

# Α.Τ.Ε.Ι ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ



**ΘΕΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ**

**ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

**SUBJECT: ELECTROSTATIC FILTERS**

**OPERATING PRINCIPLE AND INSTALLATION**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:**

ΒΩΒΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α.Μ:4999

ΠΑΤΡΑ 2013

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

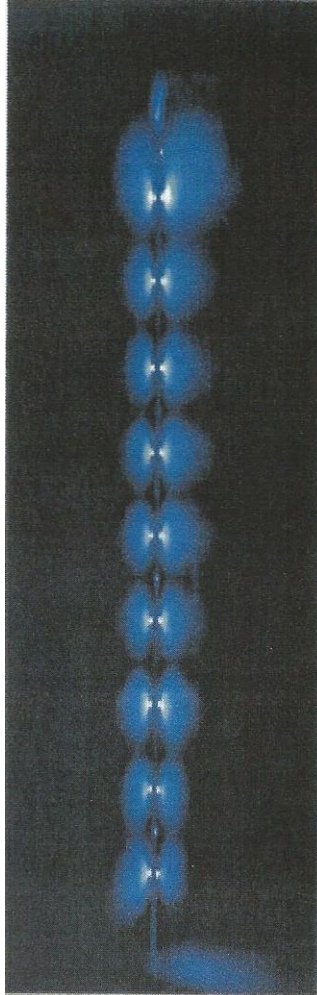
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ2 : ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ.....	7
2.1. ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....	19
2.1.1. Διαστασιολόγηση των πλακών.....	19
2.2 ΚΟΡΟΝΑ .....	20
2.3 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ .....	23
2.4. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	27
2.5 ΠΛΑΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΡΜΑΤΑ.....	30
2.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΚΟΝΗΣ .....	32
2.7 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	34
2.8 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΠΝΑΕΡΙΩΝ.....	38
2.9 ΚΟΣΤΟΣ.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	42
3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΦΙΛΤΡΟΥ.....	42
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΚΓΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΘΕ ΒΑΘΜΙΔΑΣ.....	43
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα τα τελευταία χρόνια αποκτούν όλο και ευρύτερη χρησιμότητα σε εφαρμογές χαμηλής και υψηλής ισχύος. Η χρήση των ηλεκτροστατικών φίλτρων είναι κατάλληλη ιδιαίτερα σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άνθρακα για τη συλλογή της ιπτάμενης τέφρας. Η εργασία αυτή αναφέρεται στην ανάλυση και τη χρησιμότητα των ηλεκτροστατικών φίλτρων. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα είναι πλάκες οι οποίες διαρρέονται από συνεχές ρεύμα υψηλής τάσεως. Έτσι, τα σωματίδια της τέφρας, περνώντας ανάμεσα από αυτές τις πλάκες ιονίζονται και προσκολλώνται πάνω τους απ' όπου περισυλλέγονται με διάφορες μεθόδους (ταλάντωση, με σφυριά κλπ). Το υλικό απ το οποίο είναι κατασκευασμένη η πλάκα ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου είναι από χάλυβα με νεύρα ενίσχυσης. Τα συγκεκριμένα φίλτρα έχουν 2 ειδών αιτίες κατανάλωσης ενέργειας: η ηλεκτρική ενέργεια για την κορόνα(ο ιονισμός των μορίων του αερίου από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στην περιοχή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου) και η πτώση πίεσης με την ενέργεια της κορόνας να είναι η κύρια αιτία. Το κόστος διαφοροποιείται ανάλογα με τη θέση κατασκευής του φίλτρου, την εποχή του έτους και του διαθέσιμου χώρου. Για την εύρεση του κόστους κατασκευής ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου ο Vatanuk ανέπτυξε μια εξίσωση όπου πολλαπλασιάζει την καθαρή επιφάνεια πλάκας με την τιμή αγοράς.

Τέλος στην εργασία αυτή αναφερόμαστε στη λειτουργία των ηλεκτροστατικών φίλτρων, στον υπολογισμό και στις βαθμίδες λειτουργίας τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΡΟΛΟΓΟΣ



*Καθώς περπατούσα στο παλάτι της Αυτού Μεγαλειότητας στο Whitehall σύννεφο καπνού εισέβαλε με τέτοιο τρόπο στην αυλή ώστε οι άνθρωποι δύσκολα μπορούσαν να διακρίνουν ο ένας τον άλλο εξαιτίας του σύννεφου και αυτό δεν ήταν τίποτε άλλο από το καταχθόνιο και θλιβερό σύννεφο του κάρβουνο μια βρώμικη και πυκνή ομίχλη, συνοδευόμενη από ένα αιθαλώδη και ανυπόφορο αέρα. John Evelyn 1661*

Το προηγούμενο απόσπασμα επιλέχτηκε ως εισαγωγή για το συγκεκριμένο θέμα γιατί αποδεικνύει ξεκάθαρα ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση

δεν είναι ένα φαινόμενο αλλά αποτελούσε πρόβλημα σε μερικές περιοχές εδώ και αιώνες.

Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με τον Te BRAKE (1975) ο καπνός από τη καύση του κάρβουνου από τους ασβεστοκάμινους στο Λονδίνο ήταν ένα σοβαρό πρόβλημα από το 1285. Η κατάσταση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο Λονδίνο διαρκούσε και το 1307 και ο βασιλιάς Εδουάρδος I απαγόρευσε την καύση κάρβουνου στις ασβεστοκάμινους.

Κατά το τελευταίο τέταρτο του 14ου αιώνα το πρόβλημα ελαττώθηκε για να ξαναεμφανιστεί στα μέσα του 16ου αιώνα. Σύμφωνα με τον BRAKE (1975), οι περίοδοι κορύφωσης του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο προβιομηχανικό Λονδίνο αντιστοιχούν κατά προσέγγιση με τις περιόδους αύξησης του πληθυσμού και τις περιόδους κρίσεων, με άλλα λόγια το κάρβουνο καιγόταν όταν τα καυσόξυλα διέρχονταν από περιόδους ανεπαρκούς προσφοράς ή υψηλών τιμών.

Τα δάση της Βρετανίας ήταν αντικείμενο πολλών πιέσεων που είχαν σχέση με το πληθυσμό συμπεριλαμβανομένων των αναγκών για καλλιεργήσιμη γη, για δομικά υλικά κατασκευών, και για καύσιμη ύλη. Η αιφνιδιαστική αλλαγή κατά το 15ο αιώνα από τη χρήση του ρυπογόνου κάρβουνου στο καθαρό καιγόμενο καυσόξυλο είναι πιθανό να είναι αποτέλεσμα της ξαφνικής και δραστηκής μείωσης του πληθυσμού στο Λονδίνο που προκλήθηκε από το μαύρο θάνατο (πανούκλα).

Σήμερα μεγάλο μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη χρήση καυσίμων για τη βιομηχανική παραγωγή, για τις μεταφορές, και για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Μολονότι μεμονωμένα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης ήταν τοπικής σημασίας τους προηγούμενους αιώνες, η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν απέκτησε παγκόσμιο ενδιαφέρον μέχρι την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης. Η χρήση καυσίμων σε μια χώρα είναι άμεσα συνδεδεμένη με το μέγεθος του πληθυσμού και το βιοτικό επίπεδο.

Από τις αρχές του 1800 , ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει αυξηθεί περίπου κατά μια τάξη μεγέθους, ενώ η κατά άτομο κατανάλωση ενέργειας έχει αυξηθεί περίπου δυο τάξεις μεγέθους. Βεβαίως, πολύ μεγαλύτερες

αυξήσεις, από το μέσο όρο, έχουν γίνει στα βιομηχανικά αστικά κέντρα του πλανήτη. Ως εκ τούτου, δεν προκαλεί έκπληξη ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει αποκτήσει διεθνές ενδιαφέρον στο πρόσφατο παρελθόν.

Ωστόσο, εάν τα επιχειρήματα και τα συμπεράσματα του Τε BRAKE είναι αποδεκτά τότε κάποια από τα αίτια των προβλημάτων ατμοσφαιρικής ρύπανσης της σημερινής κοινωνίας είναι παρόμοια με εκείνα που υπήρχαν 700 χρόνια πριν. Ας ελπίσουμε ότι τα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα θα επιλύονται από τις τεχνολογικές μας ικανότητες και όχι από κάποια δραστική παγκόσμια συμφορά.

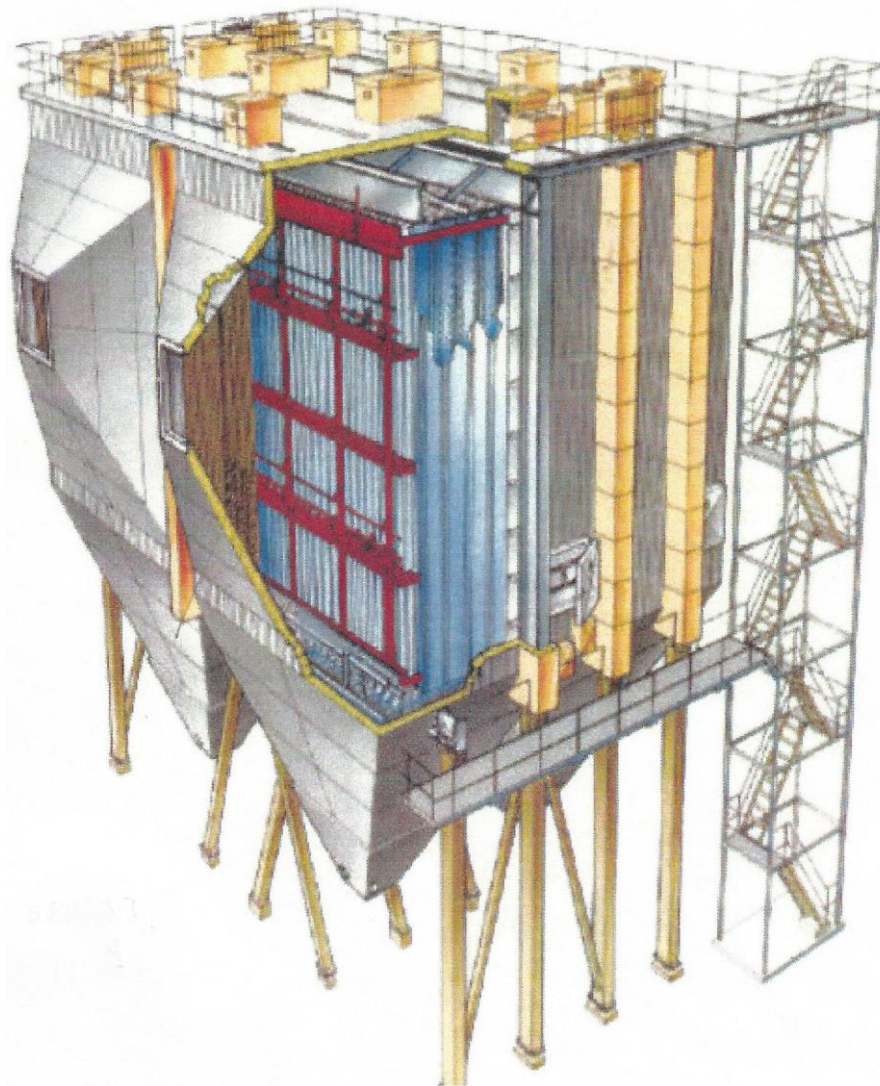
Ας ορίσουμε όμως τη λέξη **ρύπανση**. Σύμφωνα με ένα λεξικό η ρύπανση είναι συνώνυμη της μόλυνσης. Συνεπώς οι αέριοι ρύποι είναι οτιδήποτε μολύνει με κάποιο τρόπο την ατμόσφαιρα. Η ομοσπονδιακή κυβέρνηση όπως και κάθε πολιτεία των ΗΠΑ, έχει ενσωματώσει στη νομοθεσία έναν ακριβέστερο ορισμό για την ατμοσφαιρική ρύπανση. Ο ορισμός της νομοθεσίας στην πολιτεία της Φλόριντα είναι ο ακόλουθος.

Ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η παρουσία στην εξωτερική ατμόσφαιρα οποιονδήποτε ενός ή περισσοτέρων ουσιών ή ρύπων σε ποσότητες οι οποίες είναι ή μπορεί να είναι επιβλαβείς ή επιζήμιες για την ανθρώπινη υγεία ή ευεξία, για την ύπαρξη των ζώων και των φυτών, ή των περιουσιών, ή αδικαιολόγητα παρεμβαίνουν στις απολαύσεις της ζωής και της περιουσίας συμπεριλαμβανομένης και της υπαίθριας αναψυχής. (Διοικητικός κώδικας της Φλόριντα 1982).

Ο παραπάνω ορισμός σε συνδυασμό με την εισαγωγή στο πρόβλημα της αέριας ρύπανσης δημιουργεί την γέννηση μιας νέας επιστήμης που θα ασχολείται με τον έλεγχο της αέριας ρύπανσης και σκοπό θα έχει το σχεδιασμό αντιρρυπαντικής τεχνολογίας. Η αντιρρυπαντική λοιπόν τεχνολογία έχει ανακαλύψει κάποια «εργαλεία» μερικά εκ των οποίων είναι: οι κυκλώνες, τα σακόφιλτρα, τους πλυντρίδες σωματιδίων, και τα ηλεκτροστατικά φίλτρα.

Στο θέμα αυτό θα ασχοληθούμε με το τελευταίο τύπο αντιρρυπαντικής τεχνολογίας τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, τις αρχές λειτουργίας τους, τις ιδιαιτερότητες τους και τη συμβολή τους στο περιβάλλον.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ2 : ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ



Σχήμα 1: Πλάγια όψη φίλτρου

Ο σχεδιασμός των ηλεκτροστατικών φίλτρων έχει αποκτήσει νέα σημασία κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Η αυστηρή επιβολή των ορίων καθαρής ατμόσφαιρας μπορεί να απαιτεί περιορισμό ή ακόμη και πλήρη αναστολή εργασιών ολόκληρων μονάδων παραγωγής. Ως εκ τούτου ο σχεδιασμός των ηλεκτροστατικών φίλτρων και η τεχνική πρακτική είναι σήμερα ισοδύναμης σημασίας με αυτή του ίδιου του εξοπλισμού παραγωγής.

Για να δούμε όμως ποιες είναι οι βασικές αρχές που διέπουν τη

λειτουργία αυτού του «εργαλείου». Η διεργασία του διαχωρισμού με ηλεκτροστατικό φίλτρο ή ηλεκτροστατικό κατακρημνιστή περιλαμβάνει τον ιονισμό του αέρα με το ρυπαντικό φορτίο που ρέει ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, τη φόρτιση τη μετακίνηση και τη συλλογή του ρυπαντικού φορτίου στις αντίθετα φορτισμένες πλάκες και την απομάκρυνση των σωματιδίων από τις πλάκες. Τα σωματίδια μπορεί να είναι είτε ξηρές σκόνες είτε υγρά σταγονίδια. Ο αέρας ρέει μέσω του ηλεκτροστατικού φίλτρου αλλά τα σωματίδια αποτίθενται πίσω από τις πλάκες. Το υλικό τινάζεται ή ξεπλένεται από τις πλάκες και συγκεντρώνεται στη βάση του φίλτρου. Το ηλεκτροστατικό φίλτρο είναι το μοναδικό ανάμεσα στις άλλες συσκευές ελέγχου αέρας ρύπανσης στο ότι οι δυνάμεις συλλογής δρουν μόνο στα σωματίδια και όχι σε ολόκληρο το ρεύμα του αέρα. Αυτό το φαινόμενο τυπικά έχει ως αποτέλεσμα μια υψηλή απόδοση συλλογής με μια πολύ χαμηλή πτώση πίεσης του αέρα.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1900, ο Δρ F.G.Cottrell, επιμελητής τότε στο πανεπιστήμιο της California στο BERKLEY, για να βοηθήσει στην εύρεση μιας λύσης σε ένα πρόβλημα λειτουργίας του γειτονικού εργοστασίου παραγωγής H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> στο Pinole της California αρχικά δοκίμασε μια συσκευή φυγοκέντρισης για να συλλέξει την όξινη αχλή αλλά αυτό δεν ήταν επιτυχές.

Το 1906 όλες οι σημειώσεις του καταστράφηκαν στο σεισμό του San Francisco. Αποκαρδιωμένος αλλά μη πρόθυμος να εγκαταλείψει ο Cottrell απέρριψε μια προσφορά για να διευθύνει το τμήμα της χημείας του Texams A&M και επομένως μπορούσε να συνεχίσει την ιδέα του για συλλογή της όξινης αχλής από ηλεκτροστατικό φίλτρο.

Το 1907, ο Cottrell ανέπτυξε ένα μικρό ηλεκτροστατικό φίλτρο το οποίο δούλεψε ικανοποιητικά στην εγκατάσταση στο Pinole και έτσι μια νέα βιομηχανία γεννήθηκε. Κατά τη διάρκεια των επόμενων 10 ετών εγκαταστάθηκαν και αρκετά αλλά ηλεκτροστατικά φίλτρα για εφαρμογές όπως η απομάκρυνση σκόνης από κλίβανο τσιμέντου, αναθυμιάσεων από χυτήρια μολύβδου, πίσσας και πολτού με αλκάλια άλατα χαρτιού. Αυτά τα ηλεκτροστατικά φίλτρα επεξεργάζονταν παροχές αέρα έως 300.000 cfm (cfm:cubic foot/minute, 1 cubic foot/minute=1699.01082 litre/hour).

Περίπου το 1920, εισήχθηκαν οι κλίβανοι κονιορτοποιημένου άνθρακα



σε απάντηση των απαιτήσεων της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κλίβανοι κονιορτοποιημένου άνθρακα ήταν ανώτεροι των τότε διαδεδομένων λεβήτων παραγωγής ενέργειας με τροφοδότηση άνθρακα αλλά παρουσίαζαν ένα νέο πρόβλημα. Μεγάλο μέρος από την τέφρα του άνθρακα από τους κλιβάνους κονιορτοποιημένου άνθρακα ήταν με τη μορφή πολύ μικρών σωματιδίων αιωρούμενων στα απαέρια της καύσης.

Κατά καλή τύχη ήταν διαθέσιμα ηλεκτροστατικά φίλτρα και ήταν πάρα πολύ καλά προσαρμοσμένα στην εργασία απομάκρυνσης αυτών των σωματιδίων. Το πρώτο ηλεκτροστατικό φίλτρο σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με άνθρακα τέθηκε σε λειτουργία το 1923. Μετά από αρκετά χρόνια διευθέτησης διαφόρων προβλημάτων επιτεύχθηκε απόδοση συλλογής 90%. Από τότε περισσότερα από 2000 ηλεκτροστατικά φίλτρα που επεξεργάζονται περισσότερο από 1,3 δισεκατομμύρια acfm έχουν εγκατασταθεί για τη συλλογή της ιπτάμενης τέφρας στις ΗΠΑ. Παρόλο που η βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει το 80% περίπου της συνολικής δυναμικότητας των ηλεκτροστατικών φίλτρων στις ΗΠΑ πολλές άλλες βιομηχανίες χρησιμοποιούν αυτή τη τεχνολογία. Στους υπόλοιπους σημαντικούς χρήστες περιλαμβάνονται, το χαρτί και ο πολτός, ο σίδηρος και ο χάλυβας το τσιμέντο και άλλα βραχώδη προϊόντα και μη - σιδηρούχα μέταλλα.

Τις δεκαετίες του 1930 και 1940 τα ηλεκτροστατικά φίλτρα για την ιπτάμενη τέφρα κατασκευάζονταν έτσι ώστε να επιτυγχάνουν αποδόσεις κοντά στο 95%. Κατά τη δεκαετία του 1950, δίνονταν εγγυήσεις για αποδόσεις 97-98%. Κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1970 οι προδιαγραφές για τα ηλεκτροστατικά φίλτρα συχνό ήταν για αποδόσεις πάνω από 99,5%.

Τα σύγχρονα ηλεκτροστατικά φίλτρα έχουν σχεδιαστεί για αποδόσεις μεγαλύτερες από 99,9%. Θυμηθείτε ότι μια βελτίωση 0,4% στην απόδοση συλλογής αντιπροσωπεύει μια μείωση 80% στις εκπομπές. Επιπλέον στα ξηρά ηλεκτροστατικά φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υγρά ηλεκτροστατικά φίλτρα όταν υπάρχει το ενδεχόμενο για έκρηξη, όταν τα σωματίδια είναι κολλώδη ή είναι υγρά σταγονίδια ή όταν η ψιλή σκόνη έχει υπερβολικά υψηλή ειδική αντίσταση.

Ας περάσουμε σιγά σιγά στη μελέτη των ηλεκτροστατικών φίλτρων τα οποία έχουν κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες συσκευές ελέγχου σωματιδίων

### Πλεονεκτήματα

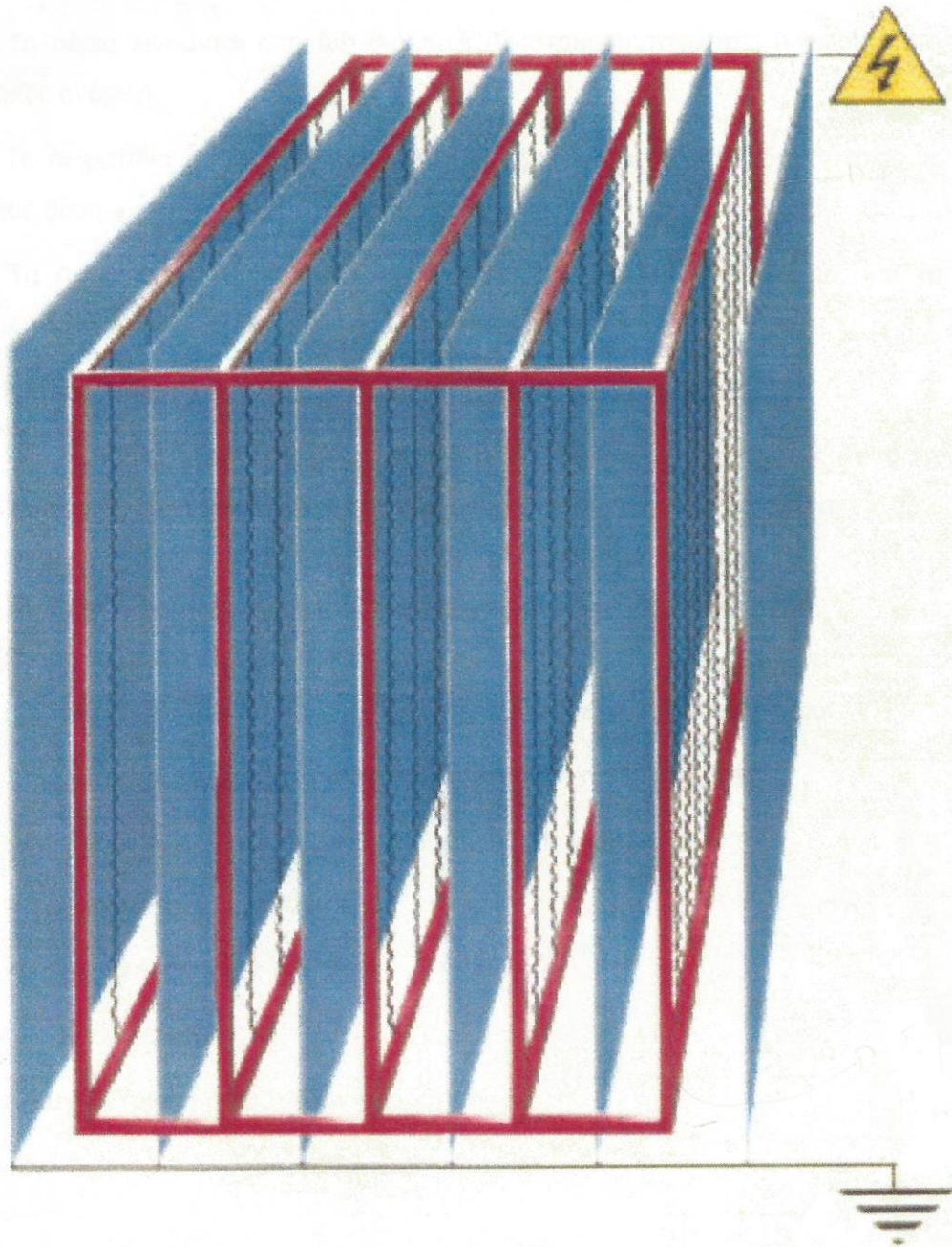
1. Πολύ υψηλές επιδόσεις ακόμη και για πολύ μικρά σωματίδια.
2. Μπορούν να επεξεργάζονται πολύ μεγάλους όγκους αερίου με χαμηλή πτώση πίεσης.
3. Ξηρή συλλογή πολύτιμων υλικών ή υγρή συλλογή για καπνούς και οχλιώματα.
4. Μπορούν να σχεδιαστούν για μια εκτεταμένη περιοχή θερμοκρασιών αερίου.
5. Χαμηλό κόστος λειτουργίας εκτός από τις πολύ υψηλές επιδόσεις.

### Μειονεκτήματα

1. Υψηλό κόστος επένδυσης.
2. Δεν ελέγχουν εκπομπές αερίων.
3. Όχι πολύ ευέλικτα στις μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας από τη στιγμή που θα εγκατασταθούν.
4. Καταλαμβάνουν πολύ χώρο.
5. Είναι πολύ πιθανόν να μη λειτουργούν σε σωματίδια με πολύ υψηλή ηλεκτρική ειδική αντίσταση.

### Θεωρία

Θεωρήστε μια ροή αέρα με σωματίδια σε ένα τετραγωνικό κανάλι ορισμένο από δύο παράλληλες πλάκες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2: Πλάγια πλακών

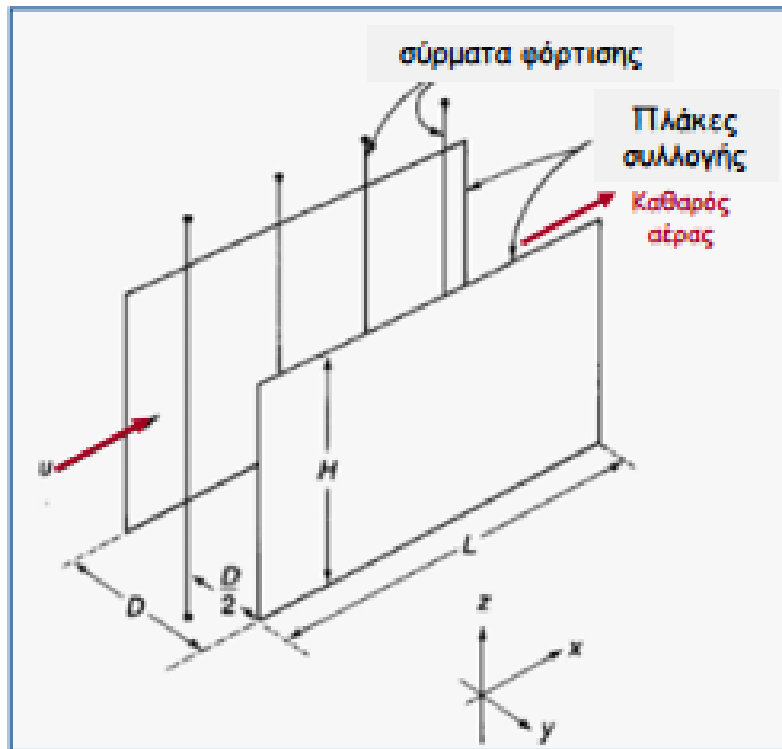
Θεωρήστε μόνο το μισό κανάλι ανάμεσα στα σύρματα φόρτισης και την πλάκα με πλάτος  $D/2$  και ύψος  $H$ .

Με κάποιες παραδοχές μπορούμε να πάρουμε τη βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται στο σχεδιάσμα των ηλεκτροστατικών φίλτρων - εξίσωση Deutsch όπου οι παραδοχές είναι:

1. Τα αέρια κινούνται στη διεύθυνση  $x$  με σταθερή ταχύτητα  $u$  χωρίς

κατά μήκος ανάμιξη.

2. Τα σωματίδια είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στις Y και Z διευθύνσεις σε κάθε θέση x.
3. Τα πεδία φόρτισης και συλλογής είναι σταθερά και ομοιόμορφα, και τα σωματίδια αποκτούν γρήγορα την οριακή ταχύτητα w στη διεύθυνση y.
4. Η επανείσοδος των συλλεχθέντων σωματιδίων είναι αμελητέα.



Η συγκέντρωση σωματιδίων θα μειώνεται με το x λόγω της καθαρής μετακίνησης των σωματιδίων στην πλάκα. Ένα ισοζύγιο μάζας στα σωματίδια που ρέουν μέσα και έξω σε μια πολύ μικρή εγκάρσια τομή του καναλιού δείχνει ότι η διαφορά ανάμεσα στη μάζα των σωματιδίων που ρέουν μέσα και έξω από το λεπτό τμήμα πρέπει να είναι ίση με τη μάζα των σωματιδίων που απομακρύνονται στις πλάκες. Κατά συνέπεια ισχύει ο παρακάτω τύπος (ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ ΣΕ  $\Delta x$  : **[ΕΙΣΟΔΟΣ] – [ΞΕΟΔΟΣ] = [ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ]**):

$$uH \frac{D}{2} C_x - uH \frac{D}{2} C_{x+\Delta x} = \text{mass removed}$$

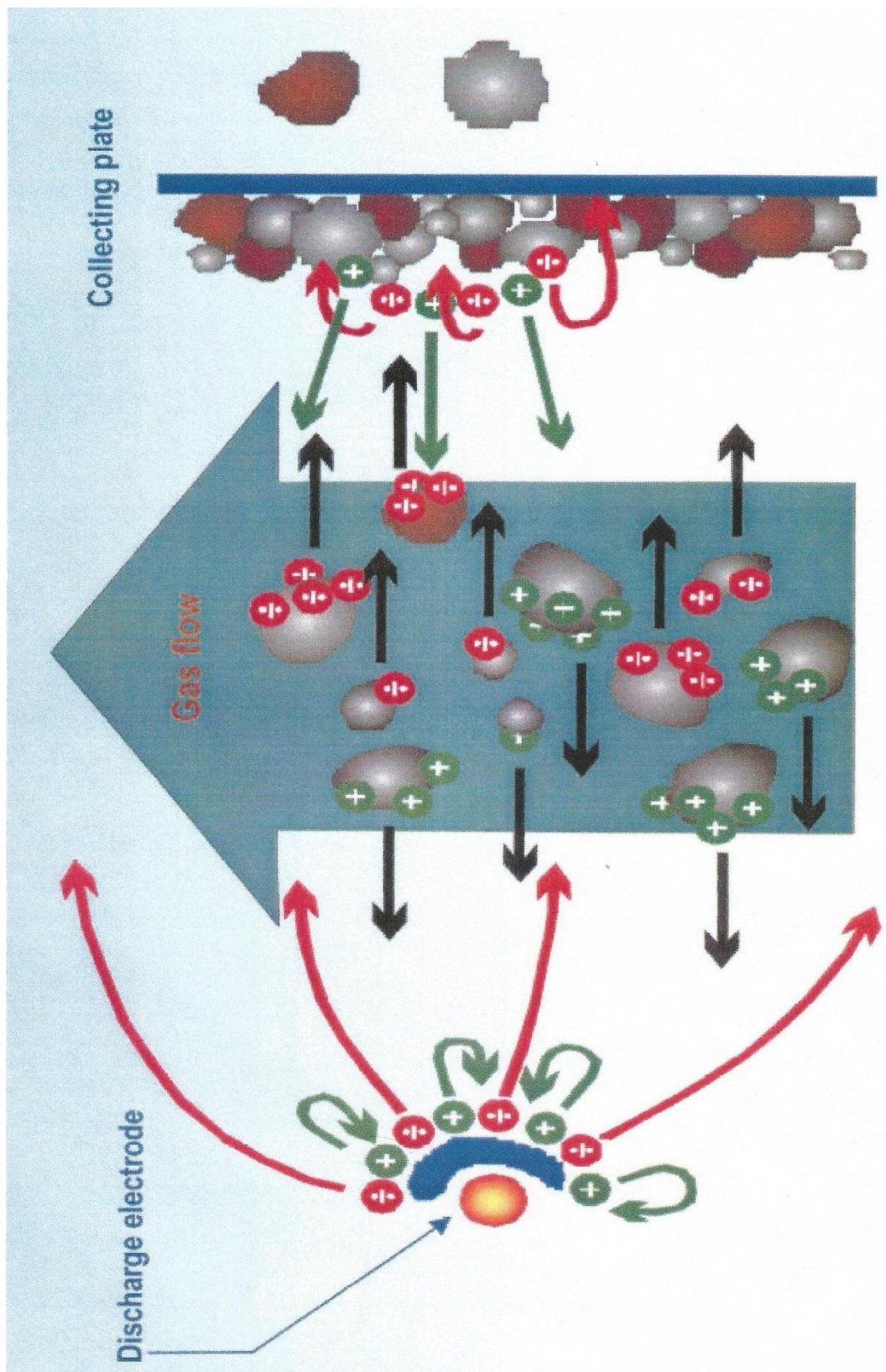
όπου:

$u$  = ταχύτητα αερίου ρεύματος, m/sec

$H$  = ύψος πλάκας, m

$D$  = πλάτος καναλιού, m

$C$  = συγκέντρωση σωματιδίων ή φόρτιση ( $\text{g/m}^3$ )



Σχήμα 3: Διαδικασία Ιονισμού

Ωστόσο η μάζα που απομακρύνεται είναι ίση με τη ροή των σωματιδίων στη διεύθυνση  $y$  επί την επιφάνεια που είναι κάθετη στη ροή. Επομένως η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$uH \frac{D}{2} (C_x - C_{x+\Delta x}) = wC_{x+\Delta x/2} (H \cdot \Delta x)$$

Όπου:

$w$ =ταχύτητα πλαγιολίσθησης (οριακή ταχύτητα στην  $y$  διεύθυνση), m/min.

Διαιρώντας με το  $\Delta x$  και λαμβάνοντας  $\Delta x \rightarrow 0$ :

$$\frac{-uHD}{2} \frac{dC}{dx} = wCH \quad \text{Από 0 μέχρι L} \Rightarrow \ln\left(\frac{C_L}{C_o}\right) = -\frac{2wHL}{uHD} = -\frac{wA_p}{Q}$$

Όπου  $A_p$  η επιφάνεια μιας πλάκας (και οι δύο πλευρές,  $m^2$ ) και  $Q$  η ογκομετρική παροχή του αερίου ρεύματος ( $m^3/s$ ).

Για ολόκληρο το ηλεκτροστατικό φίλτρο χρησιμοποιούμε τη συνολική επιφάνεια  $A$

$$\frac{C_L}{C_o} = \exp\left[-\frac{wA}{Q}\right]$$

Όπου:

$A=2 \cdot H \cdot L$  ( $m^2$ )

$Q=u \cdot H \cdot D$  ογκομετρική παροχή ( $m^3/s$ )

$A/Q$ : Ειδική επιφάνεια συλλογής

$w$  = ταχύτητα πλαγιολίσθησης ( $m/s$ )

Εξίσωση Deutsch – Anderson για την κλασματική απόδοση συλλογής

$$\eta = 1 - \frac{C_L}{C_o} = 1 - \exp\left[-\frac{wA}{Q}\right]$$

Η οριακή ταχύτητα πλαγιολίσθησης  $w$  ισούται με το γινόμενο του χαρακτηριστικού χρόνου του σωματιδίου στο αέριο πολλαπλασιασμένο με την ηλεκτροστατική δύναμη ανά μονάδα μάζας, δηλαδή:

$$w = T' F_E$$

όπου:

$F_E$  = ηλεκτροστατική δύναμη ανά μονάδα μάζας στο σωματίδιο, N/Kg

$\tau'$ : χαρακτηριστικός χρόνος (s) διορθωμένος ως προς τον συντελεστή Cunningham  $C_C$  (=1 για σωματίδια της τάξης του 1-5  $\mu\text{m}$ ).

Σύμφωνα με τον White (1977), η  $F_E$  μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο 3.000 φορές μεγαλύτερη από την δύναμη της βαρύτητας για ένα σωματίδιο 1 $\mu\text{m}$ .

$$\tau' = \frac{C_C \cdot \rho_p \cdot d_p^2}{18 \mu}$$

$\rho_p$  = πυκνότητα σωματιδίων

$d_p$  = διάμετρος σωματιδίων

$C$  = Cunningham correction factor

$\mu$  = ιξώδες αέρα

Η συνολική ηλεκτροστατική δύναμη σε ένα σωματίδιο είναι το γινόμενο του ηλεκτρικού φορτίου  $q$  πολλαπλασιασμένο με την ένταση του πεδίου συλλογής  $E_{CO}$

$$m_p \cdot F_E = q \cdot E_{CO}$$

όπου:

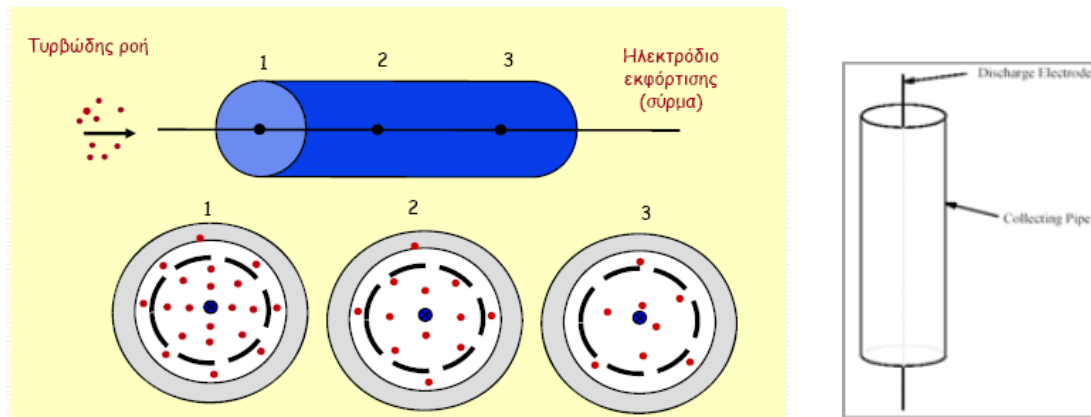
$m_p$  = μάζα σωματιδίου, kg

$q$  = ηλεκτρικό φορτίο στο σωματίδιο, coulombs (c)

$E_{CO}$  = ένταση πεδίου συλλογής, V/m

Τα σωματίδια στο ηλεκτροστατικό φίλτρο φορτίζονται με δύο μηχανισμούς. Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή ηλεκτροστατικού φίλτρου χρησιμοποιεί ένα στεμματόμορφο (corona) αρνητικό πεδίο φόρτισης. Η υψηλή αρνητική τάση (έως 100.000 V) ιονίζει τα μόρια του αερίου δημιουργώντας ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια κυκλοφορούν προς τις γειωμένες πλάκες. Συγκρούονται και προσκολλούνται στα ηλεκτροαρνητικά αέρια δημιουργώντας αρνητικά ιόντα.





Κορόνα (στεμματόμορφο) είναι ο ιονισμός των μορίων του αερίου από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στην περιοχή ενός ηλεκτρικού πεδίου (με υψηλή αρνητική τάση μέχρι και 100.000 V

Κατά τη φόρτιση του πεδίου, τα αρνητικά ιόντα κατευθύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο πάνω στα σωματίδια της σκόνης τα οποία τέμνουν τις γραμμές του πεδίου. Αυτό είναι περισσότερο αποτελεσματικό για σωματίδια μεγαλύτερα από ένα μικρόμετρο. Σωματίδια μικρότερα από 0,2 μm περίπου φορτίζονται περισσότερο αποτελεσματικά με φόρτιση διάχυσης, δηλαδή η φόρτιση μικρών σωματιδίων είναι αποτέλεσμα συγκρούσεων των ιόντων του αερίου και των μικρών σωματιδίων εξαιτίας των τυχαίων κινήσεων του καθενός.

Το θεωρητικό ηλεκτρικό φορτίο κορεσμού πάνω σε ένα σφαιρικό σωματίδιο δίνεται από:

$$q = \pi d_p^2 \epsilon_0 K E_{ch}$$

Όπου

$d_p$  = διάμετρος σωματιδίου, m

$\epsilon_0$  = διηλεκτρική σταθερά του κενού [=  $8,85 \times 10^{-12}$  C/V·m]

$K$  = σταθερά [=  $3 \epsilon / (\epsilon + 2)$  ], Τυπικές τιμές: 1,5 – 2,4

$\epsilon$  = διηλεκτρική σταθερά αναφορικά με το κενό (κενό =1, αέρας = 1,006, για σωματίδια 2-8)

$E_{ch}$  = ένταση ηλεκτρικά φορτισμένου πεδίου (V/m)

Επίσης σύμφωνα από το παραπάνω τύπο ο οποίος αποδεικνύεται από προηγούμενα και λέει ότι:

$$w = \frac{C d_p}{3\mu} \epsilon_0 K E_{ch} E_{co} \quad E_{ch} \approx E_{co} \approx E$$

όπου:

$$w \sim d_p$$

$$w \sim E^2$$

C = συντελεστής διόρθωσης Cunningham

Από τη παραπάνω εξίσωση μπορούμε να δούμε ότι η θεωρητική ταχύτητα πλαγιολίσθησης είναι ανάλογη με τη διάμετρο του σωματιδίου και με το τετράγωνο της έντασης του πεδίου επειδή τα πεδία φόρτισης και συλλογής είναι περίπου ίσα.

Η εξίσωση αυτή είναι ακριβής για λεία σφαιρικά σωματίδια που υπόκεινται σε σταθερές ροές αερίου και σταθερά ηλεκτροστατικά πεδία.

Ωστόσο οι επιπτώσεις από τυχαία σχηματισμένα σωματίδια διάφορων μεγεθών από μεταβολές στην ένταση του πεδίου, από ανομοιομορφίες στη κατανομή της ροής του αερίου και από επανείσοδο των σωματιδίων στα τοιχώματα και η από επανείσοδο κατά τη διάρκεια του τινάγματος συνδυάζονται για να καταστήσουν τη θεωρητική ταχύτητα πλαγιολίσθησης αναξιόπιστη για τη χρήση της παραπάνω εξίσωσης για το σχεδιάσμά ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου.

Στην πράξη μια πραγματική ταχύτητα πλαγιολίσθησης  $We$  αποκτάτε από πιλοτικές μελέτες ή από προηγούμενη εμπειρία με παρόμοιες εφαρμογές ηλεκτροστατικού φίλτρου. Η πραγματική ταχύτητα μετακίνησης μπορεί να ερμηνεύσει τη διείσδυση σωματιδίων εξαιτίας διαρροής του αερίου, την επανασύνδεση και τις απώλειες τινάγματος, κανένα από τα οποία δεν εξηγείται από το μοντέλο της θεωρητικής ταχύτητας πλαγιολίσθησης. Με το

We στη θέση του W στην παραπάνω εξίσωση μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική απαιτούμενη επιφάνεια της πλάκας.

Παρόλο που η εξίσωση αυτή εξυπηρετεί αρκετά καλά τη διαδικασία του αρχικού σχεδιασμού οι κατασκευαστές των ηλεκτροστατικών φίλτρων έχουν περισσότερο λεπτομερή μοντέλα τα οποία τα χρησιμοποιούν για τον οριστικό σχεδιάσμα. Τυπικές τιμές της We είναι 2 με 20cm/s για ιπτάμενη τέφρα από άνθρακα, 6 με 8 cm/s για νεφώματα θειικών οξέων, 6 με 7 cm/s για σκόνες από ξηρό τσιμέντο και 6 με 14 cm/s για σκόνες από υψικαμίλους.

## **2.1. ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

Ο πλήρης σχεδιασμός ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου περιλαμβάνει διαστασιολόγηση και καθορισμό της διαμόρφωσης των πλακών, υπολογισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής διέγερσης, προσδιορισμό των κατασκευαστικών απαιτήσεων και καθορισμό του τινάγματος της απομάκρυνσης της σκόνης και των συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου της λειτουργίας. Εμείς θα αρκεστούμε να μελετήσουμε μόνο τα δυο πρώτα στοιχεία λεπτομερώς.

### **2.1.1. Διαστασιολόγηση των πλακών**

Οι πλάκες σε ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο είναι τυπικά ψηλότερες σε σχέση με το μήκος τους και τοποθετούνται παράλληλα σε ξεχωριστά τμήματα. Η επιφάνεια για τη χρήση της εξίσωσης  $h=1-e(-Wa/Q)$  είναι η επιφάνεια της πλάκας συλλογής, δηλαδή η ενεργή επιφάνεια της πλάκας και όχι η συνολική επιφάνεια της πλάκας. Εάν θεωρήσουμε ένα τμήμα με h πλάκες παράλληλα κατά πλάτος του συνολικού εύρους του ηλεκτροστατικού φίλτρου. Το αέριο ρέει μέσω των αγωγών και έτσι όλες οι h-2 εσωτερικές πλάκες έχουν και τις δυο πλευρές να συλλέγουν σκόνη, δηλαδή ενεργές, ενώ

η καθεμιά από τις δύο εξωτερικές πλάκες μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο τη μια πλευρά. Κατά συνέπεια υπάρχουν  $h-1$  ενεργές πλάκες σε αυτό το τμήμα. Για ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο με  $N_s$  τμήματα στη διεύθυνση της ροής, η συνολική επιφάνεια συλλογής είναι ο συνολικός αριθμός των ενεργών πλακών επί την επιφάνεια της διπλής πλευράς σε κάθε πλάκα.

Δηλαδή:

$$A = A_p (h-1) N_s = A_p (N - N_s)$$

όπου:

$A_p$  = επιφάνεια πλάκας με διπλή πλευρά

$h$  = αριθμός πλακών παράλληλα κατά το πλάτος του εύρους του ηλεκτροστατικού φίλτρου

$N$  = Συνολικός αριθμός πλακών στο ηλεκτροστατικό φίλτρο

$N_s$  = αριθμός τμημάτων στη διεύθυνση της ροής.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του αριθμού των πλακών που απαιτούνται, εφόσον έχουν δοθεί οι διαστάσεις της μιας πλάκας. Τέλος, πρέπει να πούμε πως ο αριθμός των πλακών πρέπει να είναι ακέραιος.

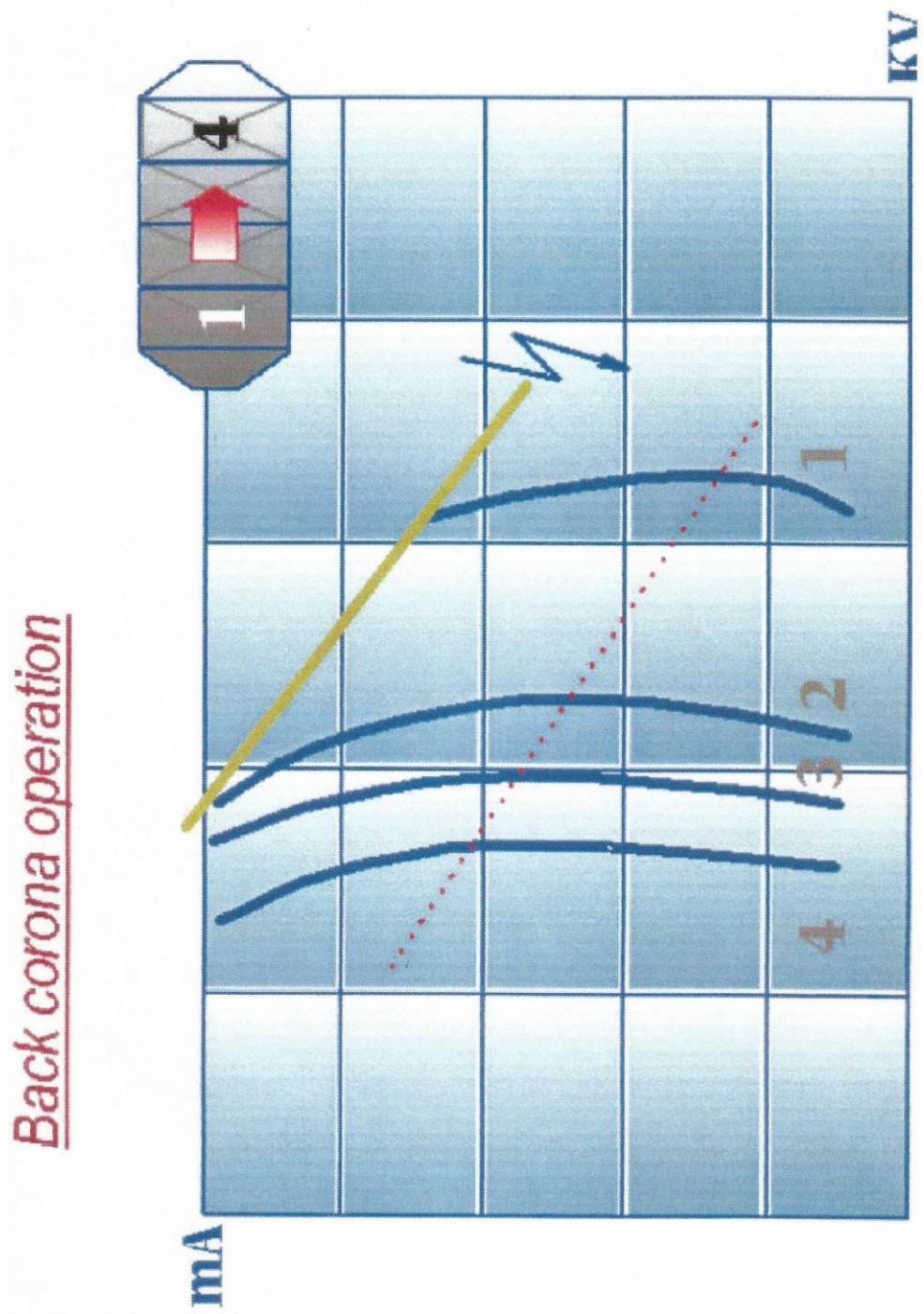
## 2.2 ΚΟΡΟΝΑ

Για να φορτιστούν τα σωματίδια πρέπει να δημιουργηθεί ένα πεδίο. **Κορόνα ή στεμματόμορφη εκκένωση** είναι ο ιονισμός των μορίων του αερίου από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στην περιοχή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Η περίσσεια των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται από τη κορόνα εύκολα προσκολλώνται πάνω στα ηλεκτροαρνητικά αέρια όπως είναι το οξυγόνο ή το  $SO_2$ .

Με τη σειρά τους τα αρνητικά ιόντα που παράγονται απορροφώνται

πάνω στα σωματίδια τα οποία στη συνέχεια μετακινούνται προς στις γειωμένες πλάκες. Τυπικό τα ηλεκτρόδια εκφόρτωσης, δηλαδή τα σύρματα, είναι ενεργοποιημένα ενώ οι πλάκες συλλογής είναι γειωμένες, αλλά τα σύρματα μπορούν να δημιουργήσουν είτε θετική είτε αρνητική κορόνα.

Η αρνητική κορόνα στην οποία τα σύρματα έχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο έχει καλύτερα χαρακτηριστικά τάσης, έντασης και χρησιμοποιείται περισσότερο συχνά. Ωστόσο η αρνητική κορόνα παράγει περισσότερο όζον από ότι παράγει η θετική κορόνα. Γι αυτό το λόγο η θετική κορόνα παρά του ότι είναι λιγότερο αποτελεσματική χρησιμοποιείται για όλες τις εφαρμογές καθαρισμού αέρα εσωτερικού χώρου.



Σχήμα 4:Φαινομενο κορόνα

## 2.3 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Επιπλέον μια άλλη σημαντική ιδιότητα των σωματιδίων είναι η **ειδική αντίσταση**.

Από τη στιγμή που τα σωματίδια έχουν μετακινηθεί σε μια πλάκα θεωρούνται ότι έχουν συλλεχτεί. Ωστόσο, τα συλλεχθέντα σωματίδια μπορεί να επανεισέλθουν μέσα στο αέριο μειώνοντας έτσι την καθαρή απόδοση του ηλεκτροστατικού φίλτρου.

**Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση** της ιπτάμενης τέφρας είναι ένα μέτρο της αντίστασης της στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι εξαιρετικά σημαντική γιατί μπορεί να μεταβάλλεται ευρέως σε μεγάλο εύρος και γιατί επηρεάζει ισχυρά την απόδοση συλλογής των σωματιδίων. Από τη στιγμή που θα συλλεχθούν τα σωματίδια αρχίζουν να χάνουν το φορτίο τους στην πλάκα. Αυτή η μεταφορά φορτίου κλείνει το ηλεκτρικό κύκλωμα, δημιουργεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος και επιτρέπει τη διατήρηση της πτώσης τάσης ανάμεσα στα σύρματα και τις πλάκες. Εάν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι πολύ χαμηλή, δηλαδή η σκόνη είναι καλός αγωγός το ηλεκτροστατικό φορτίο εκκενώνεται πολύ γρήγορα και η σκόνη επανεισέρχεται μέσα στο αέριο. Εάν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι πολύ υψηλή, δηλαδή η σκόνη είναι καλός μονωτής το φορτίο δεν εκκενώνεται στις πλάκες συλλογής. Σε αυτή τη περίπτωση αναπτύσσεται η αντίθετη κορόνα μειώνοντας τον ιονισμό και την πλαγιολίσθηση των σωματιδίων μέσα στο αέριο και τα σωματίδια παραμένουν ισχυρά ελκυσόμενα στην πλάκα και είναι δύσκολο να πιναχθούν.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού προσδιορίζεται πειραματικά διαβιβάζοντας μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω μιας πλάκας γνωστής γεωμετρίας από το υλικό. Είναι σημαντικό να γίνουν μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από προσφάτως συλλεγμένη σκόνη από το πραγματικό ρεύμα του καπναερίου που παράγεται με την καύση του συγκεκριμένου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Κατά συνέπεια τέτοιες μετρήσεις θα έπρεπε να γίνονται στο πεδίο και όχι σε εργαστήριο.

Οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις μετρημένες σε εργαστήριο σε «όμοιες» σκόρες μπορεί να είναι από 100 έως 1000 φορές μεγαλύτερες από τις ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις στο πεδίο. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  είναι απλώς η αντίσταση επί την κάθετη επιφάνεια στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος διαιρεμένη με το μήκος της διαδρομής όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{V A}{I L}$$

όπου

$\rho$  = ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\text{ohm}\cdot\text{cm}$

R = αντίσταση,  $\text{ohm}$

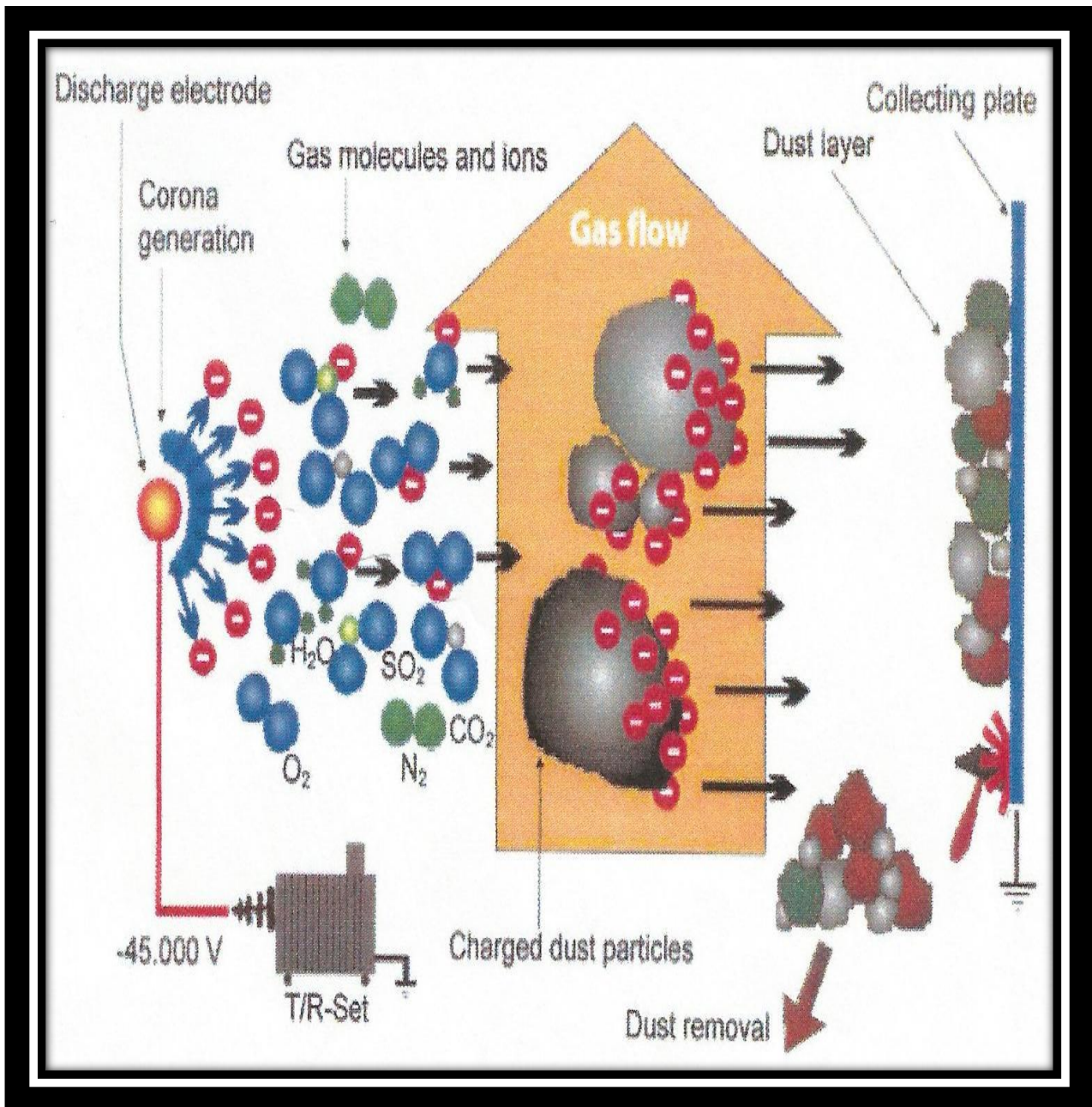
L = μήκος διαδρομής στη διεύθυνση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος,  $\text{cm}$

V = τάση, V

I = ηλεκτρικό ρεύμα, A

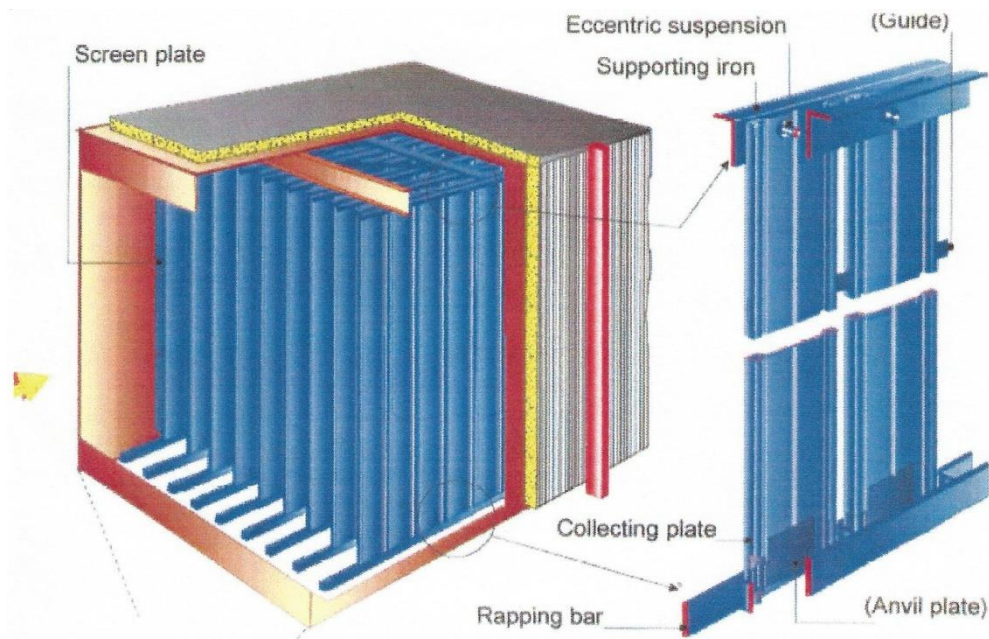
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  των υλικών κυμαίνεται  $10^{-3} - 10^{14} \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ . Για ιπτάμενες τέφρες από άνθρακα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  κυμαίνεται  $10^8 - 10^{13} \text{ ohm}\cdot\text{cm}$  ενώ για ξηρή σκόνη τσιμέντου μπορεί να υπερβεί τα  $10^{13} \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ . Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου είναι δυσχερής για ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις πάνω από  $10^{11} \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ .





Σχήμα 5: Ιονισμός

Οι σημαντικοί παράμετροι που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση της ιπτάμενης τέφρας είναι η θερμοκρασία και η χημική σύσταση. Η αγωγιμότητα του στρώματος της σκόνης προέρχεται από δύο επιδράσεις, τη χωρική ιδιότητα μέσω του ίδιου του υλικού, και την επιφανειακή αγωγιμότητα δια μέσων των προσροφημένων αέριων ή υγρών.



Σχήμα 6:Εσωτερικό φίλτρου

Η χωρητική αγωγιμότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ η επιφανειακή αγωγιμότητα αυξάνεται με τη  $T$ . Συνεπώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση η οποία είναι το αντίστροφο της αγωγιμότητας έχει μια σαφή μέγιστη τιμή. Δυστυχώς για τους χειριστές λεβήτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό το μέγιστο συμβαίνει περίπου στους **250 - 350 F**

Η θερμοκρασία της μέγιστης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυσμενής γιατί οι χειριστές συχνά δεν μπορούν να ελαττώσουν τις θερμοκρασίες των ηλεκτροστατικών φίλτρων κάτω από τους **250 F** χωρίς να διακινδυνεύσουν τη συμπύκνωση του θειικού οξέως σε κάποιες ψυχρές επιφάνειες. Αφετέρου, η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους **350 F** έχει ως αποτέλεσμα περιττές απώλειες θερμότητας έξω από την καμινάδα η οποία αντιπροσωπεύει χρηματική απώλεια.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση του περιεχόμενου θείου στον άνθρακα λόγω της αυξανόμενης πρόσφυσης αγωγίμων αερίων από την ιπτάμενη τέφρα. Για παράδειγμα, μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ήταν υπεύθυνες για αυξημένες εκπομπές ιπτάμενης τέφρας όταν οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μεταπηδούσαν από άνθρακα υψηλού θείου σε άνθρακα χαμηλού θείου για να μειώσουν τις

εκπομπές SO<sub>2</sub>. Οι αυξήσεις στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση μπορεί εν μέρει να αντισταθμιστούν προσθέτοντας χημικές ουσίες στα καπναέρια. Αργότερα, σε αυτό το κεφάλαιο θα συζητήσουμε περαιτέρω αυτή τη τεχνική, γνωστή και ως προετοιμασία των καπναερίων.

Μια σκόνη με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση αυξάνει τα περιστατικά ανάφλεξης στο φίλτρο και υποχρεώνει για χαμηλότερη τάση λειτουργίας. Η κάλυψη με σκόνη των ηλεκτροδίων μπορεί να μειώσει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, να αυξήσει την πιθανότητα σπινθηρισμών και να προκαλέσει αντίστροφη κορόνα με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σωματιδίων ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) είναι μέτρο της αντίστασης της σκόνης στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταβάλλεται σημαντικά και συνδέεται με:

1. την στοιχειακή σύσταση της σκόνης και των αερίων καύσης
2. το ποσοστό υγρασίας στον αέρα, και
3. τη θερμοκρασία του αερίου

Εάν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι υψηλή (δηλ. η σκόνη είναι καλός μονωτής), π.χ. πάνω από  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ , η συλλογή των σωματιδίων είναι ιδιαίτερα δύσκολη, γιατί το φορτίο δεν εκκενώνεται στις πλάκες (δημιουργείται «αντίθετη κορόνα»), και τα σωματίδια δεν «τινάζονται». Εάν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι πολύ χαμηλή (δηλ. η σκόνη καλός αγωγός), το φορτίο εκκενώνεται πολύ γρήγορα και τα σωματίδια επαναιωρούνται

## **2.4. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ**

Ο σχεδιασμός της εσωτερικής διαμόρφωσης ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου συχνά παραβλέπεται στα εγχειρίδια, ίσως γιατί αυτό το τμήμα του σχεδιασμού πέρασμα περιλαμβάνει περισσότερο τέχνη παρά επιστήμη. Η ομοιόμορφη κατανομή της ροής του αερίου των αγωγών είναι πολύ σημαντική για την ορθή λειτουργία ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου, όπως είναι τα ομοιόμορφα

διαστήματα μεταξύ των πλακών. Οι πλάκες πρέπει να είναι επίπεδες και παράλληλες έτσι ώστε όλα τα σημεία ανάμεσα σε δύο γειτονικές πλάκες να είναι σε ίση απόσταση, οι κλήσεις των συλλεκτών, ο επαρκής αριθμός ηλεκτρικών τμημάτων και πολλά αλλά χαρακτηριστικά.

Παρόλο που έχουν υπάρξει βελτιώσεις στα υπολογιστικά μοντέλα για το σχεδιασμό των ηλεκτροστατικών φίλτρων, ωστόσο υπάρχει ακόμη «μεγάλη διαδρομή» στον τομέα της έρευνας και της μελέτης για τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, τα οποία βρίσκονται σε πιλοτική γραμμή. Ο White (1977) σημειώνει ότι τα ηλεκτροστατικά φίλτρα σε πιλοτική κλίμακα τείνουν να λειτουργούν καλύτερα ανά μονάδα μεγέθους από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα σε πραγματικό μέγεθος.

Μερικές πραγματικές παράμετροι σχεδιασμού απαριθμούνται στο παρακάτω πίνακα. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες και μια βασική κατανόηση της διαμόρφωσης ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου μπορούμε να καθορίσουμε τη βασική γεωμετρία ενός τέτοιου φίλτρου. Για παράδειγμα το συνολικό πλάτος ενός φίλτρου είναι ουσιαστικά ίσο με τον αριθμό των αγωγών για τη ροή του αερίων επί το πλάτος του αγωγού αυξημένο με ένα μικρό συμπλήρωμα για το πλάτος των ίδιων των πλακών και για τα διάκενα μεταξύ των εξωτερικών πλακών και των τοιχωμάτων.

Ο αριθμός των αγωγών ο οποίος είναι ίσος με έναν λιγότερο από τον αριθμό των παράλληλων πλακών σε όλο το πλάτος δηλαδή,  $N_d = n - 1$  συσχετίζεται με την παροχή του αερίου, τη γραμμική ταχύτητα του αερίου και τη γεωμετρία του αγωγού μέσω

$$N_d = Q / uDH$$

όπου:

$N_d$  = αριθμός αγωγών

$Q$  = συνολική ογκομετρική παροχή αερίου μέσα στο ηλεκτροστατικό,  $m^3/min$

$u$  = γραμμική ταχύτητα του αερίου στο ηλεκτροστατικό φίλτρο,  $m/min$

$D$  = πλάτος καναλιού (διαχωρισμός πλακών),  $m$

$H$  = ύψος πλάκας,  $m$

Στην αρχή του σχεδιασμού η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του  $N_d$ , υποθέτοντας μια τιμή για το  $H$  και επιλέγοντας αντιπροσωπευτικές τιμές για τα  $u$  και  $D$ . Μια άλλη χρήση αυτής της εξίσωσης είναι να υπολογιστεί η ταχύτητα του αερίου στους αγωγούς αφού έχουν καθοριστεί όλες οι άλλοι παράμετροι.

Το συνολικό μήκος του φίλτρου δίνεται από την σχέση:

$$L_o = N_s L_p + (N_s - 1) L_s + L_{en} + L_{ex}$$

όπου:

$L_o$  = συνολικό μήκος, m

$N_s$  = αριθμός ηλεκτρικών τμημάτων στη διεύθυνση της ροής

$L_p$  = μήκος πλάκας, m

$L_s$  = διάκενο ανάμεσα στα ηλεκτρικά τμήματα, m

$L_{en}$  = μήκος τμήματος εισόδου, m

$L_{ex}$  = μήκος τμήματος εξόδου, m

Το διάκενο ανάμεσα στα τμήματα μπορεί να είναι 0,5-1,5 μέτρα και το μήκος εισόδου και εξόδου του καθενός μπορεί να είναι αρκετά μέτρα μήκος. Οι πλάκες για μεγάλα ηλεκτροστατικά φίλτρα - ιπτάμενης τέφρας είναι συχνά ύψους 6-12 μέτρων και μήκους 1 - 4 μέτρων στη διεύθυνση ροής του αερίου. Το ύψος του ηλεκτροστατικού φίλτρου μπορεί να είναι 1,5-3 φορές το ύψος της πλάκας λόγω των συλλεκτήρων και της υπερκατασκευής του ελέγχου.

Ο αριθμός των ηλεκτρικών τμημάτων κυμαίνεται μεταξύ 2 και 8 και εξαρτάται από την αναλογία των διαστάσεων και τις διαστάσεις της πλάκας. Ωστόσο ο αριθμός των τμημάτων πρέπει να είναι επαρκής για να παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη συνολική επιφάνεια συλλογής και όχι μια μεγάλη υπέρβαση της επιφάνειας. Ο αριθμός των τμημάτων μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$N_s = RH / L_p$$

όπου:

$N_s$  = αριθμός τμημάτων στη διεύθυνση της ροής (ένας ακέραιος)

$R$  = αναλογία διαστάσεων (συνολικό ύψος πλακών / ύψος της πλάκας)

Όταν έχουν καθοριστεί οι αριθμοί των αγωγών και των τμημάτων η πραγματική επιφάνεια συλλογής μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$A_a = 2HL_p N_s N_d$$

όπου:

$A_a$  = πραγματική επιφάνεια συλλογής, m<sup>2</sup>

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού δοκιμάζονται διάφορα μεγέθη πλακών και αριθμοί αγωγών έως ότου βρεθεί ένας συνδυασμός τέτοιος ώστε το  $A_a$  να είναι ίσο με την απαιτούμενη επιφάνεια συλλογής και η τελική γεωμετρία του φίλτρου να είναι λογική.

Η απόδοση ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου βελτιώνεται με την αύξηση της τμηματοποίησης. Εδώ αναφερόμαστε στην ομαδοποίηση όλων των παράλληλων πλακών σε όλο το εύρος ενός φίλτρου σε δύο ή περισσότερα ηλεκτρικά τμήματα, όπως επίσης και στην αύξηση του αριθμού των τμημάτων στη διεύθυνση της ροής. Οι μεγάλοι αριθμοί ηλεκτρικών τμημάτων επιτρέπουν την ικανοποίηση των στόχων συνολικής απόδοσης ακόμη και εάν ένα ή περισσότερα τμήματα είναι εκτός λειτουργίας. Ωστόσο η προσθήκη επιπλέον τμημάτων αυξάνει το κόστος κεφαλαίου.

Οι Theodore και Reynolds (1983) έχουν αναπτύξει μια μέθοδο για τον υπολογισμό της πιθανότητας κατά πόσο ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο θα είναι εκτός προδιαγραφών εξ αιτίας μιας αστοχίας ενός συγκεκριμένου αριθμού συστημάτων, δίνοντας πληροφορίες σχετικά με τη διαμόρφωση του ηλεκτροστατικού φίλτρου και της απόδοσης συλλογής του κάθε τμήματος. Αυτό το είδος του υπολογισμού είναι χρήσιμο στο στάδιο σχεδιασμού κατά τη στάθμιση του κόστους λόγω της αυξημένης τμηματοποίησης έναντι του κινδύνου μη συμμόρφωσης προς τις προδιαγραφές εξαιτίας ενός υποτιθέμενου αριθμού αστοχιών σε ηλεκτρικά τμήματα.

## **2.5 ΠΛΑΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΡΜΑΤΑ**

Ο τύπος και η τοποθέτηση των πλακών συλλογής και των συρμάτων φόρτισης μπορούν να είναι σημαντικοί παράγοντες στη λειτουργία και τη

συντήρηση ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου.

Οι πλάκες συνήθως είναι ελάσματα χάλυβα με νεύρα ενίσχυσης. Για τη μείωση της τριβής στη γειτονιά των πλακών τοποθετούνται διαφράγματα. Οι πλάκες θα έπρεπε να είναι απολύτως ευθείες και θα έπρεπε να αναρτώνται κάθετα και παράλληλα έτσι ώστε το διάκενο ανάμεσα στις πλάκες σε οποιοδήποτε σημείο να είναι ομοιόμορφο εντός των 0,5 cm.



Σχήμα6:Πλάκα

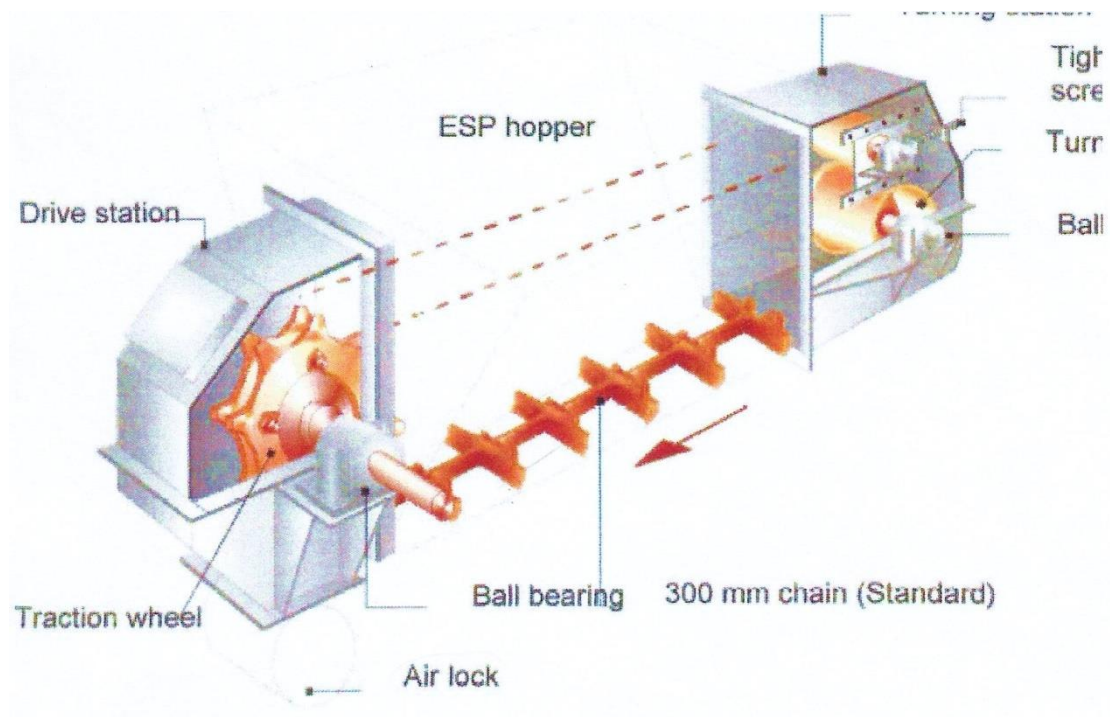
Τα ηλεκτρόδια εκφόρτισης σε παλαιότερα ηλεκτροστατικά φίλτρα στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι σύρματα διαμέτρου 2,5 mm που κρατιούνται τεντωμένα από βαρίδια και τοποθετούνται μέσω οδηγών για την πρόληψη υπερβολικής ταλάντωσης.

Τα σύρματα αποτελούν τμήμα της εγκατάστασης με υψηλές απαιτήσεις συντήρησης. Διάβρωση μπορεί να συμβεί κοντά στο επάνω μέρος των συρμάτων λόγω της διαρροής αέρα και της συμπύκνωσης οξέως. Επίσης μεγάλου μήκους σύρματα με βάρος τείνουν να ταλαντώνονται. Το μεσαίο τμήμα του σύρματος μπορεί να προσεγγίσει την πλάκα αρκετά κοντά προκαλώντας αυξημένους σπινθηρισμούς και φθορά. Κατά το παρελθόν στα ευρωπαϊκού σχεδιασμού ηλεκτροστατικά φίλτρα προτιμούνταν άκαμπτες, τύπου ιστού στηρίξεις για τα σύρματα και πολλοί χρησιμοποιούσαν ακίδες στα σύρματα ή οδοντωτές ταινίες αντί στρογγυλών συρμάτων.



Σχήμα 7: Σύρμα

## 2.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΚΟΝΗΣ



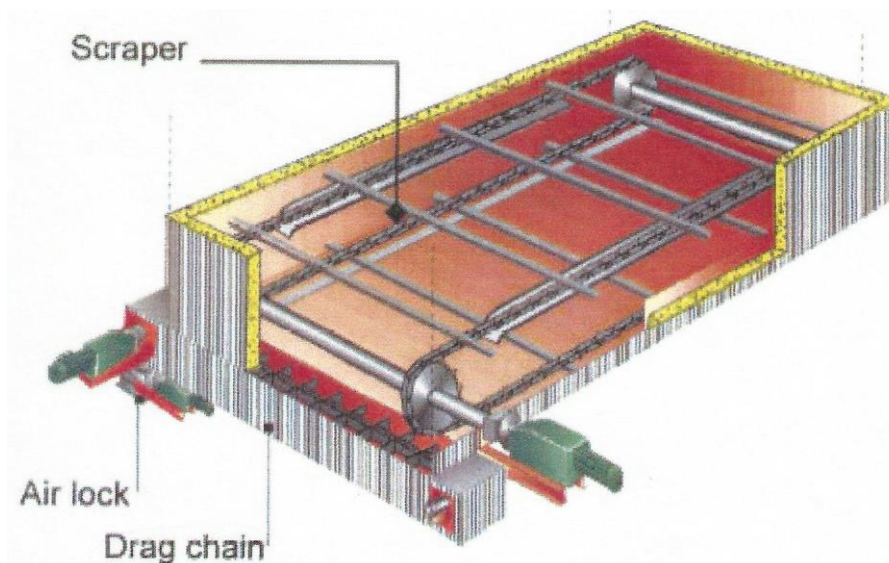
Σχήμα 8: Μηχανισμός απομάκρυνσης υπολειμμάτων

Μετά τη συλλογή τα σωματίδια πρέπει να απομακρύνονται περιοδικά έτσι ώστε το ηλεκτροστατικό φίλτρο να μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί σωστά. Η απομάκρυνση των σωματιδίων πραγματοποιείται τινάζοντας τις πλάκες προκαλώντας μια δόνηση η οποία απομακρύνει τα στρώματα της σκόνης. Η σκόνη πέφτει μέσα στους συλλεκτήρες και στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω πνευματικών σωλήνων ή κοχλιομεταφορέων σε μια



εγκατάσταση φόρτωσης. Επιπλέον, επειδή τα σύρματα συλλέγουν κάποια ποσότητα σκόνης, αυτά επίσης τινάζονται ή δονούνται περιοδικά. Οι πλάκες παραμένουν διεργεμένες κατά τη διάρκεια του τινάγματος.

Οι δύο βασικές προσεγγίσεις για το τινάγμα είναι η Αμερικάνικη προσέγγιση και η Ευρωπαϊκή προσέγγιση. Στους περισσότερους Αμερικάνικους τύπους οι πλάκες δέχονται χτύπημα από ένα καταπίπτον βάρος. Η ένταση του χτυπήματος είναι εύκολα ρυθμιζόμενη διαφοροποιώντας το ύψος από το οποίο πέφτει το βάρος, ή ρυθμίζοντας την ισχύ του πεδίου επιτάχυνσης. Σε μια τυπική Ευρωπαϊκή σχεδίαση το τινάγμα πραγματοποιείται με μη περιστρεφόμενη σφύρα σταθερού μεγέθους. Κατά συνέπεια για να ρυθμιστεί η ένταση του τινάγματος πρέπει να γίνει φυσική αντικατάσταση των σφυρών. Γενικά μια μονάδα τινάγματος εγκαθίστανται για κάθε 1200 έως 1600 τετραγωνικά πόδια επιφάνειας συλλογής. Και οι δύο σχεδιασμοί επιτρέπουν κατάλληλη ρύθμιση των διαστημάτων τινάγματος τα οποία μπορεί να μεταβάλλονται από 1 έως 10 λεπτά.



Σχήμα 9: Μηχανισμός απομάκρυνσης υπολειμμάτων

Οι συλλεκτές των ηλεκτροστατικών φίλτρων πραγματεύονται διεξοδικά από τον Schneider et al (1975) Οι συλλεκτές συλλαμβάνουν τη σκόνη που πέφτει και παρέχουν προσωρινή αποθήκευση. Οι περισσότεροι

συλλεκτήρες έχουν σχήμα πυραμίδας και συγκλίνουν είτε σε μια στρογγυλή είτε σε μια τετράγωνη εκροή. Τα τοιχώματα των συλλεκτήρων πρέπει να είναι απότομα κεκλιμένα για να προλαμβάνεται η δημιουργία κρούστας και γεφυρών από τη σκόνη. Επίσης οι συλλεκτήρες είναι συχνά θερμαινόμενοι διότι η θερμή τέφρα ρέει καλύτερα από τη ψυχρή τέφρα. Συνήθως 60-70% από τη σκόνη απομακρύνεται μέσω της πρώτης ομάδας συλλεκτήρων. Ωστόσο σε περίπτωση αστοχίας της πρώτης ομάδας συλλεκτήρων το φορτίο της σκόνης μεταφέρεται στον επόμενο συλλεκτήρα. Ως εκ τούτου συνίσταται η ελεύθερη διαστασιολόγηση των συλλεκτήρων. Πρέπει επίσης να παρέχεται η κατάλληλη συσκευή στήριξης έτσι ώστε να μην καταρρέει ο συλλεκτήρας όταν γεμίζει με σκόνη.

## 2.7 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Υπάρχουν δυο αιτίες κατανάλωσης ενέργειας σε ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο: η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την δημιουργία της κορόνας καθώς και η πτώση πίεσης, με την ενέργεια της κορόνας να είναι η κύρια αιτία. Παρόλο που η πτώση πίεσης του αερίου είναι χαμηλή, ο όγκος της ροής του αερίου είναι υψηλός. Επομένως, πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη το κόστος της ενέργειας για τον ανεμιστήρα που απαιτείται για τον ελκυσμό του αέρα μέσα από το ηλεκτροστατικό φίλτρο. Η ηλεκτρική ενέργεια για την κορόνα μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση:

$$P_C = I_C \cdot V_{avg}$$

όπου:

$P_C$  = ηλεκτρική ενέργεια κορόνας, W

$I_C$  = ένταση ηλεκτρικού ρεύματος κορόνας, A

$V_{avg}$  = μέση τιμή τάσης

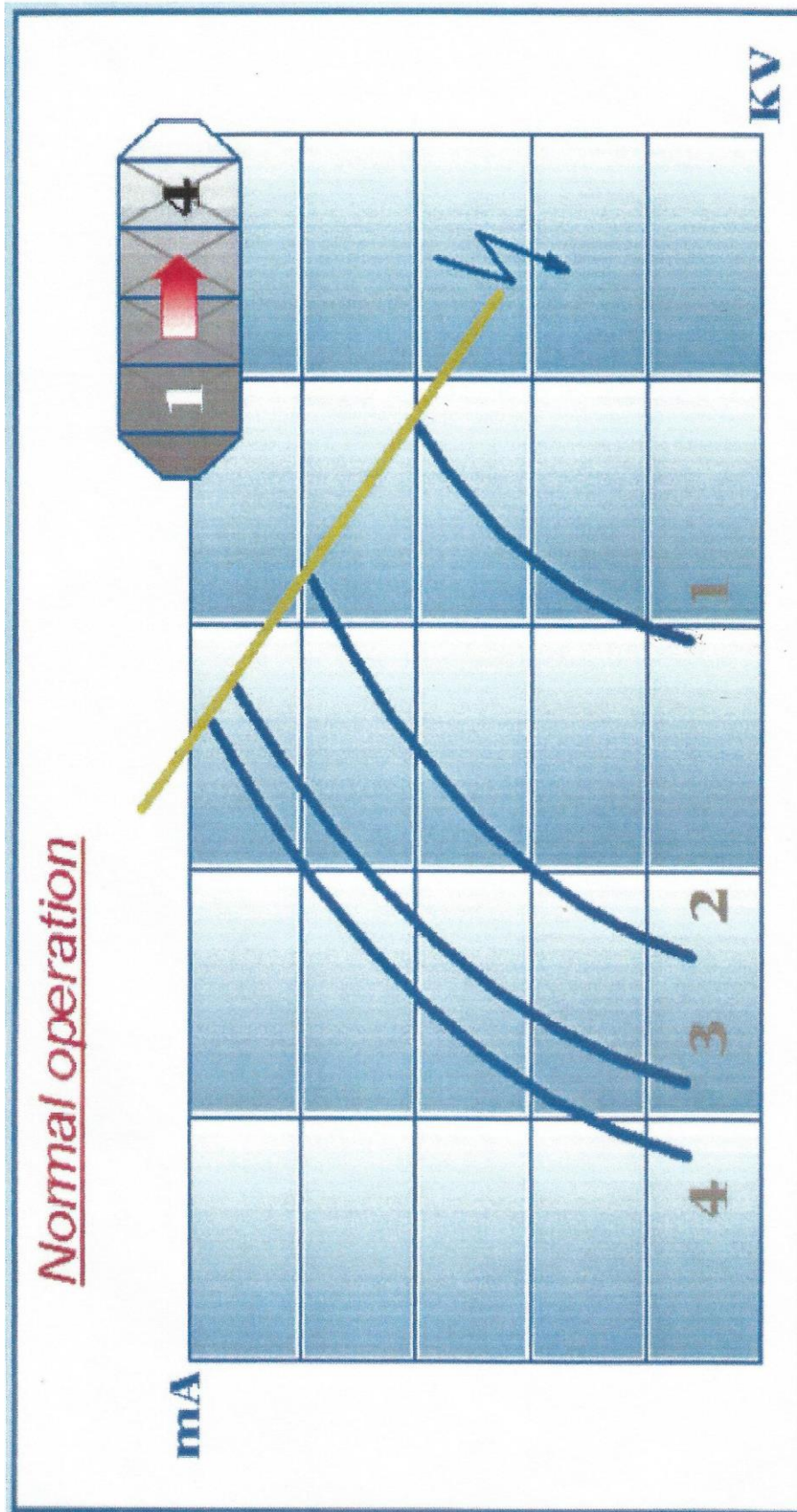
Παρόλο που οι τάσεις στα ηλεκτροστατικά φίλτρα είναι πολύ υψηλές η ροή του ρεύματος λόγω της μετακίνησης των ιόντων αερίου είναι χαμηλή και

επομένως η κατανάλωση ενέργειας δεν είναι αδικαιολογήτως υψηλή.

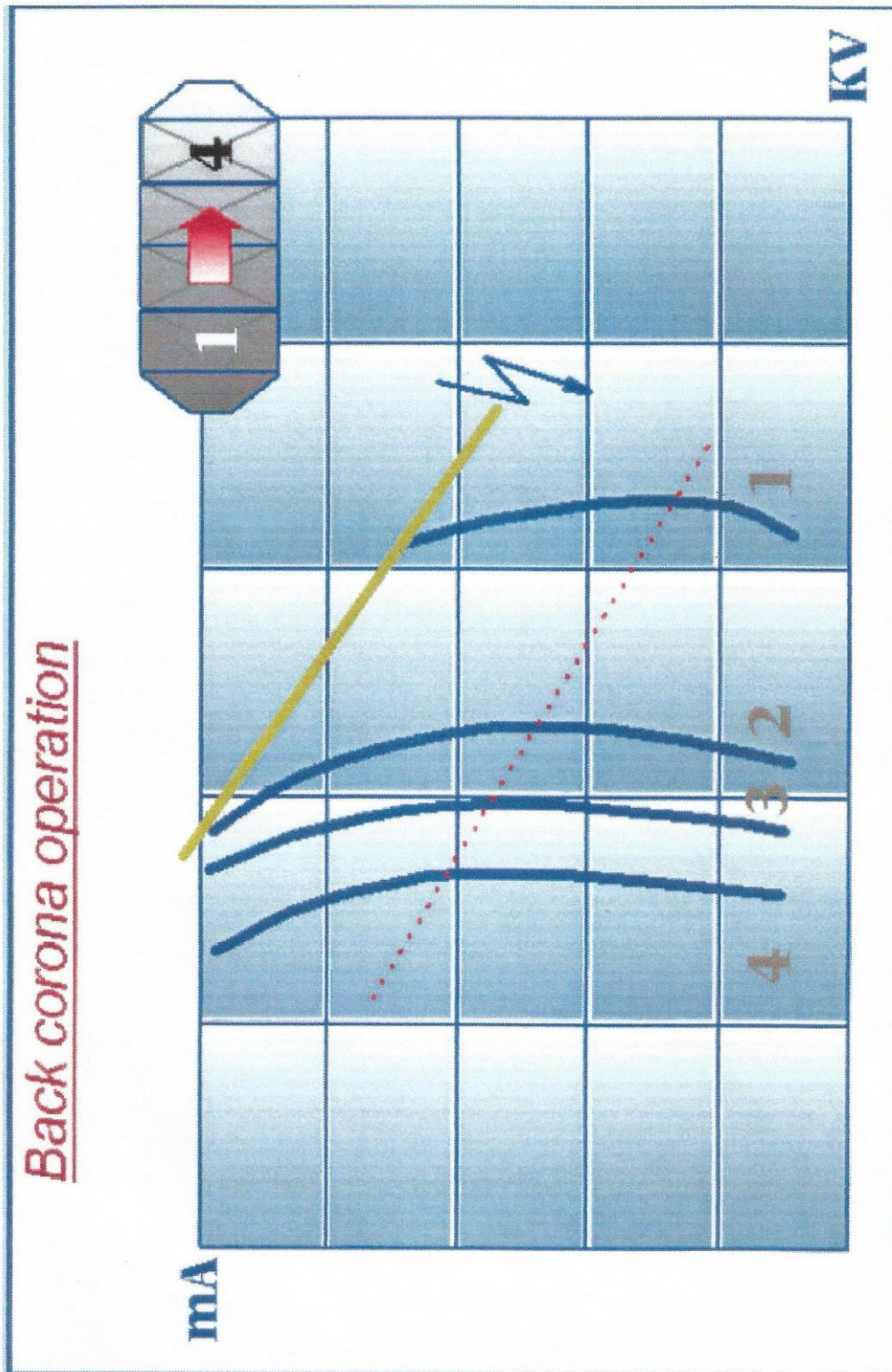
Σύμφωνα με το White (1977) η πραγματική ταχύτητα πλαγιολίσησης σχετίζεται με την ισχύ της κορόνας ως εξής:

$$w_e = \frac{k \cdot P_c}{A}$$

Όπου οι όροι έχουν καθοριστεί προηγουμένως και  $k$  είναι απλώς μια μεταβαλλόμενη σταθερά. Για καλώς κατασκευασμένα ηλεκτροστατικά φίλτρα ιπτάμενης τέφρας το  $k$  είναι στο εύρος από 0,5 έως 0,7 για μονάδες  $W_e$  σε ft/sec και  $P_c/A$  σε  $W/ft^2$ . Ο λόγος  $P_c/A$  ονομάζεται πυκνότητα ισχύος. Παρόλο που η πυκνότητα ισχύος συχνά αυξάνεται από την είσοδο της ροής του αέρα στην έξοδο η συνολική πυκνότητα ισχύος είναι μια αρκετά σταθερή και αντιπροσωπευτική παράμετρος. Τυπικές τιμές της συνολικής πυκνότητας ισχύος είναι 1-2  $W/ft^2$ .



Σχήμα 10: Κατανάλωση υπό φυσιολογικές συνθήκες

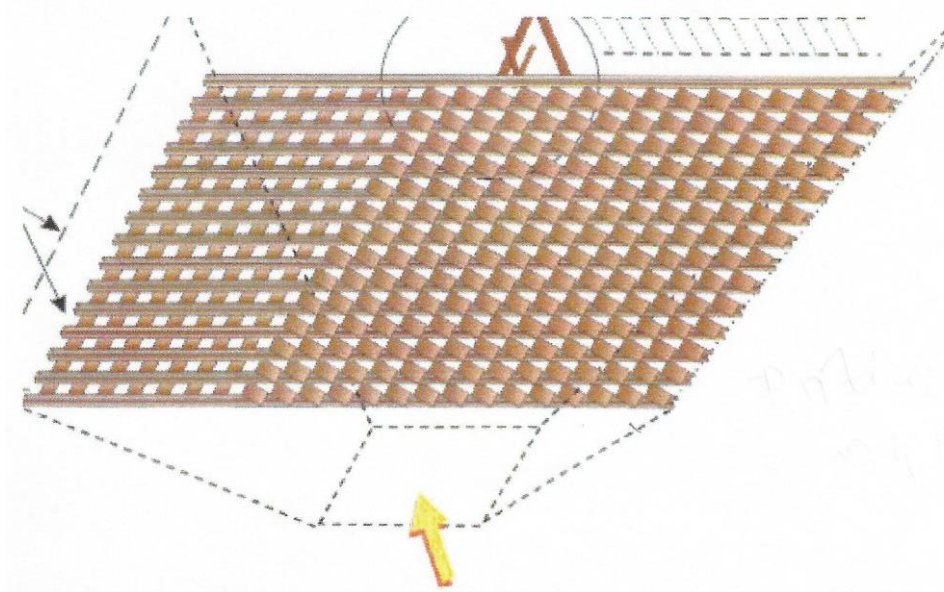


Σχήμα 11: Κατανάλωση κατά το φαινόμενο κορώνα

## 2.8 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΠΝΑΕΡΙΩΝ

**Υφιστάμενα ηλεκτροστατικά φίλτρα.** Όταν παρουσιάζεται μια ξαφνική ελάττωση στην απόδοση ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου σε ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα λόγω αλλαγής σε άνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο οι εκπομπές ιπτάμενης τέφρας αυξάνονται και ο σταθμός μπορεί να υπόκειται σε πρόσθημα, κατάργηση φοροαπαλλαγών ή κλείσιμο. Χωρίς να εγκαταλειφτεί το ηλεκτροστατικό φίλτρο και να εγκατασταθεί ένα νέο σακκόφίλτρο ή ένα νέο ηλεκτροστατικό φίλτρο μεγαλύτερο, μια δυνατή λύση είναι να μεταβληθεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της ιπτάμενης τέφρας ή του εκάστοτε υλικού.

Προηγουμένως συζητήσαμε την ισχυρή επίδραση της θερμοκρασίας και της χημικής σύστασης στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση της ιπτάμενης τέφρας και επομένως στην απόδοση συλλογής. Ωστόσο η θερμοκρασία εισόδου του αερίου σε ένα υφιστάμενο ηλεκτροστατικό φίλτρο συχνά δεν μπορεί να μειωθεί λόγω της πιθανότητας συμπύκνωσης οξέων και διάβρωσης. Η διαμόρφωση των καναλιών μπορεί μερικές φορές να επαναδιευθετηθεί έτσι ώστε η θερμοκρασία του αερίου που εισέρχεται στο φίλτρο να αυξηθεί, αλλά η λύση αυτή επιφέρει κόστος σε κεφάλαιο επένδυσης και σε λειτουργία. Για το λόγο αυτό η χημική προετοιμασία των καπναερίων είναι πιο πρακτική προσέγγιση. Υπάρχουν αρκετοί προμηθευτές και συστήματα εμπορικά διαθέσιμα και ευτυχώς αυτή η προσέγγιση συχνά λειτουργεί πολύ καλά με σχετικά χαμηλό.



Σχήμα 12:Είσοδος προετοιμασίας αερίων

Η προετοιμασία των καπναερίων είναι πάρα πολύ σημαντική για τα ηλεκτροστατικά φίλτρα στη βιομηχανία τσιμέντου. Στη περίπτωση αυτή το χημικό προετοιμασίας είναι απλά το νερό. Η προετοιμασία με υγρασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με έγχυση ατμού ή με νέφωμα σταγονιδίων υγρού νερού μέσα στο ρεύμα αέρα που περιέχει σκόνη. Ο κατάλληλος σχεδιασμός των ακροφυσίων ψεκασμού, η τοποθέτησή τους κατά διαστήματα και ο προσεκτικός έλεγχος θερμοκρασίας είναι κρίσιμα. Αν χυθεί μεγάλη ποσότητα νερού η σκόνη θα σχηματίσει κρούστα στο εσωτερικό του ηλεκτροστατικού φίλτρου.

Νέα συστήματα. Για νέους σχεδιασμούς πρέπει να εξετάζουμε τα ηλεκτροστατικά φίλτρα στην ψυχρή πλευρά του προθερμαντήρα αέρα καθώς και στη θερμή πλευρά. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα στη θερμή πλευρά έχουν το πλεονέκτημα των υψηλότερων θερμοκρασιών που μειώνουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση της τέφρας, αλλά απαιτούν μεγαλύτερες εγκαταστάσεις για να διαχειριστούν τις αυξημένες ογκομετρικές παροχές του αερίου. Τη δεκαετία του 1970 πάνω από 200 ηλεκτροστατικά φίλτρα στη θερμή πλευρά εγκαταστάθηκαν ή σχεδιάστηκαν αντιπροσωπεύοντας πάνω

από 53,000MW δυναμικότητας παραγωγής. Ωστόσο μια μεταγενέστερη έρευνα αποκάλυψε διάφορα σημαντικά προβλήματα λειτουργίας και συντήρησης που σχετίζονται με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα στη θερμή πλευρά. Στην πραγματικότητα σήμερα και υπό τις παρούσες συνθήκες δεν προδιαγράφονται νέα ηλεκτροστατικά φίλτρα στη θερμή πλευρά για εφαρμογές ιπτάμενης τέφρας.

Τα σακκόφιλτρα έχουν το πλεονέκτημα της καλής απόδοσης για οποιοδήποτε τύπο σκόνης αλλά επισύρουν αυξημένα έξοδα λειτουργίας εξ αιτίας της πτώσης πίεσης και ειδικά της αντικατάστασης των σακών. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα στην ψυχρή πλευρά με χημική προετοιμασία των καπναερίων διατηρούν όλα τα πλεονεκτήματα λειτουργίας και συντήρησης των καθιερωμένων ηλεκτροστατικών φίλτρων στη ψυχρή πλευρά και μπορούν να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις συλλογής.

*Σακκόφιλτρα: Αυτοκαθαριζόμενα φίλτρα για σκόνες ξύλου, χάρτου, χημικών, ορυκτών κλπ Τρόποι καθαρισμού:*

*-Χειροκίνητα*

*-Μηχανικής δόνησης*

*-Αναστροφής κατεύθυνσης αέρα*

*-Ριπές πεπιεσμένου αέρα.*

## **2.9 ΚΟΣΤΟΣ**

Το κόστος ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου είναι μία αρκετά προβλέψιμη συνάρτηση της επιφάνειας συλλογής της πλάκας. Ωστόσο το κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικό λόγο της θέσης κατασκευής, της εποχής του έτους του διαθέσιμου χώρου κλπ. Ο Vatavuk (1990) συγκέντρωσε τιμές κόστους από κατασκευαστές ηλεκτροστατικών φίλτρων για έναν αριθμό μονάδων και έκανε μελέτη παλινδρόμησης αυτών των τιμών έναντι της επιφάνειας συλλογής. Ο συγκεκριμένος ερευνητής ανέπτυξε τη παρακάτω εξίσωση για υπολογισμό της



τιμής αγοράς ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου. Η εξίσωση αυτή αρχικά αναπτύχθηκε για πρόβλεψη της τιμής ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου σε τιμές δολαρίου 1988. Ωστόσο, πρόσφατη πληροφόρηση από την EPA δείχνει ότι οι τιμές από τους κατασκευαστές των ηλεκτροστατικών φίλτρων σχεδόν δεν έχουν μεταβληθεί καθόλου στη δεκαετία που ακλούθησε. Αυτό είναι πιθανό να ήταν αποτέλεσμα των βελτιώσεων της τεχνολογίας, των μειώσεων στις τιμές του χάλυβα λόγω του ανταγωνισμού της αγοράς ή κάποιου συνδυασμού αυτών των παραγόντων. Για το λόγο αυτό η παρακάτω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη τιμών σε δολάρια 1998.

$$P=a \cdot A^b$$

όπου:

P = τιμή αγοράς, f.o.b (free on board) κατασκευαστή σε τιμές δολαρίου 1998

A = καθαρή επιφάνεια πλάκας

a, b: σταθερές

Οι σημαντικές άμεσες λειτουργικές δαπάνες οφείλονται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα εργατικά για τη λειτουργία έχουν εκτιμηθεί σε 0,5-2 ανθρωπόωρες ανά βάρδια. Στα τυπικά μέρη συντήρησης περιλαμβάνονται οι συσκευές τινάγματος τα σύρματα των ηλεκτροδίων, ο ηλεκτρονικός έλεγχος και τα συστήματα διακίνησης της τέφρας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

### 3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΦΙΛΤΡΟΥ

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με την μελέτη του κατασκευαστικού κομματιού ενός ηλεκτροστατικού φίλτρου, τη λειτουργία του οποίου αναλύσαμε παραπάνω. Θέλουμε να αποκωνιώσουμε σε ένα τμήμα εργοστασίου παραγωγής τσιμέντου 10,000 m<sup>3</sup>/min αέρα. Το ηλεκτροστατικό φίλτρο μας ζήτησαν να κατασκευαστεί με βαθμό απόδοσης 98%. Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία μας, για το υλικό που μας ζήτησαν να αποκωνιώσουμε χρειάζεται ταχύτητα πλαγιολίσθησης 6,0m/min. Εμείς λοιπόν διαλέξαμε να τοποθετήσουμε πλάκες ύψους 4m και 3m μήκους. Έτσι ψάχνουμε να βρούμε τον αριθμό των πλακών. Σύμφωνα με το τύπο του Deutsh ισχύουν τα παρακάτω:

$$\ln(1-n) = \frac{-AW_e}{Q}$$

Και

$$N = \frac{A}{A_p} + 2$$

Οπότε:

$$AW_e = -\ln(1-0.98)Q$$

Άρα:

$$A = -\frac{\ln(1-0.98)Q}{W_e}$$

$$\mathbf{A = 6520m^2}$$

Οπότε:

$$N = \frac{A}{A_p} + 2$$

$$\mathbf{N = 274 \text{ Πλάκες}}$$

Με δεδομένο ότι η κάθε βαθμίδα χωράει το πολύ 90 πλάκες συμπεραίνουμε ότι θα χρειαστούμε ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο 3 βαθμίδων.

Για την λειτουργία του ηλεκτροστατικού φίλτρου απαιτούνται 3 κινητήρες για την δόνηση των πλάκων, σύστημα μετατροπής των 400V AC σε 70kV DC που περιλαμβάνει Μ/Σ και ανορθωτικές διατάξεις και ένα θερμαντικό στοιχείο που θερμαίνει τα κωνικά που συλλέγουν τη σκόνη και την οδηγούν προς την έξοδο του φίλτρου και τους μονωτήρες.

### 3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΚΓΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΘΕ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Παρακάτω θα κάνουμε μία αναφορά για το πώς γίνεται η μελέτη μιας βιομηχανικής ηλεκτρικής εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει τον υπολογισμό για την ονομαστική ένταση ρεύματος κάθε γραμμής καθώς και για τη διατομή και το είδος των αγωγών όπως και των οργάνων προστασίας (ασφάλειες, διακόπτες, θερμικά κλπ.) που απαιτούνται.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα φορτία της ηλεκτρικής βιομηχανικής εγκατάστασης που μελετάμε (1Hp=746W).

Αριθμός Γραμμής	Είδος Φορτίου	Ισχύς $P_{out}$ (W)	συνφ	Αριθμός φάσεων	Μήκος Γραμμής (m)	Μέγιστη Επιτρεπόμενη Πτώση τάσης (%)	Βαθμός Απόδοσης
1	Φωτισμός 1 KW	1000	1	1	12	1%	-
2	Φωτισμός 1,5 KW	1500	1	1	63	1%	-
3	Κινητήρας 0,55 HP	410	0,8	1	25	3%	0,75
4	Κινητήρας 0,85 HP	634	0,84	1	35	3%	0,78
5	Κινητήρας 1,2 HP	895	0,8	3	12	3%	0,82
6	Κινητήρας 4,6 HP	3432	0,88	3	20	3%	0,85
7	Κινητήρας 23 HP	17158	0,91	3	35	3%	0,9
8	Κινητήρας 160 HP	119360	0,9	3	45	3%	0,92
9	Κινητήρας 482 HP	359572	0,92	3	62	3%	0,94
10	Εφεδρική	50000	-	3	15	3%	-

## Εφεδρική Γραμμή

Η εφεδρική γραμμή θα χρησιμοποιείται σε περίπτωση βλάβης των υπόλοιπων γραμμών. Η γραμμή αυτή θα είναι τριφασική και η ισχύς της θα είναι 50kW. Το μήκος το ορίζουμε στα 15m από τον πίνακα διανομής,

**Ισχύς κινητήρων:** η ισχύς που αποδίδουν οι κινητήρες στο φορτίο.

Η ισχύς που απορροφούν οι κινητήρες από το δίκτυο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

Όπου:

$P_{out}$ : Η ισχύς που αποδίδει ο κινητήρας στο φορτίο

$\eta$ : ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα

Παρακάτω υπολογίζεται η ισχύς που απορροφά κάθε κινητήρας:

ΓΡΑΜΜΗ 3 (Μονοφασικός κινητήρας 0.55 HP)

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{410}{0.75} = 547 \text{ W}$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και τα υπόλοιπα στοιχεία.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται συγκεντρωτικά η απορροφούμενη από το δίκτυο ισχύ  $P_{in}$  για κάθε κινητήρα

A/A	Αριθμός γραμμής	Είδος γραμμής	$P_{out}$ (W)	$\eta$	$P_{in}$ (w)
1	3	Μονοφασικός Κινητήρας 0,55 HP	410	0,75	547
2	4	Μονοφασικός Κινητήρας 0.85 HP	634	0,78	812
3	5	Τριφασικός Κινητήρας 1,2 HP	895	0,82	1091
4	6	Τριφασικός Κινητήρας 4,6 HP	3432	0,85	4038
5	7	Τριφασικός Κινητήρας 23 HP	17158	0,9	19064
6	8	Τριφασικός Κινητήρας 160 HP	119360	0,92	129739
7	9	Τριφασικός Κινητήρας 482 HP	359572	0,94	382523

### Ονομαστικές εντάσεις ρεύματος κάθε γραμμής

Για τον υπολογισμό της έντασης ρεύματος θεωρούμε ότι η τάση μονοφασικής γραμμής είναι 230V και η πολική τάση τριφασικής γραμμής είναι 400V. Οι σχέσεις για τον υπολογισμό της έντασης του ρεύματος που χρησιμοποιούμε προκύπτουν από τις σχέσεις ισχύος για μονοφασική και τριφασική κατανάλωση. Οι σχέσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

Μονοφασική κατανάλωση:  $P = V \cdot I \cdot \cos\phi$  (όπου  $P:P_{in}$ )

Τριφασική κατανάλωση:  $P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi$  (όπου  $P:P_{in}$ )

Αριθμός Γραμμής	Είδος Φορτίου	Ισχύς $P_{in}$ (W)	συνφ	Αριθμός φάσεων	Ονομαστική Ένταση ρεύματος (A)
1	Φωτισμού	1000	1	1	4,3
2	Φωτισμού	1500	1	1	6,5
3	Κινητήρας 0,55 HP	547	0,8	1	3,0
4	Κινητήρας 0,85 HP	812	0,84	1	4,2
5	Κινητήρας 1,2 HP	1091	0,8	3	2,0
6	Κινητήρας 4,6 HP	4038	0,88	3	6,6
7	Κινητήρας 23 HP	19064	0,91	3	30,2
8	Κινητήρας 160 HP	129739	0,9	3	208,1
9	Κινητήρας 482 HP	382523	0,92	3	600,1
10	Εφεδρική	50000	0,85*	3	84,9

### Η διατομή και το είδος των αγωγών:

Προκειμένου να επιλέξουμε τις ελάχιστες επιτρεπόμενες διατομές αγωγών σύμφωνα με την ένταση ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή και το είδος των γραμμών χρησιμοποιούμε τον πίνακα από το πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 και φαίνεται παρακάτω:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 52-K1 Μέγιστα επιτρεπόμενα ρεύματα (σε A) εντοιχισμένων (χωνευτών) και επιτοίχιων (ορατών) ηλεκτρικών γραμμών Μόνωση από PVC ή EPR ή XLPE**

Μόνωση	Πλήθος φορτισμένων αγωγών	Οι αριθμοί παραπέμπουν στις στήλες που ακολουθούν								
		Μονωμένοι αγωγοί σε σωλήνα		Πολυπολικό καλώδιο						
		Εντοιχισμένο	Επιτοίχιο	Γυμνό		Σε σωλήνα				
		Εντοιχισμένο	Επιτοίχιο	Εντοιχισμένο	Επιτοίχιο	Εντοιχισμένο	Επιτοίχιο			
PVC	2	3	5	3	6	2	4			
	3	2	4	2	5	1	3			
EPR ή XLPE	2	5	9	6	9	5	8			
	3	5	7	5	8	4	6			
<b>Στήλες</b>										
Χαλκός	mm <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1,5	13	13,5	14,5	15,5	17	19	20	22	23
	2,5	17,5	18	19,5	21	23	26	28	30	31
	4	23	24	26	28	31	35	37	40	42
	6	29	31	34	36	40	44	48	51	54
	10	39	42	46	50	54	60	66	69	75
	16	52	56	61	68	73	80	88	91	100
	25	68	73	80	89	95	105	117	119	133
	35	83	89	99	109	117	128	144	146	164
	50	99	108	118	130	141	154	175	175	198
	70	125	136	149	164	179	194	222	221	253
	95	150	164	179	197	216	233	269	265	306
	120	172	188	206	227	249	268	312	305	354
	150	196	216	240	259	285	318	-	371	441
	185	223	245	273	295	324	362	-	424	506
	240	261	286	321	346	380	424	-	500	599
300	298	328	367	396	435	485	-	576	693	
Αλουμίνιο	16	41	43	48	53	58	64	71	72	79
	25	53	57	62	70	73	84	93	90	101
	35	65	70	77	86	90	103	116	112	126
	50	78	84	92	104	110	124	140	136	154
	70	98	107	116	131	140	156	179	174	198
	95	118	129	139	157	170	188	217	211	241
	120	135	149	160	180	197	216	251	245	280
	150	155	170	189	206	226	253	-	283	324
	185	176	194	215	233	256	288	-	323	371
	240	207	227	252	273	300	338	-	382	439
	300	237	261	289	313	344	387	-	440	508

Στη συνέχεια εξετάζουμε αν οι αγωγοί που επιλέξαμε βάση του πίνακα ικανοποιούν τα κριτήρια της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης που είναι 1% για εγκαταστάσεις φωτισμού και 3% για εγκαταστάσεις κίνησης. Σε περίπτωση που η πτώση τάσης ξεπερνά το 1% ή το 3% αντίστοιχα επιλέγουμε την αμέσως μεγαλύτερη διατομή αγωγού και εξετάζουμε για δεύτερη φορά την πτώση τάσης στους αγωγούς της γραμμής.

### Υπολογισμός πτώσης τάσης

Μονοφασική γραμμή:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos\phi}{S}$$

Τριφασική γραμμή:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos\phi}{S}$$

Όπου:

$\Delta U$ : Η πτώση τάσης σε V

L: το μήκος αγωγού σε m

I: η ένταση ρεύματος σε A

$\cos\phi$ : Το συνφ της κατανάλωσης

$\rho$ : Η ειδική αντίσταση όπου για τον χαλκό και για θερμοκρασία 39°C προκύπτει 0,018  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

**Υπολογισμός ειδικής αντίστασης χαλκού:**

$$\rho_{\theta} = \rho_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)]$$

Όπου

$\rho_0$ : η ειδική αντίσταση στους 20 °C που μελετάμε

$\alpha$ : θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης σε °C<sup>-1</sup>

$\theta$  : η θερμοκρασία που θέλουμε να υπολογίσουμε την ειδική αντίσταση

$\theta_0$  : θερμοκρασία ίση με 20 °C



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Παρα κάτω αναφέρονται βασικοί συγγραφείς εκ των οποίων άντλησα πληροφορίες και ιδέες για τη πτυχιακή μου εργασία. Προτού όμως αναφερθώ σε αυτούς θα πρέπει να ευχαριστήσω το συνεργείο των ηλεκτροστατικών φίλτρων της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ ΙΙ μέλος του ομίλου LAFARGE για την πολύτιμη βοήθεια τους τόσο σε σημειώσεις και μετρήσεις αλλά και στην πολύτιμη ξεναγήσει στους χώρους του εργοστασίου τους, καθώς και διάφορους δικτυακούς τόπους.

1. Πέτρος Ντοκόπουλος ' ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ'
2. Γ Κράνα-Ε Δασκαλοπούλου 'ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΟΙ ΛΟΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ'
3. C.David cooper - F.C Alley ' ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
4. FLISMIDTH AIRTECH
5. Andes G.M,Cummings, W. E. , Link, S.A., and steindach, P.H."Survey Reveals Hot-Side Precipitator Performance," Pollution Engineering 15 March 1983
6. Vatavuk, W. M. Estimating Costs of Air Pollution Control. Chelsea, MI Lewis Publishers, 1990
7. Handbook of Air Pollution Tehnology, S Calvert and H M Engloud Eds. NewYork Wiley, 1984.
8. Wark, k and Warner C. F . Air Pollution -Its Origin And Control New York Harper & Row, 1981.