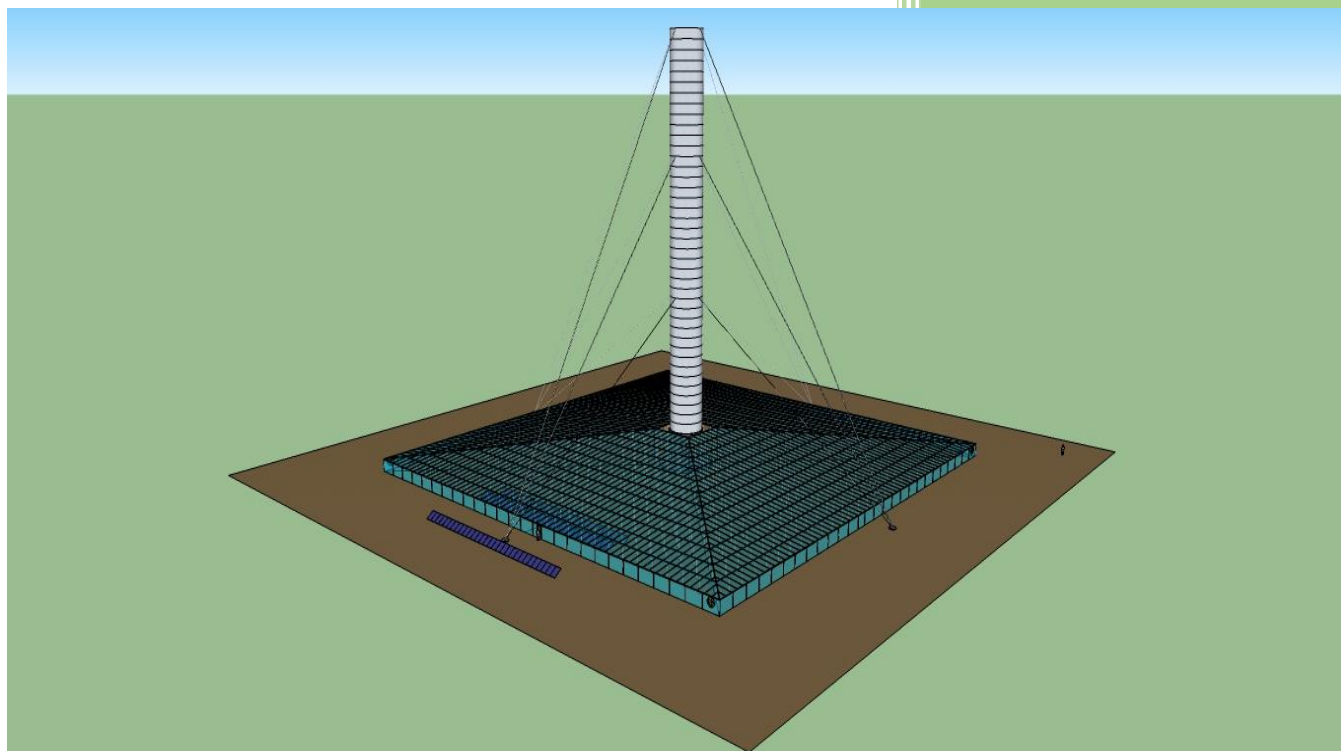




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

2014

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΑΜΙΝΑΔΑΣ ΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΚΥΡΙΑΚΟΣ ΚΑΡΥΣΤΙΝΑΙΟΣ

Επιβλέπων: Καθηγητής Δρ.

ΧΡΗΣΤΟΦΟΡΟΣ ΠΡΟΒΑΤΙΔΗΣ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Δρ. Χριστόφορο Προβατίδη για τις πολύτιμες συμβουλές και κατευθύνσεις σε όλη τη διάρκεια της εξέλιξης της εργασίας, σε ένα καθοριστικό για μένα γνωστικό αντικείμενο όπως το ANSYS, και τα finite elements.

Για την επιλογή του θέματος αλλά και για τη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Χρήστο Παπαγεωργίου, εμπνευστή της Αιωρούμενης Ηλιακής Καμινάδας και κινητήρια δύναμη της Green Chimney Technologies, κατασκευάστριας του πρώτου πειραματικού Ελληνικού ηλιακού σταθμού.

Για τις επικοινωνητικές αναλύσεις και συζητήσεις που είχα μαζί του ευχαριστώ τον αρχιτέκτονα Μηχανικό Δημήτριο Κορρέ, συνεργάτη και σχεδιαστή της GCT.

Τέλος θα πρέπει να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που παρέχοντας μου κάθε δυνατό μέσο και διευκόλυνση, έκαναν δυνατή την απόλυτη αφοσίωσή μου στην εργασία, αλλά και για όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, που στάθηκαν δίπλα μου με κάθε δυνατό τρόπο.

Περιεχόμενα

Διαγράμματα, πίνακες και εικόνες.....	4
Περίληψη	7
Abstract.....	8
1. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ Α.Π.Ε.	9
1.1. Εισαγωγή.....	9
1.2. Σημερινή κατάσταση στην κατανάλωση ενέργειας	10
1.2.1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση	10
1.2.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα	12
1.3. Ενεργειακές πολιτικές	14
1.3.1. Ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική.....	14
1.3.2. Ελληνική ενεργειακή πολιτική	16
1.4. Η ανάγκη στροφής προς τις ΑΠΕ	17
2. ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΑΜΙΝΑΔΑΣ.....	20
2.1. Η πηγή της ενέργειας.....	20
2.2. Κατανομή προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας.....	22
2.3. Βασική αρχή λειτουργίας σταθμών ηλιακής καμινάδας.....	24
2.4. Ιστορικό ηλιακής καμινάδας	25
2.6. Αιωρούμενη ηλιακή καμινάδα	27
2.7. Πειραματικές δοκιμές σταθμών με ηλιακή καμινάδα	28
3. ΠΕΡΙΚΛΕΙΣΤΟΣ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ	34
3.1. Εισαγωγή.....	34
3.2. Περιγραφή και λειτουργία συμβατικών σταθμών με ηλιακή καμινάδα	34
3.3. Ο περικλειστός σταθμός με ηλιακή καμινάδα (Enclosed Solar Chimney Power Plant, ESCP) και ο υβριδικός (HSP).....	40
3.4. Ανάπτυξη της υβριδικής τεχνολογίας "HSP TECHNOLOGY"	54
3.4.1. Demo Station	54
3.4.2. Ο σταθμός 'PROTOTYPE 5MW' και το υβριδικό ηλιακό πάρκο (Hybrid Solar Farm).....	57
4. ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΜΙΝΑΔΑ	59
4.1. Προφίλ ταχύτητας ανέμου	59
4.2. Θεωρητικά δεδομένα	60
4.3. Vortex Shedding και παραδείγματα κατάρρευσης ελαφριών μεταλλικών κατασκευών κυλινδρικής διατομής.....	63
5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS APDL	69
5.1. Θεωρία πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.).....	69

5.2. Στοιχεία και κόμβοι στην επίλυση με τη μέθοδο των Π.Σ.	71
5.3. Περιβάλλον ANSYS APDL	73
5.3.1. Στάδια επίλυσης στο ANSYS APDL.....	73
5.3.2. Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών.....	74
5.3.3. Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων.....	74
5.3.4. Κατασκευή γεωμετρίας μοντέλου	74
5.3.5. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.....	75
5.3.6. Επιβολή των οριακών συνθηκών και φορτίων	76
5.3.7. Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος και επίλυση.....	76
5.4. Περιγραφή προβλήματος	76
6. ANSYS APDL.....	79
6.1 Κατασκευή του μοντέλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Ansys.....	79
6.1.1. Ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών.....	80
6.1.2. Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων.....	80
6.1.3. Κατασκευή της γεωμετρίας.....	82
6.1.4. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.....	83
6.1.5. Επιβολή των οριακών συνθηκών και του φορτίου	84
6.2. Επίλυση του μοντέλου, ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων (Finite Element Analysis - FEA)	85
6.2.1. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 7 μποφόρ.....	85
6.2.2. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 8 μποφόρ	89
6.2.3. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 9 μποφόρ	94
6.2.4. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 10 μποφόρ	97
6.2.5. Σύνοψη αποτελεσμάτων	99
Βιβλιογραφία	101

Διαγράμματα, πίνακες και εικόνες.

	Περιγραφή	Σελ.
Διάγραμμα 1.1	Εξέλιξη των μεριδίων των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων στην Ε.Ε. (1995-2010).	11
Διάγραμμα 1.2	Πηγές παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας σε Ελλάδα και Ευρώπη.	13
Πίνακας 1.1	Εκτιμήσεις της λευκής Βίβλου για τις μελλοντικές πηγές ενέργειας στην Ε.Ε.	15
Διάγραμμα 1.3	Πρόβλεψη της κατανομής των πηγών της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας για το έτος 2100.	19
Πίνακας 2.1	Κατανομή επιπέδων άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες περιοχές του κόσμου.	23
Πίνακας 2.2	Επίπεδα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και η κατανομή τους στον πλανήτη.	24
Εικόνα 2.1	Proyecto de motor solar (1903).	25
Εικόνα 2.2	Σχέδιο του Bernard Dubos (1926).	26
Εικόνα 2.3	Σχέδιο του Bernard Dubos (1926).	27
Εικόνα 2.4	Σχέδιο αιωρούμενης ηλιακής καμινάδας (καθ. Χ. Παπαγεωργίου).	28
Εικόνα 2.5	Η καμινάδα του σταθμού στην Ισπανία.	30
Εικόνα 2.6	Η δομή του ηλιακού συλλέκτη του σταθμού στην Ισπανία.	30
Εικόνα 2.7	Ο σταθμός στο Manzanares στην ολοκληρωμένη μορφή του.	30
Εικόνα 2.8	Πειραματικά πρωτότυπα.	33
Εικόνα 3.1	Προτάσεις κατασκευής ηλιακών καμινάδων που έχουν γίνει, με το στρόβιλο τοποθετημένο στη βάση της καμινάδας.	37
Εικόνα 3.2	Προτάσεις κατασκευής ηλιακών καμινάδων που έχουν γίνει, με το στρόβιλο τοποθετημένο στη βάση της καμινάδας.	37
Εικόνα 3.3	Ανύψωση καμινάδας πειραματικού σταθμού στους Κομποτάδες.	41
Εικόνα 3.4	Κατασκευή της καμινάδας του πειραματικού σταθμού στους Κομποτάδες.	42
Εικόνα 3.5	Ο πειραματικός σταθμός στους Κομποτάδες σε τελική φάση.	42
Εικόνα 3.6	Τελική μορφή πειραματικού σταθμού στους Κομποτάδες.	43
Εικόνα 3.7	Περίκλειστος σταθμός.	44
Εικόνα 3.8	Σύστημα φραγής αέρα του περικλειστού σταθμού.	46

Εικόνα 3.9	Φωτοβολταϊκά, τουρμπίνες και θερμοκήπιο του Υβριδικού Ηλιακού Σταθμού.	49
Εικόνα 3.10	Ανάρτηση φωτοβολταϊκών πάνελ στους στύλους στήριξης του συλλέκτη.	50
Εικόνα 3.11	Ηλιοστατικό σύστημα.	51
Εικόνα 3.12	Υβριδικός ηλιακός σταθμός.	52
Εικόνα 3.13	Σταθμός Demo.	55
Εικόνα 3.14	Διαφορετικές σειρές πάνελ του Demo σταθμού.	56
Εικόνα 3.15	Σταθμός Demo.	56
Εικόνα 3.16	Σταθμός Prototype.	57
Εικόνα 3.17	Hybrid Solar Farm.	58
Εικόνα 4.1	Ανάπτυξη ροής αέρα γύρω από έναν κύλινδρο.	60
Εικόνα 4.2	Κατανομή της πίεσης γύρω από τη κυλινδρική επιφάνεια.	61
Εικόνα 4.3	Ροή γύρω από κύλινδρο για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds.	62
Εικόνα 4.4	Yorkshire 1964 πύργος τηλεόρασης.	63
Εικόνα 4.5	Yorkshire 1969, κατάρρευση πύργου τηλεόρασης.	64
Εικόνα 4.6	Κρεμαστή γέφυρα στο Texas 1997.	65
Εικόνα 4.7	Κρεμαστή γέφυρα στο Texas 1997.	65
Εικόνα 4.8	Φαινόμενο Vortex Shedding.	66
Εικόνα 4.9	Vortex Shedding εξελίσσεται πίσω από το νησί Juan Fernandez στη Χιλή.	66
Εικόνα 4.10	Ενδεικτική περιέλιξη καμινάδας.	67
Εικόνα 4.11	Ενδεικτική περιέλιξη καμινάδας.	67
Εικόνα 4.12	Καλώδια της γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου, στα οποία έχει εφαρμοστεί η λύση της περιέλιξης.	68
Εικόνα 5.1	Ενδεικτική εικόνα πλέγματος για Finite Element Analysis.	70
Εικόνα 5.2	One-dimensional elements.	71
Εικόνα 5.3	2D elements.	72
Εικόνα 5.4	3D elements.	72
Εικόνα 5.5	Καμινάδα του σταθμού Demo.	77
Εικόνα 5.6	Καμινάδα του σταθμού Demo.	77
Εικόνα 5.7	Η δομή “σάντουιτς” της καμινάδας με πραγματικές διαστάσεις.	78
Εικόνα 5.8	Μοντέλο ANSYS.	78
Εικόνα 6.1	Πεπερασμένο στοιχείο Shell 281.	81
Εικόνα 6.2	Πεπερασμένο στοιχείο Link 180.	81
Εικόνα 6.3	Keypoints στη βάση της καμινάδας.	82
Εικόνα 6.4	Keypoints σε κάθε ύψος που υπάρχει αντηρίδα, στο τελικό ύψος της καμινάδας και στη βάση των αντηρίδων.	82
Εικόνα 6.5	Το μοντέλο σε μορφή γραμμών (lines).	83
Εικόνα 6.6	Πάκτωση στη βάση της καμινάδας.	84
Εικόνα 6.7	Πάκτωση στη βάση της καμινάδας.	84
Εικόνα 6.8	DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 7 μποφόρ.	86
Εικόνα 6.9	Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 7 μποφόρ.	87
Εικόνα 6.10	Τάσεις σ1 για ένταση ανέμου 7 μποφόρ.	88

Εικόνα 6.11	Τάσεις σ3 για ένταση ανέμου 7 μποφόρ.	89
Εικόνα 6.12	DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 8 μποφόρ.	90
Εικόνα 6.13	Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 8 μποφόρ.	91
Εικόνα 6.14	Τάσεις σ1 για ένταση ανέμου 8 μποφόρ.	92
Εικόνα 6.15	Τάσεις σ3 για ένταση ανέμου 8 μποφόρ.	93
Εικόνα 6.16	DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 9 μποφόρ.	94
Εικόνα 6.17	Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 9 μποφόρ.	95
Εικόνα 6.18	Τάσεις σ1 για ένταση ανέμου 9 μποφόρ.	96
Εικόνα 6.19	Τάσεις σ3 για ένταση ανέμου 9 μποφόρ.	96
Εικόνα 6.20	DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 10 μποφόρ.	97
Εικόνα 6.21	Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 10 μποφόρ.	97
Εικόνα 6.22	Τάσεις σ1 για ένταση ανέμου 10 μποφόρ.	98
Εικόνα 6.23	Τάσεις σ3 για ένταση ανέμου 10 μποφόρ.	98
Διάγραμμα 6.1	Εύρος μετατοπίσεων για τις διαφορετικές εντάσεις ανέμου.	99
Διάγραμμα 6.2	Εύρος τάσεων για τις διαφορετικές εντάσεις ανέμου.	100

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική ξεκινά από την θεώρηση των παγκόσμιων, Ευρωπαϊκών και Ελληνικών ενεργειακών αναγκών και πολιτικών. Όλες συγκλίνουν στην ανάγκη ανάπτυξης περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.). Από το σύνολο των ΑΠΕ εκείνη από την οποία αναμένονται οι μεγαλύτερες ποσοτικά ενεργειακές αποδόσεις είναι η Ηλιακή ενέργεια. Εκτιμάται ότι το 2100 θα συμμετέχει με ποσοστό μεγαλύτερο του 50% στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας.

Οι σταθμοί ηλιακής καμινάδας είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια αλλά βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο εφαρμογής. Καταγράφεται η τεχνογνωσία που έχει αναπτυχθεί και μελετηθεί διεθνώς μέχρι σήμερα, σχετικά με τους σταθμούς ηλιακής καμινάδας. Παρουσιάζονται τα ιδιωτικά και κρατικά προγράμματα που τρέχουν σε διάφορες χώρες για την ανάπτυξη και βελτίωση της σχετικής τεχνολογίας. Περιγράφεται η πρώτη Ελληνική πειραματική κατασκευή ηλιακού σταθμού στους Κομποτάδες Φθιώτιδας και καταγράφονται οι εμπειρίες από την λειτουργία του. Κυρίως περιγράφονται και αποδίδονται σχηματικά οι αναγκαίες βελτιώσεις που προέκυψαν από τα πειράματα που έγιναν στον σταθμό αυτό και που επιγραμματικά αποδίδονται ως Περίκλειστος Υβριδικός Ηλιακός σταθμός.

Η διαπίστωση ότι οι σταθμοί μεγαλύτερης κλίμακας έχουν βελτιωμένη απόδοση οδηγεί στην ανάγκη κατασκευής μεγαλύτερου πειραματικού σταθμού ηλιακής καμινάδας (Demo). Στην παρούσα επιχειρείται η μελέτη συμπεριφοράς ενός προσομοιωμένου μοντέλου μεταλλικής καμινάδας ύψους 60 και διαμέτρου 6 μέτρων, που χρειάζεται να κατασκευαστεί για ένα τέτοιο σταθμό. Για την προσομοίωση γίνεται χρήση του λογισμικού ANSYS APDL. Αναλύονται οι βασικές παραδοχές για το τρέξιμο της εφαρμογής. Δοκιμάζεται το μοντέλο υπό συνθήκες ανέμων διαφορετικών εντάσεων και καταγράφονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση.

Οι εμπειρίες που έχουν καταγραφεί από καταστροφές άλλων παρεμφερών κατασκευών έχουν δείξει, ότι οι αποτυχίες δεν επέρχονται μόνο από τις μέγιστες κατά περιοχή εντάσεις ανέμων. Συμβαίνουν και με ανέμους μικρότερης έντασης. Για το λόγο αυτό εξετάζονται διάφορες εντάσεις ανέμων και περιλαμβάνονται και οι μέγιστες αναμενόμενες για τον Ελληνικό χώρο. Χρησιμοποιείται σύστημα πρόσθετης στήριξης με αντηρίδες από συρματόσχοινο προκειμένου η κατασκευή να είναι ελαφρύτερη και οικονομικότερη.

Τέλος καταγράφονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από το σύνολο των δοκιμών προσομοίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Abstract

This dissertation starts with a review of the global, European and Greek energy needs and policies. They all converge towards the need of developing more Renewable Sources of Energy. Out of all the Renewable Sources of Energy the one that is expected to provide the largest share of performance is Solar Energy. It is estimated that by 2100 solar energy will be contributing more than 50% to the global energy production.

Solar Chimney Stations is a new technology that uses solar energy but it is still at the experimental phase of application. This dissertation gives a description of the know-how developed and studied so far internationally regarding Solar Chimney Stations. It presents the private and public programs/projects implemented in various countries regarding the development and optimization of this technology. It also provides a description of the first Greek experimental construction of a solar chimney station at Kabotades, Fthiotida and records the experience gained from its operation. Mainly it describes and gives a schematic representation of the necessary improvements that should be done, as a result of these experiments, under the title “Enclosed Hybrid Solar Station”.

The fact that larger scale stations have better performance leads to the need of constructing a bigger experimental solar chimney station (Demo) . This dissertation attempts to study the behavior of a simulated metal chimney model, 60 meters high and 6 meters wide that needs to be constructed for such a station. In order to implement the simulation, the ANSYS APDL Software was used. The basic assumptions for running this application are analyzed. The model is tested under conditions of variant wind power and the distortions and tensions developed in each case are recorded.

The existing experience recorded so far regarding the damage/destruction from other similar constructions has shown that failure does not occur only due to the maximum wind power of the particular area where the station is located. Failure also occurs with less powerful winds. Therefore, variant wind powers are examined including the maximum wind rates for the Greek territory. In addition, a support system with steel rope struts is used, in order for the construction to be lighter and cost-effective.

Finally, the dissertation presents in summary the conclusions drawn from all the simulation tests with the finite elements method.

1. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ Α.Π.Ε.

1.1. Εισαγωγή

Ένα από τα κρισιμότερα ζητήματα, σήμερα, του ανθρώπινου πολιτισμού είναι το «ενεργειακό – περιβαλλοντικό» ζήτημα. Οι συνιστώσες αυτού του ζητήματος είναι ποικίλες. Οι κυριότερες είναι: Η αναζήτηση της απαραίτητης ενέργειας από τον άνθρωπο. Η επάρκεια των αποθηκών/πηγών ενέργειας και η βέβαιη και ταχεία εξάντληση μερικών από αυτές. Οι βέλτιστοι τρόποι εκμετάλλευσης και εξοικονόμησης. Τα οικονομικά, κοινωνικά και ηθικά προβλήματα που δημιουργούνται από την ανισοβαρή, άλλοτε αλόγιστη και άλλοτε ανεπαρκή χρήση ενέργειας. Η μεγάλη και αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τους μηχανισμούς και τα συστήματα μετατροπής και μεταφοράς της ενέργειας. Με στόχο την επίλυση του ζητήματος, έχει ξεκινήσει μια παγκόσμια προσπάθεια για τη μείωση αυτών των επιπτώσεων, αφ' ενός με την ορθολογική χρήση της ενέργειας και αφ' ετέρου με την εφαρμογή τεχνολογιών καλύτερης αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών. Στα πλαίσια της ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων αυτών, προωθείται η εκμετάλλευση φιλικών προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, συμβάλλοντας καθοριστικά στην αιεφόρο ανάπτυξη.

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τα επόμενα 25 χρόνια προβλέπεται να αυξηθεί θεαματικά. Θα επενδυθούν τρισεκατομμύρια για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες μέσα στις επόμενες δύο δεκαετίες και όλες οι τεχνολογίες εξετάζονται και επανεξετάζονται. Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση αναμένεται να αυξηθεί σε 22 Gtoe ετησίως το 2050, από 10 Gtoe που είναι σήμερα.

Η αναμενόμενη εξάντληση των συμβατικών μη ανανεώσιμων καυσίμων αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης μας. Το θέμα αυτό βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος Παγκόσμιων Οργανισμών, Κυβερνήσεων, Ερευνητικών Κέντρων, των ενδιαφερόμενων παραγωγών και χρηστών ενέργειας, άλλα και όλων των ενημερωμένων πολιτών.

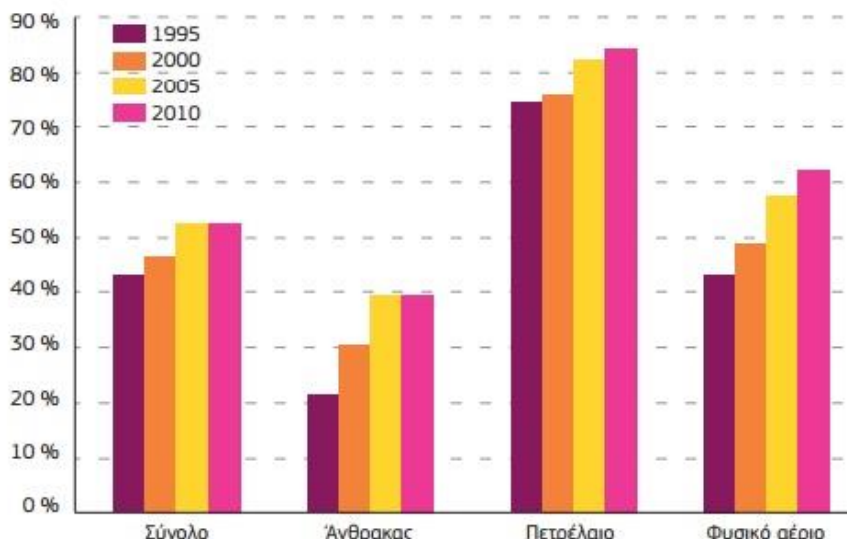
Αν και είναι γνωστό ότι η Ελλάδα είναι μια χώρα με συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς την εκμετάλλευση διαφόρων ΑΠΕ, εντούτοις δεν παρουσιάζει ποσοστό αξιοποίησης τους σε ικανοποιητικό βαθμό. Μεταξύ των παραγόντων που συμβάλλουν στη μη επιθυμητή αξιοποίηση των ΑΠΕ, μπορεί να αναφερθεί και η άγνοια – καχυποψία για την περιβαλλοντική συμβατότητα των έργων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αυτά επιφέρουν. Βέβαια, σε παγκόσμιο επίπεδο, γίνεται όλο και πιο έντονα αποδεκτό το γεγονός, ότι η αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ συνδυάζεται και συνεισφέρει στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και την αειφόρο ανάπτυξη σε αντίθεση και πάντα σε σύγκριση με τα προβλήματα που προκαλούνται από την εξόρυξη και χρήση συμβατικών καυσίμων .

1.2. Σημερινή κατάσταση στην κατανάλωση ενέργειας

Σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα παρέχουν το 81% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Μεταξύ των ορυκτών καυσίμων, το πετρέλαιο παρέχει το μεγαλύτερο ποσοστό περίπου το 35% της συνολικής παγκόσμιας ενεργειακής προσφοράς, ο άνθρακας παρέχει το 25% και το φυσικό αέριο το 21%. Οι ΑΠΕ παρέχουν περίπου το 13%, άλλα το μεγαλύτερο μέρος είναι υπό τη μορφή παραδοσιακής χρήσης της βιομάζας (πχ. καυσόξυλα) στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Οι νέες μορφές των ΑΠΕ (υδροηλεκτρικά, αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, σύγχρονες μορφές βιοενέργειας) συνεισφέρουν μόνο στο 1/3 της συνολικής προσφοράς των ΑΠΕ και το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτές είναι υπό τη μορφή μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων. Η πυρηνική ενέργεια, τέλος, παρέχει το υπόλοιπο 6%.

1.2.1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η εξάρτηση της χώρας μας από την εισαγόμενη ενέργεια δεν είναι μοναδική περίπτωση μέσα στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ολόκληρη η Ε.Ε. εξαρτάται από τις εισαγωγές ενέργειας, ιδίως πετρελαίου και πιο πρόσφατα φυσικού αερίου, και το γεγονός αυτό διαμορφώνει ένα πλαίσιο με πολιτικές ανησυχίες όσον αφορά την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού την παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην Ε.Ε. και, λόγω της απόκλισης μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, την αυξανόμενη εξάρτηση της Ε.Ε. από τις εισαγωγές ενέργειας από τρίτες χώρες. Πράγματι, το 2010 περισσότερο από το ήμισυ (54,1%) της ακαθάριστης εσωτερικής κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ-27 προερχόταν από εισαγόμενες πηγές.



Διάγραμμα 1.1: Εξέλιξη των μεριδίων των εισαγωγών ορυκτών καυσίμων στην ΕΕ (1995-2010).

Η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ-27 ανήλθε συνολικά σε 830,9 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (τιπ) το 2010. Ήταν η πρώτη ανάκαμψη της παραγωγής από το 2001, με αύξηση του όγκου της πρωτογενούς ενέργειας κατά 17,2 εκατομμύρια τιπ σε σύγκριση με το 2009. Σε πιο μακροπρόθεσμο πλαίσιο, η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ-27 ήταν κατά 109,7 εκατομμύρια τιπ χαμηλότερη το 2010 απ' ό,τι μια δεκαετία νωρίτερα. Η γενικά καθοδική τάση παραγωγής της ΕΕ-27 μπορεί, τουλάχιστον εν μέρει, να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι προμήθειες πρώτων υλών εξαντλήθηκαν και/ή οι παραγωγοί έκριναν την εκμετάλλευση των περιορισμένων πόρων μη επικερδή.

Το υψηλότερο επίπεδο παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας μεταξύ των κρατών μελών σημειώθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, με μερίδιο 17,8% επί του συνόλου της ΕΕ-27 πρόκειται για σημαντική μείωση σε σύγκριση με μια δεκαετία νωρίτερα (28,7% επί του συνόλου της ΕΕ-27 το 2000). Κατά τα άλλα, οι μεγαλύτεροι παραγωγοί πρωτογενούς ενέργειας ήταν η Γαλλία (16,2%) και η Γερμανία (15,8%), ενώ ακολούθησαν οι Κάτω Χώρες (8,4%) και η Πολωνία (8,1%). Το Ηνωμένο Βασίλειο είχε με διαφορά τη μεγαλύτερη μείωση παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας, με την παραγωγή να μειώνεται κατά 122,2 εκατομμύρια τιπ την περίοδο 2000 – 2010, ενώ η επόμενη μεγαλύτερη μείωση καταγράφηκε στην Πολωνία (11,9 εκατομμύρια τιπ). Οι μεγαλύτερες αυξήσεις στην παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας την τελευταία δεκαετία, έως το 2010, καταγράφηκαν στις Κάτω Χώρες (12,4 εκατ. τιπ), στη Γαλλία (5,0 εκατ. τιπ) και στη Σουηδία (3,1 εκατ. τιπ).

Η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ-27 το 2010 κάλυπτε ένα φάσμα διαφορετικών ενεργειακών πηγών, σημαντικότερη από τις οποίες ήταν η πυρηνική ενέργεια (28,5% του συνόλου) η συμμετοχή των πυρηνικών καυσίμων ήταν ιδιαίτερα υψηλή στο Βέλγιο, στη Γαλλία και στη Σλοβακία – όπου αντιπροσώπευαν πάνω από το ήμισυ της εθνικής παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας. Περίπου το ένα πέμπτο της συνολικής παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας της ΕΕ-27 προερχόταν από ΑΠΕ (20,1%), στερεά καύσιμα (19,6%, κυρίως άνθρακα) και φυσικό αέριο

(18,8%), ενώ η υπόλοιπη παραγωγή προερχόταν από το αργό πετρέλαιο (11,7%). Το 2010 η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην ΕΕ-27 υπερέβη για πρώτη φορά την παραγωγή από φυσικό αέριο και στερεά καύσιμα, έχοντας ήδη υπερβεί την παραγωγή από αργό πετρέλαιο το 2006.

Η αύξηση της πρωτογενούς παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπερέβη την αύξηση όλων των άλλων μορφών ενέργειας, σημειώνοντας ισχυρότατη αύξηση από το 2002 και μετά. Πράγματι, φαίνεται ότι αυτή η ημερομηνία ήταν το σημείο καμπής, καθώς η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιταχύνθηκε, σημειώνοντας αύξηση κατά 70,9% από το 2002 έως το 2010. Αντιθέτως, τα επίπεδα παραγωγής για τις άλλες πηγές πρωτογενούς ενέργειας γενικά μειώθηκαν από το 2000 έως το 2010. Οι μεγαλύτερες μειώσεις της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας που καταγράφηκαν αφορούσαν το αργό πετρέλαιο (-43,6%), το φυσικό αέριο (-24,9%) και τα στερεά καύσιμα (-23,5%), ενώ η μείωση της πυρηνικής ενέργειας ήταν μικρότερη, με 3,0%.

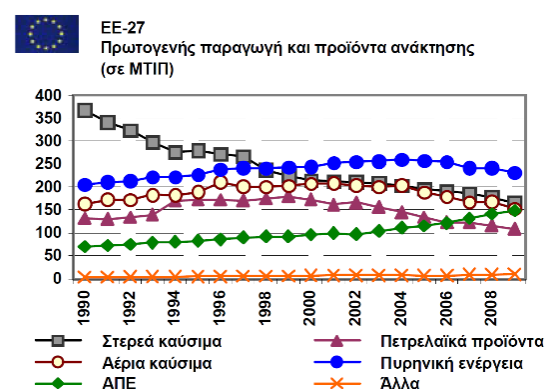
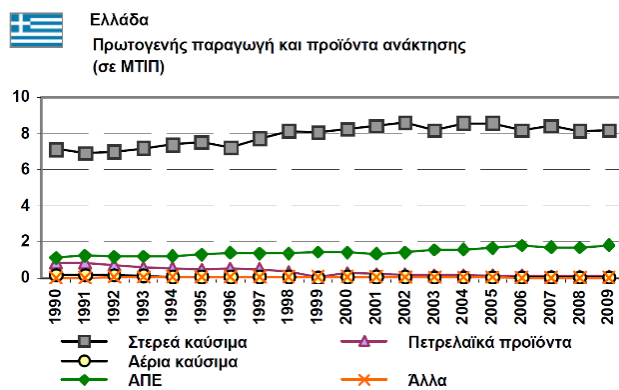
1.2.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα σήμερα, προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας παράγεται περίπου το 50% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκέντρωση των θερμοηλεκτρικών σταθμών στο Βορρά της χώρας δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης και ανισορροπία στη λειτουργία. Ωστόσο ο σχεδιασμός τους βασίστηκε στην εγγύτητά τους στις περιοχές που υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη, ο οποίος αποτελεί την καύσιμη πρώτη ύλη για αυτούς τους σταθμούς. Στη χώρα μας υπάρχουν αρκετές περιοχές με σημαντικά αποθέματα λιγνίτη, εκ των οποίων οι μεγαλύτερες και γνωστότερες είναι στην Δυτική Μακεδονία (Πτολεμαΐδα – Φλώρινα) στην Κεντρική Πελοπόννησο (Μεγαλόπολη), στην Ανατολική Μακεδονία (Φίλιπποι – Δράμα), Θεσσαλία (Ελασσόνα) κλπ.. Σύμφωνα με στοιχεία του 2011 για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα (National Report ΡΑΕ 2012), το 66.5% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων είναι θερμοκοί σταθμοί, εκ των οποίων με λιγνίτη 4930 MW, με πετρέλαιο 730 MW και με φυσικό αέριο 4579 MW. Το 19.6% είναι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και το 13.9% είναι μονάδες ΑΠΕ.

Ο λιγνίτης είναι η σημαντικότερη εγχώρια ενεργειακή πηγή, συνεισφέροντας το 53.15% της παραγωγής σύμφωνα με τα στοιχεία του 2011. Το φυσικό αέριο συνεισφέρει το 28.3%. Ταυτόχρονα η ανάδειξη της προστασίας του περιβάλλοντος ως στόχου υψηλής προτεραιότητας της ελληνικής πολιτείας, οδηγεί σε προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, θέτοντας ως στόχο την αύξηση συμμετοχής τους στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο 34% μέχρι το 2020. Στο ίδιο πλαίσιο δίνεται έμφαση στην επιτάχυνση της διεύθυνσης του φυσικού αερίου στο ενεργειακό ισοζύγιο. Επειδή η χρονική διάρκεια ζωής των αποθεμάτων λιγνίτη που εκμεταλλευόμαστε σήμερα δεν υπερβαίνει τα 35 χρόνια, έχει διατυπωθεί η άποψη

ότι θα πρέπει να μπουν στο ελληνικό ισοζύγιο ηλεκτρισμού νέα καύσιμα, όπως ο λιθάνθρακας, ώστε να παραταθεί η διαθεσιμότητα και η χρήση του λιγνίτη σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου. Οι ανθρακικές μονάδες επιτυγχάνουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από τις λιγνιτικές και κατά συνέπεια εκπέμπουν μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά στις εκπομπές διοξειδίου του θείου, αυτές αντιμετωπίζονται με αντιρρυπαντικές εγκαταστάσεις όπως η αποθείωση καυσαερίων. Επιπλέον ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του άνθρακα είναι ότι, ενώ το φυσικό αέριο θα είναι διαθέσιμο για τα επόμενα 50 – 60 χρόνια, ο άνθρακας θα είναι διαθέσιμος τουλάχιστον για 200 χρόνια ακόμη. Ωστόσο η μελλοντική αξιοποίηση του άνθρακα θα εξαρτηθεί από τη δυνατότητα των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων με άνθρακα να ενσωματώσουν καθαρές και αποδοτικές τεχνολογίες καύσης, με χαμηλό κόστος, ώστε να προσαρμοστούν στο αυστηρό πλαίσιο των περιβαλλοντικών απαιτήσεων του «Πρωτοκόλλου του Κιότο» και των αυστηρών Ευρωπαϊκών προδιαγραφών για νέες εγκαταστάσεις καύσης.

Η εγκατεστημένη ισχύς των εν λειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ήταν 2140 MW στο τέλος του 2011. Σε επίπεδο τεχνολογίας, τα αιολικά έργα επικρατούν στο σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των έργων ΑΠΕ που βρίσκονται σε λειτουργία.



Διάγραμμα 1.2.α,β: Πηγές παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας σε Ελλάδα και Ευρώπη.

1.3. Ενεργειακές πολιτικές

Είναι σημαντικό να εξετάσουμε, πέρα από το τι γίνεται σήμερα το τι σχεδιάζεται να γίνει αύριο, σχετικά με την μελλοντική διασφάλιση ενεργειακών πόρων. Και πιο συγκεκριμένα να εξετάσουμε τις ενεργειακές πολιτικές της Ευρώπης αλλά και της Ελλάδας προκειμένου να προσδιοριστεί το αν θα έχει δυνητικό μερίδιο σ' αυτό το σχεδιασμό η εξεταζόμενη τεχνολογία και η σχεδιαζόμενη κατασκευή.

1.3.1. Ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική

Πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν και διαμορφώνουν σήμερα την ενεργειακή πολιτική και τη ρύθμιση της ενεργειακής αγοράς. Πρώτον η αύξηση του πληθυσμού της γης καθώς και η συνεχής ανάπτυξη προκαλούν αύξηση της ενεργειακής ζήτησης, η οποία με τη σειρά της προκαλεί αύξηση των τιμών της ενέργειας (το 2035 υπολογίζεται ότι το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε. θα είναι κατά 50% υψηλότερο από το αντίστοιχο στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και 3 φορές υψηλότερο συγκριτικά με εκείνο της Κίνας). Επιπλέον, προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες των πολιτών της σε ενέργεια, η ΕΕ αναγκάζεται να εισάγει ορυκτά καύσιμα. Η εξάρτηση της αυτή σε ορυκτά καύσιμα (50% σήμερα, 65% το 2030) θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια εφοδιασμού, ενώ η υπερκατανάλωση ορυκτών καυσίμων συνδέεται με τις εκπομπές αέριων ρύπων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Υπό μια ευρύτερη σκοπιά, η έκρηξη ανάπτυξης του σχιστολιθικού αερίου στις ΗΠΑ και η δυσπιστία ως προς την εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας μετά το ατύχημα της Φουκουσίμα του 2011 αποτελούν σημαντικές παραμέτρους στη διαδικασία λήψης των ενεργειακών αποφάσεων στην Ευρώπη. Οι υψηλές τιμές ενέργειας, η εξάρτηση της Ευρώπης από τα ορυκτά καύσιμα, η υψηλή ενεργειακή ζήτηση και η ανάγκη για μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων οδήγησαν την Ε.Ε. στη λήψη καινοτόμων μέτρων προς μια βιώσιμη ανάπτυξη, μέσω της υιοθέτησης μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας και της προώθησης νέων τεχνολογιών που παράγουν καθαρή ('πράσινη') ενέργεια στο πλαίσιο μιας απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας, όπου θα εφαρμοστεί αποτελεσματικός ανταγωνισμός μεταξύ των νεοεισερχόμενων εταιρειών.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθετώντας τη Λευκή Βίβλο για τις ΑΠΕ το Νοέμβριο του 1997 κατέστρωσε για πρώτη φορά μια περιεκτική στρατηγική και ένα σχέδιο δράσης για τον τομέα. Κύριος στόχος της στρατηγικής είναι ο διπλασιασμός του ποσοστού διείσδυσης των ΑΠΕ στην ΕΕ έως το 2020. Αυτό σήμαινε φυσικά ότι τα κράτη μέλη όφειλαν να ενθαρρύνουν την αύξηση των ΑΠΕ σύμφωνα με το δικό τους δυναμικό.

Τύπος	1995	Στόχος - 2020
1. Αιολική Ενέργεια	2,5 GW	40 GW
2. Υδροηλεκτρική Ενέργεια	92 GW	105 GW
2.1 Μεγάλα υδροηλεκτρικά	82,5 GW	91 GW
2.2 Μικρά υδροηλεκτρικά	9,5 GW	14 GW
3. Φωτοβολταϊκά	0,03 GWp	3 GWp
4. Βιομάζα	44,8 Mtoe	135 Mtoe
5. Γεωθερμία		
5.1 Ηλεκτρισμός	0,5 GW	1 GW
5.2 Θερμότητα	1,3 GWth	5 GWth
6. Ηλιακοί συλλέκτες για θέρμανση νερού	6,5 10 ⁶ m ²	100 10 ⁶ m ²
7. Παθητικά ηλιακά		35 Mtoe
8. Άλλα		1 GW

Πίνακας 1.1: Εκτιμήσεις της Λευκής Βίβλου για τις μελλοντικές πηγές ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η Λευκή Βίβλος παρέχει ένα σχέδιο δράσης που στοχεύει στην ανάληψη πρωτοβουλιών κατά τρόπο συντονισμένο μέσα στην ΕΕ για την κινητοποίηση του δυναμικού των ΑΠΕ και την παροχή ισότιμων ευκαιριών για τις ΑΠΕ στην αγορά χωρίς υπέρμετρο δημοσιονομικό βάρος. Τα μέτρα που προτείνονται αφορούν τόσο στην εσωτερική αγορά όσο και στην ενίσχυση των Κοινοτικών πολιτικών.

Σημαντικό στοιχείο, που διαφοροποιεί το παρόν πλαίσιο από προγενέστερα, είναι ότι οι στόχοι για τις ΑΠΕ (20% διείσδυση μέχρι το 2020) και τα υγρά βιοκαύσιμα (10% αύξηση μέχρι το 2020) είναι δεσμευτικού χαρακτήρα. Σημειώνεται ότι το 20% της διείσδυσης των ΑΠΕ αφορά στο σύνολο των ενεργειακών χρήσεων (ηλεκτρισμός, θερμότητα και μεταφορές) και ως εκ τούτου είναι ιδιαίτερα φιλόδοξο. Για την ηλεκτροπαραγωγή εκτιμάται ότι το επιθυμητό ποσοστό διείσδυσης θα ξεπεράσει το 30%. Ο στρατηγικός στόχος και τα συγκεκριμένα μέτρα για την υλοποίησή του, που περιγράφονται στο Σχέδιο Δράσης, αποτελούν τον πυρήνα της νέας Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής.

Επίσης η Ε.Ε. έχει δεσμευτεί να μειώσει έως το 2050 τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 80-95% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 και γι' αυτό διερευνά την προοπτική της πλήρους απαλλαγής από τις εκπομπές CO₂. Τον Μάρτιο του 2011 η Ε.Ε. δημοσίευσε τον χάρτη πορείας για απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές, ο οποίος καλύπτει το σύνολο της οικονομίας. Παράλληλα, καταρτίζει συγκεκριμένα σχέδια για κάθε τομέα, εκ των οποίων το πλέον πρόσφατο είναι ο ενεργειακός χάρτης πορείας για το 2050. Καθώς οι μελλοντικές ανάγκες και προμήθειες είναι δύσκολο να προβλεφθούν, το σχέδιο αυτό παρουσιάζει διάφορα σενάρια που εξετάζουν τις πιθανές επιπτώσεις, προκλήσεις, αλλά και δυνατότητες εκσυγχρονισμού του ενεργειακού συστήματος. Τα σενάρια αυτά λαμβάνουν υπόψη τις πιθανές αλλαγές

στις τιμές του διοξειδίου του άνθρακα, στην τεχνολογία και στα δίκτυα. Τα σενάρια καταρτίστηκαν με βάση διαφορετικούς συνδυασμούς των τεσσάρων βασικών τρόπων απαλλαγής από τις εκπομπές CO₂: ενεργειακή απόδοση, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πυρηνική ενέργεια και δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα. Διαπιστώθηκαν τα εξής:

- η απαλλαγή από τις εκπομπές CO₂ είναι εφικτή και, μακροπρόθεσμα, είναι λιγότερο δαπανηρή από τις σημερινές πολιτικές
- η ενεργειακή απόδοση και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν καθοριστική σημασία, ανεξάρτητα από το ενεργειακό μίγμα που θα επιλεγεί
- οι επενδύσεις για τον εκσυγχρονισμό των υποδομών πρέπει να ξεκινήσουν σήμερα, έτσι ώστε να αποφευχθούν δαπανηρότερες αλλαγές στο μέλλον
- η ύπαρξη κοινής ενεργειακής αγοράς έχει καθοριστική σημασία για τη διατήρηση του ενεργειακού κόστους σε χαμηλά επίπεδα και τη διασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού· η κοινή ενεργειακή αγορά πρέπει να έχει ολοκληρωθεί μέχρι το 2014.

Όλα τα σενάρια θα εξαρτηθούν από τη δράση που θα αναλάβει κάθε χώρα για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ανεξάρτητα όμως από τις προσπάθειες απαλλαγής από τις εκπομπές CO₂, τα ενεργειακά δίκτυα της Ε.Ε. απαιτούν επενδύσεις για την αντικατάσταση των απηρχαιωμένων υποδομών τους, μερικές από τις οποίες είχαν κατασκευαστεί πριν από 40 χρόνια.

1.3.2. Ελληνική ενεργειακή πολιτική

Οι κύριοι άξονες της ενεργειακής πολιτικής στην Ελλάδα συνοψίζονται στα εξής:

- Ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού
- Διαφοροποίηση ενεργειακών πηγών
- Προστασία του περιβάλλοντος
- Προώθηση της παραγωγικότητας και της ανταγωνιστικότητας, μέσω ενεργειακών επενδύσεων καθαρών ενεργειακών τεχνολογιών, εξασφαλίζοντας παράλληλα την περιφερειακή ανάπτυξη.

Η γενική μελλοντική εικόνα του ενεργειακού ισοζυγίου της Ελλάδας είναι ότι σταδιακά θα αυξάνεται η εξάρτηση της χώρας από εισαγόμενη ενέργεια είτε με την μορφή εισαγόμενων καυσίμων είτε με την εισαγωγή απευθείας ηλεκτρικής ενέργειας, αν δεν βελτιωθούν τα ποσοστά συμμετοχής των εγχώριων σταθμών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μέχρι το 1994, η αξιοποίηση και χρήση των ΑΠΕ, περιορίστηκε: 1) σε ότι αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδόν αποκλειστικά στις πρωτοβουλίες της ΔΕΗ,

παραδοσιακά μεν στον τομέα των μικρών υδροηλεκτρικών έργων και αργότερα με τις πρώτες αξιόλογες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων και λίγων μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε απομονωμένες περιοχές της χώρας, 2) σε ότι αφορά στην παραγωγή θερμότητας, παραδοσιακά μεν στη χρήση της βιομάζας, κυρίως στις αγροτικές περιοχές της χώρας και από τη δεκαετία του '70 στην εκτεταμένη χρήση των ηλιακών θερμοσιφώνων για τη θέρμανση νερού. Τα περιθώρια ως εκ τούτων, ανάπτυξης των ΑΠΕ για την χώρα μας είναι περίπου απεριόριστα.

1.4. Η ανάγκη στροφής προς τις ΑΠΕ

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να έχουν σημαντική συμβολή στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, καθώς είναι οι μόνες πηγές ενέργειας που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με εκπομπές CO₂. Πέρα όμως από τα στενά πλαίσια αντιμετώπισης του φαινομένου του θερμοκηπίου, τα χαρακτηριστικά των ΑΠΕ τις καθιστούν συστατικό στοιχείο μιας νέας αναπτυξιακής πολιτικής και μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς την βιώσιμη ανάπτυξη. Τα οφέλη που προκύπτουν από την εκμετάλλευση των ΑΠΕ δεν είναι μόνο περιβαλλοντικής φύσης. Η αξιοποίηση αυτών των ενδογενών πόρων μπορεί να επιφέρει επίσης σημαντικές θετικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στην περιφερειακή και την τοπική ανάπτυξη. Παρά το γεγονός ότι απαιτείται ένα σημαντικό κεφάλαιο για την αρχική τους εγκατάσταση και εξοπλισμό, το λειτουργικό τους κόστος είναι αμελητέο και τα αποτελέσματά τους ιδιαίτερα σημαντικά.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους πεπερασμένους πόρους (κυρίως ορυκτά καύσιμα).
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτόαρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, παρέχοντας την δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).

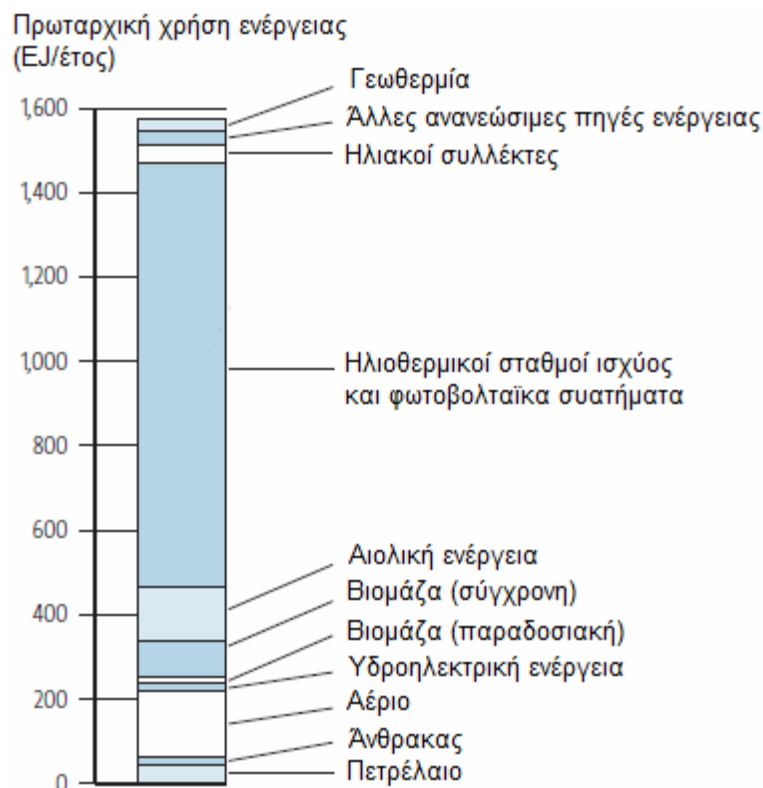
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών και σε μικρή κλίμακα εφαρμογών ή σε μεγάλη κλίμακα αντίστοιχα, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ χαρακτηρίζονται ως «εντάσεως ενέργειας», συμβάλλουν δηλαδή στη δημιουργία πολλών θέσεων εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. αιολικά πάρκα, εργοστάσια ενεργειακής αξιοποίησης γεωργικής βιομάζας, θερμοκηπιακές καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Οι ΑΠΕ χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνολογίες εκμεταλλεύονται το ηλιακό δυναμικό (ηλιακή ακτινοβολία), το αιολικό δυναμικό, το δυναμικό βιομάζας, το υδάτινο δυναμικό, το θαλάσσιο δυναμικό και το γεωθερμικό δυναμικό.

- Η ηλιακή ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία .
- Η αιολική ενέργεια, η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των ανέμων.
- Η βιομάζα, δηλαδή η ενέργεια που πηγάζει από την αξιοποίηση του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος κάθε υλικού, που προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τον φυτικό ή ζωικό κόσμο.
- Η υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού και της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια, με τη βοήθεια στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών.
- Η θαλάσσια ενέργεια, η οποία αξιοποιεί τα παλιρροιακά και θαλάσσια ρεύματα και κύματα.
- Η γεωθερμική ενέργεια, μέσω της οποίας αξιοποιούνται τα θερμά νερά ή/και οι ατμοί που υπάρχουν σε υπόγειους ταμιευτήρες της γης.

Όλες οι μελέτες των διεθνών ενεργειακών Οργανισμών έδειξαν ότι προβλέπεται μεγάλη ανάπτυξη για τους ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ισχύος. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ηλιοθερμικών σταθμών αναμένεται να αυξηθεί τουλάχιστον στα 20.000 MW μέχρι το 2020. Στο **Διάγραμμα 1.4** παρουσιάζεται μία πρόβλεψη του Γερμανικού Συμβουλίου για την Παγκόσμια Αλλαγή (WBGU) για την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας το έτος 2100. Στην πρόβλεψη αυτή βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας θα παράγεται από τεχνολογίες

που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία (ηλιοθερμικοί σταθμοί και φωτοβολταϊκά συστήματα).



Διάγραμμα 1.3: Πρόβλεψη της κατανομής των πηγών της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας για το έτος 2100.

Στα επόμενα κεφάλαια θα ασχοληθούμε αρχικά με την πηγή από την οποία αναμένεται να αντλούνται στο άμεσο μέλλον πολύ μεγαλύτερες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή με την Ηλιακή ενέργεια. Θα επικεντρωθούμε σε μια κυρίως μορφή τεχνολογίας που εκμεταλλεύεται το ηλιακό δυναμικό και πιο συγκεκριμένα, την άμεση ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρισμού με χρήση ηλιακής καμινάδας.

Θα περιγραφούν οι βελτιωμένες μορφές ηλεκτροπαραγωγικών ηλιακών σταθμών που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που εκτελέστηκαν στον Πρώτο Ελληνικό σταθμό με ηλιακή καμινάδα που λειτούργησε την διετία 2010 – 2012.

2. ΣΤΑΘΜΟΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΑΜΙΝΑΔΑΣ

2.1. Η πηγή της ενέργειας

Προέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο ήλιος είναι ένας τεράστιος αντιδραστήρας σύντηξης, όπου πραγματοποιείται μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο με ρυθμό 4 εκατομμύρια τόνους το δευτερόλεπτο. Ο ήλιος ακτινοβολεί ενέργεια προς τη γη λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της επιφάνειάς του. Το ένα τρίτο της ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη ανακλάται πίσω στο διάστημα. Η υπόλοιπη αρχικά την ημέρα απορροφάται και τελικά την νύκτα επανεκπέμπεται προς στο διάστημα ως υπέρυθη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Η γη ακτινοβολεί όση ενέργεια έχει λάβει, δημιουργώντας μια κατάσταση ενεργειακής ισορροπίας σε θερμοκρασίες κατάλληλες για τη διατήρηση της ζωής.

Τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αντιλαμβανόμαστε την ηλιακή ακτινοβολία ως λευκό φως. Στην πραγματικότητα, διαδίδεται με ένα ευρύ φάσμα μήκους κυμάτων, από την υπέρυθη έως την υπεριώδη. Η μορφή της κατανομής του μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του ήλιου. Η γη, της οποίας η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι -20°C , εκπέμπει ενέργεια ως μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθη ακτινοβολία στο διάστημα, δεδομένου ότι η θερμοκρασία του διαστήματος είναι κατά μερικούς μόνο βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν, των -273°C . Συνήθως αγνοούμε αυτή την ακτινοβολία, αλλά η εμφάνιση παγετού μια ξάστερη νύχτα οφείλεται στην αποβολή από την γη με ακτινοβολία, θερμότητας πρώτα στα ψυχρά ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και στη συνέχεια στο διάστημα.

Η ηλιακή ακτινοβολία και οι εποχές.

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο με τον πολικό της άξονα σε κλίση ως προς το επίπεδο περιστροφής ($23,5^{\circ}$). Τον Ιούνιο, η γη βρίσκεται με το βόρειο πόλο προς τον

ήλιο. Έτσι, οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν στο βόρειο ημισφαίριο πιο κάθετα και ο ήλιος εμφανίζεται υψηλότερα στον ουρανό. Το Δεκέμβριο, ο βόρειος πόλος έχει απομακρυνθεί (λόγω κλίσης) από τον ήλιο. Οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν περισσότερο πλάγια, με αποτέλεσμα χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. Ονομάζουμε ενεργειακή πυκνότητα την ενέργεια που προσπίπτει σε ένα τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας της γης στη μονάδα χρόνου.

Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία.

Όταν οι ακτίνες του ήλιου φθάνουν στην ατμόσφαιρα, το φως διαχέεται σε κάποιο βαθμό, ανάλογα με τη νέφωση. Ένα κλάσμα από το φως που διαχέεται φθάνει στη γη ως διάχυτη ακτινοβολία, χωρίς την οποία, ο ουρανός θα φαινόταν μαύρος. Η άμεση ακτινοβολία είναι το ποσοστό του φωτός που φθάνει απευθείας από τον ήλιο. Και οι δύο τύποι ακτινοβολίας είναι χρήσιμοι για εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, αλλά μόνο η άμεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών. Ωστόσο, η διάχυτη ακτινοβολία είναι αυτή που μας παρέχει το “φως της ημέρας” ιδιαίτερα σε βορινά δωμάτια. Μια ηλιόλουστη μέρα, η πυκνότητα της ισχύος της άμεσης ακτινοβολίας μπορεί να φθάσει την τιμή $1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, η οποία ονομάζεται “1 sun” και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών. Όσο πιο χαμηλά βρίσκεται ο ήλιος στον ουρανό, τόσο μεγαλύτερη απόσταση πρέπει να διανύσουν οι ακτίνες στην ατμόσφαιρα, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα για διάχυση τους πίσω στο διάστημα. Όταν ο ήλιος βρίσκεται σε κλίση 60° σε σχέση με το κάθετο επίπεδο, η μέγιστη ενεργειακή πυκνότητα στο έδαφος είναι 25% της πυκνότητας στην περίπτωση που ο ήλιος βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο.

Μέτρηση και εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο ήλιος βρίσκεται 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα μακριά από την γη και η διάμετρος του είναι περίπου 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του είναι κοντά στους 5800 K και εκπέμπει ακτινοβολία με ρυθμό $3,8\cdot 10^{23}$ kW. Αυτή η ενέργεια παρέχεται από αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης που συμβαίνουν κοντά στον πυρήνα του και οι οποίες υπολογίζεται ότι θα συνεχιστούν για μερικά εκατομμύρια χρόνια ακόμα. Το μεγαλύτερο μέρος (70%) της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης βρίσκεται εκτός του ορατού φάσματος με μέγιστη συγκέντρωση περίπου στα 500nm (συνιστώντας ένα μέλαν σώμα που ακτινοβολεί στους 5.800K). Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι της τάξης των $900 - 1000 \text{ W/m}^2$ το μεσημέρι μιας καθαρής ηλιόλουστης μέρας. Το μικροσκοπικό ποσοστό $4.5\cdot 10^{-8}\%$ της συνολικής ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο φτάνει την εξωτερική επιφάνεια της ατμόσφαιρας της γης. Ωστόσο στα $1,7\cdot 10^{14}$ kW αυτό είναι 1000 φορές μεγαλύτερο από την τρέχουσα μέση παγκόσμια κατανάλωση που είναι $1,6\cdot 10^{11}$ kW. Εάν η ηλιακή ακτινοβολία μπορούσε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με βαθμό απόδοσης 20% τότε αυτό το ποσό της

ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παραχθεί από μία επιφάνεια ίση με 35.000 km². Δηλαδή περίπου όσο το ένα τέταρτο της χώρας μας, αν θεωρήσουμε ότι αυτή δέχεται λογικά επίπεδα άμεσης ακτινοβολίας. Η άμεση ακτινοβολία μετράται με πυρηλιόμετρα και μπορεί να συγκεντρωθεί από κάτοπτρα ή φακούς τα οποία στοχεύουν απευθείας τον ήλιο. Η διάχυτη ακτινοβολία είναι το ποσοστό αυτό της συνολικής ακτινοβολίας το οποίο έχει διασκορπιστεί από υδρατμούς, σωματίδια ή μόρια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί εύκολα να συγκεντρωθεί και αποτελεί το 15% ή και περισσότερο της συνολικής ακτινοβολίας ανάλογα με την καθαρότητα του ουρανού. Τα επίπεδα της διάχυτης ακτινοβολίας μετρώνται με ένα πυρανόμετρο προσαρμοσμένο σε μία συσκευή σκίασης που να αποκλείει την άμεση ακτινοβολία. Η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία μαζί αποτελούν την συνολική παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία και μπορούν να μετρηθούν από ένα πυρανόμετρο χωρίς σκίαση.

Ωστόσο υπάρχουν προβλήματα που σχετίζονται με τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνεχή ηλεκτρική ενέργεια.

- Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης έχει μικρή συγκέντρωση ισχύος (1000 W/m²) σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας όπως στις εστίες καύσης που παράγονται από ορυκτά καύσιμα (MW/m²).
- Ο ήλιος ακτινοβολεί περιοδικά κατά την διάρκεια της ημέρας. Επίσης η ακτινοβολία του παρουσιάζει αποκλίσεις ανάλογα με την εποχή ενώ επηρεάζεται πολύ και από τις καιρικές συνθήκες.
- Η θέση (αζιμούθιο και ανύψωση) του ήλιου στον ουρανό αλλάζει συνεχώς. Κατά συνέπεια αλλάζει και η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας της άμεσης ακτινοβολίας.
- Η ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί να αποθηκευτεί άμεσα. Πρέπει κατευθείαν να μετατραπεί σε θερμότητα, ηλεκτρισμό ή χημική ενέργεια. Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν εν μέρει να αντιμετωπισθούν με την χρήση κατάλληλων τεχνολογιών.

2.2. Κατανομή προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας

Η ηλιοθερμική ενέργεια εκμεταλλεύεται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία έτσι πρέπει να χρησιμοποιείται σε τοποθεσίες με υψηλά ποσοστά άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Μια τοποθεσία για να είναι κατάλληλη θα πρέπει να μπορεί να παρέχει τουλάχιστον 2.000kWh ηλιακής ενέργειας ανά m² επιφάνειας ετησίως, όταν οι καλύτερες τοποθεσίες παρέχουν περισσότερο από 2.500kWh/m². Τέτοιες τοποθεσίες είναι αυτές στις οποίες το κλίμα και η βλάστηση δεν παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής υγρασίας όπως στέπες, θαμνώδεις εκτάσεις, σαβάνες, ημι-ερημικές

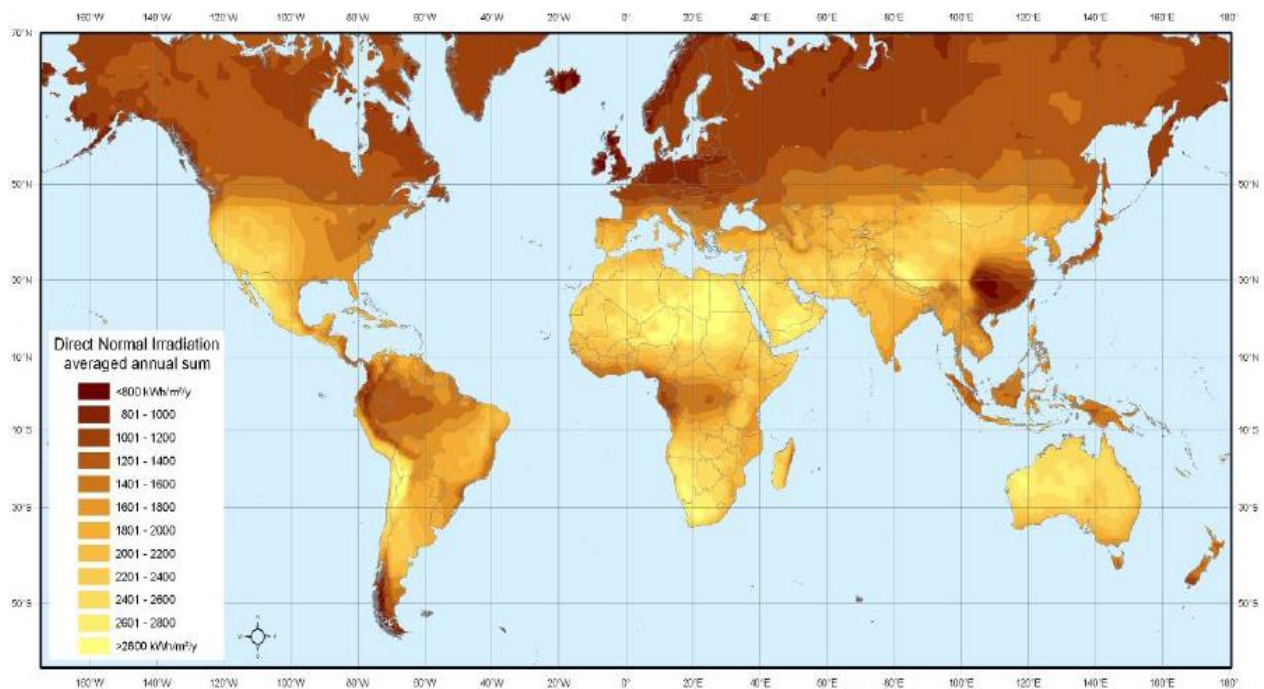
και ερημικές περιοχές που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος μεταξύ -40 και 40 μοιρών. Μεταξύ των πιο πολλά υποσχόμενων περιοχών του κόσμου είναι οι νοτιοδυτικές Η.Π.Α., η κεντρική και νότια Αμερική, η Αφρική, η μέση Ανατολή, οι μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, το Ιράν, το Πακιστάν η ερημικές περιοχές της Ινδίας, της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, η Κίνα και η Αυστραλία. Σε πολλές περιοχές του κόσμου, έκταση ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου είναι αρκετή για να παράγει 100 – 200 Gigawatt hours (GWh) ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως χρησιμοποιώντας την ηλιοθερμική τεχνολογία. Αυτό ισοδυναμεί με την ετήσια παραγωγή ηλεκτρισμού ενός συμβατικού σταθμού των 50 MW ο οποίος καίει άνθρακα ή αέριο. Παγκοσμίως η εκμετάλλευση λιγότερου του 1% του συνολικού ηλιακού δυναμικού θα ήταν αρκετή ώστε να καλυφθούν οι προτάσεις του Διακυβερνητικού Συμβουλίου για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) των Ηνωμένων Εθνών για την μακροπρόθεσμη σταθεροποίηση του κλίματος.

Επίπεδα DNI	Αφρική (Km ²)	Αυστραλία (Km ²)	Κεντρική Ασία, Καύκασος (Km ²)	Καναδάς (Km ²)	Κίνα (Km ²)	Κεντρική Νότια Αμερική (Km ²)	Ινδία (Km ²)	Ιαπωνία
kWh/m ² /y								
2000-2099	1.082.050	70.164	151.109		88.171	334.096	83.522	
2100-2199	1.395.900	187.746	3.025		184.605	207.927	11.510	
2200-2299	1.351.050	355.188	3.594		415.720	232.678	5.310	
2300-2399	1.306.170	812.512	1.642		263.104	191.767	7.169	
2400-2499	1.862.850	1.315.560	569		99.528	57.041	3.783	
2500-2599	1.743.270	1.775.670			96.836	31.434	107	
2600-2699	1.468.970	1.172.760			17.939	42.139	976	
2700-2800+	2.746.100	393.850			24.435	93.865	120	
Σύνολο (km ²)	12.956.360	6.083.450	159.939	0	1.190.948	1.190.948	112.497	0

Πίνακας 2.1.α: Κατανομή επιπέδων άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες περιοχές του κόσμου.

Επίπεδα DNI	Μέση Ανατολή (Km ²)	Μεξικό (Km ²)	Υπόλοιπη Αναπτυσσόμενη Ασία (Km ²)	Υπόλοιπη Ανατολική Ευρώπη (Km ²)	Ρωσία (Km ²)	Νότια Κορέα (Km ²)	Ε.Ε27+ (Km ²)	Η.Π.Α.
kWh/m ² /y								
2000-2099	36.315	16.999	47.520	59			9.163	149.166
2100-2199	125.682	34.123	52.262	129			5.016	172.865
2200-2299	378.654	35.263	105.768	23			6.381	210.128
2300-2399	557.299	53.765	284.963				1.498	151.870
2400-2499	633.994	139.455	172.043				800	212.467
2500-2599	298.755	60.972	37.855				591	69.364
2600-2699	265.541	12.628	2.084				257	19.144
2700-2800+	292.408	14.903	1.082				270	
Σύνολο (km ²)	2.588.648	368.108	703.577	211	0	0	23.975	985.005

Πίνακας 2.1.β: Κατανομή επιπέδων άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες περιοχές του κόσμου.



Πίνακας 2.2: Επίπεδα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και η κατανομή τους στον πλανήτη.

2.3. Βασική αρχή λειτουργίας σταθμών ηλιακής καμινάδας

Έχουν παρουσιαστεί διάφορες τεχνολογίες για την εκμετάλλευση και αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Πολλές έχουν δοκιμαστεί και βρίσκονται ήδη σε χρήση ενώ άλλες βρίσκονται σε στάδιο μελέτης και πειραματικής δοκιμής. Ο πειραματικός σταθμός, την υλοποίηση του οποίου εξετάζουμε εδώ αφορά ακριβώς μια από αυτές τις τεχνολογίες. Είναι ένας ηλιακός σταθμός στον οποίο η αξιοποίηση και εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με τη χρήση θερμοκηπίου και ηλιακής καμινάδας.

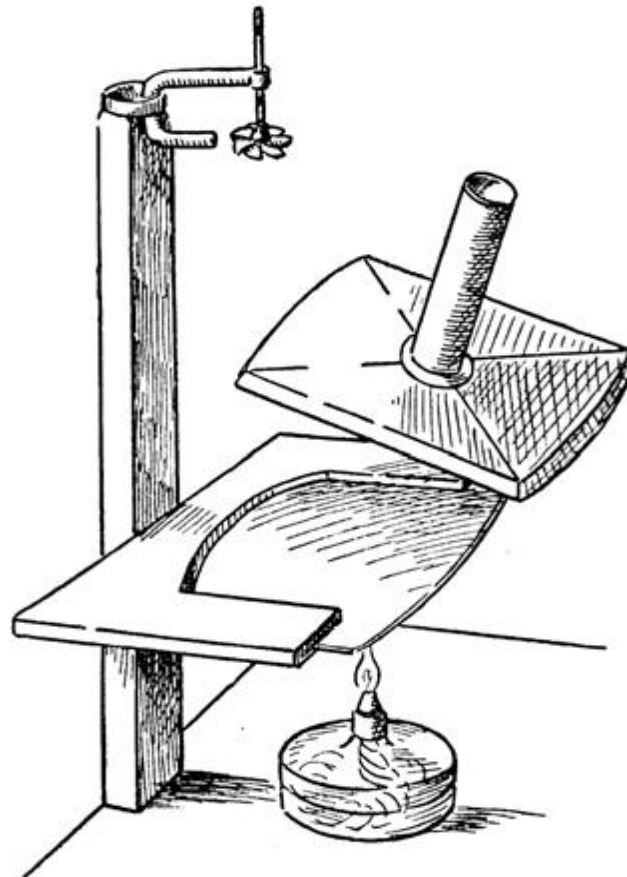
Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου ηλιακού σταθμού είναι σε γενικές γραμμές ο συνδυασμός των παρακάτω στοιχείων:

1. Ένας, μεγάλης επιφάνειας ηλιακός συλλέκτης – θερμοκήπιο (Solar Collector), συλλέγει και θερμαίνει αέρα κάτω από την υάλινη επιφάνεια του με τη επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.
2. Μία υψηλή καμινάδα (Solar Chimney) τοποθετημένη στο κέντρο του θερμοκηπίου απάγει το θερμαινόμενο αέρα, ο οποίος εισέρχεται από την περιφέρεια του θερμοκηπίου και κατευθύνεται προς στο κέντρο του δηλαδή προς την είσοδο της καμινάδας, η οποία με τη σειρά της τον διοχετεύει σε ψηλότερα και ψυχρότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.
3. Η κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, η οποία προκαλείται από την διαφορά θερμοκρασίας που δημιουργείται στον αέρα εντός του θερμοκηπίου σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον, κινεί στροβίλους

τοποθετημένους σε κατάλληλα επιλεγμένα σημεία. Οι αεριοστρόβιλοι συνδέονται μηχανικά με τις ηλεκτρογεννήτριες που παράγουν την τελικά ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια.

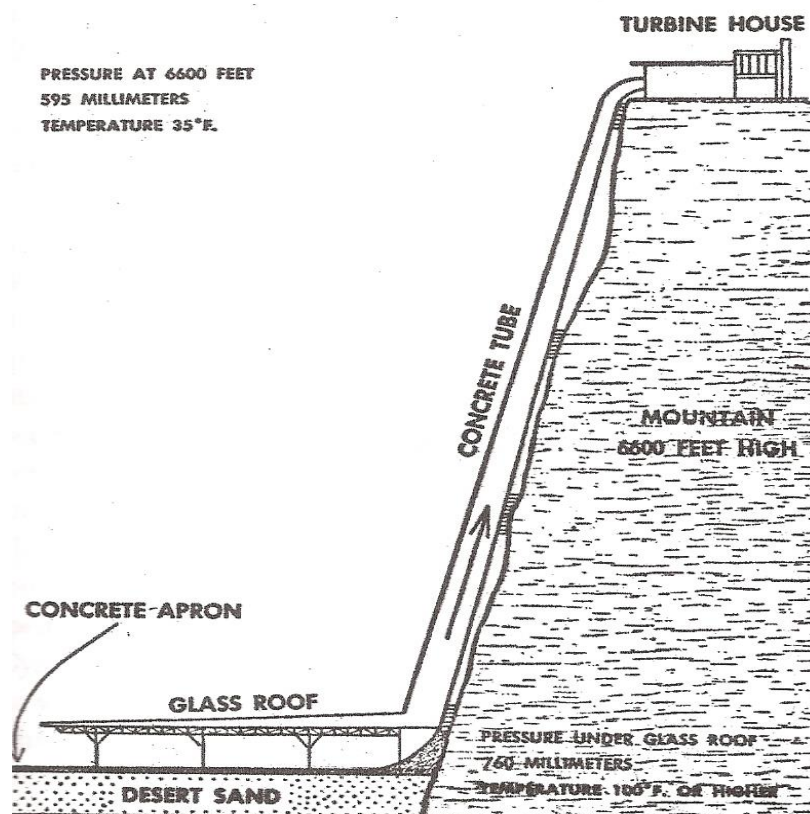
2.4. Ιστορικό ηλιακής καμινάδας

Η πρώτη πειραματική διάταξη που έδειχνε ότι θα μπορούσε κανείς να πάρει ενέργεια από τον τρόπο κυκλοφορίας του αέρα όταν θερμαίνεται διατυπώθηκε περίπου 110 χρόνια πριν, το 1903 από ένα Ισπανό αξιωματικό του πυροβολικού τον Ισίδωρο Καμπανιές. Δημοσίευσε την πρότασή του με τίτλο “Proyecto de motor solar” (“Σχέδιο ηλιακής μηχανής”) όπου παρουσίαζε μια διάταξη παραγωγής θερμού αέρα να κινεί ένα είδος ανεμοπροπέλλας (βλ. **Εικόνα 2.1**).

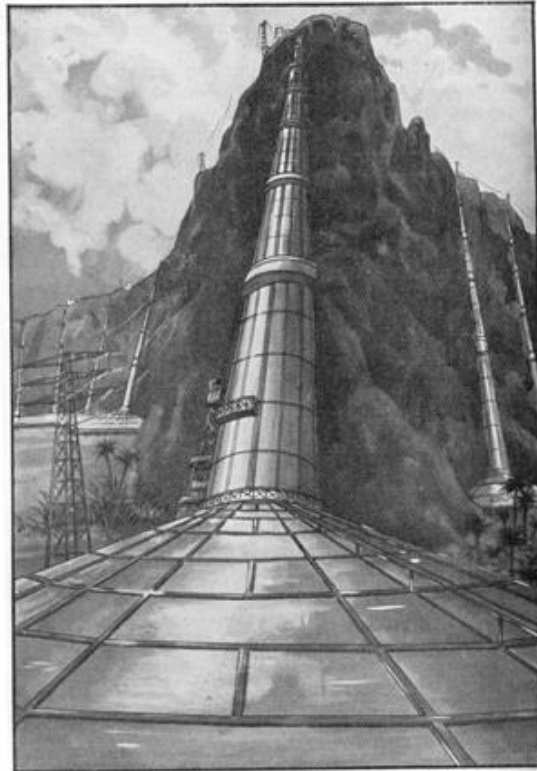


Εικόνα 2.1: Proyecto de motor solar (1903).

Αργότερα το 1926 ο Γάλλος μηχανικός Bernard Dubos παρουσίασε μια πιο συγκεκριμένη διάταξη προς την Γαλλική Ακαδημία Επιστημών. Σχεδίασε μια κατασκευή στην Αλγερία σε περιοχή με μεγάλη ηλιοφάνεια και την ηλιακή καμινάδα όχι αυτόνομα στηριγμένη αλλά ακουμπισμένη σε μια παρακείμενη βουνοπλαγιά με μεγάλη τελική υψομετρική διαφορά (βλ. **Εικόνες 2.2 & 2.3**). Η τουρμπίνα παραγωγής βρισκόταν στο τελικό σημείο της καμινάδας. Παρουσίασε υπολογισμούς όπου η ταχύτητα του αέρα θα μπορούσε να φτάσει τα 50m/sec. Μάλιστα εκμεταλλευόμενος την συγκεκριμένη τοπογραφία πρότεινε όχι μια, αλλά περισσότερες εγκαταστάσεις στην ίδια περιοχή. Τέλος για να τεκμηριώσει την πρότασή του κατασκεύασε μια απλή διάταξη όπου θέρμαινε με καμινέτο ένα γυαλί και στη συνέχεια το ζεστό ρεύμα αέρα που δημιουργούσε κινούσε μια μικρή φτερωτή τοποθετημένη ακριβώς από πάνω. Παρά την απλότητά του σχεδίου το όλο σχέδιο δεν έτυχε προσοχής και απερρίφθη ως αντιοικονομικό. Τα ορυκτά καύσιμα τότε ήταν ακόμα εξαιρετικά φτηνά και έμοιαζαν ανεξάντλητα.



Εικόνα 2.2: Σχέδιο του Bernard Dubos (1926).

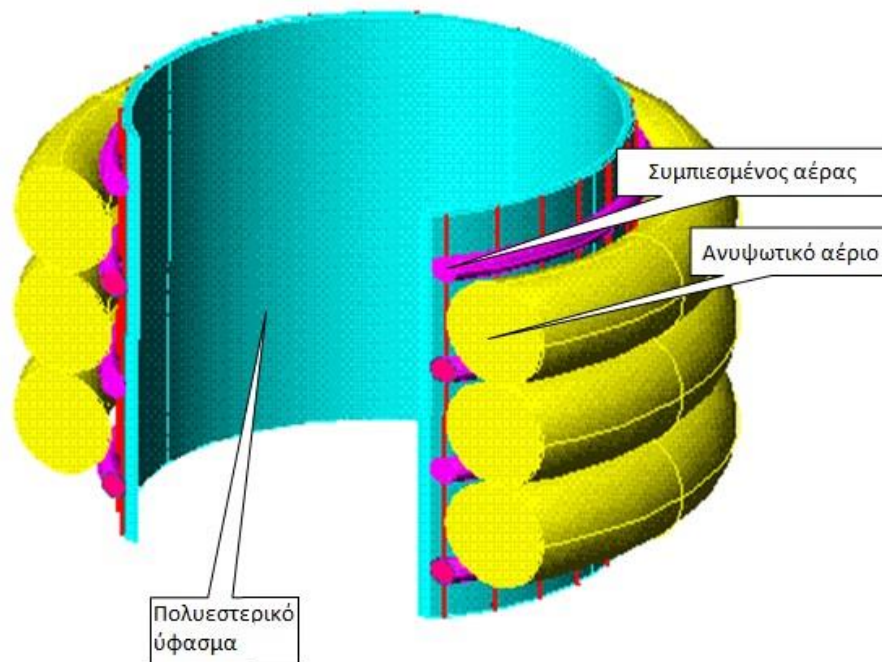


Εικόνα 2.3: Σχέδιο του Bernard Dubos (1926).

2.6. Αιωρούμενη ηλιακή καμινάδα

Το 2003 ο καθηγητής Χ. Παπαγεωργίου παρατηρώντας τα προβλήματα που προκύπτουν με την κατασκευή ηλιακών καμινάδων μεγάλου ύψους και με πρωτεύοντα στόχο τη μείωση του κόστους και την απλοποίηση της κατασκευής, διατύπωσε την ιδέα της αιωρούμενης ηλιακής καμινάδας, σαν μια εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους, δεδομένου ότι υπάρχει αφθονία περιοχών με ηλιοφάνεια και χαμηλό αιολικό δυναμικό.

Τα βασικά δομικά στοιχεία αυτής της κατασκευής, (βλ. **Εικόνα 2.4**) είναι: ο δακτύλιος αερόστατο που είναι γεμάτος με ελαφρύ άφλεκτο αέριο (NH_3 ή He), ένας υποστηρικτικός δακτύλιος συμπιεσμένου αέρα που παραλαμβάνει τη λειτουργική υποπίεση επί του τοιχώματος της καμινάδας και βρίσκεται μεταξύ δύο διαδοχικών δακτυλίων αεροστάτων και το πολυεστερικό ύφασμα που εξασφαλίζει λεία επιφάνεια στο εσωτερικό της καμινάδας για την καλύτερη δυνατή ροή του θερμού ρεύματος αέρα και την απαγωγή του στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αξιοσημείωτο είναι ότι αυτή η σκέψη επανήλθε στο προσκήνιο από την Βρετανία το 2013 με ένα μεγαλεπίβολο σχέδιο όπως θα δούμε παρακάτω.



Εικόνα 2.4: Σχέδιο αιωρούμενης ηλιακής καμινάδας (καθ. Χ. Παπαγεωργίου).

2.7. Πειραματικές δοκιμές σταθμών με ηλιακή καμινάδα

Με βάση όλα τα βιβλιογραφικά ερευνητικά δεδομένα, μπορεί κανείς με ασφάλεια να πει ότι η σκέψη εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας με ηλιακές καμινάδες έχει ένα στέρεο θεωρητικό υπόβαθρο. Όμως η πρακτική εφαρμογή τους βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο. Ένα ιδιότυπο πειραματικό στάδιο. Οι πειραματικές δοκιμές σταθμών με ηλιακή καμινάδα παρουσιάζουν αυξημένο βαθμό περιπλοκότητας και δυσκολίας. Δυσκολίες που σχετίζονται κυρίως με την κλίμακα και το μέγεθος του προς μελέτη ηλιακού σταθμού.

Σε κλίμακα εργαστηρίου, δηλαδή σε μικρή κλίμακα, μικρές μεταβολές εξωτερικών παραγόντων μεταβάλλουν ασύμμετρα τα μετρούμενα αποτελέσματα. Το ίδιο ισχύει και για μικρούς σταθμούς, δηλαδή σταθμούς με καμινάδα μικρού ύψους ή θερμοκήπιο μικρού μεγέθους. Από την άλλη τα κεφάλαια που απαιτούνται για την κατασκευή ενός πειραματικού σταθμού μέσης κλίμακας είναι ιδιαίτερα υψηλά, και στην παρούσα οικονομική περίοδο δυσεύρετα. Στην βάση αυτή θα επιχειρήσουμε την καταγραφή όλων των ερευνητικών προγραμμάτων που δημοσιοποιήθηκαν και είναι σχετικά με σταθμούς παραγωγής ενέργειας με χρήση ηλιακής καμινάδας.

Ισπανία Manzanares

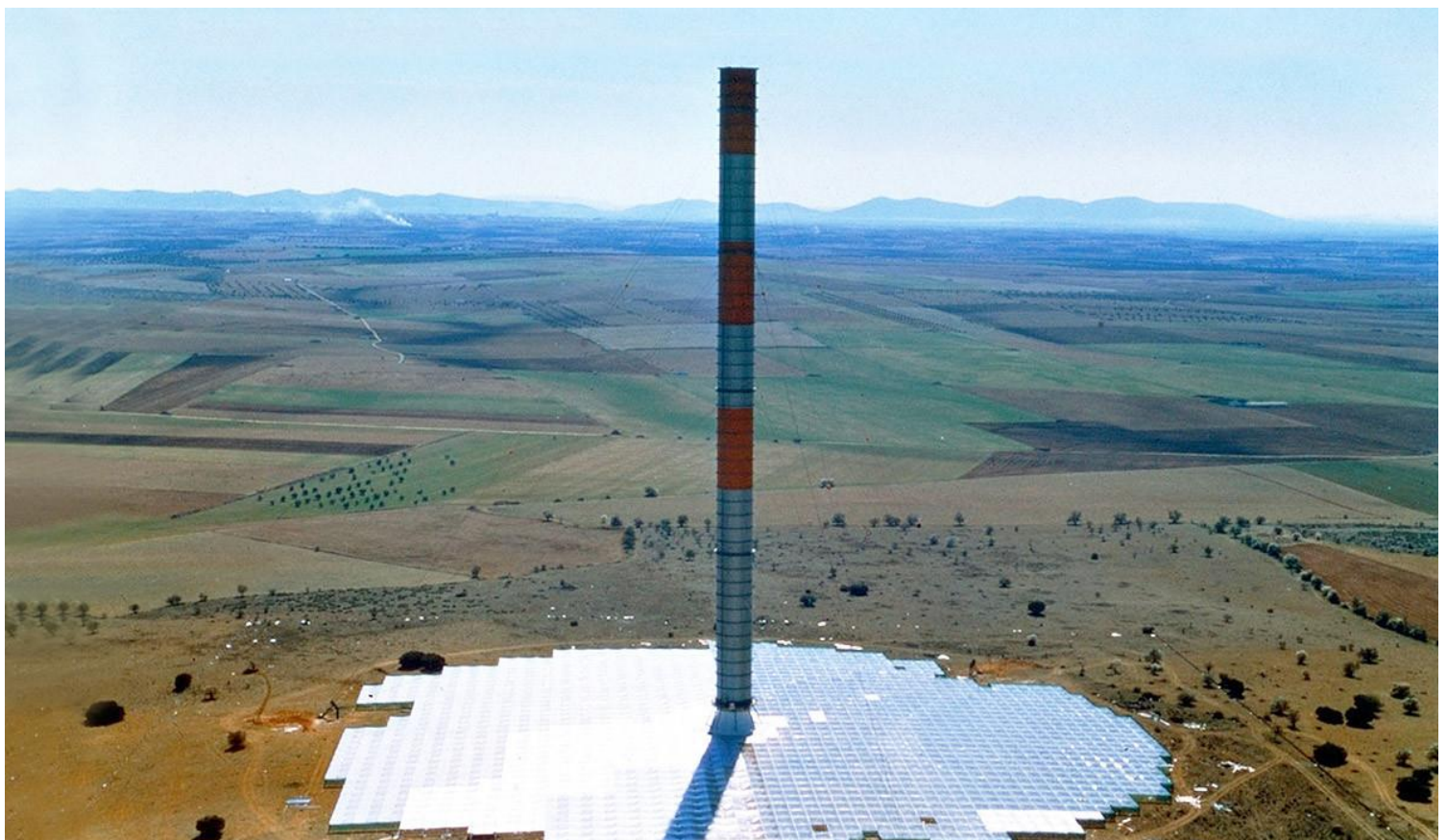
Το 1981 ξεκίνησε η κατασκευή του κυριότερου μέχρι σήμερα σταθμού ηλιακής καμινάδας στο Manzanares της Ισπανίας, 150 χιλιόμετρα νότια της Μαδρίτης, με χρηματοδότηση από το γερμανικό Υπουργείο Έρευνας και Τεχνολογίας. Διευθυντής του προγράμματος και βασικός σχεδιαστής του έργου ήταν ο Γερμανός μηχανικός B. Schlaich. Ήταν ένας σταθμός με συλλέκτη – θερμοκήπιο έκτασης 6000 τετραγωνικών μέτρων, καμινάδα διαμέτρου 5 μέτρων και ύψους 195 μέτρων. Η υπολογιζόμενη ισχύς του ήταν 50 KW. Η λειτουργία του σταθμού άρχισε το 1983 και συνεχίστηκε μέχρι το 1989. Την χρονιά αυτή κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας κατέρρευσε ένας εξασθενημένος από οξείδωση σύνδεσμος της καμινάδας και μαζί του κατέρρευσε ολόκληρη η καμινάδα.

Οι μετρήσεις που έγιναν κατά την διάρκεια της βετούς λειτουργίας του σταθμού είναι η βάση όλων των θεωρητικών μοντέλων που θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Έδειξαν ότι ο βαθμός απόδοσης του σταθμού έφτασε το 0,53% το οποίο σύμφωνα με τον επικεφαλής της ερευνητικής ομάδας B. Schlaich (1995) μπορεί να υπερδιπλασιαστεί (1.3%) αν το μέγεθος του σταθμού φθάσει σε ισχύ τα 100 MW και γίνουν μερικές ακόμη αλλαγές στον σχεδιασμό. Η τεκμηριωμένη αυτή παρατήρηση εμπεριέχει το κύριο πρόβλημα της σχεδίασης και κατασκευής πειραματικών σταθμών ηλιακής καμινάδας. Δηλαδή, για να φανεί η αποδοτικότητά τους πρέπει να έχουν μεγάλο μέγεθος.

Η συνεχής λειτουργία του ηλιακού σταθμού ανέδειξε και μερικά μικρότερης σημασίας ζητήματα. Πχ. Η αρχική κάλυψη του θερμοκηπίου είχε γίνει με πλαστικό διάφανο φιλμ για να είναι οικονομικότερη η κατασκευή. Όμως τα ρεύματα αέρα κοντά στην βάση της καμινάδας και γύρω από την τουρμπίνα ήταν τόσο ισχυρά που κατέστρεφαν το φιλμ και έτσι αυτό χρειάστηκε να αντικατασταθεί από ισχυρότερη κατασκευή με υαλοπίνακες. Άλλο ένα πρόβλημα ήταν η κάλυψη του θερμοκηπίου με σκόνη γεγονός που μείωνε την απόδοση του σταθμού, καθότι προκαλούσε σκίαση.



Εικόνα 2.5&2.6: Η καμινάδα και η δομή του ηλιακού συλλέκτη του σταθμού στην Ισπανία.



Εικόνα 2.7: Ο σταθμός στο Manzanares στην ολοκληρωμένη μορφή του.

Κίνα

Η Κινεζική προσέγγιση στην υλοποίηση της κατασκευής ηλιακών σταθμών, σύμφωνα με τα μέχρι σήμερα γνωστά στοιχεία, έχει ακολουθήσει την κλιμάκωση που επιβάλλουν οι ιδιαιτερότητες της εξεταζόμενης τεχνολογίας.

Αρχικά, στην επαρχία Jinsha Bay Wuhai, στην Μογγολία, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας πειραματικός σταθμός μικρής κλίμακας. Η κατασκευή άρχισε τον Μάιο του 2009 και ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2010. Η καμινάδα που κατασκευάστηκε έχει διάμετρο 18 μέτρα και ύψος 53 μέτρα, ενώ το θερμοκήπιο καλύπτει επιφάνεια 40 στρεμμάτων. Η ονομαστική ισχύς του πειραματικού αυτού σταθμού είναι 200 kW. Σύμφωνα με τα μέχρι τώρα γνωστά για τον σταθμό αυτό δαπανήθηκε 1 εκατομμύριο κινεζικά Γιουάν.

Η δεύτερη φάση ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2011 και αφορά στην κατασκευή ενός πειραματικού σταθμού μέσης κλίμακας και ονομαστικής ισχύος 2.2MW. Η χρηματοδότηση τη δεύτερης αυτής φάσης έχει προγραμματιστεί να φτάσει τα 110 εκατομμύρια Γιουάν (περίπου 13 εκατομμύρια €).

Το τρίτο και ουσιαστικότερο βήμα αφορά στην κατασκευή σταθμού ηλιακής καμινάδας εμπορικής κλίμακας ονομαστικής ισχύος 27MW. Το θερμοκήπιο θα καλύπτει επιφάνεια 277 εκταρίων (1,12 τετραγωνικών χιλιομέτρων) και αναμένεται να δαπανηθούν περισσότερα από 200 εκατομμύρια δολάρια.

Ένα παράλληλο σχέδιο κατασκευής ηλιακού σταθμού που αξιοποιεί τα μορφολογικά χαρακτηριστικά περιοχών με μεγάλες υψομετρικές διαφορές τρέχει στην πόλη Λαντζού της ΒΔ Κίνας. Είναι ένας σταθμός με καμινάδα διαμέτρου 14 μέτρων και ύψους 252 μέτρων, όπου το ίδιο το θερμοκήπιο είναι κατασκευασμένο σε μια υποκείμενη πλαγιά σε έδαφος με κλίση 30 μοιρών. Η ονομαστική ισχύς του σταθμού είναι 5 MW.

Αυστραλία-Αριζόνα(Η.Π.Α.) Enviromission

Οι ίδιοι σχεδιαστές του σταθμού στο Manzanares χρησιμοποιήθηκαν από την ιδιωτική εταιρεία με το όνομα Enviromission για τον σχεδιασμό ενός ηλιακού σταθμού ηλιακής καμινάδας ονομαστικής ισχύος 200MW. Η καμινάδα θα είναι φτιαγμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με διάμετρο 130 μέτρα και τελικό ύψος τα 1000 μέτρα. Η υπολογιζόμενη έκταση του θερμοκηπίου θα είναι της τάξεως των 35 τετραγωνικών χιλιομέτρων.

Το φιλόδοξο αυτό σχέδιο που πρωτοανακοινώθηκε το 2001 και δεν έχει ακόμη υλοποιηθεί. Όμως η ίδια εταιρεία ανακοίνωσε το 2011 ότι έχει ήδη εξασφαλίσει 30 εκατομμύρια δολάρια για δυο αντίστοιχα σχέδια στην πολιτεία της Αριζόνα στις ΗΠΑ.

Μποτσουάνα

Ένας ενδιαφέρον μικρός πειραματικός σταθμός κατασκευάστηκε το 2005 στην Αφρική στην Μποτσουάνα. Αφορούσε ένα θερμοκήπιο 160m². Καλυμμένο με υαλοπίνακες πάχους 5 χιλιοστών στερεωμένους σε δικτυωτή μεταλλική κατασκευή. Η καμινάδα είχε διάμετρο 2 μέτρα, ύψος 22 και ήταν φτιαγμένη από φάιμπεργκλας.

Τουρκία

Επίσης ένας μικρός πειραματικός σταθμός έχει κατασκευαστεί και στην Τουρκία αλλά λίγα είναι γνωστά για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Μεγάλη Βρετανία

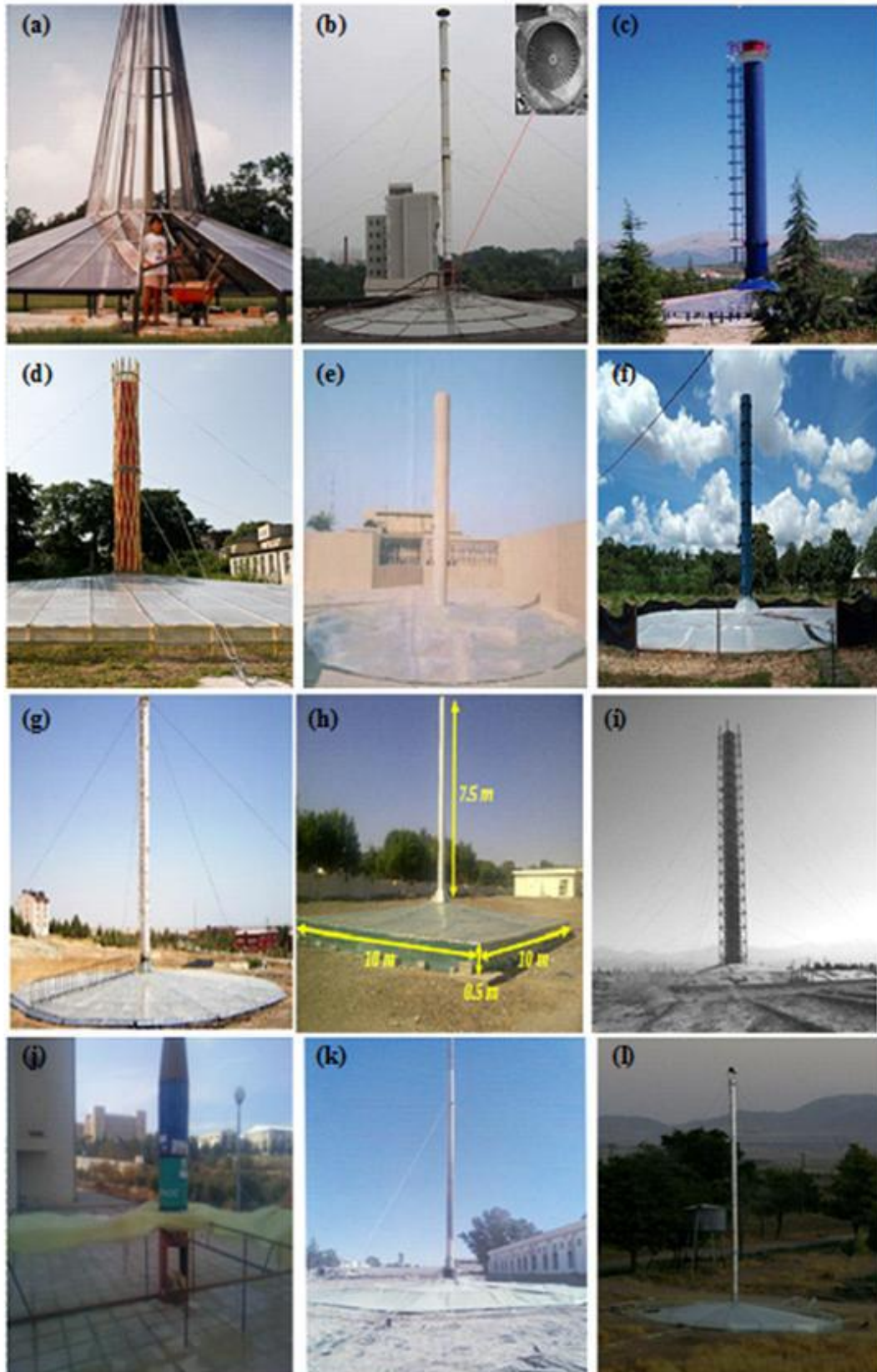
Η πιο ενδιαφέρουσα ίσως ανακοίνωση ήρθε πριν ένα περίπου έτος από την Μεγάλη Βρετανία. Έγινε από ένα συνεργάτη του εκατομμυριούχου Sir Richard Branson, τον Per Lindstrand, ο οποίος το 1991 είχε κάνει το γύρο του κόσμου μαζί με τον Sir Richard Branson με αερόστατο. Ίδιος ανέφερε στο περιοδικό *The Engineer Magazine* ότι επρόκειτο για ένα επενδυτικό σχέδιο της τάξεως των 20 εκατομμυρίων δολαρίων. Σύμφωνα με τις ανακοινώσεις, ο σταθμός ηλιακής καμινάδας που ετοιμάζεται θα έχει καμινάδα φτιαγμένη από πολυεστερικό ύφασμα με ύψος 1000 μέτρων. Θα ανυψωθεί και θα στηρίζεται σε αεροστεγείς δακτυλίους γεμισμένους με αδρανές αέριο ελαφρύτερο του αέρα.

Πειραματικά πρωτότυπα μικρής κλίμακας

Ακόμα έχουν κατασκευαστεί αρκετά πειραματικά πρωτότυπα ανά τον κόσμο.

Στην επόμενη **Εικόνα 2.8** παρουσιάζονται αρκετά από αυτά.

- a) Από τους Pasurmarthi Sheriff and Florida (1997)
- b) Από τους Pasurmarthi Sheriff and Florida (2002)
- c) Τουρκία, Suleyman Demirel University – RACRER (Research and Application Center for Renewable Energy Resources)
- d) Γερμανία, Bauhaus University in Weimar (2008)
- e) Ιράκ, Βαγδάτη (2010)
- f) Βραζιλία, Belo Horizonte
- g) Τουρκία, Adiyaman University
- h) Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, AIAin (2011)
- i) Ιράν, Κέρμαν
- j) Ισραήλ, Mutah University
- k) Ιράν, University of Zanjan (2010)
- l) Τυνησία, Higher Institute of Science and Energy Technology of Gafsa (2009)



Εικόνα 2.8: Πειραματικά πρωτότυπα.

3. ΠΕΡΙΚΛΕΙΣΤΟΣ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

3.1. Εισαγωγή

Οι σταθμοί με ηλιακή καμινάδα είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Είναι η μόνη που έχει τη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας στο έδαφος κάτω από την διαφανή στέγη του θερμοκηπίου. Δεν έχει εφαρμοστεί μέχρι στιγμής πέραν του πειραματικού σταδίου γιατί χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη έκταση για την ίδια ηλεκτροπαραγωγή σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και τα οικονομοτεχνικά στοιχεία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το ύψος της καμινάδας που θα επιλεγεί.

Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ηλιακές καμινάδες (Solar Updraft Power Plants) αποτελούνται συνήθως από:

1. Συλλέκτη - θερμοκήπιο
2. Καμινάδα απαγωγής αέρα
3. Τουρμπίνα/ες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
4. Βοηθητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στο θερμοκήπιο

Θα εξετάσουμε το καθένα από αυτά χωριστά

3.2. Περιγραφή και λειτουργία συμβατικών σταθμών με ηλιακή καμινάδα

Συλλέκτης-Θερμοκήπιο

Το μεγαλύτερο σε έκταση τμήμα του σταθμού. Προετοιμάζει και παράγει τον θερμό αέρα ο οποίος κινούμενος θα περιστρέψει τις τουρμπίνες και θα δώσει την τελικά ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η οροφή του είναι καλυμμένη με διαφανές πλαστικό υλικό ή τζάμι και συνήθως 2-6 μέτρα πάνω από το έδαφος. Το ύψος του αυξάνεται προοδευτικά όσο πλησιάζει κανείς προς το κέντρο και την βάση της καμινάδας. Το είδος και οι διαστάσεις της κατασκευής που συγκρατεί το διάφανο υλικό της οροφής έχει σχήμα και διαστάσεις επιλεγμένες ανάλογα με το υλικό επικάλυψης.

Αρκετές επιστημονικές δημοσιεύσεις έχουν ασχοληθεί με τον προσδιορισμό των παραμέτρων που θα επιτρέψουν την βέλτιστη σχεδίαση του συλλέκτη, ως προς το σχήμα, τις διαστάσεις και τη λειτουργία του. Η θεωρητική εξομοίωση των παραμέτρων αυτών έχει γίνει με διάφορα υπολογιστικά μοντέλα. Το πιο γνωστό και συχνότερα χρησιμοποιούμενο αναλυτικό πρότυπο έχει δημοσιευθεί από τον Schlaich (1995). Χρησιμοποιεί τα πειραματικά δεδομένα του σταθμού στο Manjapares προκειμένου να καταλήξει στις μαθηματικές εξισώσεις του. Νεώτερα υπολογιστικά μοντέλα έχουν αποτυπωθεί από τους Kroger – Buys (1999), Gannon - Von Backstrom (2000) και Hedderwick (2001). Στην εργασία των Lombaard et al (2002) μελετώνται οι θερμοκρασίες του διαφανούς μέσου και του συλλέκτη για διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες. Ο χρησιμοποιούμενος μαθηματικός τύπος δίνει μια καλή αντιστοίχιση των πραγματικά μετρούμενων με τις θεωρητικά υπολογιζόμενες. Ο Bonelle (2005) παρουσίασε μια παραλλαγή της διάταξης του θερμοκηπίου η οποία μοιάζει με νευρωνικό δίκτυο όπου περίπου διαφοροποιούνται τα τμήματα που θερμαίνουν τον αέρα από τα τμήματα που κατευθύνουν τον αέρα στην καμινάδα. Ο M.O. Hamdan (2004) δίνει ένα συνολικό μοντέλο μέτρησης της αποδοτικότητας του σταθμού. Οι Bilgen – Rheault (2005) προτείνουν την κατασκευή του συλλέκτη σε κεκλιμένες περιοχές με μεγάλη τελική υψομετρική διαφορά. Αυτή η πρόταση ουσιαστικά αποτελεί μετεξέλιξη της πρότασης του Γάλλου Dubos (1926). Διάφορους τύπους θερμοκηπίων εξέτασε και ο Ninic (2006). Βασισμένοι σε διάφορες προγενέστερες εργασίες τους οι Koonsrisuk – Chitsomboon δημοσίευσαν το 2012 ένα συνολικό μαθηματικό μοντέλο για την όλη αξιολόγηση των σταθμών με ηλιακή καμινάδα.

Καμινάδα

Η καμινάδα ή πύργος απαγωγής αέρα είναι το πιο χαρακτηριστικό στοιχείο των συγκεκριμένων ηλιακών σταθμών. Είναι τοποθετημένη στο κέντρο του θερμοκηπίου και θεωρητικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι είναι η θερμική μηχανή του όλου συστήματος. Η καμινάδα είναι αυτή που επιτρέπει τη συνεχόμενη φυσική ροή του αέρα και την απαγωγή του στο περιβάλλον λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, με την ατμόσφαιρα που του δημιουργεί το θερμοκήπιο. Η μόνιμη αυτή ροή είναι που κινεί τις τουρμπίνες. Το μεγάλο ύψος της καμινάδας απαιτεί και ισχυρή βάση στερέωσής της, η οποία όμως να είναι έτσι φτιαγμένη που να μην εμποδίζει την ροή του αέρα προς το εσωτερικό της. Στους πειραματικούς σταθμούς τα απαιτούμενα ύψη εξαρτώνται από την κλίμακα του πειράματος ενώ για τους τελικούς πειραματικούς σταθμούς το ζητούμενο ύψος ξεπερνά τα 1000 μέτρα.

Η διατομή της είναι κυκλική για να έχει ευνοϊκότερη συμπεριφορά, και μειωμένη αντίσταση στους ανέμους στο εξωτερικό της ενώ ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται η πιο ομαλή και ομοιόμορφη ροή στο εσωτερικό της. Διαφορετικές διατομές μπορούν να

εφαρμοσθούν στις περιπτώσεις των επικλινών καμινάδων οι οποίες είναι ακουμπισμένες σε περιοχές με υψομετρικές διαφορές.

Έχουν προταθεί και μελετηθεί διάφοροι τύποι και τρόποι κατασκευής αυτών των καμινάδων. Αυτοί είναι:

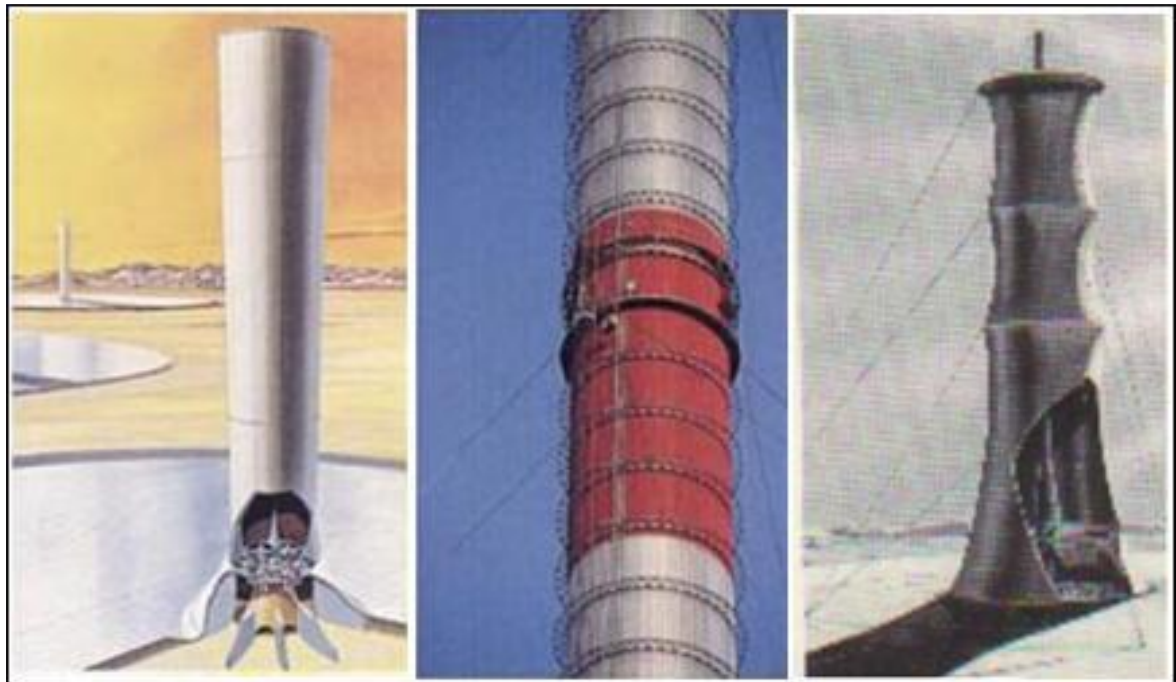
1. Αυτόνομοι πύργοι από οπλισμένο σκυρόδεμα.
2. Χαλύβδινοι επάλληλοι σωλήνες από συγκολλημένα φύλλα λαμαρίνας με ή χωρίς υποστήριξη από περιφερειακά εξαρτημένα συρματόσχοινα–αντηρίδες.
3. Μεταλλικός δικτυωτός σκελετός επενδυμένος εξωτερικά ή και εσωτερικά με λεπτή λεία ή κυματοειδή λαμαρίνα ή και από πλαστική μεμβράνη. Πάντοτε με υποστήριξη από περιφερειακά εξαρτημένα συρματόσχοινα–αντηρίδες.
4. Κυλινδρικός σωλήνας από ενισχυμένο με ειδικές ίνες ύφασμα, ο οποίος κρατιέται ανυψωμένος από αεροστεγείς δακτυλίους γεμισμένους με ελαφρύτερο του αέρα αδρανές αέριο.

Οι τεχνολογίες πίσω από αυτές τις καμινάδες είναι συχνά δανεισμένες από υπάρχουσες και δοκιμασμένες εφαρμογές.

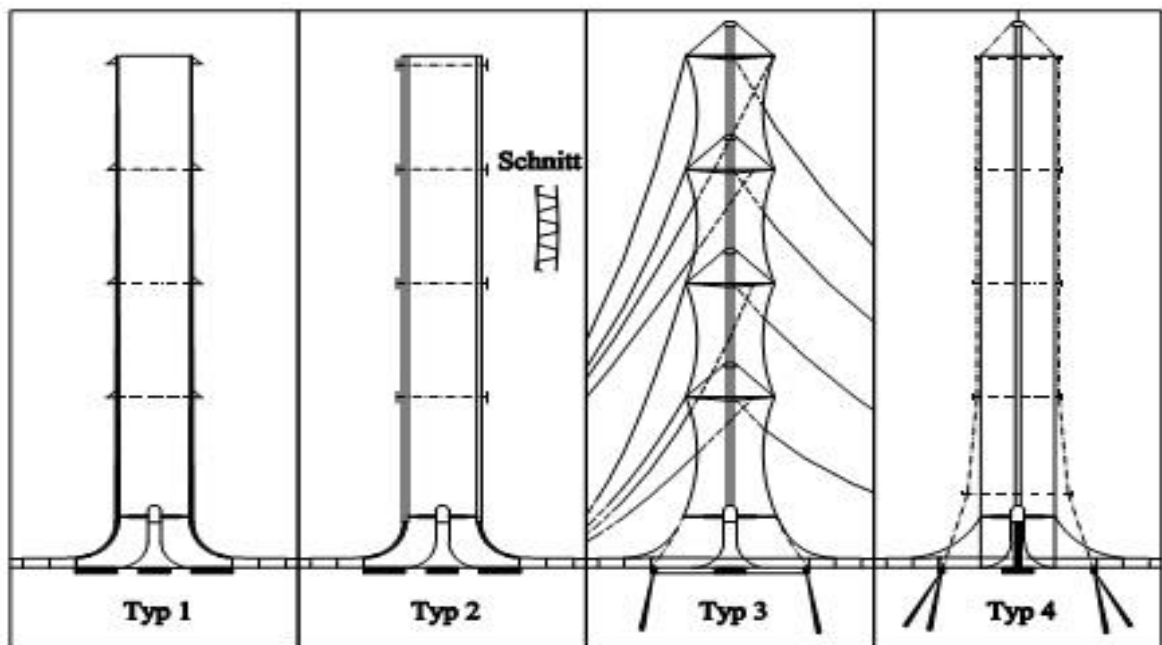
Τα κτήρια με οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ήδη κοντά στον στόχο των 1000 μέτρων. Η τεχνολογία κατασκευής τους είναι δοκιμασμένη σε όλα τα μέρη του κόσμου, αλλά το κόστος κατασκευής τους είναι μεγάλο.

Πύργοι από χαλύβδινους επάλληλους σωλήνες συγκολλημένων φύλλων λαμαρίνας κατασκευάζονται σε όλο και μεγαλύτερα ύψη για την στήριξη μεγάλων ανεμογεννητριών. Το κόστος κατασκευής τους είναι επίσης μεγάλο. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών είναι πρακτικά ανεφάρμοστο να ενισχυθούν με περιφερειακά εξαρτημένα συρματόσχοινα – αντηρίδες, όμως στους ηλιακούς σταθμούς αυτό είναι άμεσα εφικτό, οπότε το βάρος και συνεπώς το κόστος τους μπορεί να μειωθεί, λόγω αυτής της δυνατότητας στη στήριξη.

Καμινάδα με μεταλλικό δικτυωτό σκελετό έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στο μοναδικό πειραματικό σταθμό μεγάλης κλίμακας στο Manzanares. Το φτηνότερο κόστος κατασκευής είναι το κυριότερο πλεονέκτημά που παρουσιάζουν αυτές οι κατασκευές. Έχουν παρουσιασθεί διάφορες παραλλαγές και ως προς τον τρόπο κατασκευής των δομικών στοιχείων τους και ως προς το υλικό και τον τρόπο κάλυψης τους εσωτερικά ή εξωτερικά. Η γενική αρχή είναι στα σημεία εξάρτησής τους από τις πλευρικές αντηρίδες να έχουν ενισχυμένα στοιχεία είτε με ακτινικές ράβδους είτε με περιφερειακές ενισχύσεις είτε με συνδυασμό τους. Η κάλυψή τους με κυματοειδείς λαμαρίνες προσφέρει στιβαρότητα αλλά ταυτόχρονα αυξημένη αντίσταση από τον άνεμο.



Εικόνα 3.1: Προτάσεις κατασκευής ηλιακών καμινάδων που έχουν γίνει με το στρόβιλο τοποθετημένο στη βάση της καμινάδας.



Εικόνα 3.2: Προτάσεις κατασκευής ηλιακών καμινάδων που έχουν γίνει με το στρόβιλο τοποθετημένο στη βάση της καμινάδας.

Οι αιωρούμενες καμινάδες από πολυεστερικό ύφασμα, αποτελούν Ελληνική πρόταση που έχει κατοχυρωθεί με διεθνή διπλώματα ευρεσιτεχνίας (καθ. Παπαγεωργίου 2007). Τις επαναφέρουν στο προσκήνιο ανακοινώσεις από την Μεγάλη Βρετανία, όπου τον Νοέμβριο του 2013 ανακοινώθηκε η έγκριση από το Βρετανικό Συμβούλιο Έρευνας, (UK Engineering and Physical Sciences Research Council) η χρηματοδότηση ενός εκτεταμένου προγράμματος κατασκευής καμινάδας ύψους 1000 μέτρων με την παραπάνω τεχνική. Το όλο πρόγραμμα προβλέπεται να έχει ύψος 20 εκατομμύρια δολάρια και δεν στηρίζεται μόνο στην χρηματική υποστήριξη της Βρετανικής κυβέρνησης αλλά και επώνυμων ιδιωτών όπως ο Sir Richard Branson.

Τουρμπίνες

Τα τεχνικά στοιχεία των τουρμπινών στους ηλιακούς σταθμούς κατά τους Von Backstrom et al (2008) έχουν πολλά κοινά σημεία με εκείνα των τουρμπινών των ανεμογεννητριών. Και οι δυο παραλαμβάνουν μεγάλα ποσά ενέργειας προερχόμενα από ροή αέρα και την διοχετεύουν σε συνδεδεμένες με αυτές ηλεκτρογεννήτριες. Η καθοριστική διαφορά τους είναι ότι στην περίπτωση των ηλιακών σταθμών η ροή του αέρα είναι «εξαναγκασμένη» με την έννοια ότι το ρεύμα του αέρα δεν μπορεί να περάσει από πουθενά αλλού παρά μέσα από την τουρμπίνα. Επίσης η κατεύθυνση της ροής είναι γνωστή και παραμένει η ίδια συνεχώς. Οι τουρμπίνες στους ηλιακούς σταθμούς είναι προστατευμένες από ακραίες καιρικές συνθήκες αλλά γενικά είναι υποχρεωμένες να λειτουργούν σε περιβάλλον με γενικά υψηλότερες θερμοκρασίες. Κατά τους ίδιους ερευνητές η πτώση πίεσης στις τουρμπίνες των ηλιακών σταθμών είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την πτώση πίεσης στις ανεμογεννήτριες.

Για τον αριθμό, τις θέσεις και τον τρόπο διάταξης των τουρμπινών στους ηλιακούς σταθμούς έχουν διατυπωθεί αρκετές σκέψεις από διάφορους ερευνητές. Στο Manzanares η τουρμπίνα ήταν μια, μεγάλη και τοποθετημένη στην βάση της καμινάδας. Οι Denantes – Bilgen (2006) πρότειναν αντί μιας, πολλαπλές μικρότερες τοποθετημένες περιφερειακά στην βάση της καμινάδας. Σε άλλη εργασία προτείνεται η χρήση τουρμπινών με διπλά και αντίθετα περιστρεφόμενα πτερύγια.

Νεότερες ερευνητικές εργασίες Von Backstorm – Fluri (2007), Nizetic et al (2010) δίνουν περισσότερα δεδομένα σχετικά με την αποδεκτή πτώση πίεσης στις χρησιμοποιούμενες τουρμπίνες και την προσδιορίζουν στο 0,8–0,9. Αυτή η απλοποιημένη προσέγγιση είναι χρήσιμη για τις προκαταρκτικές αναλύσεις και την ευκολότερη αξιολόγηση του δυναμικού των ηλιακών σταθμών με καμινάδα.

Μια πιο αναλυτική προσέγγιση των σχέσεων των παραμέτρων της ταχύτητας του ρεύματος του αέρα, της θερμοκρασίας του χώρου, της πτώσης πίεσης και της τελικά

ανακτώμενης ενέργειας από την (τις) τουρμπίνα (-ες) δίνεται από τον Koonsrisuk (2012).

Σύζευξη τουρμπινών (Turbine coupling)

Χρησιμοποιώντας το ισπανικό πρωτότυπο σαν μια πρακτική εφαρμογή, το 2008 ο Tingzhen διατύπωσε μια αριθμητική προσομοίωση ενός ηλιακού σταθμού με ηλιακή καμινάδα με μια τρίφτερη τουρμπίνα. Αυτή η μελέτη έδειξε ότι, η τιμή της μέσης ταχύτητας στην έξοδο της καμινάδας και της ροής μάζας έπεφτε με την αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας της τουρμπίνας. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η μέση θερμοκρασία στην έξοδο της καμινάδας και η πτώση πίεσης στην τουρμπίνα είναι αντιστρόφως ανάλογα, ενώ η μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια, η ισχύς στην έξοδο και η απόδοση της τουρμπίνας έχουν όλες μια μέγιστη τιμή. Το 2010 ο Koonsrisuk, πραγματοποίησε μια μελέτη, στην οποία το θερμοκήπιο, η καμινάδα και η τουρμπίνα ήταν μαζί μοντελοποιημένα θεωρητικά, και στη συνέχεια έλυσε το μαθηματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε με επαναληπτικές διαδικασίες. Ήταν φτιαγμένο για να εκτιμήσει την ισχύ που αποδίδει η τεχνολογία με τις ηλιακές καμινάδες αλλά και για να δει πως επηρεάζεται αυτή από τη ροή της ηλιακής θερμότητας και από τις διαστάσεις της κατασκευής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για την καλύτερη απόδοση της τεχνολογίας οι πιο βασικές παράμετροι είναι: το μέγεθος του σταθμού, η πτώση πίεσης στην τουρμπίνα και η ροή της ηλιακής θερμότητας. Το 2011 έγινε επίσης μια μελέτη από τον Al-Dabbas, της οποίας τα αποτελέσματα ήταν ακριβώς τα ίδια με εκείνα της μελέτης του Tingzhen.

Αποθήκευση ενέργειας στο συλλέκτη

Το έδαφος στο πάτωμα του συλλέκτη συμπεριφέρεται σαν ένα μέσο αποθήκευσης ενέργειας και μπορεί να συνεχίζει να θερμαίνει τον αέρα του θερμοκηπίου αρκετή ώρα μετά από το ηλιοβασίλεμα. Έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για να επιμηκυνθεί ο χρόνος όπου το πάτωμα του θερμοκηπίου θα συνεχίζει να θερμαίνει τον αέρα και άρα θα συνεχίζεται η λειτουργία του ηλιακού σταθμού και μετά την δύση του ηλίου. Άλλοι βασίζονται στην χρήση υλικών που έχουν μεγαλύτερη συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και άλλοι στη χρήση υλικών που έχουν μεγαλύτερο συντελεστή θερμοχωρητικότητας, από το έδαφος.

Το έδαφος έχει συντελεστή θερμοχωρητικότητας που κυμαίνεται από 0,75 έως 0,85 kJ/Kg. Στο νερό ο ίδιος συντελεστής είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερος (4,2 kJ/Kg). Αυτό οδήγησε διάφορους ερευνητές στο να προτείνουν την κάλυψη του πατώματος του θερμοκηπίου με δίκτυο μαύρων σωλήνων γεμάτων νερό. Το δίκτυο αυτό είναι

κλειστό έτσι ώστε το νερό να μην μπορεί να εξατμισθεί κατά τον χρόνο που θερμαίνεται από την ηλιακή ενέργεια αλλά απλά να λειτουργεί σαν μια αποθήκη ενέργειας. Ο Kreetz (1997) υπολόγισε ότι με ένα κατάλληλα μελετημένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε μαύρους σωλήνες νερού η λειτουργία της ηλιακής καμινάδας μπορεί να φτάσει να είναι ακόμη και συνεχής καθ' όλη την διάρκεια της νύχτας. Αντίστοιχο συμπέρασμα δημοσίευσε και οι Pretorius et al (2004) επεκτεινόμενος στην μελέτη της κατανομής των θερμοκρασιών κάτω από την επιφάνεια του πατώματος του θερμοκηπίου. Με βάση τα παραπάνω οι ίδιοι μελέτησαν και την ενεργειακή συμπεριφορά έξι διαφορετικών τύπων εδάφους: Γρανίτη, ψαμμίτη, ασβεστόλιθο, χαλαρή άμμο ερήμου, υγρό έδαφος και πάτωμα καλυμμένο με νερό. Βρήκαν ότι το υγρό έδαφος είχε την χειρότερη ενεργειακή απόδοση και η χαλαρή άμμος την καλύτερη.

Ο Hammadi (2008) παρουσίασε ένα μαθηματικό μοντέλο για ηλιακή καμινάδα με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε σωλήνες νερού. Τα αποτελέσματά του έδειξαν μετατόπιση του μέγιστου της ενεργειακής απόδοσης της καμινάδας σε μεταμεσημβρινές ώρες και την γενικότερη εξομάλυνση των καμπυλών ενεργειακής απόδοσης.

3.3. Ο περίκλειστος σταθμός με ηλιακή καμινάδα (Enclosed Solar Chimney Power Plant, ESCP) και ο υβριδικός (HSP)

Τα θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα που περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα 3.2, χρησιμοποιήθηκαν στον μέγιστο βαθμό για την κατασκευή και λειτουργία του πρώτου Ελληνικού πειραματικού ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού στους Κομποτάδες Φθιώτιδος. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις και τα πειράματα που εκτελέστηκαν σ' αυτόν οδήγησαν την Green Chimney Technologies (GCT) στην διαμόρφωση των σχεδίων αρχικά του «περίκλειστου σταθμού με ηλιακή καμινάδα» και στην συνέχεια στην βελτιωμένη εκδοχή του τον «Υβριδικό Ηλιακό Ηλεκτροπαραγωγικό Σταθμό», (Hybrid Solar Power Plant) που αναλύονται παρακάτω.

Πειραματικός σταθμός στους Κομποτάδες.

Στην περιοχή Κομποτάδες της Λαμίας το 2010 κατασκευάστηκε με ιδιωτικά κεφάλαια από την Green Chimney Technologies του καθηγητή Χρ . Παπαγεωργίου, ο πρώτος ελληνικός πειραματικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με ηλιακή καμινάδα. Ο σταθμός λειτούργησε για περίπου δύο χρόνια κατά τη διάρκεια των οποίων γίνονταν συνεχείς μετρήσεις με παράλληλες δοκιμές διαφορετικών τεχνικών λύσεων, προκειμένου να συγκριθεί η λειτουργικότητα και η απόδοση των εφαρμοζόμενων τεχνολογιών.

Ο συλλέκτης του σταθμού κάλυπτε επιφάνεια 1020m^2 , η καμινάδα του είχε ύψος 25 μέτρων και η τουρμπίνα είχε διάμετρο 1,4m.

Σκοπός του πειράματος αυτού ήταν να βρεθούν τρόποι να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου σταθμού, εξετάζοντας παράγοντες όπως:

- Η διαφοροποίηση της απόδοσης που μπορεί να προέλθει από τον καλύτερο έλεγχο της ροής του αέρα στην είσοδο του συλλέκτη.
- Η μεταβολή του ύψους της επιφάνειας κάλυψης του συλλέκτη από την περιφέρεια προς το κέντρο έτσι ώστε να βελτιώνεται η ροή του αέρα.
- Η αναλογία του ύψους της καμινάδας με τη συνολική επιφάνεια που καλύπτει ο ηλιακός συλλέκτης.
- Η διαφοροποίηση της απόδοσης του ηλιακού σταθμού ανάλογα με την θέση των τουρμπινών.
- Η διευκόλυνση της κατασκευής αλλά και της συντήρησης του ηλιακού σταθμού.

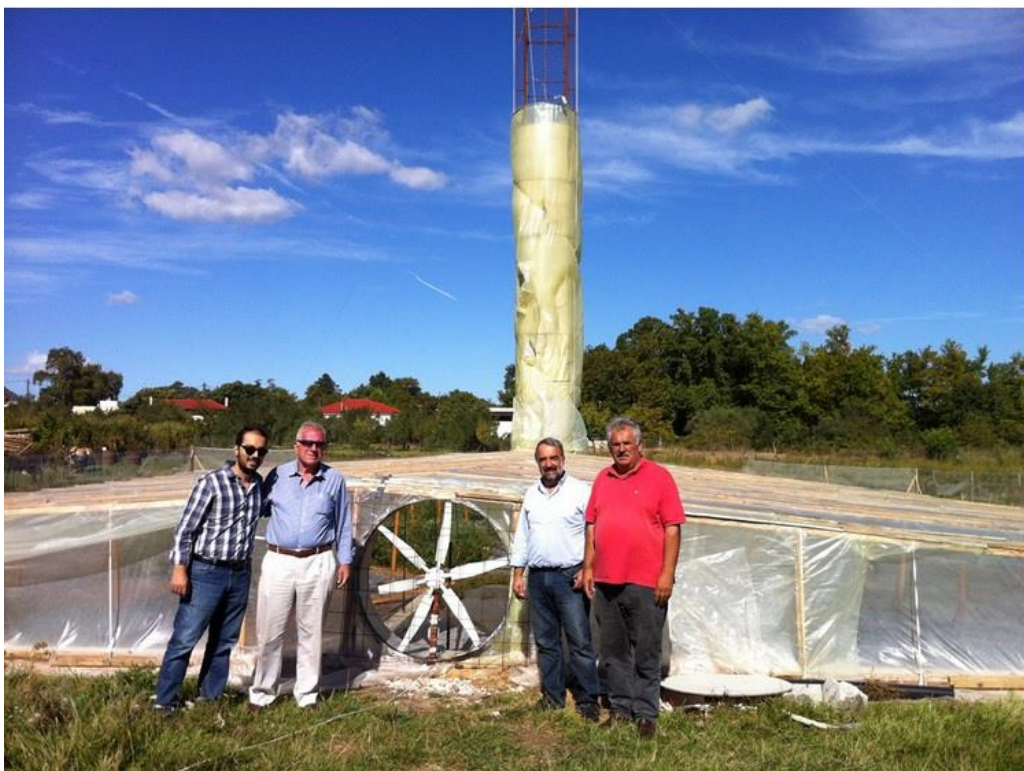
Η καμινάδα του κατασκευάστηκε με σιδερένιες δοκίδες του εμπορίου. Συναρμολογήθηκε στο έδαφος με επαναλαμβανόμενα δομικά στοιχεία και ανυψώθηκε με γερανό (βλ. **Εικόνες 3.3 & 3.4**). Ο συλλέκτης του πειραματικού σταθμού ήταν καλυμμένος με ηλιοπερατή μεμβράνη (βλ. **Εικόνα 3.5**).



Εικόνα 3.3: Ανύψωση καμινάδας πειραματικού σταθμού στους Κομποτάδες.



Εικόνα 3.4: Κατασκευή της καμινάδας του πειραματικού σταθμού στους Κομποτάδες.



Εικόνα 3.5: Ο πειραματικός σταθμός στους Κομποτάδες σε τελική φάση.



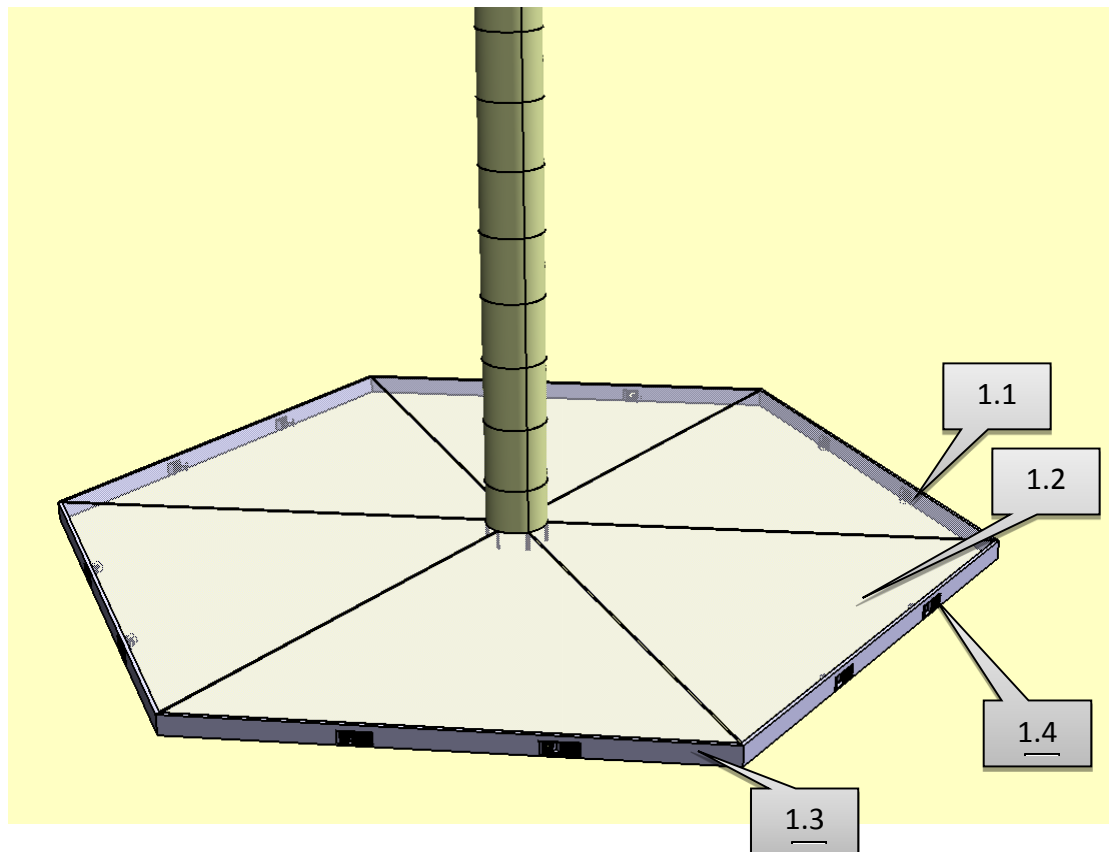
Εικόνα 3.6: Τελική μορφή πειραματικού σταθμού στους Κομποτάδες.

Τα στοιχεία που συνέλεξε η GCT χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των δύο επόμενων σχεδίων της.

Περίκλειστος σταθμός με ηλιακή καμινάδα (Enclosed Solar Chimney Power Plant, ESCP).

Ο περίκλειστος σταθμός είναι ένας απλούστερος και χαμηλότερου κόστους σταθμός με ηλιακή καμινάδα, που ονομάστηκε περίκλειστος γιατί ο ηλιακός συλλέκτης του (θερμοκήπιο) είναι κλειστός περιφερειακά και βελτιώνει τα βασικά μειονεκτήματα της συμβατικής τεχνολογίας των ηλιακών καμινάδων.

Ο περίκλειστος ηλιακός συλλέκτης του ESCP, ενδεικτικά είναι μια κανονική (κόλουρος) πολυγωνική πυραμίδα όπου οι επιφάνειες της ηλιοπερατής οροφής της στηρίζονται σε κατάλληλη μεταλλική υποδομή που εδράζεται στο έδαφος με την βοήθεια υποστυλωμάτων στήριξης (βλ. **Εικόνα 3.7**)



- 1.1 Περίκλειστος ηλιακός συλλέκτης
- 1.2 Διαφανής οροφή ηλιακού συλλέκτη
- 1.3 Περιφερειακό τοίχωμα ηλιακού συλλέκτη
- 1.4 Άνοιγμα περιφερειακού τοιχώματος

Εικόνα 3.7: Περίκλειστος σταθμός.

Οι κορυφές της ηλιοπερατής οροφής, της κόλουρης πυραμίδας ακουμπούν στην ηλιακή καμινάδα και είναι ανυψωμένες σε σχέση με τις βάσεις τους που ακουμπούν στο περιφερειακό τοίχωμα που περικλείει τον ηλιακό συλλέκτη. Αυτό διευκολύνει την κίνηση του εσωτερικού ρεύματος του απαγόμενου αέρα, ενώ παράλληλα και η σκόνη που φυσιολογικά επικάθεται στην εξωτερική υάλινη επιφάνεια μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί από τους εξωτερικούς ανέμους, την βροχή, ή με τεχνητά μέσα καθαρισμού.

Οι αεροστρόβιλοι τοποθετούνται σε κατάλληλα ανοίγματα επί του κατακόρυφου τοιχώματος το οποίο περικλείει τον ηλιακό συλλέκτη.

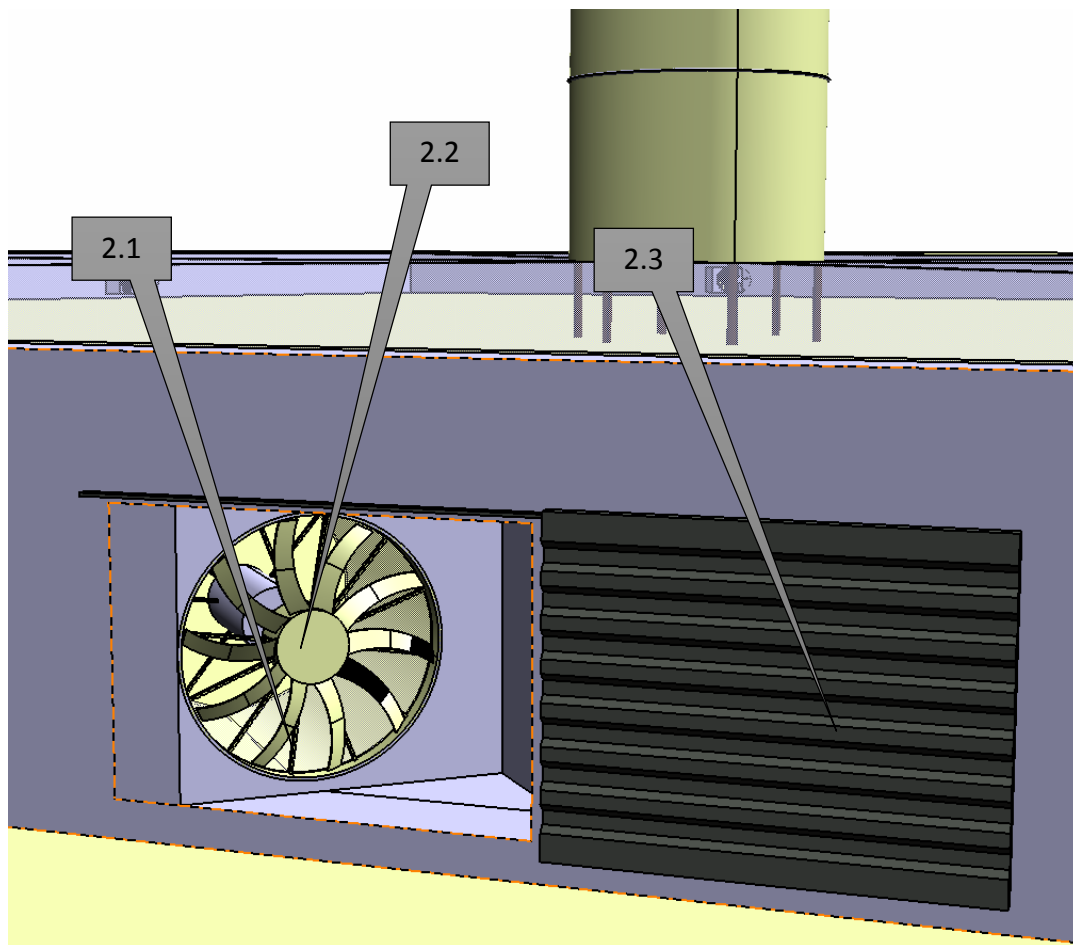
Οι αεροστρόβιλοι του περικλειστού σταθμού είναι πάντοτε οριζόντιου άξονα και τοποθετούνται με κατάλληλη γωνία ως προς την ακτίνα της περιφέρειας του τοιχώματος, ώστε το ρεύμα κρύου αέρα, που διέρχεται από τους αεροστροβίλους εισέρχεται στο θερμοκήπιο όπου θερμαίνεται και κινείται προς την ηλιακή καμινάδα, να αποκτά και περιφερειακή συνιστώσα, με απώτερο σκοπό να παραμένει το ρεύμα αυτό όσον το δυνατόν περισσότερο μέσα στον ηλιακό συλλέκτη και να επιτυγχάνεται

η μεγαλύτερη δυνατή διαφορά θερμοκρασίας του ρεύματος με το εξωτερικό περιβάλλον.

Στα ανοίγματα που βρίσκονται τοποθετημένοι οι αεροστρόβιλοι θα υπάρχουν ηλεκτροκίνητα συστήματα φραγής του αέρα. Κάθε σύστημα φραγής του αέρα (βλ. **Εικόνα 3.8**), με εντολή από τον κεντρικό υπολογιστή παρακολούθησης του σταθμού, μπορεί να ανοίγει ή να κλείνει ερμητικά το αντίστοιχο άνοιγμα ελευθερώνοντας ή φράζοντας το ρεύμα του εισερχόμενου αέρα, που περιστρέφει τον αντίστοιχο αεροστρόβιλο, ενώ ταυτόχρονα συνδέεται και αποσυνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο και η αντίστοιχη ηλεκτρογεννήτρια. Έτσι όταν λ.χ. η ταχύτητα διέλευσης του εισερχόμενου ρεύματος αέρα από έναν αεροστρόβιλο είναι μικρότερη κάποιας επιθυμητής τιμής μπορούμε να φράξουμε το άνοιγμά του και να σταματήσουμε την λειτουργία της ηλεκτροπαραγωγικής του μονάδας, οπότε ταυτόχρονα θα ενισχύονται τα ρεύματα αέρα και η ισχύς των αεροστρόβιλων στα υπόλοιπα ανοίγματα, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης του σταθμού την στιγμή εκείνη.

Επιπλέον χαρακτηριστικά που μπορούν να αποδοθούν στον περικλειστο ηλιακό σταθμό με ηλιακή καμινάδα:

- Σε κάθε άνοιγμα και στην κορυφή της ηλιακής καμινάδας του σταθμού μπορούν να τοποθετηθούν μεταλλικά πλέγματα τα οποία δε θα επιτρέπουν σε ζώα ή πτηνά να έλθουν σε επαφή με την πτερωτή των αεροστροβίλων ή να εισέλθουν στο εσωτερικό του ηλιακού συλλέκτη, καθιστώντας έτσι το σταθμό απολύτως αβλαβή για την πανίδα της περιοχής εγκατάστασης του.
- Η επιφάνεια του εδάφους κάτω από την οροφή του ηλιακού συλλέκτη μπορεί να καλυφθεί με ελαστικό ή πλαστικό μαύρο τάπητα ώστε να υπάρχει η μεγαλύτερη δυνατή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται από την υάλινη διαφανή στέγη του ηλιακού συλλέκτη.
- Κάτω από τον τάπητα (ή πάνω του), μπορούν να χωνευτούν στο έδαφος σωλήνες γεμάτοι νερό για αύξηση της θερμοχωρητικότητας του εδάφους εάν απαιτείται η λειτουργία του σταθμού με ηλιακές καμινάδες να συνεχίζεται πολύ πέραν της δύσης του ηλίου.



2.1 Αεροστρόβιλος

2.2 Ηλεκτρογεννήτρια συνδεδεμένη απευθείας με τον αεροστρόβιλο

2.3 Ενδεικτικό σύστημα φραγής του ανοίγματος

Εικόνα 3.8: Σύστημα φραγής αέρα του περικλειστού σταθμού.

Γεωμετρική απόδοση του σταθμού με ηλιακή καμινάδα.

Η GCT απέδειξε ότι για δεδομένο τόπο εγκατάστασης του σταθμού με ηλιακή καμινάδα η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή του είναι ανάλογη του γινομένου του ύψους της καμινάδας επί το εμβαδόν του ηλιακού συλλέκτη.

Ο καθηγητής Χρ. Παπαγεωργίου ονόμασε αυτόν το συντελεστή αναλογίας, γεωμετρική απόδοση του σταθμού. Από τη μελέτη του πειραματικού σταθμού στους Κομποτάδες, συμπέρανε ότι η γεωμετρική απόδοση ενός τέτοιου σταθμού μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη μεταβολή των διαστάσεων και της γεωμετρικής διάταξης των κύριων στοιχείων του.

Ο περικλειστός ηλιακός σταθμός με ηλιακή καμινάδα (ESCP) έχει σχεδιαστεί ώστε να έχει πολύ μεγαλύτερη γεωμετρική απόδοση από ένα συμβατικό σταθμό με ηλιακή

καμινάδα, με αποτέλεσμα να έχει τη δυνατότητα για την ίδια ετήσια ηλεκτροπαραγωγή να κατασκευαστεί με σημαντικά μικρότερες διαστάσεις.

Βελτιώσεις που ενσωματώνονται στους Περίκλειστους Ηλιακούς σταθμούς.

Με βάση τα συλλεχθέντα πειραματικά δεδομένα η GCT ενσωμάτωσε στα σχέδια της σειρά βελτιώσεων προκειμένου να αντιμετωπίσει τα αδύναμα σημεία των συμβατικών σταθμών.

Οι συμβατικοί σταθμοί με ηλιακές καμινάδες χρειάζονται μεγάλης έκτασης θερμοκήπια και μεγάλου ύψους καμινάδες πράγμα που δημιουργεί αυξημένο κόστος κατασκευής που είναι αποτρεπτικό για την μαζική εφαρμογή της τεχνολογίας των ηλιακών καμινάδων.

Η διόρθωση αυτού του μειονεκτήματος γίνεται με την αύξηση της γεωμετρικής απόδοσης των σταθμών με ηλιακές καμινάδες. Αυξάνοντας την γεωμετρική απόδοση των σταθμών με ηλιακές καμινάδες με τον περίκλειστο σταθμό με ηλιακή καμινάδα (ESCP), θα έχουμε σταθμούς με ηλιακές καμινάδες μικρότερου ύψους με θερμοκήπια μικρότερης έκτασης.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των συμβατικών σταθμών με ηλιακές καμινάδες είναι ότι οι αεροστρόβιλοι τους είναι μηχανές που έχουν χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και μεγάλη διάμετρο (είναι σχεδόν σαν τις ανεμογεννήτριες) και απαιτούν ειδική μελέτη και κατασκευή και επομένως δεν υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά.

Με την αύξηση της ταχύτητας του κινητήριου ρεύματος αέρος στους αεροστροβίλους και επομένως και της ταχύτητας περιστροφής τους όπως γίνεται στους περίκλειστους σταθμούς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως αεροστρόβιλους κατάλληλους αξονικούς ανεμιστήρες (axial fans) που βρίσκονται σε αφθονία στην αγορά.

Επίσης μειονέκτημα των συμβατικών σταθμών με ηλιακές καμινάδες είναι η χρήση μηχανικών κιβωτίων πολλαπλασιασμού της συχνότητας περιστροφής που τοποθετούνται μεταξύ των αεροστροβίλων τους που λόγω των διαστάσεων τους περιστρέφονται με μικρή συχνότητα και των ηλεκτρογεννητριών που έχουν πολύ μεγαλύτερη συχνότητα περιστροφής. Τα κιβώτια αυτά είναι μηχανές με υψηλό κόστος και απαιτούν προσεκτική και συχνή συντήρηση.

Αντιθέτως οι αεροστρόβιλοι στους περίκλειστους σταθμούς με ηλιακές καμινάδες λειτουργούν πάντοτε με μεγάλες ταχύτητες ρεύματος αέρα, χάρις και στα ηλεκτρομηχανικά συστήματα φραγής του εισερχόμενου ρεύματος αέρα, και επομένως η συχνότητα περιστροφής των αεροστροβίλων είναι μεγάλη και μπορεί να ρυθμιστεί χονδρικά ώστε να συμπίπτει με την συχνότητα περιστροφής των ηλεκτρογεννητριών άρα δεν χρειάζονται κιβώτια ταχυτήτων.

Η προσαρμογή των συχνότητων περιστροφής των αεροστρόβιλων, των σταθμών με ηλιακές καμινάδες, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση τους για κάθε ταχύτητα του εισερχομένου ρεύματος αέρα, γίνεται με την βοήθεια ρυθμιζόμενων ηλεκτρονικών μετατροπέων συχνότητας, (frequency converters) που συνοδεύουν τις ηλεκτρογεννήτριες.

Οι αεροστρόβιλοι των συμβατικών σταθμών με ηλιακή καμινάδα, στις περιόδους όπου η ηλιακή ενέργεια είναι μικρή, λειτουργούν με ρεύματα αέρος χαμηλής ταχύτητας επομένως και οι ηλεκτρογεννήτριες τους λειτουργούν με πολύ μικρή ισχύ, άρα λόγω των σταθερών απωλειών τους, έχουν πάρα πολύ μικρή απόδοση. Επιπλέον οι ηλεκτρονικοί μετατροπέες συχνότητας, που συνοδεύουν τις ηλεκτρογεννήτριες, δεν μπορούν να προσαρμόσουν την συχνότητα περιστροφής των αεροστρόβιλων σε πολύ μικρές ταχύτητες ρεύματος αέρα με αποτέλεσμα και οι αεροστρόβιλοι να έχουν επίσης πολύ μικρή απόδοση.

Αυτό περιορίζει το βαθμό απόδοσης του ηλεκτροπαραγωγικού τους συστήματος στις περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας και επομένως η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή του συμβατικού σταθμού με ηλιακή καμινάδα είναι μικρή.

Αντιθέτως οι περίκλειστοι σταθμοί με ηλιακές καμινάδες έχουν ένα σημαντικό αριθμό αεροστρόβιλων και οι είσοδοι αέρα ενός αριθμού από αυτούς μπορούν να κλείσουν σε περιόδους χαμηλής ταχύτητας του ρεύματος αέρα, έτσι ώστε όσοι παραμένουν ανοικτοί να δέχονται ρεύμα αέρος αυξημένης ταχύτητας δηλαδή να λειτουργούν με αυξημένη ισχύ και συχνότητα περιστροφής εξαλείφοντας τα προηγούμενα μειονεκτήματα των συμβατικών σταθμών με ηλιακές καμινάδες και επομένως έχουν αυξημένη ετήσια ηλεκτροπαραγωγή.

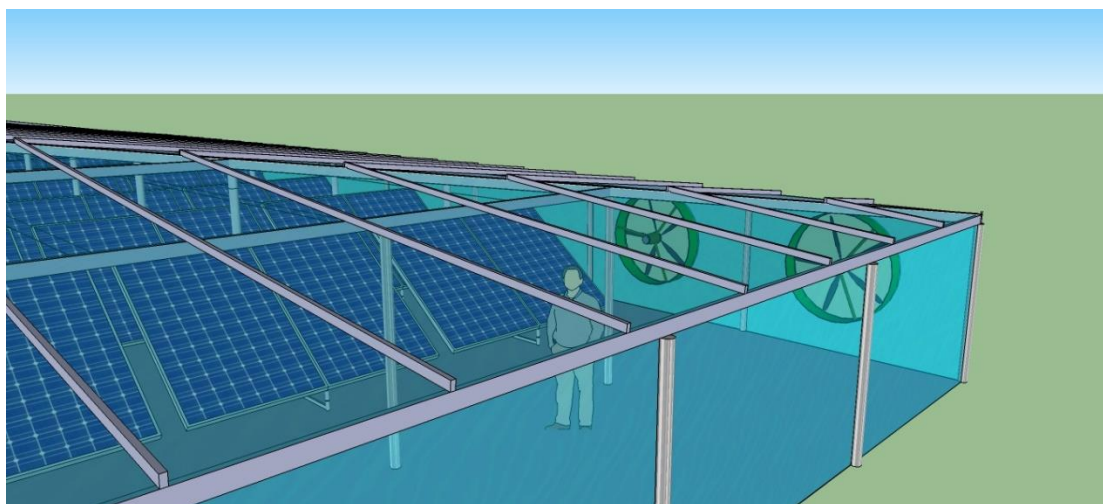
Παρά τις βελτιώσεις παραμένει το μειονέκτημα, πως οι περίκλειστοι σταθμοί με ηλιακές καμινάδες χρειάζονται περισσότερη έκταση για ίδια ετήσια παραγωγή ηλεκτρισμού συγκριτικά με τις άλλες δύο ηλιακές τεχνολογίες δηλαδή τα φωτοβολταϊκά και τα ηλιακά κάτοπτρα. Αυτό τους το μειονέκτημα σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά αυτή τη στιγμή είναι η οικονομικότερη λύση για όποιον επιθυμεί να μπει στο χώρο των ΑΠΕ, είναι τα δύο στοιχεία που δεν έχουν επιτρέψει στην τεχνολογία της ηλιακής καμινάδας να μπει σε εφαρμογή για σημαντική ηλεκτροπαραγωγή. Για να ξεπεραστεί και αυτό προτάθηκε και σχεδιάστηκε από την GCT ο υβριδικός ηλιακός σταθμός.

Υβριδικός ηλιακός σταθμός (Hybrid Solar Power Plant HSP)

Από την περιγραφή του περίκλειστου σταθμού με ηλιακές καμινάδες (ESCP) είναι φανερό ότι η βάση του περίκλειστου ηλιακού συλλέκτη τους, στεγασμένη κάτω από

την γυάλινη οροφή του και προστατευμένη από το περιφερειακό του τοίχωμα είναι ελεύθερη, εκτός από τα σημεία που εδράζονται τα μεταλλικά στηρίγματα της υποδομής της γυάλινης οροφής. Άρα στην ελεύθερη αυτή επιφάνεια μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά πάνελ και να λειτουργήσουν σαν υβριδικοί σταθμοί (βλ. **Εικόνα 3.9**).

Τη σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19% (εκμεταλλεύσιμη ενέργεια προς την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της γης), ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Η απόδοση ενός δεδομένου συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε ηλιοστάτη.



Εικόνα 3.9: Φωτοβολταϊκά, τουρμπίνες και θερμοκήπιο Υβριδικού Ηλιακού Σταθμού.

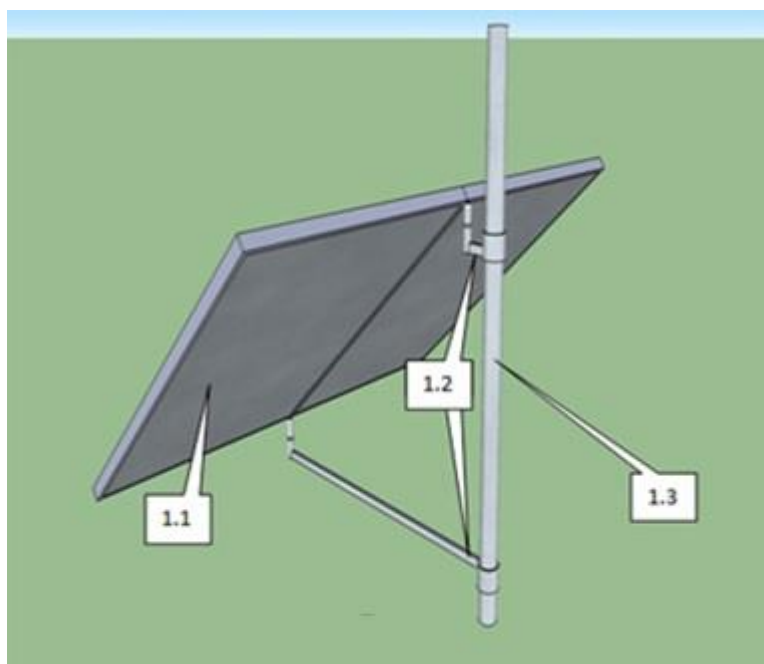
Όπως δείξαμε στο Κεφάλαιο 1 οι προϋποθέσεις αξιοποίησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη, αφού η συνολική ενέργεια που δέχεται ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας στην διάρκεια ενός έτους κυμαίνεται από 1400-1800 kWh. Πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας, το οποίο κατά πάσα πιθανότητα δε θα μπορέσουμε ποτέ να εκμεταλλευτούμε με ένα σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης, αλλά και στο βαθμό που μπορούμε τώρα με τις υπάρχουσες τεχνολογίες μας λύνει πολύ σημαντικά προβλήματα ενώ ταυτόχρονα προστατεύουμε τον πλανήτη μας μελλοντικά, μη καίγοντας ορυκτά καύσιμα για να καλύψουμε τις ηλεκτρικές μας ανάγκες.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ σε ελεύθερο εξωτερικό χώρο απαιτεί βαριά σιδηροκατασκευή, προκειμένου το πάνελ να αντέχει την καταπόνηση λόγω της απευθείας δυσμενούς επίδρασης των μεταβολών των καιρικών συνθηκών (βροχή,

χιόνι, χαλάζι, υγρασία, ισχυροί άνεμοι, κτλ.). Για παράδειγμα σε έναν ισχυρό άνεμο το ίδιο το πάνελ λειτουργεί ως «πανί», λόγω της κλίσης που χρειάζεται να έχει με το οριζόντιο επίπεδο. Κατ' επέκταση ένα σύστημα ηλιοστάτη, το οποίο παρακολουθεί τον ήλιο και τοποθετεί την επιφάνειά του πάνελ κάθε στιγμή κάθετα στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε αυτό, ανεβάζει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης (σε € ανά εγκατεστημένο W), σε σύγκριση με μια απλή εγκατάσταση όπου τα πάνελ θα παραμένουν σταθερά. Διότι απαιτείται ακόμα πιο βαριά μεταλλική κατασκευή και δυνατά, άρα και ακριβά μοτέρ για την κίνηση των πάνελ.

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ εντός του υβριδικού σταθμού όμως είναι προστατευμένα από τα δυσμενή καιρικά φαινόμενα καθώς βρίσκονται μέσα στο θερμοκήπιο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα κατασκευής ενός απλού και οικονομικού ηλιοστατικού συστήματος.

Για την δημιουργία του ηλιοστατικού συστήματος του υβριδικού σταθμού τα φωτοβολταϊκά πρέπει να τοποθετηθούν σε ειδικά πάνελ των οποίων το ύψος δεν θα ξεπερνά το 1.5 έως 1.8, μέτρα ενώ το μήκος τους θα είναι μικρότερο από την πλευρά του τετραγώνου του κανάβου που δημιουργούν οι κατακόρυφοι στύλοι στην επιφάνεια του εδάφους του θερμοκηπίου.

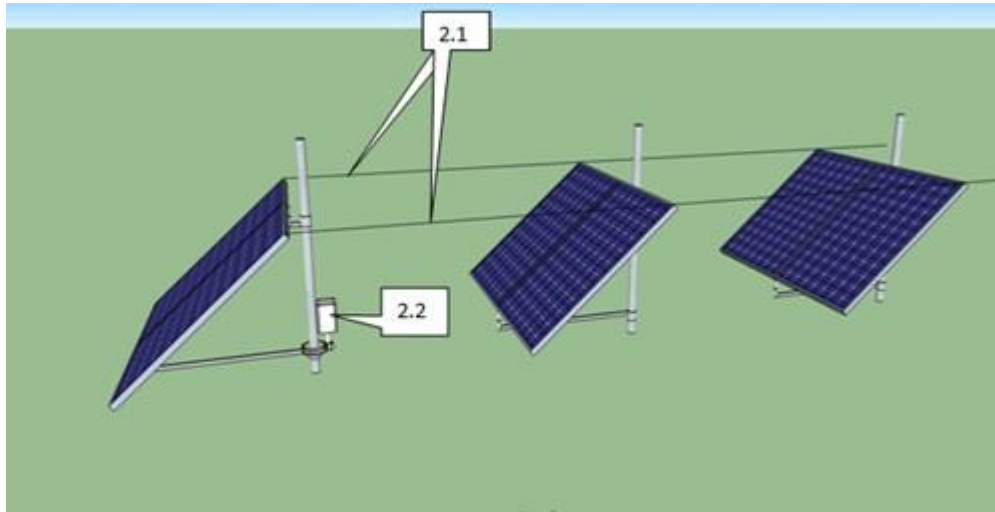


- 1.1 Αναρτημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κατακόρυφο στύλο
- 1.2 Σύνδεσμοι ανάρτησης φωτοβολταϊκού πάνελ σε κατακόρυφο στύλο
- 1.3 Κατακόρυφος στύλος στήριξης φωτοβολταϊκού πάνελ

Εικόνα 3.10: Ανάρτηση φωτοβολταϊκού πάνελ στους στύλους στήριξης του συλλέκτη.

Τα φωτοβολταϊκά αυτά πάνελ θα αναρτώνται με δύο συνδέσμους που θα επιτρέπουν την περιστροφή τους γύρω από τους κατακόρυφους στύλους στήριξης της διαφανούς στέγης (βλ. **Εικόνα 3.10**). Θα έχουν την απαραίτητη κλίση ως προς το έδαφος και τον

στύλο στήριξης. Όλα τα πάνελ που αναρτώνται σε μια σειρά από κατακόρυφους σωλήνες με προσανατολισμό Βορά-Νότο θα συνδέονται μεταξύ τους με ανθεκτικά νήματα (π.χ. συρματόσχοινα, ατσάλοσυρμα κλπ.) ώστε να είναι παράλληλα σε σταθερή απόσταση ίση με την πλευρά του τετραγώνου του κάναβου, με τρόπο ώστε η γωνιακή περιστροφή ενός πάνελ πέριξ του κατακόρυφου άξονα ανάρτησής του να συνεπάγεται την ίση γωνιακή περιστροφή, πέριξ των κατακόρυφων αξόνων τους, όλων των πάνελ της σειράς Βορά-Νότου στην οποία ανήκει το πάνελ.



2.1 Συνδετήριο νήμα των φωτοβολταϊκών πάνελ μιας τυχαίας σειράς στην κατεύθυνση Βοράς-Νότος.
2.2 Ενδεικτικό ηλεκτρομηχανικό σύστημα περιστροφής ενός φωτοβολταϊκού πάνελ της σειράς-οδηγού που έχει κατεύθυνση Ανατολή-Δύση.

Εικόνα 3.11: Ηλιοστατικό σύστημα.

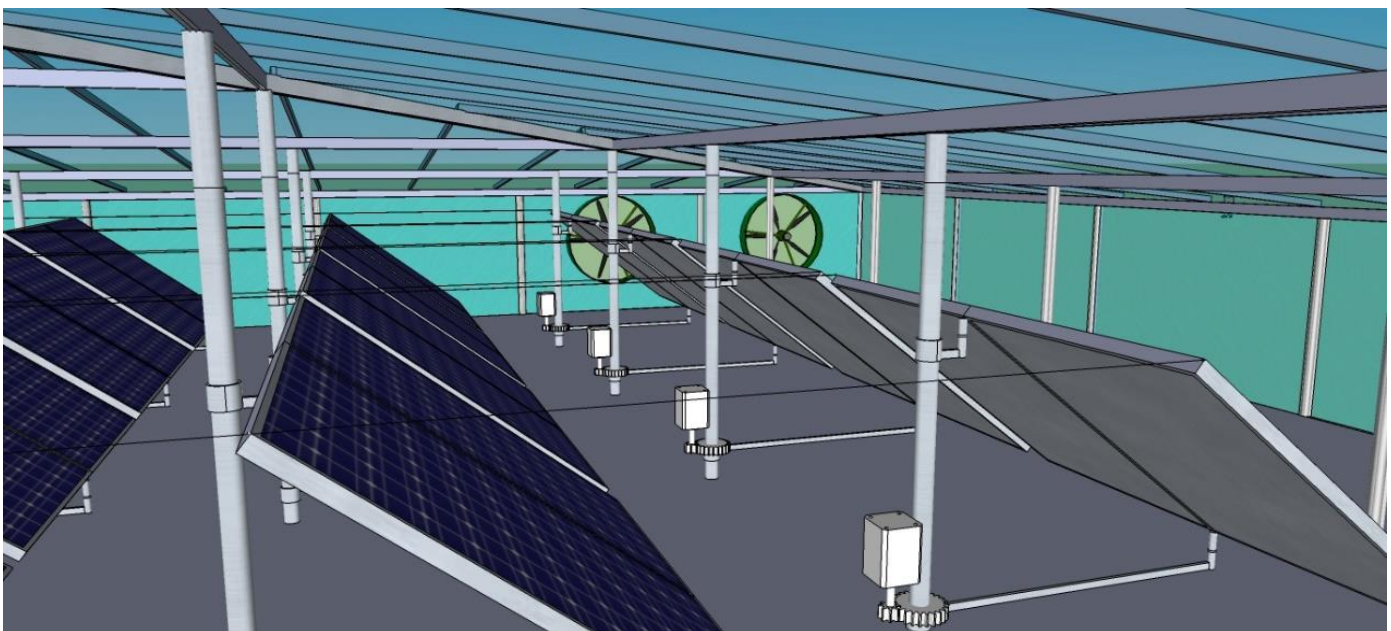
Τα πάνελ μιας μόνον σειράς (σειράς- οδηγού) με προσανατολισμό Ανατολή –Δύση περιστρέφονται πέριξ του κατακόρυφου στύλου ανάρτησης τους, με την βοήθεια ειδικών συστημάτων τα οποία αποτελούνται, από ένα ηλεκτροκινητήρα (π.χ. stepper motor) και ένα συνδυασμό οδοντωτών τροχών (βλ. **Εικόνα 3.11**). Οι εντολές στους ηλεκτροκινητήρες δίδονται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα που ενεργοποιείται από ψηφιακό σύστημα με ενσωματωμένο ένα ετήσιο πρόγραμμα, κατάλληλο για τη γεωγραφική θέση της περιοχής εγκατάστασης του υβριδικού ηλιακού σταθμού, ώστε τα πάνελ της σειράς-οδηγού να παραμένουν παράλληλα και να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου στην διάρκεια της ημέρας. Μετά την δύση του ηλίου τα πάνελ της σειράς-οδηγού επανέρχονται στην θέση εκκίνησης και είναι έτοιμα για να ξεκινήσουν την γωνιακή του περιστροφή με την ανατολή του ήλιου κτλ..

Επειδή τα πάνελ της σειράς-οδηγού συνδέονται με τα πάνελ όλων σειρών με προσανατολισμό Βορά-Νότο όλα τα πάνελ του υβριδικού σταθμού παραμένουν παράλληλα παρακολουθώντας την τροχιά του ηλίου (βλ. **Εικόνα 3.12**).

Το προτεινόμενο ηλιοστατικό σύστημα συνιστά λοιπόν ένα μονοαξονικό σύστημα κατακόρυφου άξονα παρακολούθησης του ήλιου, με το οποίο αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ του υβριδικού σταθμού.

Οι αντιστάσεις περιστροφής των φωτοβολταϊκών πάνελ του υβριδικού ηλιακού σταθμού, πέριξ των κατακόρυφων στύλων ανάρτησης τους, είναι πολύ μικρές επειδή είναι προστατευμένα μέσα στον περικλειστο ηλιακό συλλέκτη του και δεν δέχονται τις ισχυρές δυνάμεις από καιρικά φαινόμενα. Άρα το ηλιοστατικό σύστημα μπορεί να λειτουργεί με σταθερότητα και ακρίβεια χωρίς πρόβλημα, με την βοήθεια ενός μικρού αριθμού ηλεκτροκινητήρων πολύ μικρής ισχύος.

Ας σημειωθεί ότι ενώ το συγκεκριμένο ηλιοστατικό σύστημα έχει πολύ μικρό κόστος κατασκευής (2%-3% της επένδυσης), επιλέγοντας την κατάλληλη για την περιοχή εγκατάστασης, γωνία κλίσης των πάνελ, ως προς το έδαφος, η απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ του υβριδικού μπορεί να αυξηθεί κατά 25%.



Εικόνα 3.12: Υβριδικός ηλιακός σταθμός.

Ας σημειωθεί επίσης ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στον περικλειστο ηλιακό συλλέκτη ακόμη και χωρίς το συνηθισμένο γυάλινο προστατευτικό τους κάλυμμα, αφού βρίσκονται προστατευμένα μέσα σε αυτόν.

Επειδή τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι προστατευμένα και χωρίς την επίδραση δυσμενών καιρικών συνθηκών και άλλων φαινομένων (βροχή, χιόνι, χαλάζι, υγρασία, ισχυρός άνεμος, κεραυνοί κτλ.) αναμένεται να έχουν καλύτερη απόδοση ενώ σίγουρα θα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Επίσης η παρουσία των φωτοβολταϊκών κάτω από τον περικλειστο ηλιακό συλλέκτη είναι πιθανόν να επηρεάσει θετικά την ηλεκτροπαραγωγική δυνατότητα και την απόδοση του περικλειστού σταθμού με ηλιακή καμινάδα ο οποίος λειτουργεί με την θερμότητα που συλλέγεται από τον ήλιο μέσα στο θερμοκήπιο.

Πλεονεκτήματα υβριδικού σταθμού

Με βάση αυτά που αναφέρθηκαν είναι φανερό ότι ο υβριδικός ηλιακός σταθμός που αποτελείται από ένα περικλειστο σταθμό με ηλιακή καμινάδα και ένα σύνολο από φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετημένα στο δάπεδο του κλειστού θερμοκηπίου του θα έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Ο υβριδικός ηλιακός σταθμός θα έχει μικρότερο κόστος κατασκευής από το άθροισμα κόστους των μονάδων του, δηλαδή του περικλειστού σταθμού και του φωτοβολταϊκού σταθμού που εδράζεται στη βάση του, αν αυτοί κατασκευαστούν ως ανεξάρτητοι σταθμοί (αφού χρησιμοποιούν από κοινού την γυάλινη επιφάνεια του θερμοκηπίου).
- Ο υβριδικός ηλιακός σταθμός χρησιμοποιεί την ίδια έκταση γης με τον αντίστοιχο φωτοβολταϊκό σταθμό ίσης ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος, ενώ μπορεί να παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια.
- Ο υβριδικός ηλιακός σταθμός μπορεί να λειτουργεί αρκετές ώρες μετά την δύση του ηλίου και αν απαιτηθεί και αδιάλειπτα καθ' όλη την διάρκεια του 24ώρου, χάρις τον περικλειστο σταθμό του με ηλιακή καμινάδα.
- Ο υβριδικός ηλιακός σταθμός που χρησιμοποιεί την ίδια έκταση γης με τον φωτοβολταϊκό σταθμό ίσης ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος, μπορεί να έχει μικρότερο σταθμισμένο κόστος παραγωγής της kWh (LEVELIZED COST OF ELECTRICITY).

Ο περικλειστος σταθμός με ηλιακή καμινάδα εξαλείφει τα μειονεκτήματα των συμβατικών σταθμών με ηλιακές καμινάδες. Χρειάζεται μικρότερη έκταση θερμοκηπίου και μικρότερη ηλιακή καμινάδα, και έχει πολύ μεγαλύτερη απόδοση.

Χρειάζεται πολύ μικρή συντήρηση και έχει καλύτερη προστασία από καιρικές συνθήκες άρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Ταυτόχρονα έχει και την εξαιρετικά χρήσιμη ιδιότητα να συνδυάζεται χρησιμοποιώντας την ίδια γη φωτοβολταϊκά δημιουργώντας υβριδικούς ηλιακούς σταθμούς με μικρότερο κόστος κατασκευής, και άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συνήθεις ηλιακούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια των πειραμάτων στον μικρό πειραματικό σταθμό στους Κομποτάδες της Λαμίας διαπιστώθηκε ότι ο ισχυρός εξωτερικός άνεμος είχε σημαντικά θετική επίδραση στην ηλεκτροπαραγωγή του πράγμα που διαπιστώθηκε πειραματικά και στον σταθμό στο WUHAI της ΚΙΝΑΣ (Shed Absorbability and Tower Structure Characteristics of the Solar heated Wind Updraft Tower Power , Yili Wei and Zhenkui Wu, proceedings of SUPTP 2012 WUHAN CHINA).

Επομένως μπορεί να λεχθεί τι ο υβριδικός ηλιακός σταθμός παράγει ηλεκτρισμό:

1. Από την Ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τα φωτοβολταϊκά πάνελ.
2. Από την θερμότητα της Ηλιακής ακτινοβολίας.
3. Από τον εξωτερικό άνεμο.

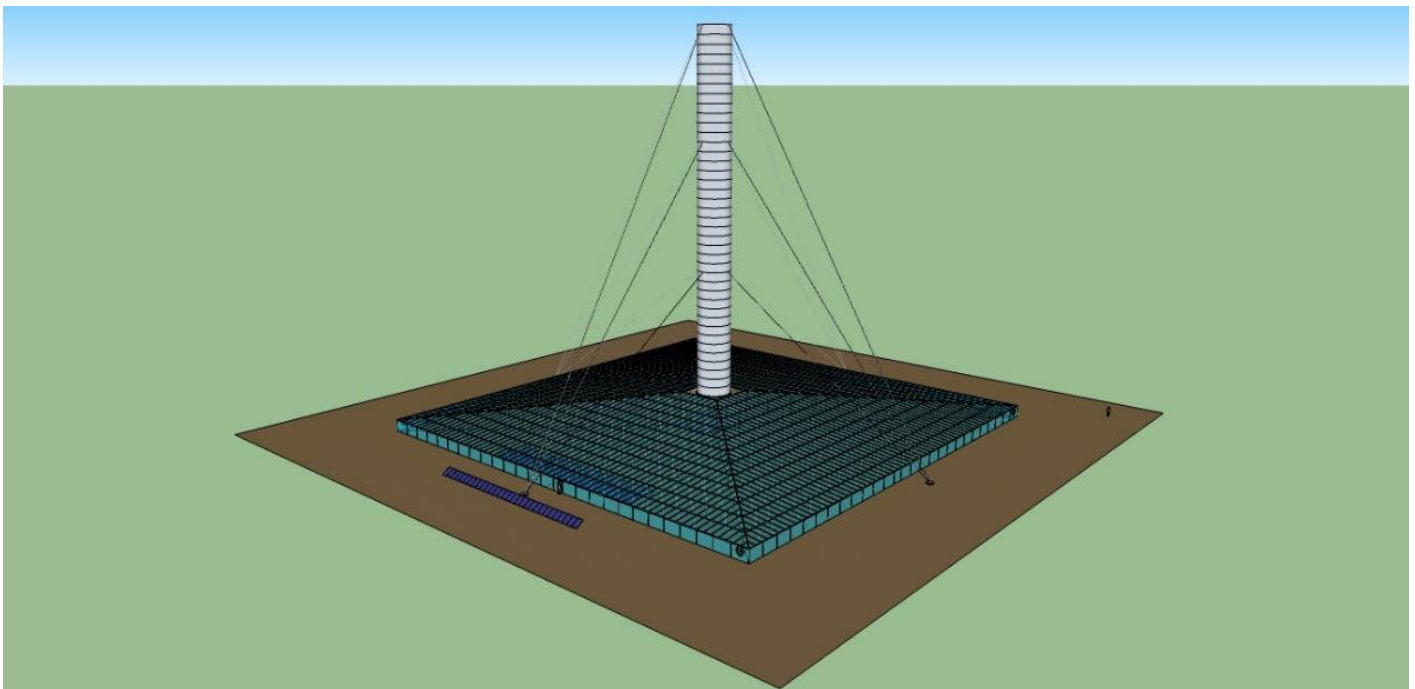
3.4. Ανάπτυξη της υβριδικής τεχνολογίας “HSP TECHNOLOGY”

Προκειμένου να προχωρήσει η ανάπτυξη της “HSP TECHNOLOGY” χρειάζεται η κατασκευή ενός επιδεικτικού σταθμού (“Demo”), που να δείξει με σαφήνεια το πώς λειτουργεί η συγκεκριμένη τεχνολογία, την απόδοση της, τα μελλοντικά οικονομοτεχνικά πλεονεκτήματά της, αλλά και τα πιθανά προβλήματα κατασκευής των κύριων τμημάτων της.

3.4.1. Demo Station

Η επιλογή του μεγέθους του επιδεικτικού σταθμού (Demo) είναι πολύ πιο σύνθετη υπόθεση από μια άλλη αντίστοιχη επιλογή μεγέθους επιδεικτικού σταθμού, για άλλη τεχνολογία. Στους ηλιακούς σταθμούς μικρού μεγέθους, μικρές μεταβολές των εξωτερικών παραγόντων μεταβάλουν ασύμμετρα τα μετρούμενα αποτελέσματα. Αυτό γιατί, εξ ορισμού, ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών αυτού του τύπου είναι πολύ μικρός. Από την άλλη μεριά η κατασκευή μεγάλου επιδεικτικού σταθμού απαιτεί ιδιαίτερα μεγάλα κεφάλαια, τα οποία ειδικά την παρούσα εποχή είναι δυσεύρετα.

Η επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών του σχεδιαζόμενου σταθμού Demo στην ουσία αποτελεί την βέλτιστη ισορροπία για να υπερκεραστεί η παραπάνω αντίφαση. Δηλαδή κατασκευή αρκετά μεγάλη για να έχουμε σταθερά και δυνάμενα να επαναληφθούν πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις, από την μια μεριά. Και από την άλλη κατασκευή σχετικά χαμηλού κόστους ώστε να μπορέσουν να εξευρεθούν τα απαιτούμενα ποσά.



Εικόνα 3.13: Σταθμός Demo.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του "Demo" είναι τα εξής:

- Θερμοκήπιο 6,4 στρεμμάτων, μια τετράγωνη πυραμίδα με πλευρά 80 μέτρα, που οι εξωτερικές πλευρές της θα ακουμπούν σε περιφερειακό διαφανές τοίχωμα ύψους περίπου 2 μέτρων και θα ανυψώνονται με κλίση 5% προς το κέντρο όπου βρίσκεται η ηλιακή καμινάδα.
- Μεταλλική καμινάδα ελαφράς κατασκευής διαμέτρου 6 μέτρων και ύψους 60 μέτρων.

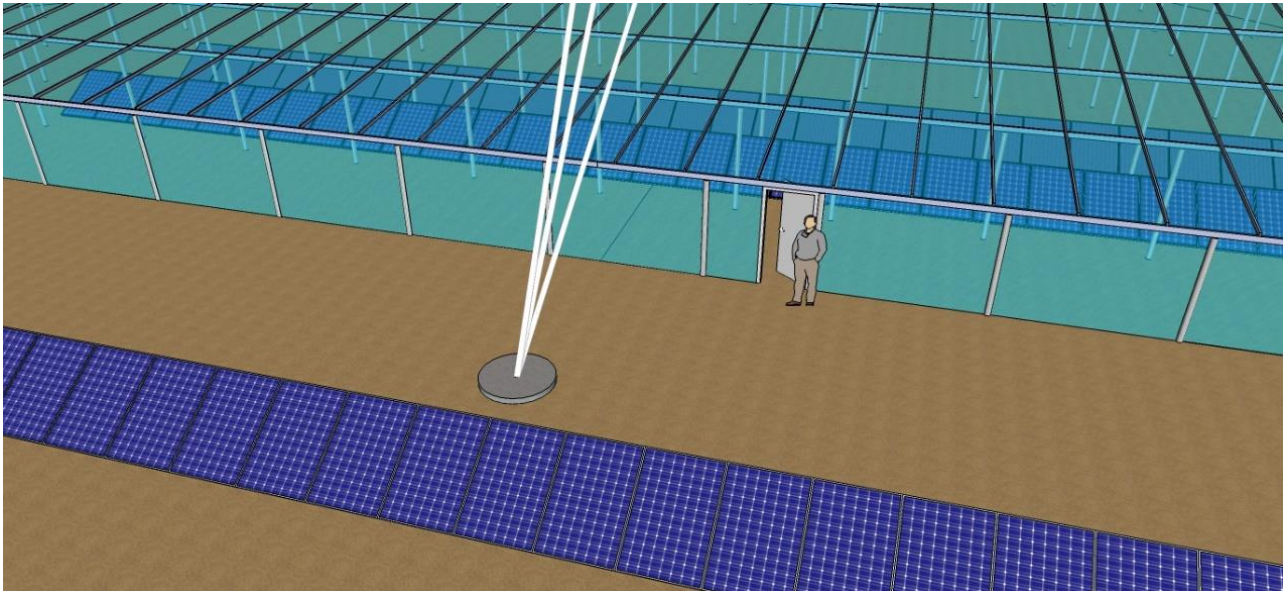
Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του "Demo" είναι:

- 4 αξονικοί αεροστρόβιλοι διαμέτρου 1.25 μέτρων και ονομαστικής ισχύος 25 kW ο καθένας, οι οποίοι θα είναι τοποθετημένοι στις 4 γωνίες του περιφερειακού τοιχώματος.
- Εντός του περικλειστού θερμοκηπίου θα τοποθετηθούν σταθερά φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 25 kW και φωτοβολταϊκά πάνελ με το ηλιοστατικό σύστημα που περιεγράφηκε προηγουμένως ισχύος 25KW. Επίσης εκτός του περικλειστού σταθμού θα τοποθετηθούν σταθερά φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 25 kW (βλ. **Εικόνα 3.14**).

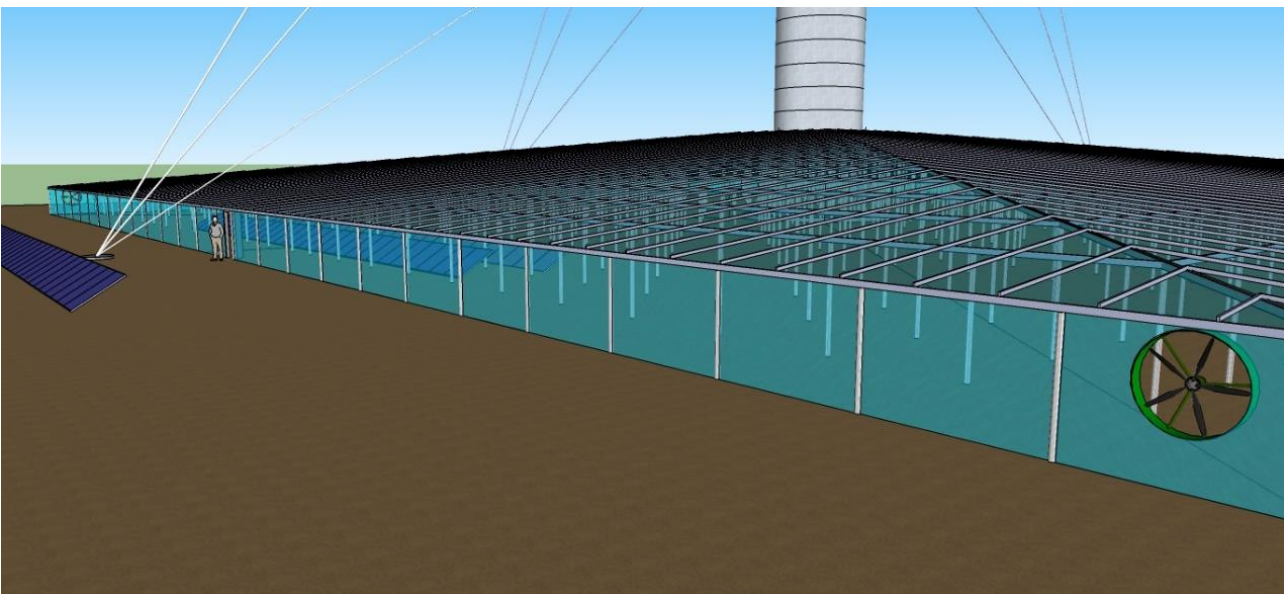
Τα ποσά ενέργειας που θα παραχθούν από τις τρεις αυτές διαφορετικές σειρές πάνελ, θα μελετηθούν με σκοπό να μπορεί να υπολογιστεί συγκριτικά το κόστος

εγκατάστασης - συντήρησης και η παραγόμενη ενέργεια ενός υβριδικού ηλιακού σταθμού πραγματικής κλίμακας.

Η μεταλλική καμινάδα του σταθμού Demo είναι η καμινάδα που προσομοιώνεται και αναλύεται με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων του λογισμικού ANSYS, στην παρούσα διπλωματική



Εικόνα 3.14: Διαφορετικές σειρές φωτοβολταϊκών πάνελ του Demo σταθμού.

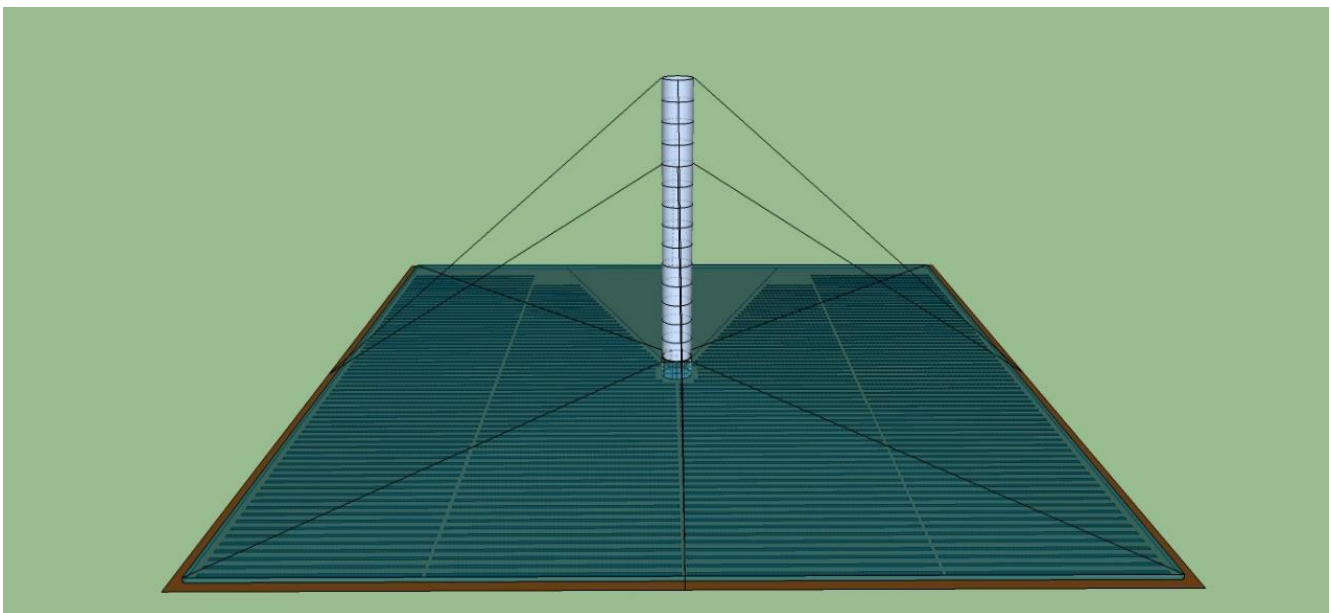


Εικόνα 3.15: Σταθμός Demo.

3.4.2. Ο σταθμός 'PROTOTYPE 5MW' και το υβριδικό ηλιακό πάρκο (Hybrid Solar Farm)

Στόχος είναι η τεχνολογία HSP (Hybrid Solar Power Plant) να γίνει ανταγωνιστική οικονομικά και να δίνει τη δυνατότητα σημαντικής ηλεκτροπαραγωγής σε μέρη που το χρειάζονται ή είναι πρόσφορα για την ανάπτυξή της.

Αυτό θα επιτευχθεί με το υβριδικό ηλιακό πάρκο (solar farm). Το υβριδικό ηλιακό πάρκο αποτελείται από σταθμούς Prototype των 5MW (βλ. **Εικόνα 3.16**) τον έναν δίπλα στον άλλον χωρίς να επηρεάζει ο καθένας τον διπλανό του κι έτσι ο μόνος περιορισμός για το ποσό ηλεκτροπαραγωγής που θέλουμε να πετύχουμε θα είναι ο χώρος.



Εικόνα 3.16: Σταθμός Prototype.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε σταθμού "Prototype" είναι:

- Θερμοκήπιο 101.170 m^2 , μια τετράγωνη πυραμίδα που οι εξωτερικές πλευρές της θα ακουμπούν σε περιφερειακό διαφανές τοίχωμα ύψους περίπου 2 μέτρα και θα ανυψώνονται με κλίση περίπου 5% προς το κέντρο όπου βρίσκεται η ηλιακή καμινάδα.
- Ηλιακή καμινάδα διαμέτρου 15 μέτρων και συνολικού ύψους 150 μέτρων.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του σταθμού "Prototype" είναι:

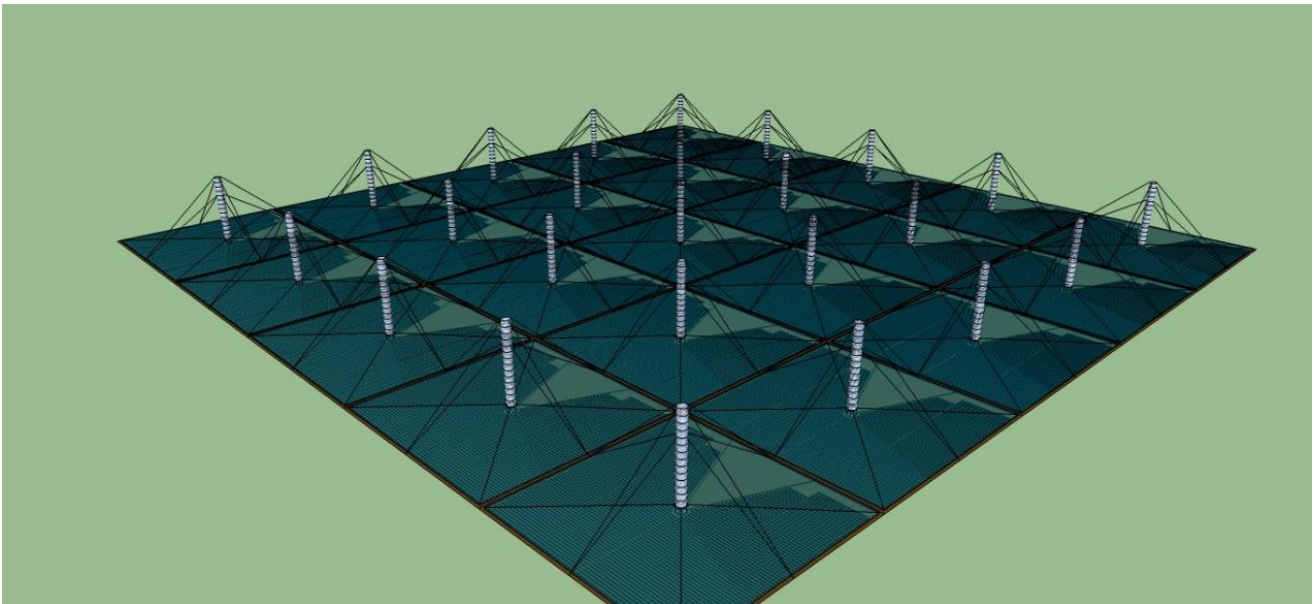
- 20 αξονικοί αεροστρόβιλοι 50 kW ο καθένας, οι οποίοι θα είναι τοποθετημένοι στις 4 γωνίες του περιφερειακού τοιχώματος (ισχύς αεροστροβίλων 1MW).

- Φωτοβολταϊκά πάνελ με δυνατότητα παρακολούθησης του ήλιου κατά τη 2 διάρκεια της ημέρας (το ηλιοστατικό σύστημα που παρουσιάστηκε παραπάνω στην εργασία ενότητα 3.3.), συνολικής ονομαστικής ισχύος 4MW.

Συνεπώς ο σταθμός αυτός θα έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 5MW.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της HSP τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι τέτοιοι σταθμοί είναι πολύ εύκολο να στηθούν σχεδόν οπουδήποτε, καθώς τα υλικά κατασκευής είναι απλά και καθόλου δυσεύρετα.

Ιδανικά η συγκέντρωση περισσότερων του ενός τέτοιων σταθμών θα μπορούσε να αποτελέσει, στην κατάλληλη γεωγραφική περιοχή, ένα Υβριδικό Ηλιακό Πάρκο υψηλών ενεργειακών αποδόσεων, (εικόνα 3.17)



Εικόνα 3.17: Hybrid Solar Farm.

4. ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΜΙΝΑΔΑ

4.1. Προφίλ ταχύτητας ανέμου

Καθώς η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε σχετική κίνηση με τη Γη, στο κατώτατο τμήμα της λόγω του ιξώδους του αέρα δημιουργείται ένα στρώμα αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν πάνω στην επιφάνεια της Γης, μέχρι μεγαλύτερες τιμές. Τα χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, καθορίζονται κυρίως από τη μορφή της επιφάνειας της Γης (τραχύτητα εδάφους), αλλά και από τον άνεμο και την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο το πάχος του οριακού στρώματος μπορεί να είναι της τάξεως των 200 μέτρων, ενώ για ανώμαλη επιφάνεια (μεγάλη τραχύτητα) και έντονο άνεμο είναι δυνατό να φτάσει μέχρι τα 2 χιλιόμετρα.

Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούμε σήμερα για να υπολογίσουμε την διανομή της ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα είναι δύο (Μπεργελές 2005):

- ο λογαριθμικός νόμος $U(z) = \frac{U_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$
- ο εκθετικός νόμος $U(z) = U(z_0) \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha$

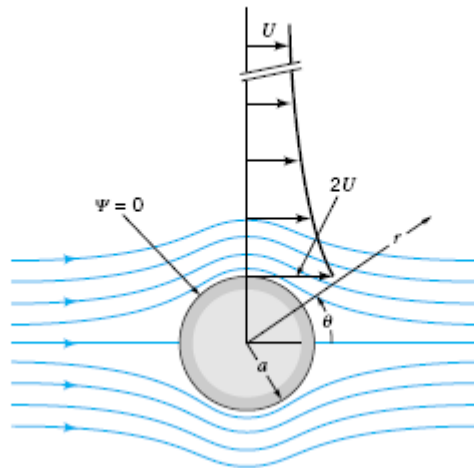
όπου $U(z)$ η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z , U_* η ταχύτητα τριβής, α ο εκθέτης του εκθετικού νόμου, k η σταθερά von Karman ($k=0.35$) και z_0 η παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας.

Συνήθως στα μετεωρολογικά προβλήματα χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος λόγω της απλότητάς του.

Στην παρούσα, για την ανάλυση της μεταλλικής καμινάδας χρησιμοποιήθηκε ο λογαριθμικός νόμος με $z_0=0.03$ που είναι μια ενδεικτική τιμή για έδαφος με γρασίδι.

4.2. Θεωρητικά δεδομένα

Παρακάτω παρατίθενται τα θεωρητικά δεδομένα για τη ροή αέρα γύρω από κύλινδρο που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση της μεταλλικής καμινάδας του σταθμού Demo.



Εικόνα 4.1: Ανάπτυξη ροής του αέρα γύρω από έναν κύλινδρο.

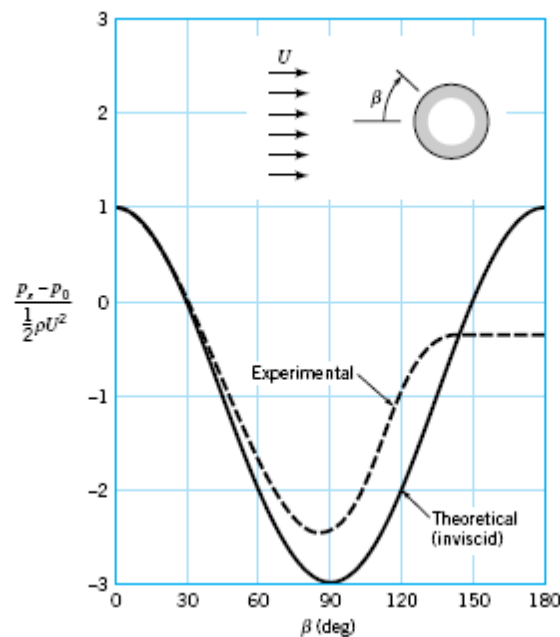
Η κατανομή της στατικής πίεσης πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου βρίσκεται γράφοντας την εξίσωση Bernoulli για ένα σημείο μακριά από τον κύλινδρο (όπου έχουμε συνθήκες αδιατάρακτης ροής) και ένα σημείο πάνω στον κύλινδρο (θέση που ορίζεται με τη γωνία θ , για κάθε ύψος)(Αθανασιάδης 1989).

$$p + \frac{1}{2} \rho U^2 = p_s + \frac{1}{2} \rho v_{\theta s}^2$$

Γνωρίζοντας έτσι την κατανομή της ταχύτητας συναρτήσει της γωνίας θ από την παραπάνω σχέση, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την κατανομή της στατικής πίεσης (θεωρητικής) πάνω στον κύλινδρο.

$$p_s = p + \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - 4 \sin^2 \theta)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η θεωρητική κατανομή της στατικής πίεσης είναι συμμετρικής μορφής. Η ελάχιστη τιμή της θα είναι για $\theta = \pm\pi/2$.

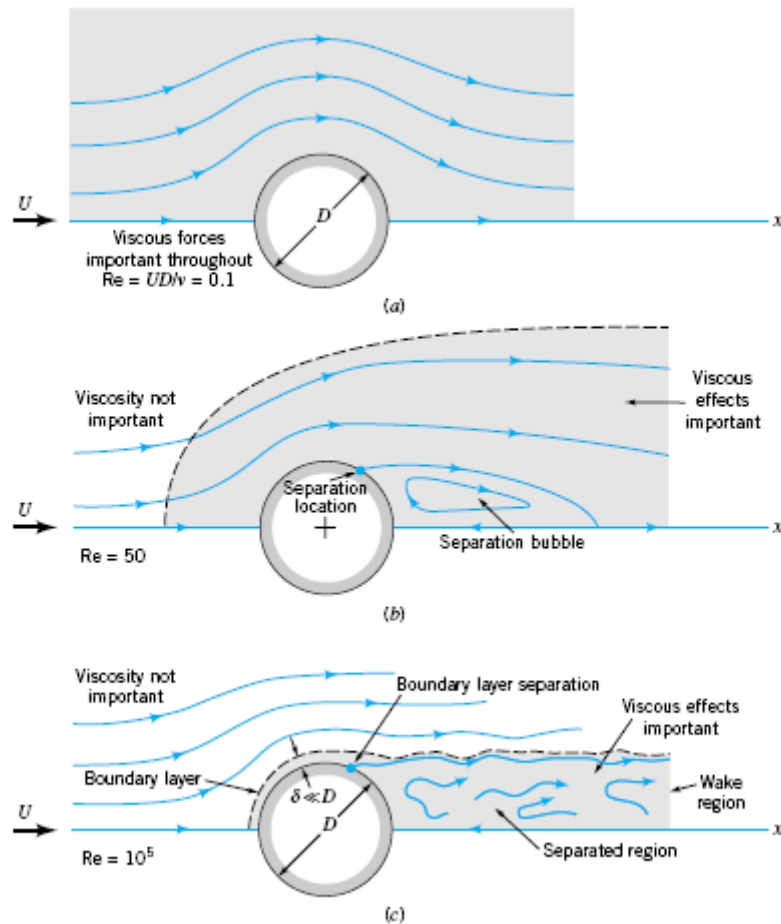


Εικόνα 4.2: Κατανομή της πίεσης γύρω από την κυλινδρική επιφάνεια.

Από την κατανομή της πίεσης (βλ. **Εικόνα 4.2**) προκύπτει ότι μόνο στην περιοχή της εισερχόμενης ροής η θεωρητική στατική πίεση (για μη συνεκτικό ρευστό) προσεγγίζει την πραγματική (δηλ. την κατανομή πίεσης για ροή συνεκτικού ρευστού). Στην περιοχή της απερχόμενης ροής οι δύο κατανομές αποκλίνουν σημαντικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση συνεκτικού ρευστού η συνεχώς ανερχόμενη πίεση στην περιοχή $-\pi/2 < \theta < +\pi/2$ εμποδίζει το ρευστό να μείνει κολλημένο πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα σε κάποιο σημείο να έχουμε αποκόλληση και στην συνέχεια σχηματισμό στροβιλισμών. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να μην έχουμε ανάκτηση της στατικής πίεσης, όπως συμβαίνει στην θεωρητική περίπτωση.

Όπως για την ροή αέρα πάνω σε επίπεδη πλάκα έτσι και για την ροή γύρω από κύλινδρο σημαντική επίδραση έχει ο αριθμός Reynolds. Γενικά ισχύει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός Reynolds τόσο μικρότερη είναι η περιοχή όπου οι επιδράσεις τριβής είναι σημαντικές (βλ. **Εικόνα 4.3**).

Για σώματα τα οποία δεν έχουν αεροδυναμικό σχήμα παρατηρείται επιπλέον το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής (*flow separation*).



Εικόνα 4.3: Ροή γύρω από κύλινδρο για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds.

Καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνει η περιοχή μπροστά από τον κύλινδρο, όπου έχουμε συνεκτικές επιδράσεις μειώνεται πολύ, όπως διακρίνουμε στο σχήμα (b) παραπάνω. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ακόμη το σημείο αποκόλλησης, όπου οι δυνάμεις αδρανείας είναι αρκετά μεγάλες και τα σωματίδια του ρευστού δεν μπορούν να ακολουθήσουν την επιφάνεια του κυλίνδρου. Τέλος σε κάποια απόσταση από τον κύλινδρο σχηματίζεται μία περιοχή όπου τα σωματίδια του ρευστού κινούνται κατ' αρχάς αντίθετα και στην συνέχεια περιφερειακά μέσα σ' αυτήν.

Τέλος για ακόμη μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds η περιοχή συνεκτικών επιδράσεων περιορίζεται ουσιαστικά στην περιοχή μετά τον κύλινδρο ενώ μόνον μία λεπτή περιοχή, η περιοχή του οριακού στρώματος $\delta \ll D$, έχει να κάνει με τριβή πάνω στον κύλινδρο.

4.3. Vortex Shedding και παραδείγματα κατάρρευσης ελαφριών μεταλλικών κατασκευών κυλινδρικής διατομής

Η εκτίμηση της απόκρισης κατασκευών λόγω παρουσίας ρευμάτων αέρα είναι ένα μεγάλο κομμάτι της Ρευστομηχανικής. Τέτοιου είδους μελέτες ξεκινούν με πειράματα μικρής κλίμακας σε σήραγγες, και καταλήγουν σε θεωρητικές προσεγγίσεις με μαθηματικά μοντέλα. Τα μαθηματικά μοντέλα που έχουν ήδη αναπτυχθεί έχουν τη δυνατότητα να αναπαραστήσουν με ακρίβεια το εκάστοτε δοκίμιο και τη ροή γύρω από αυτό. Επιτρέπουν έτσι την προσομοίωση και μελέτη κάθε περίπτωσης με χρήση Η/Υ.

Στην περίπτωση ροής αέρα γύρω από κύλινδρο, όπου είναι και το πρόβλημα της παρούσας εργασίας έχει παρατηρηθεί ανά τα χρόνια ένα αξιοσημείωτο πρόβλημα σε παρόμοιες κατασκευές.

Το 1964 στο Yorkshire κατασκευάστηκε ένας πύργος τηλεόρασης (βλ. **Εικόνα 4.4**), μια αρκετά μοντέρνα για τότε μεταλλική ελαφριά κατασκευή. Πέντε χρόνια αργότερα, μια ημέρα με χαμηλή ταχύτητα ανέμου, ο πύργος καταρρέει (βλ. **Εικόνα 4.5**). Εικόνες του πύργου πριν και μετά:



Εικόνα 4.4: Yorkshire 1964 πύργος τηλεόρασης.



Εικόνα 4.5 Yorkshire 1969, κατάρρευση πύργου τηλεόρασης.

Η μελέτη της πτώσης του πύργου στο Yorkshire, απέδωσε την πτώση του πύργου σε ένα φαινόμενο αποκαλούμενο **vortex shedding**.

Το 1997 στη (κρεμαστή) γέφυρα στο Beytan του Texas, 2 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της με ταχύτητα ανέμου 10mil/h, υπήρξε έντονη κίνηση των καλωδίων της (βλ. **Εικόνες 4.6 & 4.7**), με αποτέλεσμα να κινείται επικίνδυνα ολόκληρη η γέφυρα. Γεγονός που παρατηρήθηκε αρκετές φορές και θορύβησε το υπουργείο μεταφορών του Texas και προσπάθησε απευθείας να βρει μια λύση. Η λύση που βρέθηκε και εφαρμόστηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος ήταν, η σύνδεση όλων των καλωδίων μεταξύ τους, ώστε να μη τους επιτρέπεται η ελεύθερη κίνηση. Στις **Εικόνες 4.6 & 4.7** φαίνεται η κίνηση των καλωδίων.

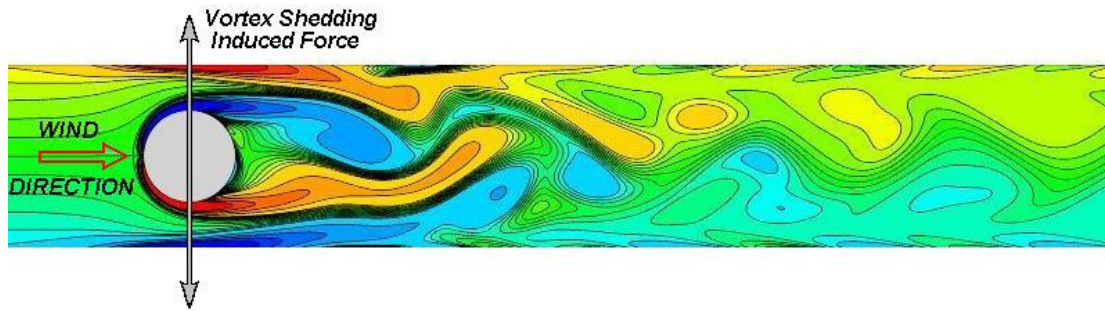


Εικόνα 4.6: Κρεμαστή γέφυρα στο Texas 1997.



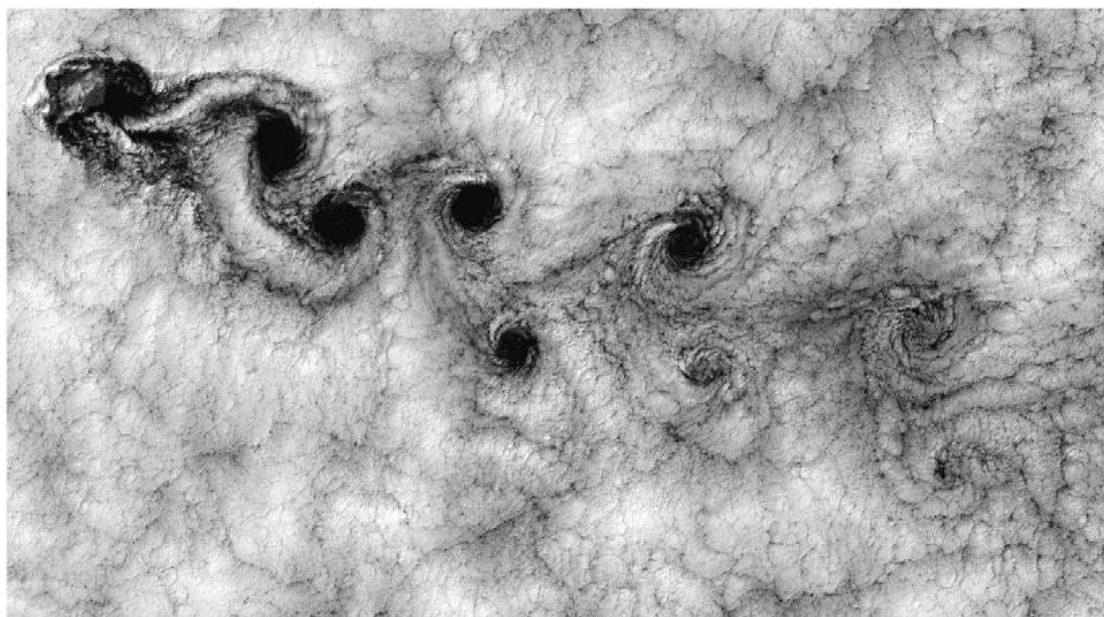
Εικόνα 4.7: Κρεμαστή γέφυρα στο Texas 1997.

Και τα δύο περιστατικά οφείλονται στο φαινόμενο **vortex shedding**. Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δημιουργούνται εναλλασσόμενα περιοχές χαμηλής πίεσης (το μπλε χρώμα στην **Εικόνα 4.8**) στην υπήνεμη πλευρά του αντικειμένου. Καθώς δημιουργούνται αυτές οι εναλλασσόμενες περιοχές χαμηλής πίεσης αναγκάζουν το αντικείμενο να κινηθεί κάθε φορά προς αυτές, κινώντας το κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου. Κάθε δοκίμιο έχει μια ταχύτητα ανέμου στην οποία εμφανίζει το φαινόμενο αυτό. Όταν ο άνεμος αποκτήσει την κρίσιμη αυτή τιμή και το δοκίμιο αρχίσει να εκτρέπεται στην κάθετη διεύθυνση από αυτή του ανέμου καταπονείται από ιδιαίτερα μεγάλες δυνάμεις. Το φαινόμενο είναι επικίνδυνο για οποιαδήποτε μεταλλική ελαφριά κατασκευή κυκλικής διατομής.



Εικόνα 4.8: Φαινόμενο Vortex Shedding.

Το φαινόμενο μπορεί ακόμα να παρατηρηθεί και σε μεγαλύτερη κλίμακα σαν μετεωρολογικό φαινόμενο. Η **Εικόνα 4.9** είναι τραβηγμένη από δορυφόρο και δείχνει το φαινόμενο να εξελίσσεται πίσω από το νησί Juan Fernandez στη Χιλή.



Εικόνα 4.9: Vortex Shedding εξελίσσεται πίσω από το νησί Juan Fernandez στη Χιλή.

Το φαινόμενο vortex shedding είναι από τις βασικότερες αιτίες αποτυχίας κατασκευών όπως η σχεδιαζόμενη εδώ. Η μέχρι τώρα εμπειρία έχει δείξει ότι αντιμετωπίζεται με διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη είναι με χρήση δυναμικών αποσβεστήρων ταλαντώσεων κατάλληλα αναρτημένων. Η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος βέβαια είναι απολύτως αντίθετη με την φιλοσοφία κατασκευής της παρούσας καμινάδας, καθώς πρέπει να είναι μια ελαφριά μεταλλική κατασκευή. Η δεύτερη και πλέον συνηθισμένη προβλέπει την περιέλιξη της εξωτερικής επιφάνειας της καμινάδας με ελικοειδές έλασμα κάθετο προς αυτή (βλ. **Εικόνα 4.10 & 4.11**).

Η μελέτη του φαινομένου και η ανάλυση των τεχνικών επίλυσης του ζητήματος για την εξεταζόμενη καμινάδα είναι εκτός των ορίων της θεματικής ενότητας της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 4.10: Ενδεικτική περιέλιξη καμινάδων.



Εικόνα 4.11: Ενδεικτική περιέλιξη καμινάδας.



Εικόνα 4.12: Καλώδια της γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου, στα οποία έχει εφαρμοστεί η λύση της περιέλιξης.

5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS APDL

5.1. Θεωρία πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.)

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της.

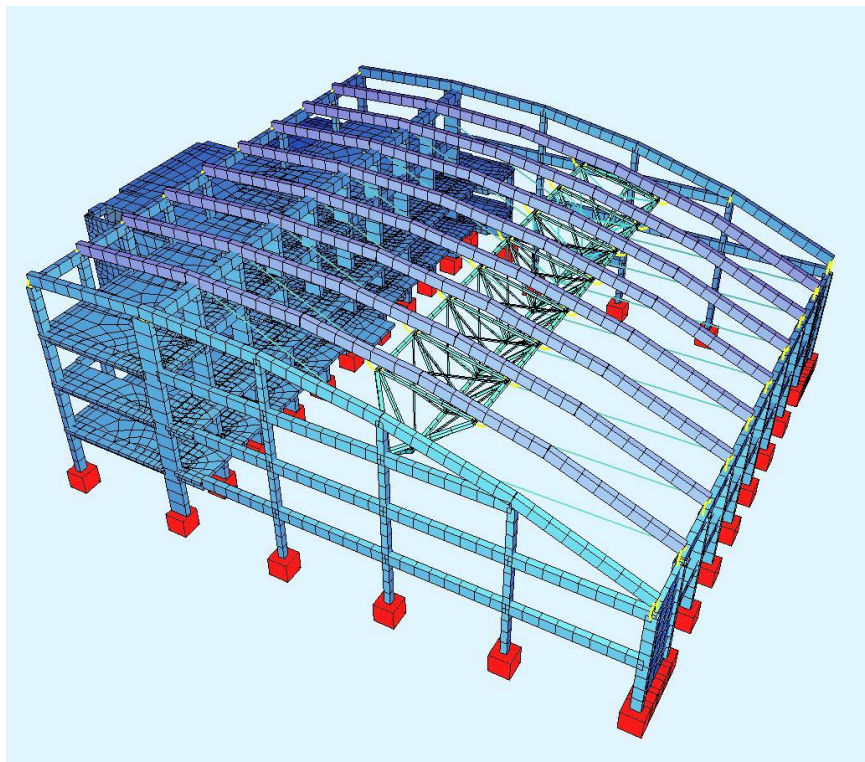
Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα 'απεικόνισης' της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα 'προσομοίωσης' της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

Το χαρακτηριστικό της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ), ή Finite Elements Method (FEM), είναι η χρήση δυσδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων (βλ. **Εικόνα 5.1**). Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή είναι των Turner, Clough, Martin, και Torp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη διατυπωθεί από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Αργύρη και των συνεργατών του την περίοδο 1954-60. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά

αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους (Προβατίδης 2000).

Το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων είναι το υπολογιστικό πλέγμα, βάση και του οποίου θα γίνει ανάλυση της ηλιακής καμινάδας του σταθμού Demo.



Εικόνα 5.1: Ενδεικτική εικόνα πλέγματος για Finite Element Analysis.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD (Computer Aided Design) και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται *pre processor*.
- Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται *solver* και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- Όταν τελειώσει η επίλυση, για τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται *post processor*, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

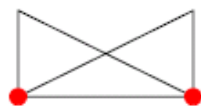
Στην παρούσα εργασία όλα τα παραπάνω βήματα θα γίνουν με χρήση του λογισμικού ANSYS.

5.2. Στοιχεία και κόμβοι στην επίλυση με τη μέθοδο των Π.Σ.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι και τάξεις στοιχείων, που έχουν δημιουργηθεί για να ικανοποιήσουν συγκεκριμένους σκοπούς και ειδικά προβλήματα (καλωδιώσεις, σωληνώσεις, δοκοί, δικτυώματα, κ.ά.).

Στοιχείο **μιας διάστασης (one-dimensional element)** χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση γραμμικών σχεδίων, όπως είναι οι δοκοί και τα ελατήρια (βλ. **Εικόνα 5.2**).

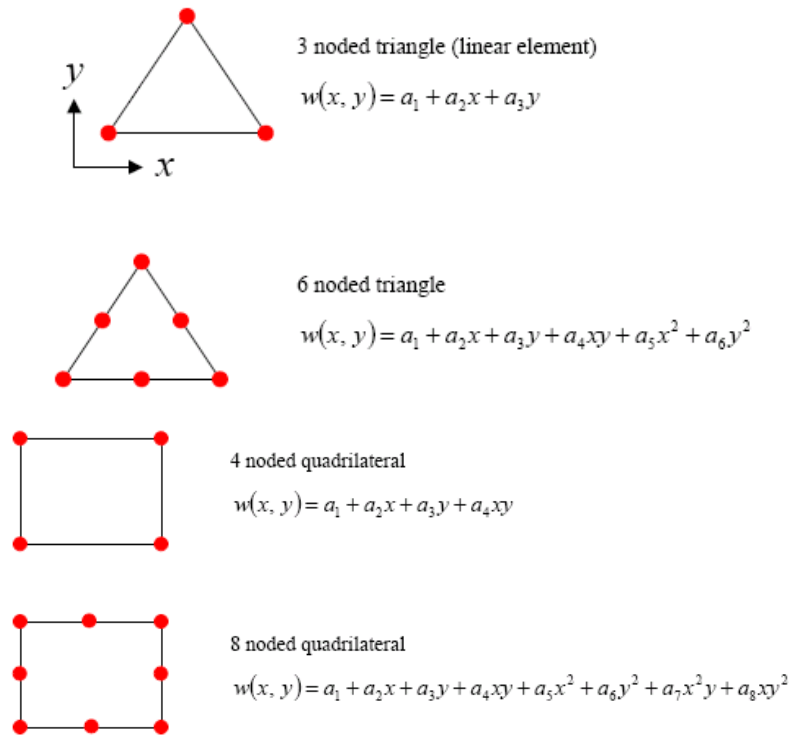
1D FEM:



$$w(x) = a_1 + a_2x \quad (\text{linear interpolation})$$

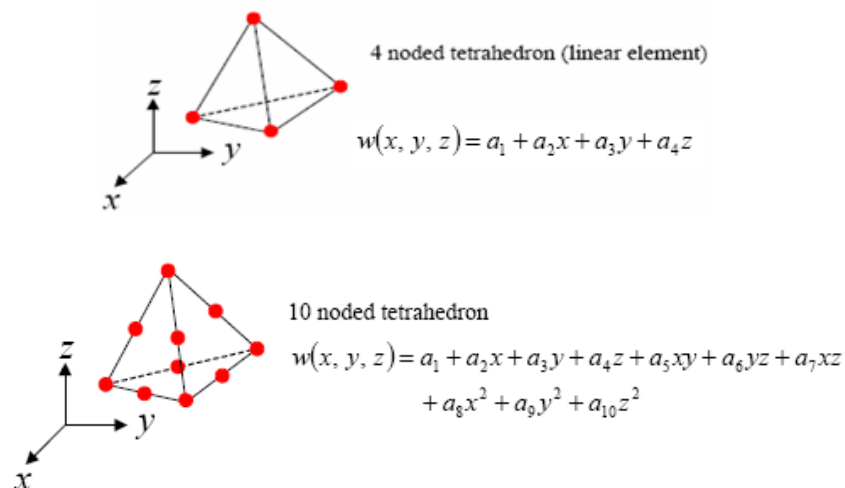
Εικόνα 5.2: One-dimensional element.

Η επιλογή **στοιχείου δύο διαστάσεων (2D element)**, αναπαριστά **τρίγωνα (triangle)** και **τετράγωνα** και συνήθως χρησιμοποιούμε το γνωστό ως τετραπλευρικό στοιχείο ή **quadrilateral element** με ενδιάμεσους κόμβους στις πλευρές του στοιχείου (βλ. **Εικόνα 5.3**).



Εικόνα 5.3: 2D elements.

Τα **στοιχεία 3 διαστάσεων (3D elements)** χρησιμοποιούνται για στερεά και είναι συνήθως σε 2 βασικά σχήματα: **ορθογώνια μάζα** ή τούβλο ή brick (hexahedrons ή “hex”) και **πυραμίδες** ή pyramids (tetrahedrons ή “tets”).(βλ. **Εικόνα 5.4**)



Εικόνα 5.4: 3D elements.

Κάθε στοιχείο απαρτίζεται από 2 ή περισσότερους **κόμβους** τα λεγόμενα “**nodes**”, οι οποίοι χρησιμεύουν στην καλύτερη μορφοποίηση και καθορισμό του σχήματος του στοιχείου, αλλά και προπάντων για τη μεταφορά των φυσικών αντιδράσεων από το ένα στοιχείο στο άλλο.

Ο επιλύτης του προγράμματος ομαδοποιεί και δουλεύει αθροιστικά με τις επιμέρους συμπεριφορές των διαφορετικών στοιχείων για να μας αποδώσει μία πρόβλεψη συνολικής συμπεριφοράς του ενιαίου φυσικού συστήματος.

5.3. Περιβάλλον ANSYS APDL

Το πρόγραμμα ANSYS της εταιρίας ANSYS Inc. με έδρα τις Η.Π.Α είναι ένας κώδικας που επιτρέπει την επίλυση μοντέλων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Χρησιμοποιείται στα περισσότερα Πανεπιστημιακά ιδρύματα της Ευρώπης και περισσότερο της Αμερικής και τις βιομηχανίες που επιλύουν αντίστοιχα προβλήματα.

Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, ένα από τα οποία είναι και το ANSYS, στην αρχική τους μορφή είχαν μόνο γραμμή εντολών όπου γινόντουσαν όλες οι ενέργειες που ήθελε ο χρήστης. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τα παραθυρικά περιβάλλοντα και έτσι δόθηκε η δυνατότητα να κατασκευάζονται μοντέλα με τη χρήση αυτών πολύ πιο απλά και εύκολα.

Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση **ANSYS 13.0**.

Το παραθυρικό περιβάλλον έχει τις εντολές σε δενδροειδή μορφή και συνεπώς είναι πολύ εύκολο να βρούμε την εντολή που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε κάθε φορά, χωρίς να απαιτείται κάποια απομνημόνευση και έτσι η μορφή αυτή είναι ιδιαίτερα βολική αλλά και με αυτόν τον τρόπο αποκτούμε μια εποπτεία και πλήρη εικόνα για τις δυνατότητες του προγράμματος.

Εργαζόμαστε λοιπόν σε **παραθυρικό περιβάλλον** και όλες οι εντολές που θα δίνουμε μέσω του δένδρου επιλογών, θα γράφονται με την μορφή της γραμμής εντολών σε ένα αρχείο απλού κειμένου και έτσι μελλοντικά υπάρχει και η δυνατότητα να αλλάξουμε κάποια στοιχεία σε αυτό και να το επανεκτελέσουμε. Το μόνο πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι αν έχουμε κάνει πολλά λάθη τα οποία τα διορθώνουμε στη συνέχεια θα προκύψει ένα πολύ μεγάλο αρχείο που ίσως θα είναι λίγο πιο δύσκολο στο να το διαχειριστούμε. Δουλεύοντας σε παραθυρικό περιβάλλον πρέπει να επιλέξουμε τον φάκελο στον οποίο εργαζόμαστε και θα γραφούν όλα τα αρχεία όπως και το όνομα της ανάλυσης που πρόκειται να κάνουμε.

5.3.1. Στάδια επίλυσης στο ANSYS APDL

Οι εργασίες που θα εκτελεστούν στο ANSYS στα πλαίσια της στατικής μελέτης της καμινάδας με Π.Σ., διαχωρίζονται σε διακριτά στάδια ως εξής:

1. Ορισμός των **μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών**.
2. Επιλογή του **είδους** των **πεπερασμένων** στοιχείων
3. **Κατασκευή** της γεωμετρίας του εξεταζόμενου δοκιμίου.
4. **Διακριτοποίηση** της **γεωμετρίας** σε πεπερασμένα στοιχεία.
5. Επιβολή των **οριακών συνθηκών** και **φορτίων**.
6. Επιλογή του **τρόπου επίλυσης** του προβλήματος (γραμμικό, μη γραμμικό, μεταβατικό, υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων) και επίλυση.
7. Ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση των **αποτελεσμάτων**.

Όλα τα προαναφερθέντα στάδια μπορούν να υλοποιηθούν με πολλές εναλλακτικές μεθοδολογίες εντός του περιβάλλοντος ANSYS, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα οποιαδήποτε από τις παραπάνω φάσεις να πραγματοποιηθεί και σε άλλο περιβάλλον και τα αποτελέσματα από αυτά να εισαχθούν έπειτα στο ANSYS.

5.3.2. Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι μονοσήμαντα ορισμένες, αλλά πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τις μονάδες. Όλες οι μονάδες είναι στο SI εκτός αν θέλουμε να τις ορίσουμε εμείς διαφορετικά, αν και θα προτιμήσουμε να μην γίνει αλλαγή μονάδων για την αποφυγή σημαντικού κινδύνου λάθους. Οι ιδιότητες που θα πρέπει να οριστούν εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα των υλικών αλλά και από το είδος της επίλυσης που επιζητείται.

5.3.3. Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων

Η επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από την επίλυση που θα κάνουμε, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής τους στη συνέχεια. Το σημαντικό είναι να έχουμε καταλήξει στη διάστασή τους και στο είδος της καταπόνησης.

5.3.4. Κατασκευή γεωμετρίας μοντέλου

Η κατασκευή της γεωμετρίας μέσα στο περιβάλλον του ANSYS μπορεί να γίνει, γενικά, με δύο τρόπους:

1. Ο πρώτος τρόπος είναι να δημιουργηθούν διαδοχικά σημεία (keypoints), γραμμές (lines), επιφάνειες (areas) και τέλος όγκοι (volumes).

2. Ο δεύτερος τρόπος είναι να κατασκευαστούν όγκοι ή επιφάνειες είτε από σημεία, χωρίς τη δημιουργία γραμμών, είτε απευθείας ορίζοντας τις διαστάσεις τους.

Ο δεύτερος τρόπος αποδεικνύεται πιο εύχρηστος στις περιπτώσεις που θέλουμε να κατασκευάσουμε απλά γνωστά γεωμετρικά σχήματα, όπως κύκλους, κυλίνδρους, ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.ά., ενώ με ορισμό των διαστάσεων σαν μεταβλητές μπορούμε μετά την επίλυση να κάνουμε παραμετρική ανάλυση.

5.3.5. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία

Αφού έχει γίνει νωρίτερα η επιλογή του στοιχείου μένει να γίνει η **διακριτοποίηση της γεωμετρίας** σε αυτά τα στοιχεία. Η πιο απλή δυνατότητα είναι να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές είναι:

- αυτόματη δημιουργία πλέγματος, που γενικά δεν προτείνεται στις περισσότερες περιπτώσεις,
- ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές ή
- ορισμός μεγέθους στοιχείων (μέγιστο μέγεθος πλευράς ή ακμής) καθώς και
- η επιλογή του *Smart Size* η οποία κάνει προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία, δηλαδή μικραίνει τα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και το αραιώνει στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερα ανάγκη για λεπτή διαμέριση.

Αφού καταλήξουμε σε μία από τις παραπάνω επιλογές ακολουθεί η **δημιουργία του πλέγματος**. Γενικά οι δυνατότητες του προγράμματος είναι πάρα πολλές και μπορούν να δώσουν πάρα πολλά και πολύ διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα ανάλογα με τις παραμέτρους που θα ορίσουμε, το πρόγραμμα όμως δεν μπορεί να γνωρίζει τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε, την ακρίβεια ή και το χρόνο επίλυσης που επιθυμούμε, άρα πρέπει σίγουρα να επέμβουμε στις προεπιλογές που μας παρέχει.

Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα να μην οριστούν γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου στο περιβάλλον του ANSYS και στη συνέχεια να γίνει η διακριτοποίηση, αλλά να κατασκευαστούν απευθείας κόμβοι και πεπερασμένα στοιχεία ή να εισαχθούν αφού έχουν υπολογιστεί με κάποιο άλλο προεπεξεργαστή, κάτι το οποίο συνιστά παράκαμψη του 1ου Σταδίου.

Σημειώνουμε ότι δεν μπορούμε να κάνουμε *delete* σε γεωμετρικές οντότητες οι οποίες έχουν πλέγμα καθώς επίσης και σε μεμονωμένα πεπερασμένα στοιχεία ή κόμβους που έχουν κατασκευαστεί με τις εντολές του *mesh*.

5.3.6. Επιβολή των οριακών συνθηκών και φορτίων

Η **επιβολή των οριακών συνθηκών** μπορεί να γίνει πάλι με πολλούς τρόπους και οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στα σημεία όπου μπορούν αυτές να επιβληθούν. Έτσι μπορούν να επιβληθούν είτε σε:

- γεωμετρικά στοιχεία (σημεία, γραμμές, επιφάνειες), είτε σε
- στοιχεία του πλέγματος (κόμβους, στοιχεία).

Όταν επιβάλλονται σε γεωμετρικά στοιχεία γίνεται αυτόματα η μεταφορά τους σε στοιχεία του πλέγματος πριν από την επίλυση.

Οι οριακές συνθήκες ορίζονται μέσα από τη σειρά εντολών *Define Loads* όπου έχουμε την πρώτη εντολή *Settings* η οποία αφορά τον ορισμό θερμοκρασίας σε προβλήματα μετάδοσης θερμότητας ή προβλήματα όπου έχουμε συστολές ή διαστολές. Η δεύτερη είναι και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εντολή *Apply* → *Structural* με την οποία ορίζουμε περιορισμούς μετατοπίσεων *Displacement*, εφαρμογή δυνάμεων/ροπών *-Force/Moment*, πιέσεων *- Pressure* και εφαρμογή θερμοκρασιακής διαφοράς *-Temperature*. Η επιλογή *Displacement* μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις γεωμετρικές οντότητες αλλά και σε κόμβους. Η επιλογή *Force/Moment* εφαρμόζεται είτε σε σημεία είτε σε κόμβους, δηλαδή σε στοιχεία του πλέγματος. Η *Pressure* εφαρμόζεται τόσο σε επιφάνειες όσο και σε πεπερασμένα στοιχεία .

5.3.7. Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος και επίλυση

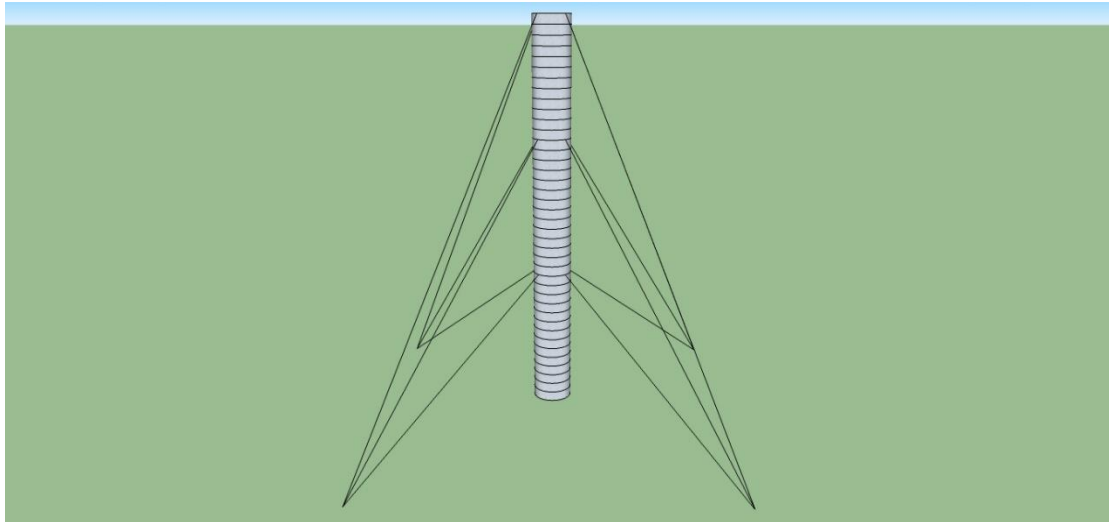
Η επιλογή του τρόπου επίλυσης έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του προβλήματος και μπορεί να διακριθεί σε γραμμικό, μη γραμμικό, μεταβατικό, ακόμα να' ναι υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων και άλλα.

Οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τον τρόπο επίλυσης όμως είναι το υπολογιστικό κόστος και η ακρίβεια που επιθυμούμε για το αποτέλεσμά μας. Το υπολογιστικό κόστος είναι συνήθως αυτό που μας καθοδηγεί καθώς σχετίζεται άμεσα με το “μηχάνημα” που έχουμε στη διάθεση μας.

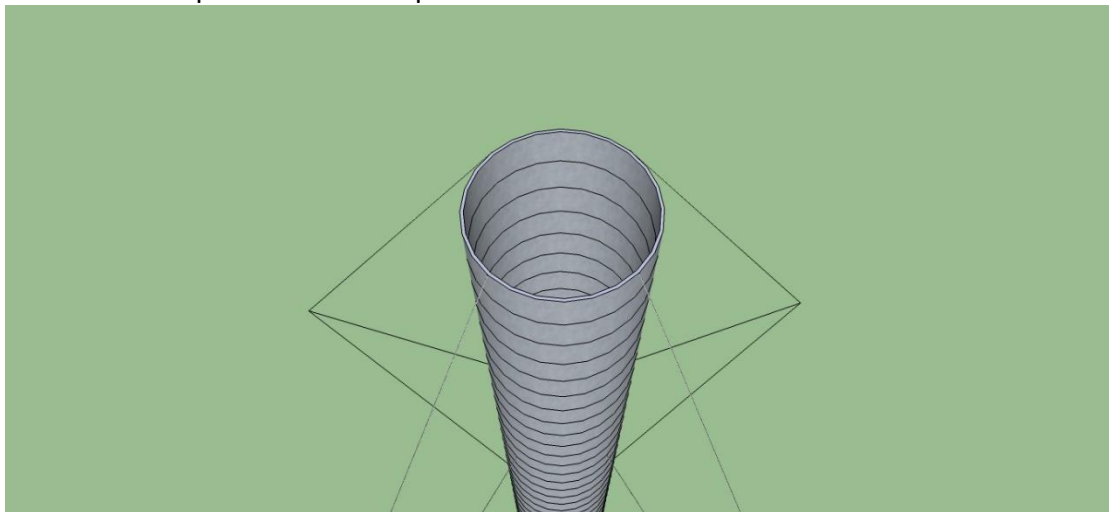
5.4. Περιγραφή προβλήματος

Το παρόν πρόβλημα αποτελεί τη στατική ανάλυση ηλιακής καμινάδας σταθμού ηλεκτροπαραγωγής για δυνάμεις ασκούμενες από άνεμο. Το σχέδιο της καμινάδας έχει γίνει από τον αρχιτέκτονα Δημήτριο Κορρέ.

Στις **Εικόνες 5.5&5.6** παρουσιάζεται το σχέδιο της καμινάδας του Demo σταθμού (ο οποίος αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3), αποκομμένη από τον υπόλοιπο σταθμό.



Εικόνα 5.5: Καμινάδα του σταθμού Demo.

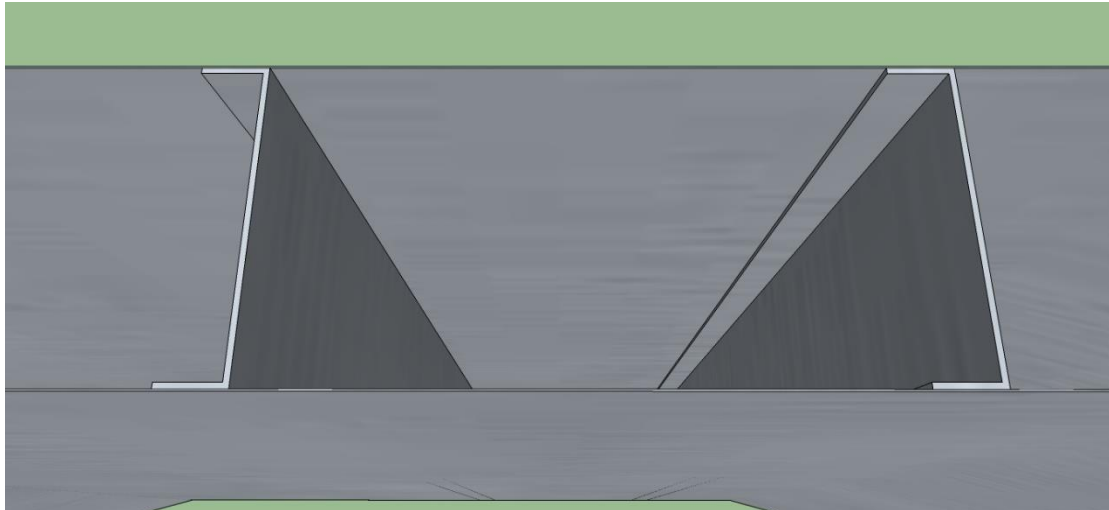


Εικόνα 5.6: Καμινάδα του σταθμού Demo.

Τεχνικά χαρακτηριστικά καμινάδας:

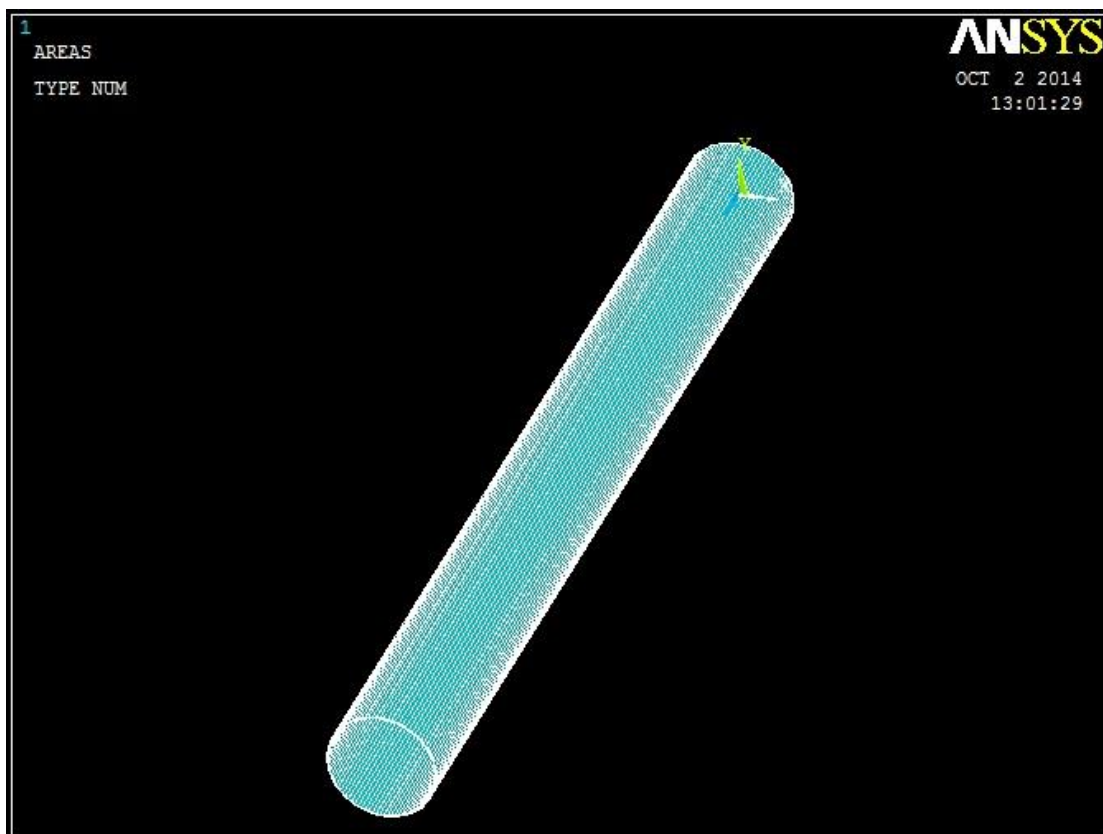
- Υλικό: Χάλυβας
- Εσωτερική διάμετρος: 6m
- Εξωτερική διάμετρος: 6,2m
- Ύψος: 60m

Η καμινάδα αποτελείται από κάθετα σίδερα στήριξης σχήματος 'π', πάχους 2mm, τοποθετημένα ανά 4 μοίρες, τα οποία "τρέχουν" καθ' ύψος της καμινάδας (όπως φαίνονται στο επόμενο σχήμα), και είναι "ντυμένα" εσωτερικά και εξωτερικά από φύλλο χάλυβα (λαμαρίνα) πάχους 0,6mm. Η καμινάδα στηρίζεται από αντηρίδες (συρματόσχοινα διαμέτρου 16mm). Οι αντηρίδες είναι 12 συνολικά τοποθετημένες ανά 90 μοίρες σε τρία διαφορετικά ύψη, τα οποία είναι 15, 40 και 55 μέτρα. Στο έδαφος οι αντηρίδες στηρίζονται σε απόσταση 50 μέτρων από το κέντρο της καμινάδας, καθώς το θερμοκήπιο είναι τετραγωνικό με πλευρά 80 μέτρα.



Εικόνα 5.7: Η δομή “σάντουιτς” της καμινάδας.

Με τα παραπάνω χαρακτηριστικά κατασκευάστηκε το μοντέλο προς μελέτη στο ANSYS APDL (βλ. **Εικόνα 5.8**), προκειμένου να γίνει η στατική ανάλυση.



Εικόνα 5.8: Αρχική μορφή μοντέλου καμινάδας στο ANSYS.

6. ANSYS APDL

6.1 Κατασκευή του μοντέλου στο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Ansys

Όπως έχω ήδη αναφέρει, ο σχεδιασμός της καμινάδας που θα αναλυθεί έγινε από τον αρχιτέκτονα Δ. Κορρέ. Ο ίδιος είχε σχεδιάσει και την ύψους 30 μέτρων μεταλλική καμινάδα η οποία χρησιμοποιήθηκε στο σταθμό των Κομποτάδων. Η πρώτη αυτή μεταλλική καμινάδα κατασκευάστηκε από κοινά μεταλλικά στοιχεία άμεσα διαθέσιμα στο εμπόριο. Χρησιμοποιήθηκε ένα επαναλαμβανόμενο τυπικό μεταλλικό πλαίσιο και είχε 4 αντηρίδες περιμετρικά στην κορυφή της. Η εμπειρία που αποκτήθηκε από την κατασκευή και την λειτουργία αυτής της καμινάδας χρησιμοποιήθηκε και ενσωματώθηκε στον σχεδιασμό της παρούσας μεγαλύτερης. Στόχος και σ' αυτό το σχέδιο η εξοικονόμηση υλικών και πόρων γενικότερα καθώς και η ευκολία κατασκευής.

Στη μελετούμενη καμινάδα το ύψος είναι διπλάσιο από την αρχική και φτάνει τα 60 μέτρα ενώ η εσωτερική διάμετρος έχει καθορισθεί στα 6 μέτρα. Η καμινάδα θα αποτελείται από δακτύλιους τους ενός μέτρου, οι οποίοι θα βιδώνονται κάθε φορά πάνω στον προηγούμενο.

Το βασικό μεταλλικό στοιχείο που χρησιμοποιείται, δηλαδή οι δοκίδες σχήματος Π, δεν είναι άμεσα διαθέσιμες στο εμπόριο, όμως μπορούν να παραγγελθούν και να κατασκευαστούν εύκολα. Τα μεταλλικά ελάσματα που περιβάλλουν τις δοκίδες είναι άμεσα διαθέσιμα σε ρολά πλάτους ενός μέτρου, που θα είναι και το ύψος του κάθε επαναλαμβανόμενου δακτυλίου. Τα συρματόσχοινα που μελετήθηκαν για τις αντηρίδες με 16mm διάμετρο είναι επίσης άμεσα διαθέσιμα στο εμπόριο.

Με δεδομένο ότι ο πειραματικός σταθμός προορίζεται να στηθεί στην Ελλάδα θα μελετηθεί η αντοχή και η συμπεριφορά της μεταλλικής καμινάδας σε διάφορες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων και των ακραίων για τον Ελληνικό χώρο.

Στο λογισμικό ANSYS APDL είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποτυπωθεί το ακριβές σχέδιο του μοντέλου. Γι' αυτό το λόγο έγινε μια προσομοίωση του σχεδίου της καμινάδας προκειμένου να γίνει η ανάλυσή της. Ακολουθώντας τις σχεδιαστικές οδηγίες που μου δόθηκαν προχώρησα στην κατασκευή του μοντέλου.

6.1.1. Ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών

Ακολουθώντας τις επιταγές του σχεδίου, για την κατασκευή της επιλέχθηκε χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E_X=210E9$ και λόγο Poisson $\nu=0.35$.

Ο **χάλυβας** (κοινώς ατσάλι) είναι κράμα σιδήρου–άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.

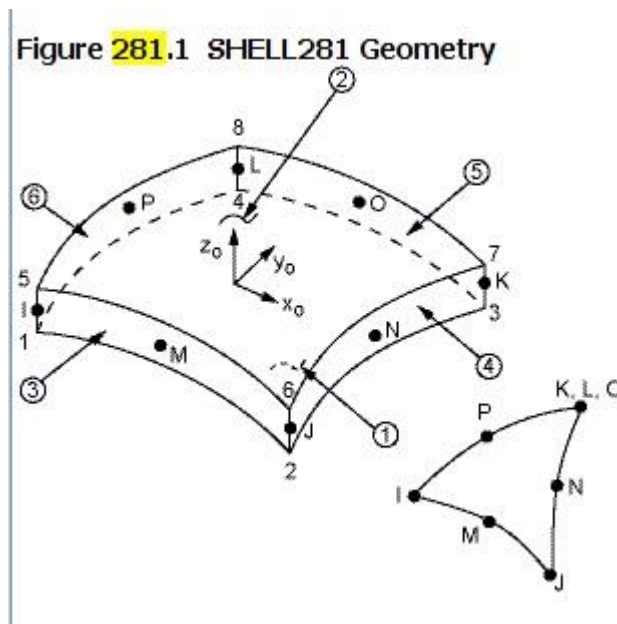
Έτσι όπως και στην πλειοψηφία των μεταλλικών ελαφριών κατασκευών το υλικό που επιλέχθηκε για την κατασκευή της καμινάδας είναι χάλυβας.

6.1.2. Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων

Για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία από τη βιβλιοθήκη του ANSYS.

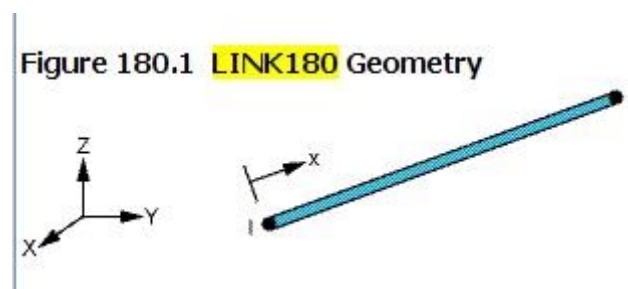
Ένα είναι το πεπερασμένο στοιχείο Shell 281, το οποίο είναι κατάλληλο για την ανάλυση μικρού και μεγάλου πάχους κατασκευές με κελύφη. Στην τετραγωνική του μορφή, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, έχει 8 κόμβους με 6 βαθμούς ελευθερίας στον καθένα από αυτούς, μετατοπίσεις και περιστροφές στους x, y και z άξονες (βλ. **Εικόνα 6.1**).

Το στοιχείο Shell 281 χρησιμοποιήθηκε για την εσωτερική επιφάνεια της καμινάδας, την εξωτερική, αλλά και για τα κάθετα σίδερα στήριξης ανάμεσα από τις 2 επιφάνειες.



Εικόνα 6.1: Πεπερασμένο στοιχείο Shell 281.

Το δεύτερο πεπερασμένο στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Link 180, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη ποικιλία μηχανολογικών εφαρμογών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση δικτυωμάτων, αιωρούμενων καλωδίων, συνδέσμων, ελατηρίων κτλ.. Είναι ένα μονοαξονικό στοιχείο εφελκυσμού, με 3 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (βλ. **Εικόνα 6.2**). Δεν υφίσταται λυγισμό, ωστόσο έχει τη δυνατότητα πλαστικότητας και περιστροφής.

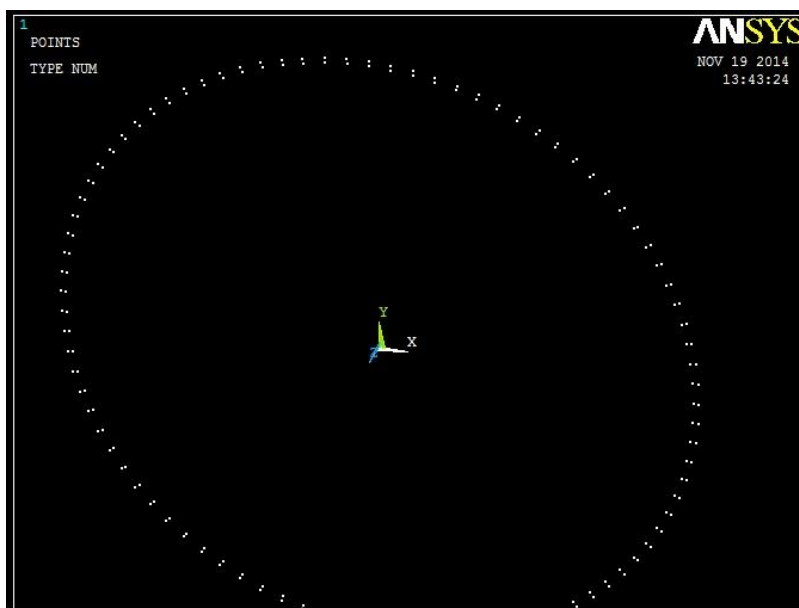


Εικόνα 6.2: Πεπερασμένο στοιχείο Link 180.

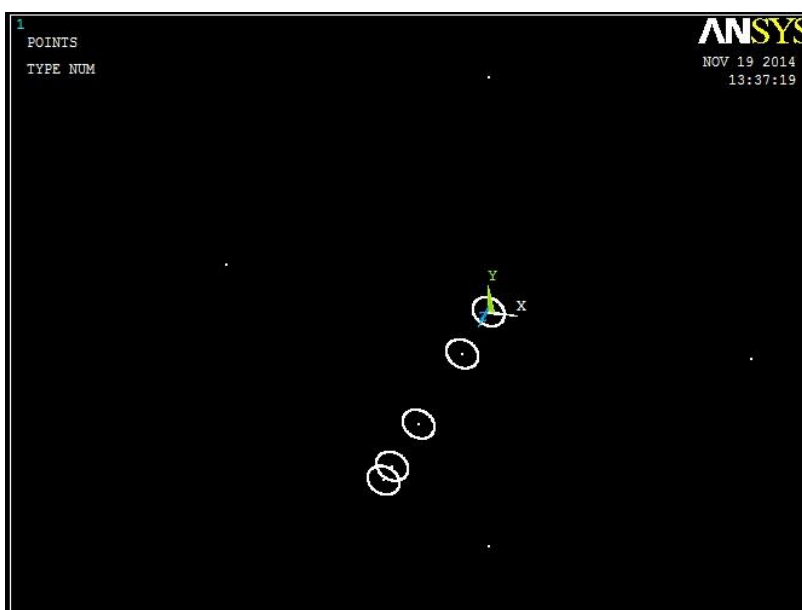
6.1.3. Κατασκευή της γεωμετρίας

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.3.4. είναι δύο οι τρόποι κατασκευής της γεωμετρίας. Στην παρούσα εργάστηκα με τον πρώτο.

Τα κάθετα σίδερα στήριξης που 'τρέχουν' καθ' ύψος της καμινάδας, ανάμεσα από την εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια είναι κατανεμημένα ανά 4 μοίρες. Πρώτα λοιπόν σχεδιάστηκαν τα keypoints που ορίζουν τη θέση αυτών των σιδερων στη βάση της καμινάδας (βλ. **Εικόνα 6.3**), σε κάθε ύψος που υπάρχει αντηρίδα, στο τελικό ύψος της καμινάδας και στη βάση των αντηρίδων (βλ. **Εικόνα 6.4**).

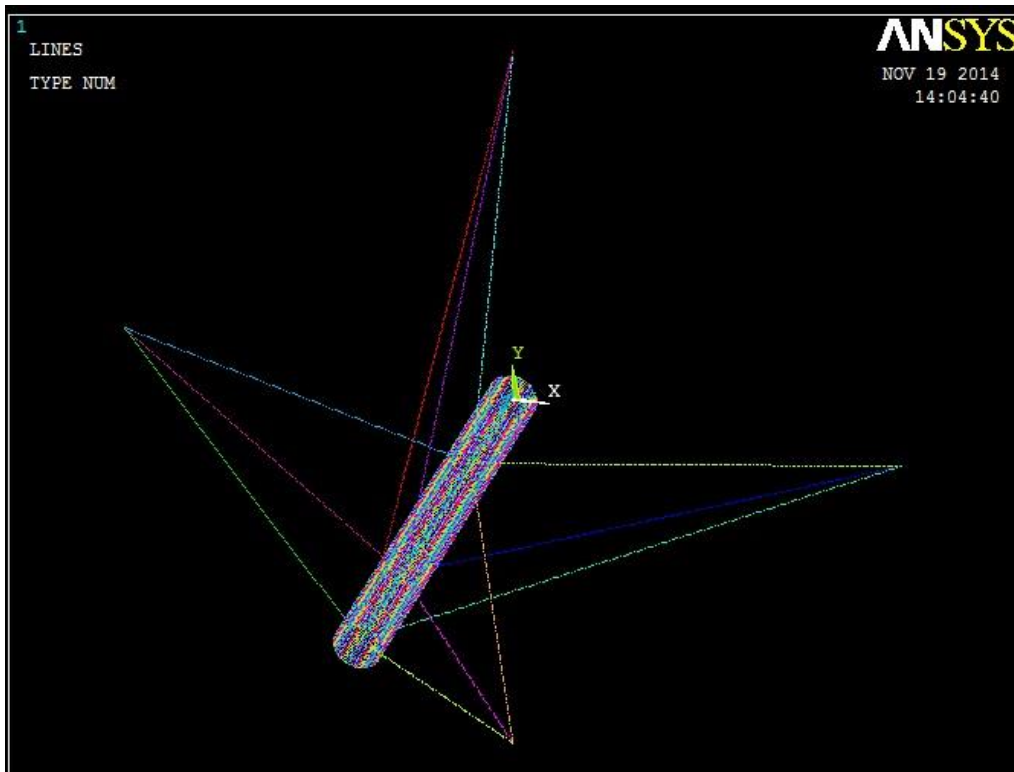


Εικόνα 6.3: Keypoints στη βάση της καμινάδας.



Εικόνα 6.4: Keypoints σε κάθε ύψος που υπάρχει αντηρίδα, στο τελικό ύψος της καμινάδας και στη βάση των αντηρίδων.

Στη συνέχεια ένωση με τόξα (arcs) αυτά τα keypoints για να δημιουργηθούν έτσι ο εσωτερικός και εξωτερικός δακτύλιος. Με lines ένωση το κάθε ζεύγος keypoints για να σχηματιστούν οι κάθετες στηρίξεις και τέλος έκανα extrude τα τόξα μέχρι το ύψος της πρώτης αντηρίδας. Επανάλαβα αυτή τη διαδικασία τέσσερις φορές για τις θέσεις όλων των αντηρίδων και μέχρι το τελικό ύψος της καμινάδας.



Εικόνα 6.5: Το μοντέλο της καμινάδας σε μορφή γραμμών (lines).

6.1.4. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία

Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας έγινε με βάση το υπολογιστικό κόστος και την ακρίβεια του μοντέλου, όπως και για τον ίδιο λόγο επιλέχθηκαν τα πεπερασμένα στοιχεία με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Shell 281, έχουν πάχος 0,6mm και στην επιλογή Section offset: Mid-Plane.

Τα κάθετα σίδερα στήριξης για τα οποία επίσης χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Shell 281, έχουν πάχος 2mm και στην επιλογή Section offset: Mid-Plane.

Οι αντηρίδες, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Link 180, έχουν διάμετρο 16mm.

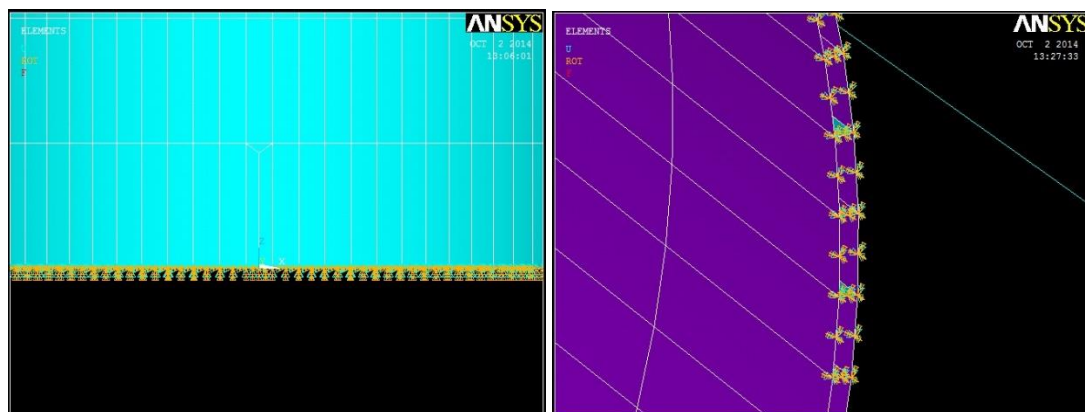
Για τη διακριτοποίηση των τριών μερών της καμινάδας και των αντηρίδων, επιλέχθηκε Size Element edge length 0,5, για να πετύχουμε μια μέση πυκνότητα πλέγματος, η οποία δεν παρουσίασε κανένα πρόβλημα.

Για να γίνει η σύνδεση της καμινάδας με τις αντηρίδες χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία επαφής (contact elements), τα οποία δημιουργήθηκαν αυτόματα από το λογισμικό όσον αφορά το μέγεθος και το είδος τους.

6.1.5. Επιβολή των οριακών συνθηκών και του φορτίου

Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν είναι οι εξής:

- Η βάση της καμινάδας είναι πακτωμένη (βλ. **Εικόνες 6.6 & 6.7**), δεν έχει δηλαδή κανένα βαθμό ελευθερίας (ALL DOF=0).



Εικόνες 6.6 & 6.7: Πάκτωση της καμινάδας στη βάση της.

- Οι βάσεις των αντηρίδων στο έδαφος είναι πακτωμένες, δεν έχουν κανένα βαθμό ελευθερίας (ALL DOF=0).
- Το φορτίο-πίεση εφαρμόστηκε στην εξωτερική επιφάνεια (on areas), σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο και το λογισμικό το πέρασε στους κόμβους.

6.2. Επίλυση του μοντέλου, ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων (Finite Element Analysis - FEA)

Η μεταλλική καμινάδα του πειραματικού σταθμού Demo προσομοιώθηκε για όλα τα καιρικά φαινόμενα που για τα δεδομένα της Ελλάδας θεωρούνται ακραία.

Το μοντέλο εξετάστηκε για δυνάμεις ασκούμενες από ανέμους 7, 8, 9 και 10 μποφόρ.

Στην περίπτωση της καμινάδας το μοντέλο είναι μη γραμμικό (non linear). Γι' αυτό το λόγο και για χάρη υπολογιστικού κόστους αλλά και ευκολίας, χωρίς βέβαια να χαθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε η Eigen Buckling Analysis.

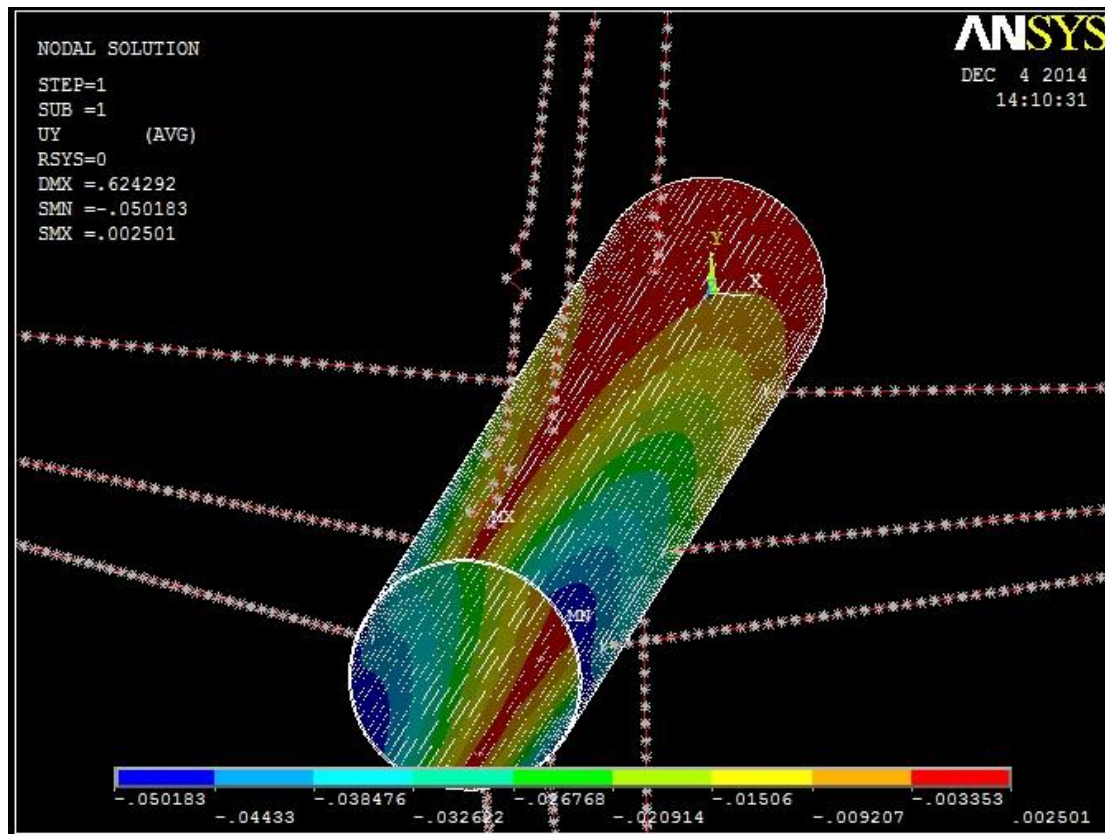
Για τις διαφορετικές περιπτώσεις ανέμου, στο μοντέλο κάθε φορά έγινε μια στατική ανάλυση και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η Eigen Buckling ανάλυση με τις εξής ρυθμίσεις: 1) Number of modes to extract =5. 2) Shift point for eigenvalue =1.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

6.2.1. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 7 μποφόρ

Στην **Εικόνα 6.8** βλέπουμε τη μετατόπιση-παραμόρφωση στον άξονα των Y.

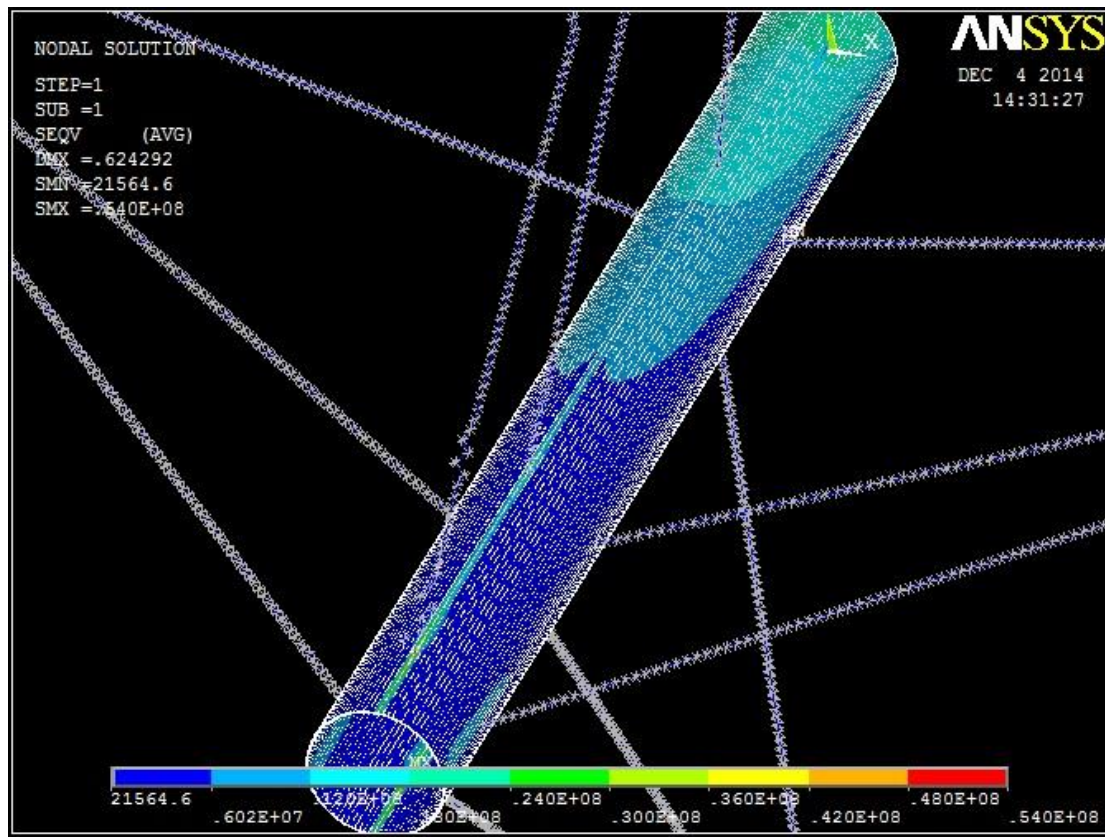
Η διεύθυνση του ανέμου είναι στον άξονα των Y (από πάνω προς τα κάτω όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.8**). Παρατηρούμε ότι η μετατόπιση είναι συμμετρική ως προς τον άξονα των Y (τη διεύθυνση του ανέμου δηλαδή) και ότι στην περιοχή των αντηρίδων είναι σχεδόν μηδενική (κόκκινες περιοχές). Ότι μετατόπιση-παραμόρφωση υπάρχει, οφείλεται στην πίεση επιφανείας. Η μέγιστη μετατόπιση που παρατηρείται είναι της τάξεως των 5cm στο υψηλότερο σημείο της καμινάδας (σκούρες μπλε περιοχές).



Εικόνα 6.8: DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 7 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε m).

Στην **Εικόνα 6.9** παρατηρούμε ότι υπάρχει αρκετά μεγάλη συγκέντρωση τάσεων στη βάση της καμινάδας και στις αντηρίδες (γαλάζιες περιοχές). Λόγω του ότι η μετατόπιση είναι πολύ μικρή όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι πολύ λογικό να αναπτύσσονται τάσεις.

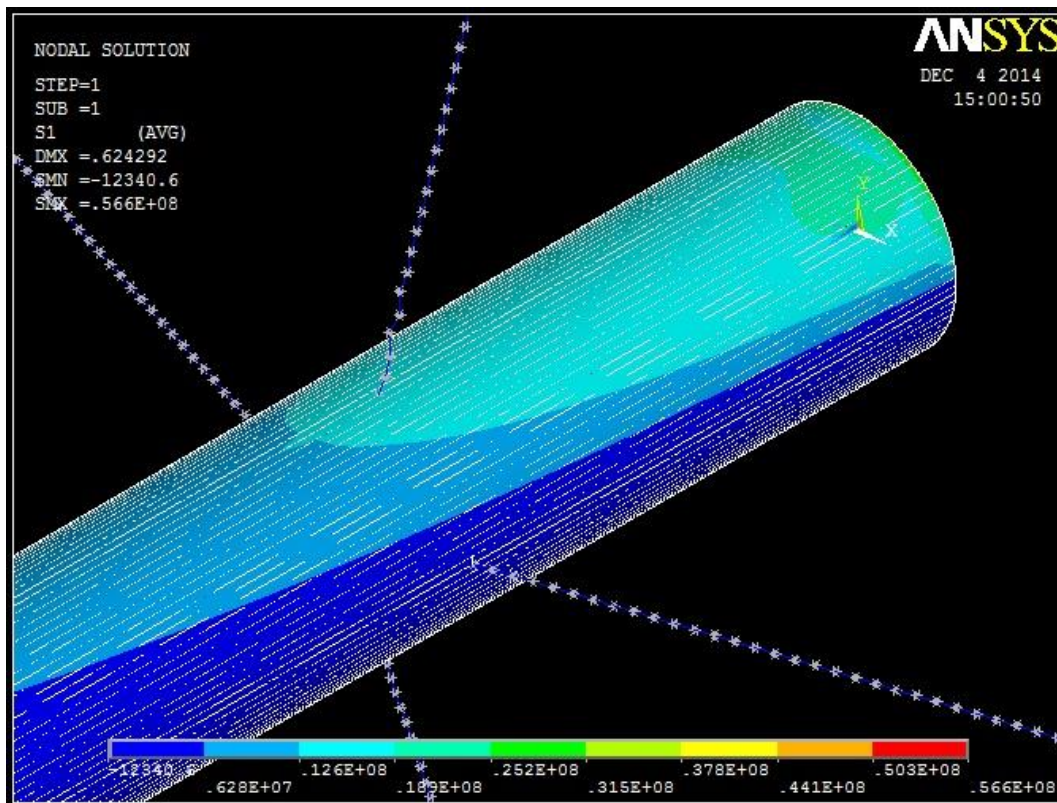
Από τα σημεία που αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τάσεις αντιλαμβανόμαστε πως η καμινάδα κάμπτεται στην κατεύθυνση του ανέμου. Με αποτέλεσμα στη βάση της, τα στοιχεία από τη μια μεριά να θλίβονται και από την άλλη να εφελκύνονται. Αυτό αποδεικνύεται από τις επόμενες εικόνες που δείχνουν τις τάσεις σ1 και σ3 σε διαφορετικά σημεία του μοντέλου.



Εικόνα 6.9: Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 7 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Παρατηρούμε ότι στην προσήνεμη πλευρά του μοντέλου αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις (γαλάζιες περιοχές), ενώ στην υπήνεμη μηδενίζονται (σκούρες μπλε περιοχές). Στην προσήνεμη πλευρά δηλαδή το μοντέλο εφελκύεται, ενώ στην υπήνεμη θλίβεται.

Στην **Εικόνα 6.10** φαίνονται οι εφελκυστικές τάσεις (σ_1) στη βάση της καμινάδας από την προσήνεμη πλευρά.

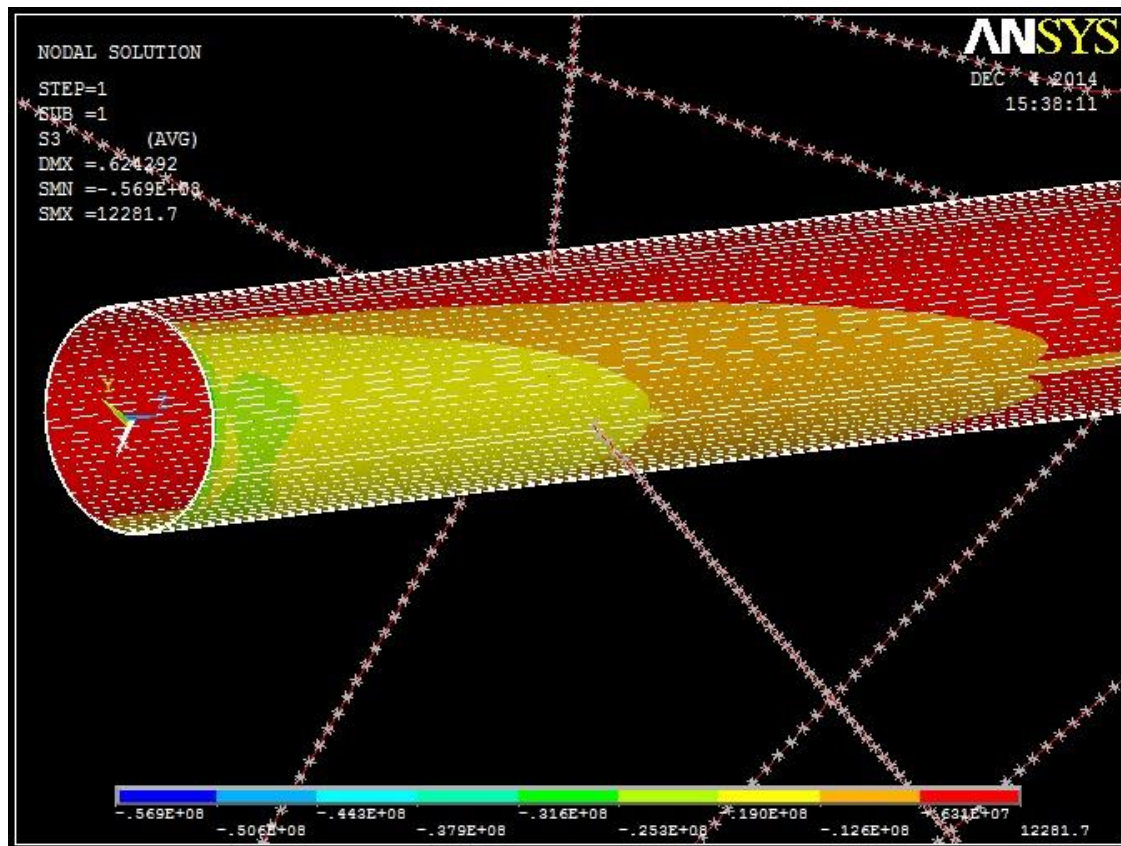


Εικόνα 6.10: Τάσεις σ_1 για ένταση ανέμου 7 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Η UTS (Ultimate Tensile Strength, μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό), είναι 400-550MPa. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στη βάση της καμινάδας που είναι και οι μεγαλύτερες είναι της τάξεως των 15MPa.

Στην **Εικόνα 6.11** φαίνονται οι θλιπτικές τάσεις (σ_3) που αναπτύσσονται στη βάση της καμινάδας από την υπήνεμη πλευρά.

Αντίστοιχα εδώ παρατηρούμε ότι στην υπήνεμη πλευρά του μοντέλου αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις (κίτρινες-πορτοκαλί περιοχές), ενώ στην προσήνεμη μηδενίζονται (κόκκινες περιοχές).

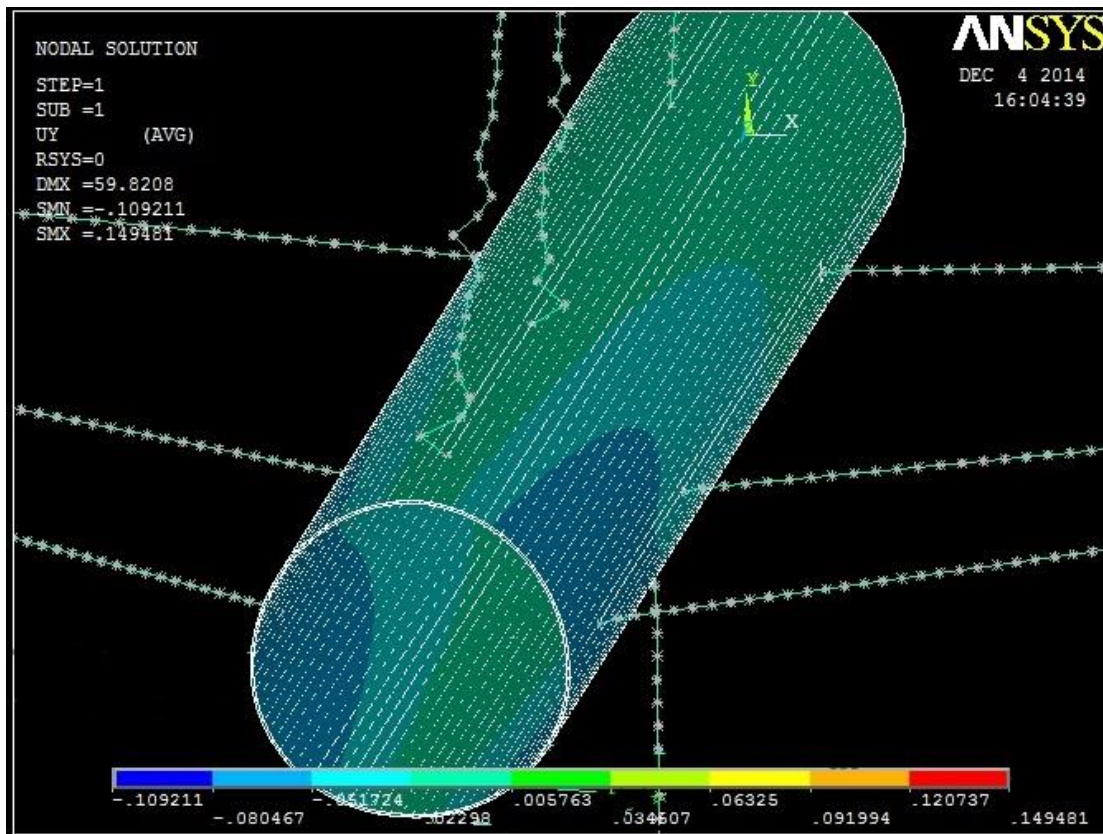


Εικόνα 6.11: Τάσεις σ_3 για ένταση ανέμου 7 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

6.2.2. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 8 μποφόρ

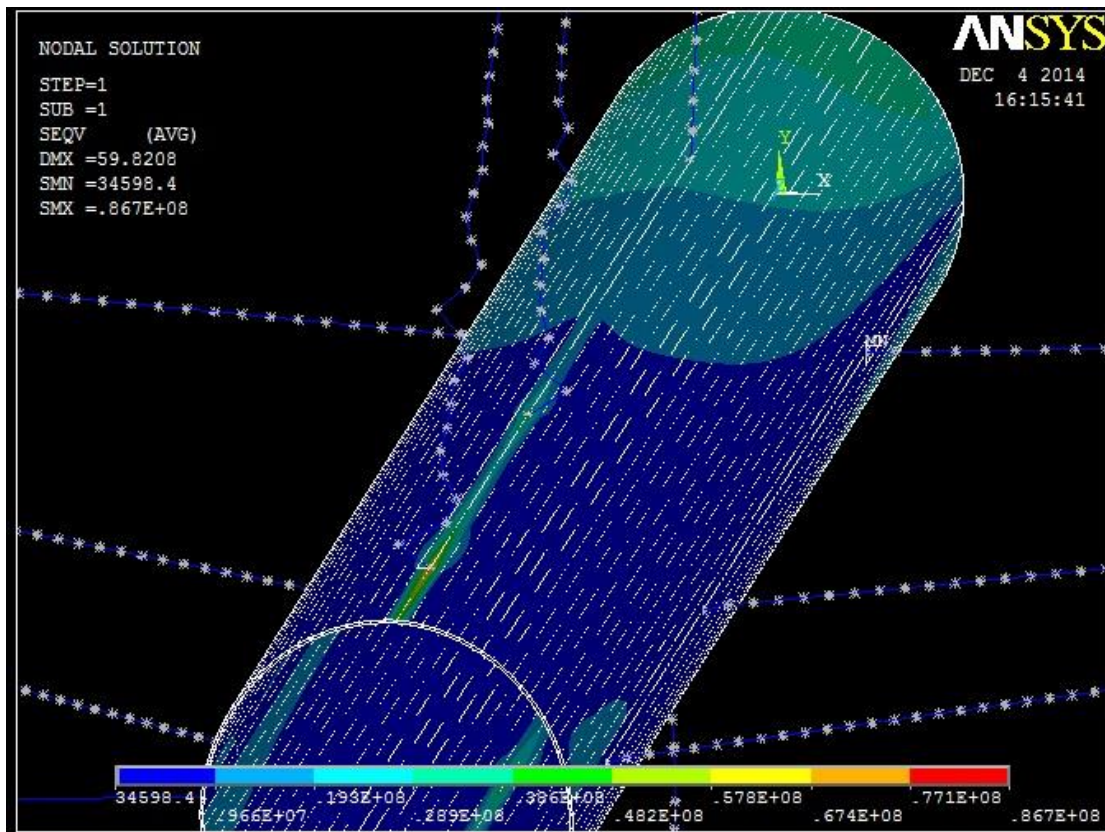
Στην **Εικόνα 6.12** βλέπουμε τη μετατόπιση-παραμόρφωση στον άξονα των Y.

Η διεύθυνση του ανέμου είναι στον άξονα των Y (από πάνω προς τα κάτω όπως φαίνεται στην εικόνα). Παρατηρούμε και εδώ πως η μετατόπιση είναι συμμετρική ως προς τον άξονα των Y. Ότι μετατόπιση-παραμόρφωση υπάρχει, οφείλεται στην πίεση επιφανείας. Η μέγιστη μετατόπιση που παρατηρείται είναι περίπου 9cm στο υψηλότερο σημείο της καμινάδας (μπλε περιοχές).



Εικόνα 6.12: DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 8 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε m).

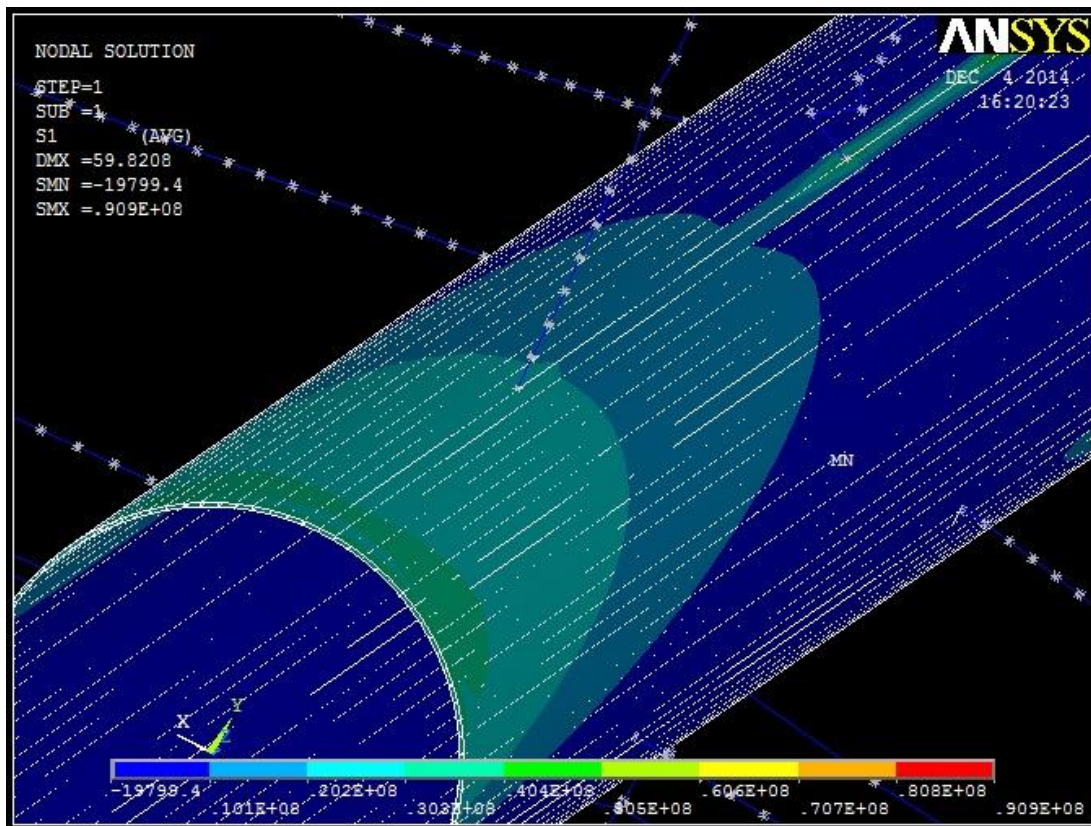
Στην **Εικόνα 6.13** παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises και παρατηρούμε ότι η κατανομή των τάσεων είναι παρόμοια με εκείνη του μοντέλου των 7 μποφόρ. Και εδώ η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων βρίσκεται στη βάση της καμινάδας και στα σημεία που είναι συνδεδεμένες οι αντηρίδες πάνω στην καμινάδα.



Εικόνα 6.13: Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 8 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Παρατηρούμε και εδώ ότι στην προσήνεμη πλευρά του μοντέλου αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις (γαλάζιες περιοχές), ενώ στην υπήνεμη μηδενίζονται (σκούρες μπλε περιοχές).

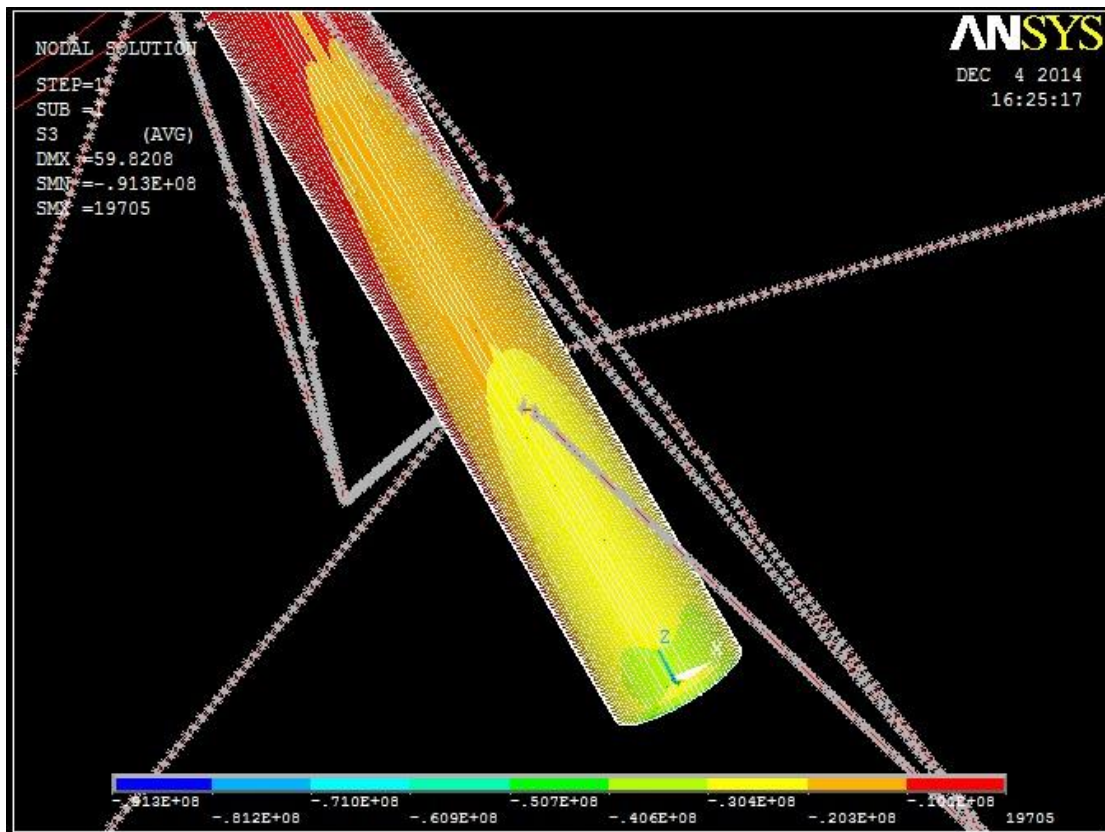
Στην **Εικόνα 6.14** φαίνονται οι εφελκυστικές τάσεις (σ_1) στη βάση της καμινάδας από την προσήνεμη πλευρά.



Εικόνα 6.14: Τάσεις σ_1 για ένταση ανέμου 8 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στη βάση της καμινάδας τώρα είναι της τάξεως των 30-40MPa, αρκετά μικρότερες δηλαδή από την UTS.

Στην **Εικόνα 6.15** φαίνονται οι θλιπτικές τάσεις (σ_3) που αναπτύσσονται στη βάση της καμινάδας από την υπήνεμη πλευρά.



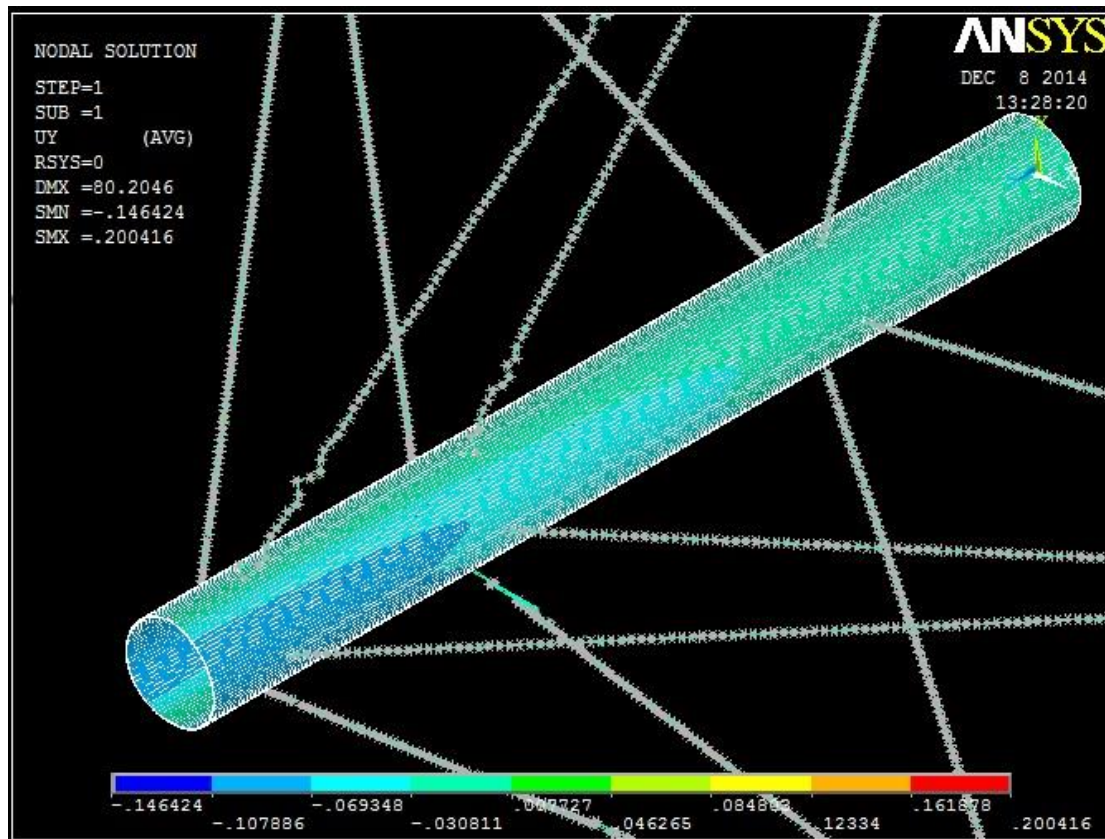
Εικόνα 6.15: Τάσεις σ_3 για ένταση ανέμου 8 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι παρεμφερή με τα προηγούμενα και οι τάσεις πιο έντονες ειδικά στα σημεία που ενώνονται οι αντηρίδες με την καμινάδα, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στην εικόνα με τις τάσεις Von Mises.

6.2.3. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 9 μποφόρ

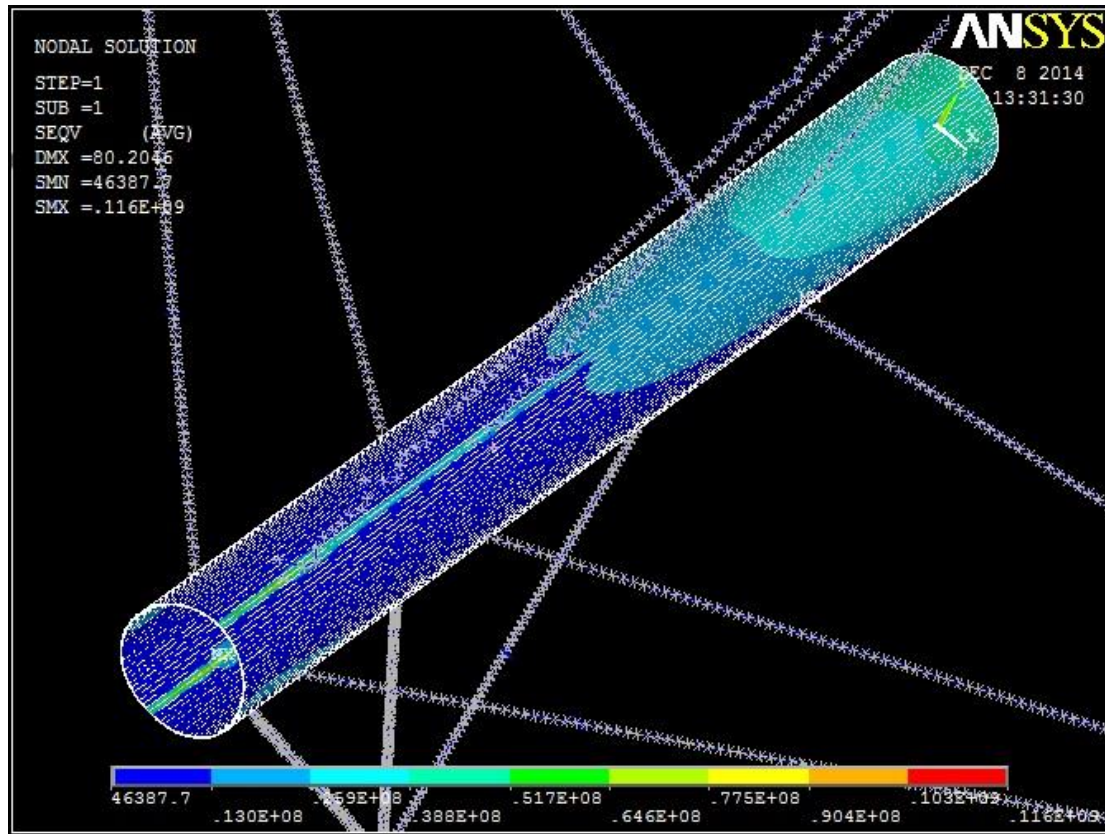
Στην **Εικόνα 6.16** βλέπουμε τη μετατόπιση-παραμόρφωση στον άξονα των Y.

Η διεύθυνση του ανέμου είναι στον άξονα των Y (από πάνω προς τα κάτω όπως φαίνεται στην εικόνα). Παρατηρούμε και εδώ πως η μετατόπιση είναι συμμετρική ως προς τον άξονα των Y.



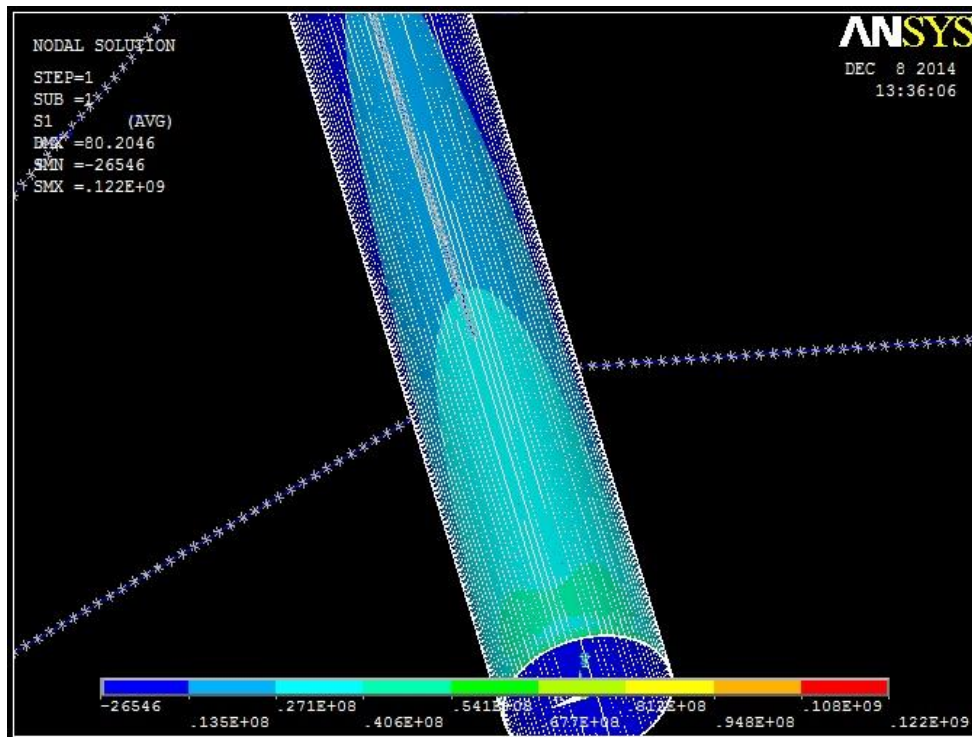
Εικόνα 6.16: DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 9 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε m).

Στην **Εικόνα 6.17** παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises, παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα είναι της ίδιας μορφής με εκείνα των 7 και των 8 μποφόρ. Και εδώ η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων βρίσκεται στη βάση της καμινάδας και στα σημεία που είναι συνδεδεμένες οι αντηρίδες πάνω στην καμινάδα, με τις μεγαλύτερες να είναι της τάξεως των 30MPa.



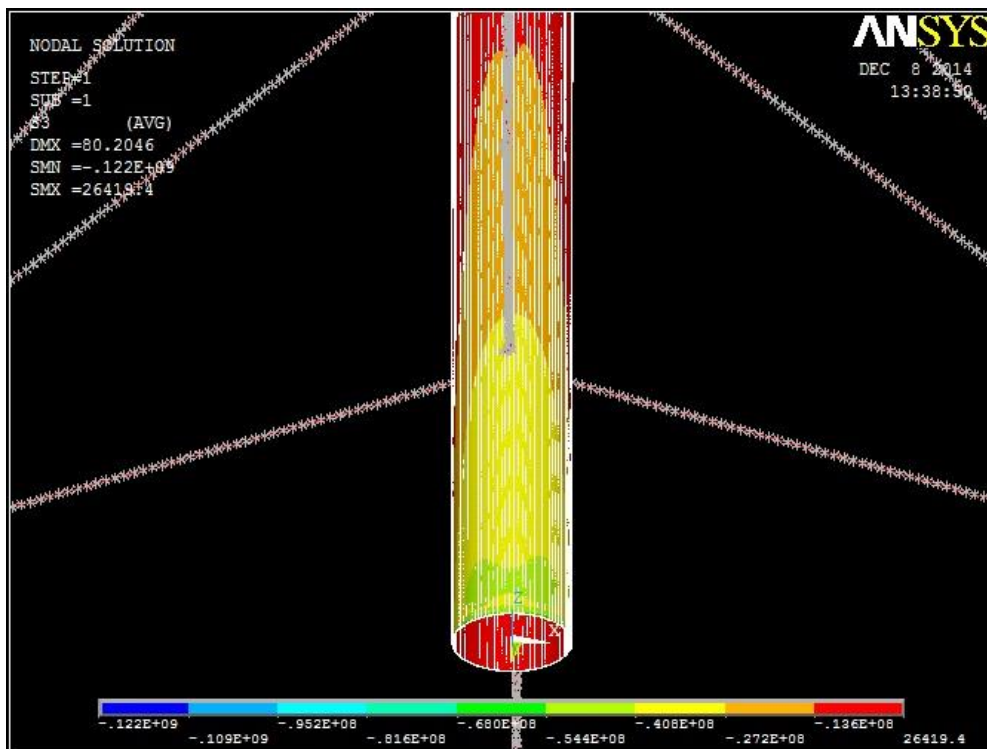
Εικόνα 6.17: Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 9 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Στην **Εικόνα 6.18** αποτυπώνονται οι εφελκυστικές τάσεις (σ_1) στη βάση της καμινάδας από την προσήνεμη πλευρά.



Εικόνα 6.18: Τάσεις σ_1 για ένταση ανέμου 9 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

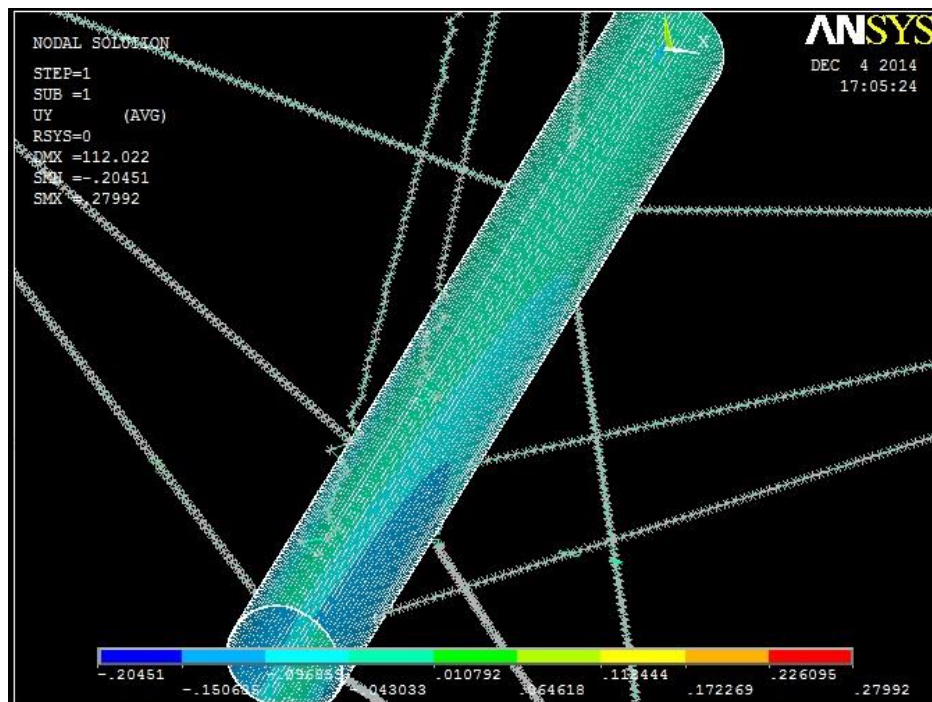
Στην **Εικόνα 6.19** φαίνονται οι θλιπτικές τάσεις (σ_3) που αναπτύσσονται στη βάση της καμινάδας από την υπήνεμη πλευρά.



Εικόνα 6.19: Τάσεις σ_3 για ένταση ανέμου 9 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

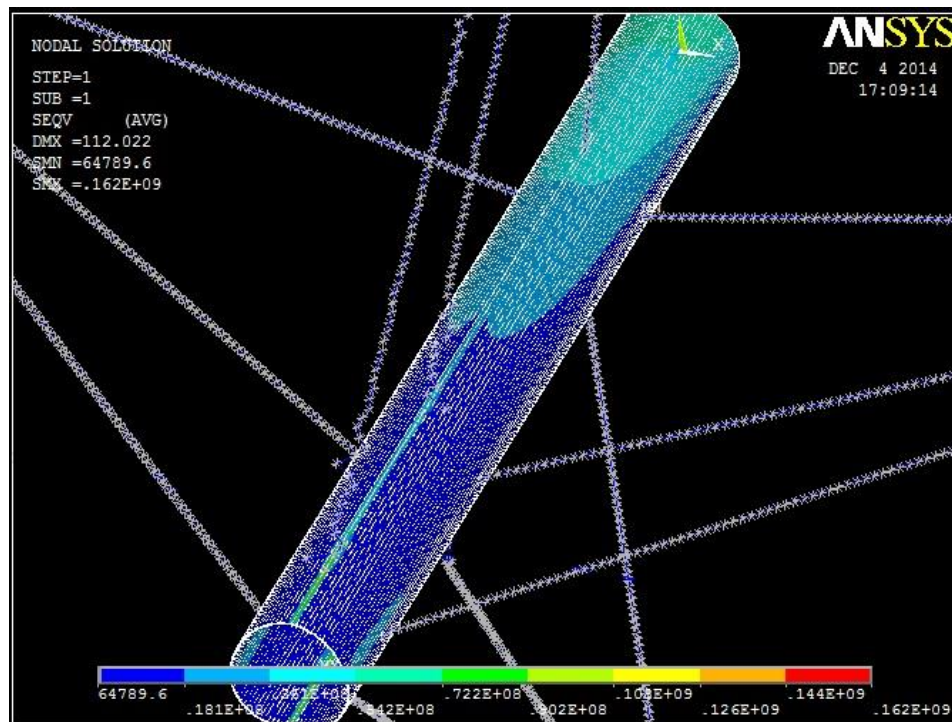
6.2.4. Αποτελέσματα για ένταση ανέμου 10 μποφόρ

Στην **Εικόνα 6.20** βλέπουμε τη μετατόπιση-παραμόρφωση στον άξονα των Υ.



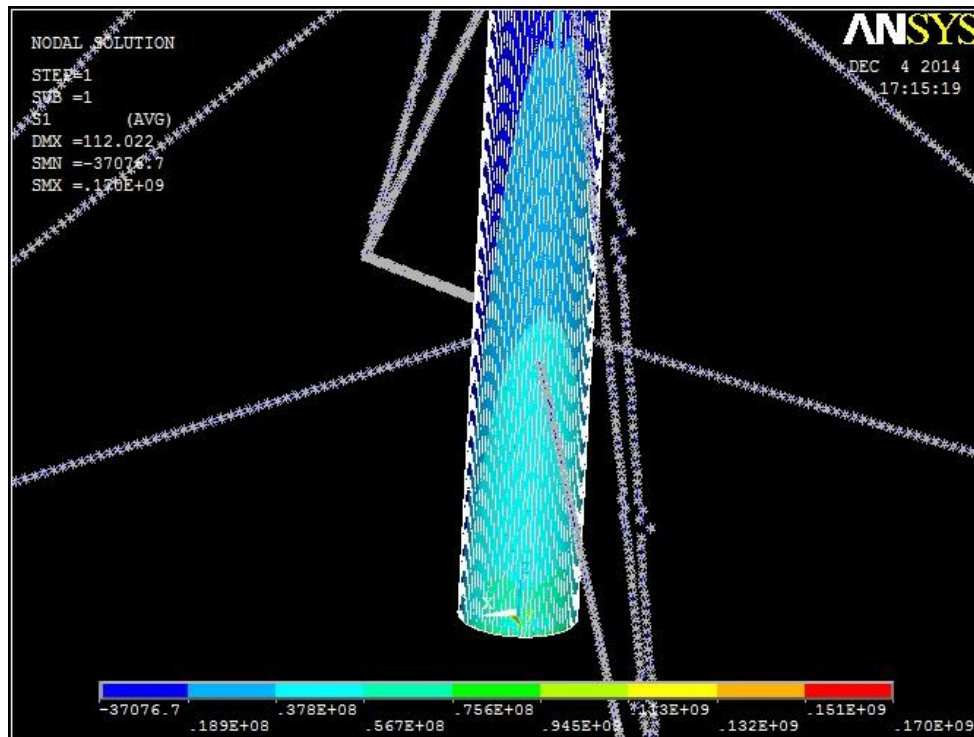
Εικόνα 6.20: DOF στον άξονα γ για ένταση ανέμου 10 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε m).

Στην **Εικόνα 6.21** αποτυπώνεται η κατανομή τάσεων Von Mises.



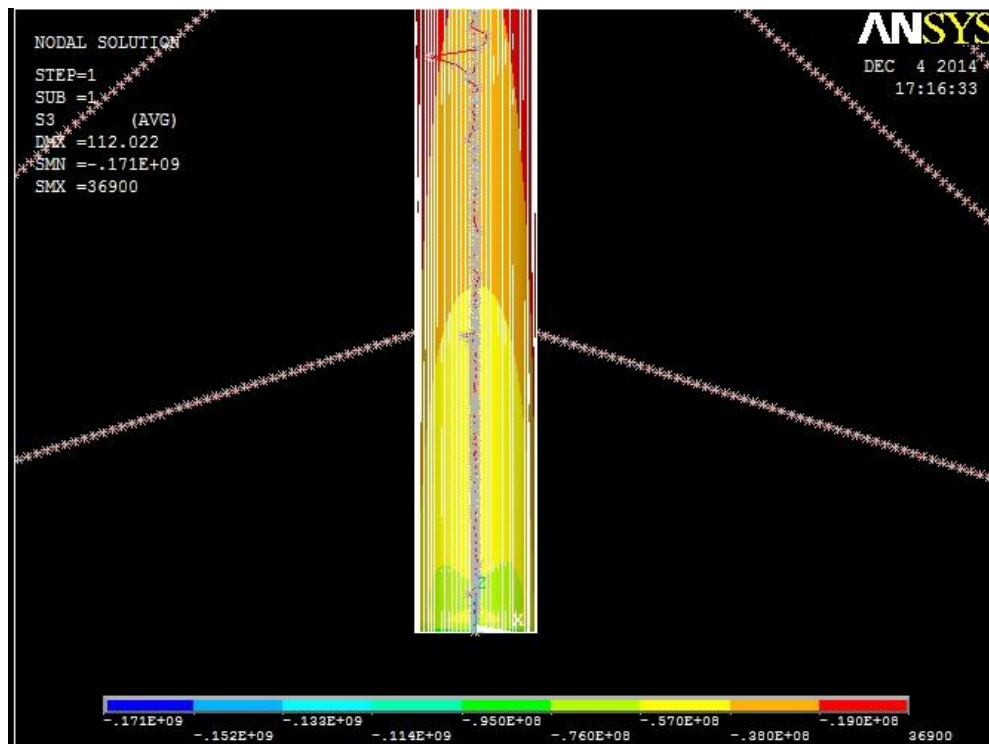
Εικόνα 6.21: Τάσεις Von Mises για ένταση ανέμου 10 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Στην **Εικόνα 6.22** αποτυπώνονται οι εφελκυστικές τάσεις (σ_1) στη βάση της καμινάδας από την προσήνεμη πλευρά.



Εικόνα 6.22: Τάσεις σ_1 για ένταση ανέμου 10 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

Στην **Εικόνα 6.23** φαίνονται οι θλιπτικές τάσεις (σ_3) που αναπτύσσονται στη βάση της καμινάδας από την υπήνεμη πλευρά.

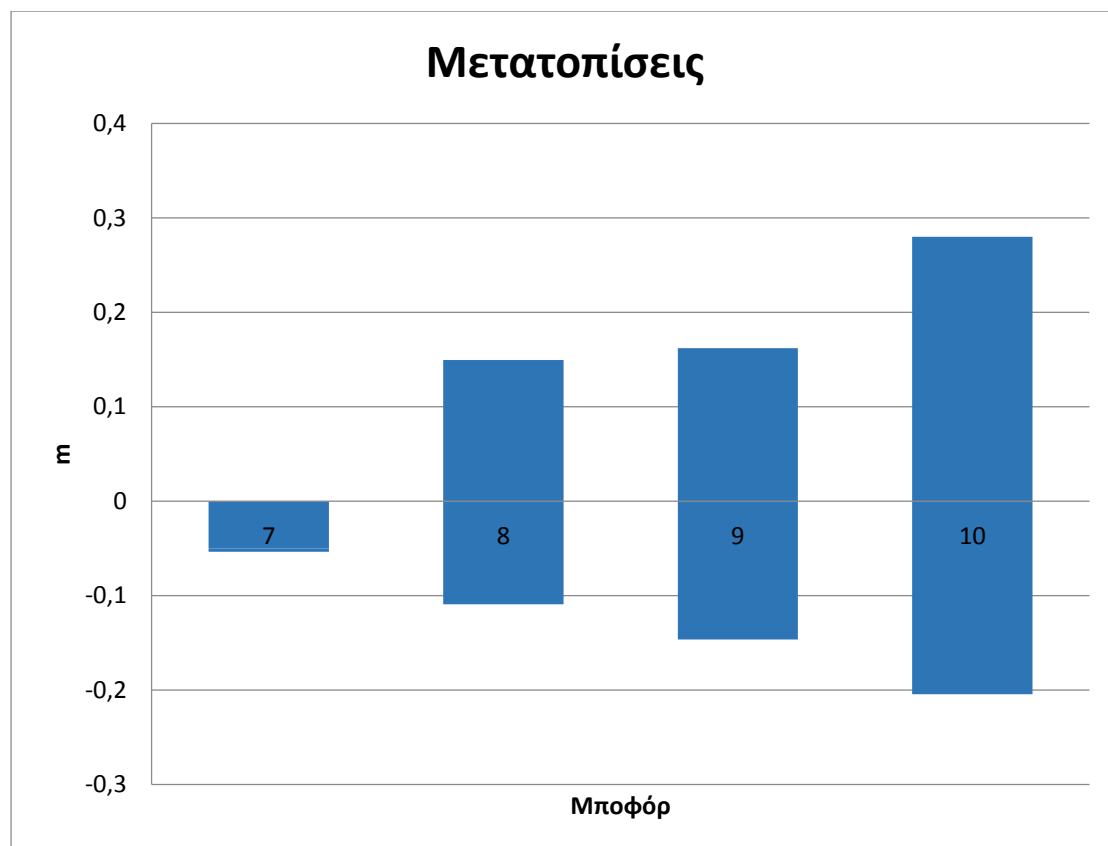


Εικόνα 6.23: Τάσεις σ_3 για ένταση ανέμου 10 μποφόρ (η κλίμακα είναι σε Pa).

6.2.5. Σύνοψη αποτελεσμάτων

Τα αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις F.E.A. που έγιναν, και η σημασία αυτών, συνοψίζονται στα παρακάτω.

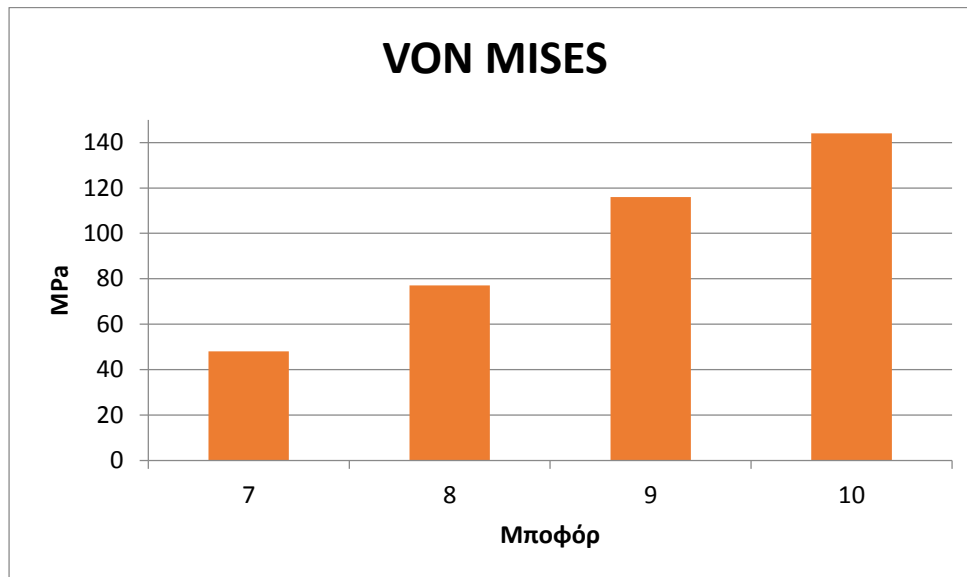
Στο **Διάγραμμα 6.1** παρουσιάζονται τα εύρη των τιμών των μετατοπίσεων του μοντέλου της καμινάδας για τις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.



Διάγραμμα 6.1: Εύρος μετατοπίσεων για τις διαφορετικές εντάσεις ανέμου.

Παρατηρούμε ότι η κατανομή των παραμορφώσεων στο μοντέλο παραμένει μορφολογικά η ίδια, ανεξάρτητα από τις διαφορετικές εντάσεις ανέμου. Αυτό που αλλάζει είναι η μέγιστη τιμή και το εύρος των τιμών.

Στο **Διάγραμμα 6.2** γίνεται σύγκριση του εύρους των τιμών των τάσεων Von Mises.



Διάγραμμα 6.2: Εύρος τάσεων για τις διαφορετικές εντάσεις ανέμου.

Η μέγιστη τάση Von Mises που εμφανίζεται στο μοντέλο για ένταση ανέμου 10 μποφόρ είναι 144 MPa, ενώ το όριο διαρροής για τυπικούς χάλυβες με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα όπως είναι ο πλέον διαδεδομένος S275JR και ο S355JR, είναι 275 N/mm^2 και 355 N/mm^2 αντίστοιχα ($1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$).

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το εύρος των τιμών των τάσεων Von Mises που αναπτύσσονται στο μοντέλο, αυξάνεται αναλογικά με την ένταση του ανέμου. Αυτό δείχνει πως η συμπεριφορά του μοντέλου είναι ομαλή και προβλέψιμη για τις καιρικές συνθήκες που μας ενδιαφέρουν.

Συνεπώς παρατηρούμε, πως η καταπόνηση του μοντέλου βρίσκεται μέσα σε επιτρεπτά όρια και τα φαινόμενα διαφέρουν μόνο στην ένταση για τις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου κάθε φορά.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

- Κανάραχος Ανδρέας Ε., Προβατίδης Χριστόφορος Γ., Πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανολογία, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2000.
- Τσαμασφύρος Γεώργιος Ι., Θεοτόκογλου Ευστάθιος Ελ., Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων II, Αθήνα, 2002.
- Μιχάλτσος Γεώργιος Θ., Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές θεωρία και εφαρμογές, Αθήνα, 2001.
- Jörg Schlaich. *The Solar Chimney Electricity from the Sun*, Stuttgart, 1995.
- Richard Scott. *In the Wake of Tacoma*
- Αρθούρος Ζερβός. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Αθήνα, 2008.
- Shiyi Chen, Jane Golley. *Green productivity growth in China's industrial economy*.
- Αρθούρος Ζερβός, Κάραλης Γεώργιος. *Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας*, Αθήνα 2009.
- Νικόλαος Α. Αθανασιάδης, *Μηχανική Ρευστών, Συμεών*, Αθήνα, 1989.
- Τσαγγάρης Σωκράτης, *Μηχανική των Ρευστών, Συμεών*, Αθήνα, 2005.
- Κίμωνας Α. Αντωνόπουλος, *Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα*, Αθήνα, 2008.
- Γεώργιος Μπεργκελές, *Ανεμοκινητήρες, Συμεών*, Αθήνα, 2005.

Άρθρα

- A. Koonsrisuk, S. Loreute, A. Bejan. "Constuctal solar chimney configuration", *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53(2010), 327-333.
- Amel Dhahri, Ahmed Omri. "A Review of Solar Chimney Power Generation Technology", *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2(2013).
- Xinping Zhou, "Analysis of chimney height", *Applied Thermal Engineering*. 29(2009), 178-185.
- A. Koonsrisuk, J. Chitsombomm, "The Solar Chimney", *International Journal of Green Energy*. 7(2006), 557-592.
- Santos Bernandes, M. Anrelio, "Solar Chimney Power Plants Developments and Advantages", *Solar Energy* (2010).
- Nicholas Apergis, James E. Payne. "Energy Consumption and growth in South America :Evidence from a panel error correction model", *Energy Economics*. 32(2010), 1421-1426.
- Xinping Zhou, Jiakuan Yang, Bo Xiao, Guoxiang Hou. "Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup". *Applied Thermal Engineering*. 27(2007), 2044-2050.

- *M.A. dos Bernandes, A. Vob, G. Weinrebe. "Thermal and technical analyses of solar chimneys". Solar Energy 75(2003), 511-524.*
- *T.P. Fluri, J.P. Pretorius, C. Van Dyk, T.W. Von Backstrom, D.G. Kroger, G.P.A.G. Van Zijl. "Cost analysis of solar chimney power plants". Solar Energy 83(2009), 246-256.*
- *New Scientist 345 (1963), 732-735*
- *Thomas Vincent Lawson. "Flying Debris". Wind Engineering Society. 11 (2009)*
- *Johannes Petrus Pretorius, Optimization and Control of a Large-scale Solar Chimney Power Plant.*

Internet

- *www.gchimneytech.com*
- *http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/fea.pdf*
- *Europa.eu/pol/ener/index_el.htm.*
- *www.solarserver.com*
- *www.energy-regulation.eu/el/energy-regulation-2/ευρωπαϊκή-ενεργειακή-πολιτική*
- *www.ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto_h2_key_gr.pdf.*
- *www.cres.gr/kape/pdf/download/Energy_Outlook_2009_EI%20.pdf*
- *Europa.eu/legislation_summaries/energy/index_el.htm.*
- *I. Giosan, P. Eng. "Vortex shedding Induced Loads on Free Structures".*
- *www.solar-updraft-tower.com*
- *www.solaripedia.com*
- *www.floatingsolarchimney.gr*
- *Users.ntua.gr/caridis/methodoi/keimena*
- *http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/Biomixanika%20kramata%20Xalibes.pdf*
- *http://www.renewableenergyworld.com/*
- *http://cleantechnica.com/*
- *ANSYS 13.0 Help*
- *Χρήστος Δ. Παπαγεωργίου, Μιχάλης Ψαλιδάς, Solar Farming.*
- *Χρήστος Δ. Παπαγεωργίου, Floating Solar Chimney Technology.*
- *Χρήστος Δ. Παπαγεωργίου, Μιχάλης Ψαλιδάς, Πέτρος Κατοπόδης, Solar chimney technology without solar collectors.*