότε το μήκος του πεδίου ροής που έχει ληφθεί υπόψη στην εκτίμηση είναι τα 2,713 m που προσεγγίζει περισσότερο το νούμερο των 2.660 m.
- Απόσταση καμινάδας από την κεντρική πλατεία της Μάνδρας, ίση με 3.900 m. Εδώ το μήκος του πεδίου ροής που έχει ληφθεί υπόψη στην εκτίμηση είναι τα 3,856 m που είναι πιο κοντά στο νούμερο των 3.900 m.
- Σύμφωνα με το κεφάλαιο 16.2 οι διευθύνσεις ανέμου που επηρεάζουν τις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας, είναι 225° έως 270° και 180° έως 225° αντίστοιχα. Οι συχνότητες τους δίνονται από τον Πίνακα 16.5.
- Οι Συχνότητες Έντασης Ανέμου συνάρτηση της Διεύθυνσης του Ανέμου έχουν ληφθεί από τον Πίνακα 16.5.
- Σε συνθήκες άπνοιας (0 – 0,5 m/s) έχει θεωρηθεί συχνότητα 100% στον υπολογισμό της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης.
- Τα θεσμοθετημένα Όρια Ποιότητας του Αέρα
- Εξετάζονται δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή χωρίς κώνο και αυτή με κώνο.

#### 19.6.1 Όρια Ποιότητας Αέρα

Προκειμένου να εκτιμηθεί η σοβαρότητα των επιπτώσεων από την ατμοσφαιρική ρύπανση θεωρήθηκαν τα ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (οδηγία 2008/50/ΕΚ) και τα συνέπεια της Ελληνικής Νομοθεσίας (ΦΕΚ 488, 30/3/2011). Θα εστιάσουμε στα όρια που αφορούν το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) και τα αιωρούμενα σωματίδια. Τα όρια παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 19.26: Υφιστάμενα Όρια Ποιότητας Αέρα (Ε.Ε.) [58]

Διοξείδιο του θείου (SO <sub>2</sub> )	Διοξείδιο του αζώτου (NO <sub>2</sub> )
Ωριαία τιμή 350 μg/m <sup>3</sup> (όχι άνω από 24 φορές/ έτος) Περιθώριο Ανοχής 150 μg/m <sup>3</sup> (43%)	Ωριαία τιμή 200 μg/m <sup>3</sup> (όχι άνω από 18 φορές/ έτος)
Ημερήσια τιμή 125 μg/m <sup>3</sup> (όχι άνω από 3 φορές/ έτος)	Ετήσια τιμή 40 μg/m <sup>3</sup>
Ετήσια τιμή για οικοσυστήματα 20 μg/m <sup>3</sup>	
Σωματίδια PM10	
Ημερήσια τιμή: 50 μg/m <sup>3</sup> (όχι άνω από 35 φορές/ έτος)	
Ετήσια τιμή: 40 μg/m <sup>3</sup>	

Οπότε, οι οριακές τιμές για το SO<sub>2</sub> διαμορφώνονται ως ακολούθως:

- Ωριαίες τιμές κάτω των 350 μg/m<sup>3</sup>
- Μέσες ημερήσιες τιμές κάτω των 125 μg/m<sup>3</sup>
- Μέσες ετήσιες τιμές κάτω των 20 μg/m<sup>3</sup>

Αντίστοιχα οι οριακές τιμές για το NO<sub>2</sub> διαμορφώνονται ως ακολούθως:



- Ωριαίες τιμές κάτω των 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Μέσες ετήσιες τιμές κάτω των 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Και οι οριακές τιμές για τα σωματίδια διαμορφώνονται ως ακολούθως:

- Μέσες ημερήσιες τιμές κάτω των 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Μέσες ετήσιες τιμές κάτω των 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

#### 19.6.2 Διοξείδιο του Θείου

Από το κεφάλαιο 19.6.1 έχουμε το νομοθετημένο μέσο ετήσιο όριο να είναι 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και η διάμεση τιμή (βασισμένη σε ωριαίες συγκεντρώσεις) από το σταθμό Ελευσίνας να είναι 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  για το 2018.

Για την πόλη της **Ελευσίνας** έχουμε τους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 19.27: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Θείου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα χωρίς κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου στον κώνο 225 <sup>0</sup> - 270 <sup>0</sup> Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{g}/\text{SO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση στον κώνο 225 <sup>0</sup> - 270 <sup>0</sup> $\mu\text{g}/\text{SO}_2/\text{m}^3$	<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>
Calm - 0,5	100,00%	0,36	0,360	<b>4,003</b>
0,5 -2	2,75%	15,76	0,434	
2-4	4,12%	61,71	2,543	
4-6	0,97%	63,58	0,617	
6-9	0,10%	47,62	0,049	

Πίνακας 19.28: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Θείου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα με κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{g}/\text{SO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{g}/\text{SO}_2/\text{m}^3$	<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>
Calm - 0,5	100,00%	0,32	0,320	<b>3,345</b>
0,5 -2	2,75%	5,34	0,147	
2-4	4,12%	53,83	2,218	
4-6	0,97%	62,80	0,609	
6-9	0,10%	49,42	0,051	

Ανάλογους πίνακες έχουμε και για την πόλη της **Μάνδρας**.



Πίνακας 19.29: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Θείου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα χωρίς κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr SO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr SO}_2/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,4	0,400	2,007
0,5 - 2	1,79%	16,57	0,297	
2-4	1,94%	49,13	0,953	
4-6	0,67%	49,03	0,329	
6-9	0,08%	36,38	0,029	

Πίνακας 19.30: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Θείου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα με κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr SO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr SO}_2/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,4	0,400	1,789
0,5 - 2	1,79%	5,83	0,104	
2-4	1,94%	47,30	0,918	
4-6	0,67%	50,14	0,336	
6-9	0,08%	38,33	0,031	

Για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι  $3,345 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ . Η τιμή αυτή είναι το 33,45% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 16,73% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή είναι  $1,789 \mu\text{gr}/\text{m}^3$  και αποτελεί το 17,89% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 8,95% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Στην περίπτωση καμινάδας χωρίς κώνο, η συνολική μέση τιμή είναι  $4,003 \mu\text{gr}/\text{m}^3$  και  $2,007 \mu\text{gr}/\text{m}^3$  στις πόλεις της Ελευσίνας και της Μάνδρας αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή με κώνο οδηγεί σε μείωση της συνολικής ετήσιας μέσης τιμής κατά 17,5% και 10,5% για τις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας αντίστοιχα.

Σαν γενικό συμπέρασμα καταλήγουμε ότι οι συγκεντρώσεις από τη διασπορά του Διοξειδίου του Θείου από την καμινάδα με κώνο της Μονάδας Κενού (όπως αναφέρθηκε δίνει το 50% περίπου των εκπομπών) ευθύνονται μέχρι ποσοστού 33.45% για την Ελευσίνα και 17.89% για την Μάνδρα των καταγεγραμμένων επιπέδων ρύπανσης, με την επισήμανση ότι για τις εν λόγω πόλεις δεν παρατηρούνται υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ορίων.

### 19.6.3 Διοξείδιο του Αζώτου

Για την πόλη της Ελευσίνας έχουμε τους παρακάτω πίνακες.



Πίνακας 19.31: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Αζώτου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα χωρίς κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,11	0,110	1,303
0,5 - 2	2,75%	6,54	0,180	
2-4	4,12%	19,50	0,804	
4-6	0,97%	20,03	0,194	
6-9	0,10%	15,05	0,015	

Πίνακας 19.32: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Αζώτου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα με κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,1	0,100	1,070
0,5 - 2	2,75%	2,21	0,061	
2-4	4,12%	17,01	0,701	
4-6	0,97%	19,84	0,193	
6-9	0,10%	15,62	0,016	

Ανάλογους πίνακες έχουμε και για την πόλη της Μάνδρας.

Πίνακας 19.33: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Αζώτου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα χωρίς κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,13	0,130	0,668
0,5 - 2	1,79%	6,88	0,123	
2-4	1,94%	15,53	0,301	
4-6	0,67%	15,49	0,104	
6-9	0,08%	11,93	0,010	

Πίνακας 19.34: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Διοξειδίου του Αζώτου στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα με κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr NO}_2/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,13	0,130	0,580
0,5 - 2	1,79%	2,42	0,043	
2-4	1,94%	14,95	0,290	
4-6	0,67%	15,85	0,106	
6-9	0,08%	12,55	0,010	



Για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι 1,070  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ . Η τιμή αυτή είναι το 5,35% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 2,67% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή είναι 0,580  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  και αποτελεί το 2,90% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 1,45% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Στην περίπτωση καμινάδας χωρίς κώνο, η συνολική μέση τιμή είναι 1,303  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  και 0,668  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  στις πόλεις της Ελευσίνας και της Μάνδρας αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή με κώνο οδηγεί σε μείωση της συνολικής ετήσιας μέσης τιμής κατά 17,9% και 4,6% για τις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας αντίστοιχα.

Σαν γενικό συμπέρασμα καταλήγουμε ότι οι συγκεντρώσεις από τη διασπορά του Διοξειδίου του Αζώτου από την καμινάδα της Μονάδας Κενού ευθύνονται μέχρι ποσοστού 5.35% για την Ελευσίνα και 2.90% για την Μάνδρα των καταγεγραμμένων επιπέδων ρύπανσης, ήτοι σε πολύ μικρό ποσοστό.

#### 19.6.4 Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)

Για την πόλη της **Ελευσίνας** έχουμε τους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 19.35: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Αιωρούμενων Σωματιδίων στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα χωρίς κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,004	0,004	0,05
0,5 - 2	2,75%	0,30	0,008	
2-4	4,12%	0,72	0,030	
4-6	0,97%	0,74	0,007	
6-9	0,10%	0,56	0,001	

Πίνακας 19.36: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Αιωρούμενων Σωματιδίων στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα με κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,004	0,004	0,04
0,5 - 2	2,75%	0,10	0,003	
2-4	4,12%	0,63	0,026	
4-6	0,97%	0,73	0,007	
6-9	0,10%	0,58	0,001	

Ανάλογους πίνακες έχουμε και για την πόλη της **Μάνδρας**.



Πίνακας 19.37: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Αιωρούμενων Σωματιδίων στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα χωρίς κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,005	0,005	0,026
0,5 - 2	1,79%	0,31	0,006	
2-4	1,94%	0,57	0,011	
4-6	0,67%	0,57	0,004	
6-9	0,08%	0,44	0,000	

Πίνακας 19.38: Μέση Ετήσια (2018) Συγκέντρωση Αιωρούμενων Σωματιδίων στο επίπεδο του εδάφους για καμινάδα με κώνο

Ένταση Ανέμου	Διεύθυνση Ανέμου (225 - 270) Συχνότητα	Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	Μέση (2018) Συγκέντρωση $\mu\text{gr PM}/\text{m}^3$	ΣΥΝΟΛΟ
Calm - 0,5	100,00%	0,005	0,005	0,022
0,5 - 2	1,79%	0,11	0,002	
2-4	1,94%	0,55	0,011	
4-6	0,67%	0,59	0,004	
6-9	0,08%	0,46	0,000	

Για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι 0,04  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ . Η τιμή αυτή είναι το 0,16% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 0,10% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή είναι 0,022  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  και αποτελεί το 0,09% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 0,005% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου.

Στην περίπτωση καμινάδας χωρίς κώνο, η συνολική μέση τιμή είναι 0,05  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  και 0,0026  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  στις πόλεις της Ελευσίνας και της Μάνδρας αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή με κώνο οδηγεί σε μείωση της συνολικής ετήσιας μέσης τιμής κατά 20,0% και 15,4% για τις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας αντίστοιχα.





## 20. Γενικά Συμπεράσματα

### 20.1 Εισαγωγή

Ο κύριος σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον και στην δημόσια υγεία από τη λειτουργία καμινάδας διυλιστηρίου. Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή επιχειρείται ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων στο επίπεδο του εδάφους ατμοσφαιρικών ρύπων που προέρχονται από το φούρνο της Μονάδας Κενού του διυλιστηρίου της Ελευσίνας.

Επιπλέον διερευνώνται η επίδραση στην ανύψωση του πλουμίου των ρυπαντών από την τραχύτητα του εδάφους, την ύπαρξη ειδικού κώνου αύξησης της ταχύτητας εκροής των καυσαερίων στην καμινάδα και το ύψος της καμινάδας. Στο τέλος αναπτύχθηκε μια πολύ καλή βάση δεδομένων για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ρυπαντών στο επίπεδο του εδάφους χωρίς τη χρήση υπολογιστικού κώδικα ρευστομηχανικής.

Έχει επιλεγεί η συγκεκριμένη καμινάδα γιατί δίνει τις μισές περίπου εκπομπές διοξειδίου του θείου επί συνόλου των εκπομπών από όλες μαζί τις καμινάδες. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 12, η λύση της εργασίας έγινε με τη χρήση του υπολογιστικού κώδικα ρευστομηχανικής PHOENICS, ο οποίος είναι ένας κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD).

Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων από τη λειτουργία του φούρνου, οι συγκεντρώσεις στο επίπεδο του εδάφους συγκρίνονται με τα θεσμοθετημένα όρια ποιότητας του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος που ισχύουν σήμερα και από την Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της Ατμόσφαιρας 2018 του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας [57].

### 20.2 Τραχύτητες Εδάφους 0,1 και 0,3

Η αύξηση της τραχύτητας εδάφους προκαλεί μείωση της ανύψωσης του πλουμίου των ρύπων με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις στο επίπεδο του εδάφους και επιπλέον οι μέγιστες συγκεντρώσεις να παρουσιάζονται σε μικρότερες σχετικά αποστάσεις από την καμινάδα. Επίσης ανάλογα φαινόμενα παρατηρούνται και με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Μάλιστα σε πολύ ισχυρούς ανέμους (και στις δύο τιμές τραχύτητας), το πλούμιο έχει παρόμοια συμπεριφορά σε μεγάλες αποστάσεις από την καμινάδα.

### 20.3 Καμινάδα με ή χωρίς Κώνο

Η καμινάδα με ειδικό κώνο αύξησης της ταχύτητας εκροής των καυσαερίων παρουσιάζει μεγαλύτερη ανύψωση του πλουμίου των ρύπων σε σχέση με αυτήν χωρίς κώνο, με αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεων στο επίπεδο του εδάφους σε αποστάσεις μέχρι 4.000 m από την καμινάδα, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις οι συγκεντρώσεις είναι παρόμοιες. Η μείωση αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Για χαμηλές ταχύτητες ανέμου η μείωση είναι της τάξης έως 300% για την καμινάδα με κώνο.
- Για μέτριες ταχύτητες ανέμου η μείωση είναι μικρότερη (της τάξης του 20%).
- Για ισχυρές ταχύτητες η μείωση είναι έως 10% και παρατηρείται σε μικρότερες αποστάσεις από την καμινάδα (στα 1.953 μέτρα).



- Σε πολύ ισχυρούς ανέμους οι συγκεντρώσεις και στις δύο περιπτώσεις καμινάδας είναι παρόμοιες.

#### 20.4 Βέλτιστο Ύψος Καμινάδας

Για καμινάδα με κώνο, όσο αυξάνεται το ύψος της έχουμε μείωση συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου στο επίπεδο του εδάφους. Αύξηση κατά 10 m του ύψους της καμινάδας οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου στο επίπεδο αναπνοής κατά 19% μέσο όρο περίπου. Η συνολική μείωση είναι της τάξης του 50,00% κατά μέσο όρο για καμινάδα ύψους 90 m. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται το ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου ανά 10 m αύξησης ύψους καμινάδας.

Υψηλότερη καμινάδα οδηγεί σε μεγαλύτερο ενεργό ύψος, άρα αυξημένη ανύψωση του πλουμίου. Η μείωση αυτή είναι πιο ελαφριά σε ύψη καμινάδας από 80 m σε 90 m. Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι το βέλτιστο ύψος της καμινάδας είναι τα 80 m.

#### 20.5 Αδιάστατη Συγκέντρωση

Έχει αναπτυχθεί για την συγκεκριμένη καμινάδα μια πολύ καλή βάση δεδομένων που συνδυάζει τις διάφορες τιμές παροχής της καμινάδας και ταχύτητας ανέμου. Μέσω της αδιάστατης συγκέντρωσης διοξειδίου του θείου γρήγορα και με σχετική ακρίβεια μπορεί να προσδιοριστεί η συγκέντρωση του ρύπου στο επίπεδο του εδάφους χωρίς τη χρήση υπολογιστικού κώδικα ρευστομηχανικής.

#### 20.6 Επίδραση στην Δημόσια Υγεία για τις πόλεις Ελευσίνας και Μάνδρας

Για την εκτίμηση της επίδρασης της δημόσιας υγείας από την διασπορά ρύπων στις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας σε ετήσια βάση, συμπεραίνεται ότι η διασπορά των ρύπων από καμινάδα διυλιστηρίου ευθύνεται για μικρό σχετικά μέρος των μετρούμενων συγκεντρώσεων ρύπων σε ετήσια βάση στις εν λόγω πόλεις, στις οποίες μάλιστα δεν καταγράφονται υπερβάσεις των νομοθετημένων οριακών τιμών. Πιο συγκεκριμένα:

Ως προς το διοξείδιο του θείου για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι το 33,45% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 16,73% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή αποτελεί το 17,89% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 8,95% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή με κώνο οδηγεί σε μείωση της συνολικής ετήσιας μέσης τιμής κατά 17,5% και 10,5% για τις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας αντίστοιχα.

Ως προς το διοξείδιο του αζώτου για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι το 5,35% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 2,67% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Για την πόλη της Μάνδρας η τιμή αποτελεί το 2,90% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 1,45% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή με κώνο οδηγεί σε μείωση της συνολικής ετήσιας μέσης τιμής κατά 17,9% και 4,6% για τις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας αντίστοιχα.

Σχετικά με τα αιωρούμενα σωματίδια για την καμινάδα με κώνο η συνολική μέση τιμή για την πόλη της Ελευσίνας είναι το 0,16% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 0,10% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Για την πόλη



της Μάνδρας η τιμή αποτελεί το 0,09% της μετρούμενης ετήσιας τιμής από το Σταθμό της Ελευσίνας και το 0,005% του νομοθετημένου ετήσιου ορίου. Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις καμινάδας, αυτή με κώνο οδηγεί σε μείωση της συνολικής ετήσιας μέσης τιμής κατά 20,0% και 15,4% για τις πόλεις της Ελευσίνας και Μάνδρας αντίστοιχα.

#### 20.7 Προτάσεις για Ανάπτυξη της Εργασίας

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είχε κύριο στόχο όπως αναφέρθηκε, την προσομοίωση της διασποράς του πλουμίου ρύπων από καμινάδα διυλιστηρίου. Επειδή εχθρός του καλού είναι το καλύτερο, έτσι δίνεται το έναυσμα για επέκταση της παρούσας εργασίας σε μελλοντική έρευνα για θέματα και σημεία που χρήζουν περαιτέρω ανάλυση, προσεγγίζοντας ακόμα περισσότερο την βιομηχανική διεργασία.

Επομένως προτείνονται τα παρακάτω:

Στη παρούσα εργασία έγινε μελέτη των διασπορών σε συνθήκες αδιαβατικής ατμόσφαιρας. Σαφώς θα ήταν καλύτερο να μελετηθούν και οι περιπτώσεις ευσταθούς και ασταθούς ατμόσφαιρας. Έτσι θα είναι πιο σαφές το πεδίο συγκεντρώσεων για κάθε πιθανή ατμοσφαιρική κατάσταση.

Η προσομοίωση της διασποράς των ρύπων έγινε με την παραδοχή ότι η γεωμετρία του πεδίου ροής είναι αρκετά απλή. Έτσι η προσομοίωση θα μπορούσε να γίνει με πολύπλοκη μορφολογία εδάφους - εξοπλισμού και να συνεκτιμηθεί η επίδραση του γειτονικού εξοπλισμού στην ανάπτυξη του φαινομένου της διασποράς.

Η προσέγγιση της διασποράς έγινε για μια καμινάδα του διυλιστηρίου. Θα μπορεί να επεκταθεί για το σύνολο των καμινάδων, ώστε να έχουμε την συνολική εκτίμηση της διασποράς ρύπων από την εγκατάσταση.

Η συγκεκριμένη εργασία έγινε με χρήση του μοντέλου τύρβης RNG derived  $k\sim\epsilon$ , λόγω των καλύτερων αποτελεσμάτων που δίνει για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Ωστόσο η χρήση άλλων μοντέλων όπως του  $k\sim\omega$ , των μεγάλων δινών (LES) και των πολύ μεγάλων δινών (VLES) θα είναι καλό να εξεταστεί, αφού είναι εξίσου πολύ γνωστά και σε αρκετές περιπτώσεις με καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το RNG derived  $k\sim\epsilon$ .



## 21. Βιβλιογραφία – Παραπομπές

- [1]: Θ. Κουϊμπτζή, Κ. Φυτιάνου, Κ. Σαμαρά, 'Χημεία Περιβάλλοντος', Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1987
- [2]: Οξενκιουν Μ., Πετροπούλου, «Περιβάλλον - Ατμοσφαιρική Ρύπανση», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1996
- [3]: Lipton Lynch, 'Handbook of Health Hazard Control in Chemical Process Industry', Εκδόσεις John Wiley 1994
- [4]: Α. Κ. Αναγνωστόπουλος 'Η Ρύπανση του Περιβάλλοντος', Έκδοση 3η ΑΠΘ, 1993
- [5]: Γ. Βαλκανάς 'Ρύπανση του Περιβάλλοντος', Εκδ. ΠΑΠΑΖΗΣΗ, 1992
- [6]: Μελάς Δημήτριος, 'Διασπορά Αερίων Ρύπων', Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1997
- [7]: Ε. Κωτσοβίνου 'Ρύπανση και Προστασία Περιβάλλοντος' Εκδ. Γ. ΦΟΥΝΤΑΣ, 1993
- [8]: Λεμονίδης, Π., (2003). Αριθμητική προσομοίωση διασποράς βιομηχανικών οσμηρών ουσιών από πολλαπλές βιομηχανικές καμινάδες. Πιλοτική εφαρμογή σε μονάδα τεχνητής ξυλείας, Διπλωματική Εργασία Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- [9]: Τσιώκου Ελένη, (2003). Προσομοίωση διασποράς οσμηρών ουσιών από σημειακές και εμβαδικές πηγές σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις τεχνητής ξυλείας. Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ : Υπολογιστική Μηχανική, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- [10]: Τεχνολογία Περιβαλλοντικών Μετρήσεων Ενότητα #8: Η Ατμόσφαιρα της Γης - Το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα Δρ Κ.Π. Μουστρής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ
- [11]: Hanna, S. R., Briggs G. A., Hosker, R. P., (1982). Handbook on atmospheric diffusion, Technical Information Center, U.S Department of Energy, (Απόδοση στα Ελληνικά Καθ. Ε.Π. Γ. Μπεργελές).
- [12]: 'Διασπορά Ρύπων- Εμβάθυνση στα φαινόμενα μεταφοράς', Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009-2010.
- [13]: Ventilation Factor by Dr. Nolan Atkins, Lyndon State College, 'Air Pollution Dispersion'.
- [14]: Beychok, Milton R., 'Fundamentals Of Stack Gas Dispersion' (4th Edition ed.). author-published. ISBN 0-9644588-0-2. (Chapter 8, page 124), 2005.
- [15]: Χρήστος Δ. Αργυρόπουλος, Διπλωματική Εργασία, 'Προσομοίωση διασποράς τοξικών ρύπων και εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιές σε δεξαμενές καυσίμων για την εφαρμογή της οδηγίας Seveso II', 2006.
- [16]: Δημήτριος Κ. Φεΐδαρος, Διπλωματική Εργασία, 'Μαθηματική Προσομοίωση Διασποράς & Εναπόθεσης Ρύπων' 1997.
- [17]: <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AtmosphericChemistry>



- [18]: Features of Dispersion Models publication of the European Union Joint Research Centre (JRC).
- [19]: DEGADIS Technical Manual and User's Guide (US EPA's download website).
- [20]: SLAB User's Manual.
- [21]: HEGADIS Technical Reference Manual.
- [22]: Bosanquet, C.H. and Pearson, J.L., 'The spread of smoke and gases from chimney', Trans. Faraday Soc., 32:1249 ,1936.
- [23]: Κιτσάκης Παναγιώτης, Διπλωματική Εργασία, 'Προσομοίωση της διασποράς αέριων ρύπων λέβητα κεντρικής θέρμανσης γύρω από κτήρια του Πολυτεχνείου Κρήτης' 2010.
- [24]: UNIT 31 Vacuum Distillation Unit Εγχειρίδιο Λειτουργίας της ΕΛΠΕ/ΒΕΕ.
- [25]: Data Sheet 31-H-001 της ΕΛΠΕ/ΒΕΕ.
- [26]: Παρουσίαση Ενότητα 9η: Δομή Λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Νικόλαος Χ. Μαρκάτος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ και Θεοδώρα Ξενίδου, Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ.).
- [27]: Υπολογιστική Ρευστοδυναμική – Σημειώσεις (Νικόλαος Χ. Μαρκάτος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ).
- [28]: Τυρβώδη Φαινόμενα Μεταφοράς και Μαθηματικά Πρότυπα Προσομοίωσης τους (Νικόλαος Χ. Μαρκάτος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ), 1998.
- [29]: Pasquill, F., (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteorol. Mag., 90: 33-49.
- [30]: Application of  $k-\epsilon$  model to the stable ABL: Pollution in complex terrain Huser A. Pål Jahre Nilsen, Helge Skåttun (1997)
- [31]: Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα ΕΜΠ «Υπολογιστική Μηχανική» 'Υπολογιστικές Μέθοδοι στη Διασπορά Ρυπαντών". Αν. Καθ. Δημήτρης Μπούρης
- [32]: Launder, B. E. and Spalding, D. B., (1972). Lectures in Mathematical models of turbulence, Academic Press, New York.
- [33]: Launder, B. E. and Spalding, D. B., (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flow, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp: 269-289.
- [34]: Yakhot V and Orszag A (1986) Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory, Journal of Scientific Computing, Vol. 1, No. 1, pp: 3-51.
- [35]: Κεφαλάς, Δ., (2004). Μελέτη επιπτώσεων ατυχήματος – Φωτιάς σε υπαίθρια αποθήκη φυτοφαρμάκων, Διπλωματική Εργασία Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- [36]: Στουρνάς Σ., Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., (2002). Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα



- [37]: Χαλουλάκου, Α., (2005). Σχεδιασμός Εγκαταστάσεων Αντιρύπανσης Επεξεργασία Αιωρούμενων Σωματιδίων και Αερίων Αποβλήτων. Σημειώσεις παραδόσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα
- [38]: Μαρκάτος, Χ. Ν., (1988). Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [39]: Versteeg, H. K., Malalasekera, W., (1995). An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Longman Group Ltd, London.
- [40]: Van Doormal, J.P. and Raithby, G.D. Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. Numerical Heat Transfer, vol. 7, pp 147-163, 1984.
- [41]: Stone, H. L. Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations. SIAM J. Numer. Anal., Vol. 5, pp. 530-558, 1968.
- [42]: PI Process Indicator, Version 3.6.1.184 της OSIsoft LLC, 1993
- [43]: Εκτίμηση Επιπτώσεων από την Εκδήλωση Φωτιάς σε Χώρους Αποθήκευσης Χημικών, Μ.Ν. Χριστόλη, Περιβαλλοντολόγου DEA, Ν.Χ. Μαρκάτου, Καθηγητή ΕΜΠ & τ. Πρύτανη, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Νοέμβριος 2015
- [44]: Leonard, B. P. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on Quadratic Upstream Interpolation Comput. Methods Appl. Mech. Eng. Vol. 19, pp: 59-98.
- [45]: Markatos, N. C. and Pericleous, K. A., (1984) Int. J. Heat Mass Transfer. Vol 27, No. 5, pp: 755-772.
- [46]: TR 326 PHOENICS-VR Reference Guide, page 98
- [47]: Καλλιόπη Βουρουτζή, Πτυχιακή Εργασία, «Γκαουσιανά Μοντέλα Ποιότητας Αέρα RAM και ISC3. Εφαρμογή Προσομοιώσεων Για Τις Συγκεντρώσεις Του SO<sub>2</sub>» Θεσσαλονίκη 2011.
- [48]: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών «meteo.gr».
- [49]: Ατμοσφαιρική Ρύπανση – Κεφάλαιο 5 «course 109\_2195», Τμήμα Φυσικής Πανεπιστημίου Πατρών.
- [50]: CFD simulation of neutral ABL flows – Xiaodong Zhang Risø-R-1688(EN) - Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, April 2009.
- [51]: EN 15259 (2007): Air quality - Measurement of stationary source emissions - Requirements for measurement sections and sites and for the measurement objective, plan and report. Annex C – Conversion to reference quantities.
- [52]: Wolfgang Rodi: Turbulence Models and their Application in Hydraulics. A state of the Art Review A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000.
- [53]: Ατμόσφαιρα – Ατμοσφαιρική Ρύπανση. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών. Γιάννης Ζιώμας, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Αθήνα 2007.



[54]: Κασσωμένος Π., Ανάλυση καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια επεισοδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθήνας, Τομέας Εφαρμογών Φυσικής, 1993.

[55]: Ζιώμα Ι., προσωπική ανακοίνωση, 1998

[56]: P. Zannetti, Air Pollution Modeling, Computational Mechanics, Publications, 1990.

[57]: Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της Ατμόσφαιρας, Μάιος 2018, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Περιβαλλοντικής Πολιτικής, Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής & Ποιότητας Ατμόσφαιρας, Τμήμα Ποιότητας της Ατμόσφαιρας.

[58]: ΦΕΚ 488, 30/3/2011, Μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/EK «για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 21ης Μαΐου 2008».

[59]: SM – QG – 05 - Monitoring Oxides of Nitrogen, SEPA, Scottish Environment Protection Agency.

[60]: Hamma ST Improvements to the Gaussian Model Atmosphere Turbulence and Air Pollution Modelling. Atmospherics Sciences Library D, Reidel Publishing Company 1982.

[61]: «An Introduction to CFD. The Finite Volume Method» H K Versteeg and W Malalasekera , Longman 1996.

[62]: «Υπολογιστική Ρευστοδυναμική». Ν.Μαρκάτου και Δ.Ασημακόπουλου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1998.

[63]: «A Hazard Identification and Parametric Analysis of Toxic Pollutants Dispersion from Large Liquid Hydrocarbon Fuel-Tank Fires». C D Argyropoulos, M N Christolis, Z S Nivolianitou, N C Markatos.

[64]: «Advances in Energy Research», Vol 16, Edited by Morena J Acosta, 11/2013, Nova Science Publishers, ISBN : 978-1-62808-827-4.

[65]: «Recent Advances on the numerical modelling of turbulent flows, Applied Mathematical Modelling, 01/2015: 399” ». C D Argyropoulos and N C Markatos, pp693-732, 2015.

[66]: «Dynamic Computer Modelling of environmental systems for decision making, risk assessment and design, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 03/2012,7(2) ». DOI: 10.1002/apj.654, N C Markatos.