



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Μελέτη Συμπεριφοράς Κεραυνικών Πληγμάτων  
Σε Απομονωμένα Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας  
Φωτοβολταϊκών Πάρκων**

**Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α**

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ ΑΘ. ΚΟΚΑΛΗΣ**

**Επ. Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος  
**Επιβλέπουσα:** Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη

Αθήνα, Οκτώβριος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μελέτη Συμπεριφοράς Κεραυνικών Πληγμάτων  
Σε Απομονωμένα Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας  
Φωτοβολταϊκών Πάρκων**

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

ΧΡΗΣΤΟΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ ΑΘ. ΚΟΚΑΛΗΣ

**Επ. Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος  
**Επιβλέπουσα:** Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την \_\_\_ Οκτωβρίου 2016.

.....  
Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Χρήστος Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρήστος Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης κεραυνικών πληγμάτων σε απομονωμένα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, μέσω της εκτέλεσης προσομοιώσεων με το λογισμικό SES CDEGS. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του λογισμικού CDEGS έγινε σχεδιασμός και προσομοίωση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης 100kWp, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για το αναπτυσσόμενο δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους και για τις τάσεις επαφής που εμφανίζονται στην περίπτωση που η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση υποστεί ένα κεραυνικό πλήγμα. Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, συναρτήσει της δομής του εδάφους, στα αναπτυσσόμενα δυναμικά σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος. Έπειτα, μελετάται η σημασία της ύπαρξης και του βάθους στο οποίο είναι θαμμένη η περιμετρική γείωση στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, καθώς και η βελτίωση της κεραυνικής συμπεριφοράς που προκαλείται από τροποποιήσεις του συστήματος γείωσης. Επίσης, καταδεικνύεται η επίδραση κάθετου ηλεκτροδίου που συνδέεται στο κάτω άκρο του αλεξικέραυνου. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση απομονωμένου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, μη απομονωμένου και απομονωμένου με αγώγιμο βραχίονα.

**Λέξεις κλειδιά:** Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, CDEGS, κεραυνικό πλήγμα, δυναμικό, τάσεις επαφής



## **Abstract**

Subject of this diploma thesis is to examine the effect of lightning strikes in isolated lightning protection systems on photovoltaic installations. More specifically, a 100kWp PV system was designed and simulated using CDEGS software in order to study the developed potential and touch voltages in the case of a lightning strike. Additionally, the effect of the distance of lightning rod from the PV installation in case of a lightning strike is examined depending on the soil structure. Moreover, the importance of perimeter grounding and the depth in which it is buried is investigated and results are obtained in case of multiple lengths of a vertical grounding rod connected to the lightning rod. Furthermore, changes in grounding system of the PV installation are considered in order to reduce the calculated potential. Finally, isolated and non-isolated lightning protection systems (LPS) are compared using different types of insulators.

**Keywords:** Photovoltaic systems, isolated lightning protection system, CDEGS, lightning surge, potential, touch voltages





## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, για τη συνεχή βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της και για τις εμπειρίες που μου μετέδωσε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

Επίσης, ευχαριστώ την Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη, υποψήφια Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεχή βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας, για την καθοριστική συμβολή της στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, καθώς και για το άριστο κλίμα συνεργασίας που υπήρχε μεταξύ μας.

Επιπλέον, θα ήθελα να πω ένα ευχαριστώ σε όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για όλες τις εμπειρίες που μου μετέδωσαν όσο καιρό ήμουν μαζί τους στο εργαστήριο.

Τέλος, ευχαριστώ το Θεό που με βοήθησε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου, την οικογένεια μου, την κοπέλα μου και τους φίλους μου για τη συνεχή και πολύπλευρη υποστήριξη τους σε όλα τα βήματα που έχω κάνει μέχρι τώρα.



# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	11
Πρόλογος.....	17
<b>Κεφάλαιο 1: Φωτοβολταϊκές διατάξεις.....</b>	<b>19</b>
1.1 Εισαγωγή.....	19
1.2 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών διατάξεων .....	20
1.3 Αρχή λειτουργίας .....	22
1.3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	22
1.3.2 Η επαφή p - n .....	23
1.3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	25
1.3.4 Η χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	26
1.3.5 Επίδραση εξωτερικών παραγόντων στη λειτουργία των φ/β στοιχείων.....	26
1.3.5.1 Θερμοκρασιακή επίδραση .....	26
1.3.5.2 Επίδραση της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας.....	27
1.3.5.3 Η επίδραση της ρύπανσης .....	28
1.4 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	29
1.4.1 Μονοκρυσταλλικά φ/β στοιχεία .....	29
1.4.2 Πολυκρυσταλλικά φ/β στοιχεία.....	30
1.4.3 Φ/β στοιχεία λεπτών υμενίων .....	31
1.5 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	32
1.5.1 Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	32

1.5.2	Προβλήματα σκιασμών.....	35
1.5.3	Βάσεις στήριξης και ιχνηλάτες .....	36
1.5.4	Η μέγιστη δυνατή συλλογή ακτινοβολίας από σταθερό συλλέκτη .....	38
1.5.5	Καλωδιώσεις.....	39
1.5.6	Αντιστροφείς.....	41
1.5.6.1	Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters).....	42
1.5.6.2	Αντιστροφείς συστοιχιών (string inverters) .....	43
1.5.6.3	Αντιστροφείς πολλαπλών συστοιχιών (multi-string inverters) .....	43
1.5.6.4	Μικρο-αντιστροφείς πλαισίου (micro inverters).....	43
1.6	Ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	43
1.7	Αναγκαιότητα αντικεραυνικής προστασίας φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	44
<b>Κεφάλαιο 2: Αντικεραυνική προστασία και προστασία από υπερτάσεις σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου.....</b>		<b>45</b>
2.1	Κεραυνός.....	45
2.1.1	Ιστορική αναδρομή .....	45
2.1.2	Το φαινόμενο του κεραυνού .....	47
2.1.3	Είδη κεραυνικών εκκενώσεων.....	47
2.1.4	Παράμετροι κεραυνού .....	49
2.1.5	Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό .....	50
2.1.6	Διάρκεια κεραυνών και χαρακτηριστικές I-t.....	50
2.2	Εκτίμηση κινδύνου και προσδιορισμός απαιτούμενου επιπέδου αντικεραυνικής προστασίας.....	52
2.2.1	Εκτίμηση κινδύνου ζημίας από κεραυνό .....	52
2.2.2	Στάθμη προστασίας.....	53
2.2.3	Επιλογή στάθμης προστασίας του ΣΑΠ .....	54
2.2.3.1	Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή ( $N_d$ ) ..54	
2.2.3.2	Μέση ετήσια πυκνότητα πλήγματος κεραυνού στο έδαφος ( $N_g$ ).....	55

2.2.3.3	Ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια ( $A_e$ ).....	56
2.2.3.4	Αποδεκτή συχνότητα ζημιών από κεραυνικά πλήγματα στην κατασκευή ( $N_c$ ) .....	57
2.2.3.5	Επιλογή του ΣΑΠ και της στάθμης προστασίας του.....	58
2.3	Επιλογή Εξωτερικού Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας .....	60
2.3.1	Εξωτερική Εγκατάσταση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας .....	61
2.3.1.1	Συλλεκτήριο Σύστημα .....	61
2.3.1.2	Σύστημα αγωγών καθόδου .....	63
2.3.1.3	Θεμελίωση και Σύστημα Γείωσης.....	64
2.3.2	Σύστημα γείωσης σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου με σύστημα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου.....	67
2.3.3	Στερέωση .....	68
2.4	Εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας .....	69
2.4.1	Ισοδυναμικές συνδέσεις.....	69
2.4.2	Ελάχιστη διατομή θωράκισης καλωδίων.....	70
2.4.3	Αντοχή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού έναντι υπερτάσεων.....	71
2.4.4	Συσκευές περιορισμού υπερτάσεων .....	72
2.4.4.1	Βασικά Χαρακτηριστικά .....	72
2.4.4.2	Διαχωρισμός συσκευών περιορισμού υπερτάσεων ανάλογα με την απόκριση τους σε ρεύμα υπερεντάσεως .....	73
2.4.4.3	Επιλογή στάθμης προστασίας συσκευών περιορισμού υπερτάσεων ...	73
2.4.5	Προστασία φ/β στοιχείων από υπερρεύματα και διακόπτης φορτίου .....	73
<b>Κεφάλαιο 3: Ειδική αντίσταση εδάφους .....</b>		<b>75</b>
3.1	Ορισμός.....	75
3.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους.....	75
3.2.1	Είδος του εδάφους .....	76
3.2.2	Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία .....	77
3.2.3	Θερμοκρασία και πίεση .....	78

3.2.4	Διαλυμένα άλατα στο νερό .....	78
3.2.5	Μέγεθος των κόκκων του εδάφους.....	78
3.2.6	Μορφή της τάσης.....	79
3.2.7	Ηλεκτρικό ρεύμα .....	79
3.2.8	Ένταση του πεδίου (Voltage gradient) .....	79
3.3	Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους .....	79
3.3.1	Μέθοδος Wenner .....	80
3.3.2	Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού (fall-of-potential)	81
3.3.3	Σύγκριση μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης.....	82
3.4	Καθορισμός της δομής του εδάφους.....	83
<b>Κεφάλαιο 4: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....</b>		<b>85</b>
4.1	Τρόποι μείωσης επαγόμενων υπερτάσεων σε φ/β συστήματα .....	85
4.2	Πειραματική σύγκριση απομονωμένου και μη απομονωμένου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας για μεγάλης κλίμακας φ/β πάρκο .....	86
4.3	Επαγόμενες υπερτάσεις από κεραυνικά πλήγματα διαφόρων μορφών σε φ/β εγκαταστάσεις σε σχέση με το σημείο πτώσης του κεραυνού .....	89
4.4	Επαγόμενες υπερτάσεις και τάσεις επαφής λόγω σχηματιζόμενων βρόχων καλωδίων .....	92
<b>Κεφάλαιο 5: Τοπολογίες.....</b>		<b>97</b>
5.1	Εισαγωγή.....	97
5.2	Περιγραφή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	97
5.2.1	Τρόπος διασύνδεσης και σχηματιζόμενες συστοιχίες .....	97
5.2.2	Λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φ/β πλαισίων .....	97
5.2.3	Γείωση και σύστημα αντικεραυνικής προστασίας .....	100
5.3	Εξεταζόμενες περιπτώσεις .....	102

5.3.1	Διάταξη με περιμετρική γείωση στα 0,5m βάθος.....	102
5.3.2	Διάταξη με περιμετρική γείωση στην επιφάνεια του εδάφους.....	104
5.3.3	Διάταξη χωρίς περιμετρική γείωση .....	105
5.3.4	Διάταξη με το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με την ακίδα σύλληψης σε διάφορα βάθη κάτω από το έδαφος .....	105
5.3.5	Διάταξη με αγωγίμο βραχίονα στήριξης της ακίδας σύλληψης .....	107
<b>Κεφάλαιο 6: Περιγραφή του λογισμικού CDEGS.....</b>		<b>109</b>
6.1	Εισαγωγή.....	109
6.2	Ταχύς μετασχηματισμός Fourier του κεραυνικού ρεύματος.....	110
6.2.1	Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη FFTSES .....	110
6.2.2	Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του επιλύτη FFTSES .....	114
6.3	Απόκριση συστήματος στο πεδίο της συχνότητας.....	116
6.3.1	Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη HIFREQ.....	116
6.3.2	Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του HIFREQ.....	122
6.4	Απόκριση συστήματος στο πεδίο του χρόνου.....	124
6.4.1	Υπολογισμός αντιστρόφου Fourier (IFFT).....	124
<b>Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....</b>		<b>127</b>
7.1	Διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων.....	127
7.2	Επίδραση της απόστασης του αλεξικέραυνου και της δομής του εδάφους.....	128
7.3	Επίδραση της περιμετρική γείωσης .....	136
7.3.1	Αναπτυσσόμενο δυναμικό .....	136
7.3.2	Τάσεις επαφής.....	147
7.4	Επίδραση του μήκους του κάθετου ηλεκτροδίου που βρίσκεται μέσα στο έδαφος και συνδέεται στο κάτω μέρος του αλεξικέραυνου .....	150

7.5	Επίδραση της αντικατάστασης του υλικού του βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου από μονωτικό σε αγώγιμο.....	157
7.5.1	Αναπτυσσόμενο δυναμικό .....	157
7.5.2	Τάσεις επαφής.....	169
<b>Κεφάλαιο 8:</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>173</b>
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>177</b>
	<b>Παράρτημα Α .....</b>	<b>181</b>
	<b>Παράρτημα Β .....</b>	<b>185</b>
	<b>Παράρτημα Γ.....</b>	<b>189</b>
	<b>Παράρτημα Δ.....</b>	<b>193</b>



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τις επιπτώσεις που προκαλούν τα κεραυνικά πλήγματα σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας.

Στο κεφάλαιο 1 περιγράφονται και εξηγούνται αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών διατάξεων και των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Περιγράφονται η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, οι χαρακτηριστικές καμπύλες που διέπουν τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς επίσης και οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Επίσης, γίνεται λόγος για τους βασικούς τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων που υπάρχουν στην αγορά και για τις βασικές παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψιν ώστε να κατασκευαστεί μια σωστή φωτοβολταϊκή εγκατάσταση (π.χ. σκιάσεις και προσανατολισμός των πλαισίων). Τέλος, περιγράφεται ο βασικός εξοπλισμός από τον οποίο αποτελείται μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και αναφέρεται το τι ισχύει σχετικά με την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σήμερα.

Το κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την αντικεραυνική προστασία και την προστασία από υπερτάσεις σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πάρκων. Αρχικά, εξηγούνται το φαινόμενο του κεραυνού, οι παράγοντες που τον επηρεάζουν, καθώς επίσης και οι χαρακτηριστικές καμπύλες του κεραυνικού ρεύματος. Ακολούθως, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία με την οποία καθορίζεται, αν χρειάζεται αντικεραυνική προστασία μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και αν ναι τότε με ποιο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας θα προστατευτεί καλύτερα. Τέλος, περιγράφονται το εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (συλλεκτήριο σύστημα, αγωγοί καθόδου, σύστημα γείωσης), όπως επίσης και η εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας (ισοδυναμικές συνδέσεις, θωράκιση καλωδίων, συσκευές περιορισμού υπερτάσεων κλπ.).

Το κεφάλαιο 3 πραγματεύεται την ειδική αντίσταση του εδάφους. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους και παρατίθενται κάποιοι τρόποι μέτρησης της. Μετά από αυτές τις μετρήσεις μπορεί να καθοριστεί ο τύπος ενός εδάφους.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια ανασκόπηση σε παλαιότερες επιστημονικές εργασίες που έχουν το ίδιο ή παρόμοιο αντικείμενο μελέτης με την παρούσα εργασία. Επιπλέον, παρατίθενται τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτών των εργασιών.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται αναλυτικά οι τοπολογίες των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που προσομοιώθηκαν. Ακόμη, καταδεικνύονται τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά της γείωσης και του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας.

Το κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τη λεπτομερή περιγραφή του λογισμικού πακέτου CDEGS της εταιρείας SES, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις. Επιπροσθέτως,

επεξηγείται η λειτουργία όλων των εφαρμογών του, που χρειάστηκαν για την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Το κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (αναπτυσσόμενο δυναμικό και τάσεις επαφής), που εκτελέστηκαν με τις διατάξεις του κεφαλαίου 5. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό υπάρχουν παρατηρήσεις, σχολιασμοί και συγκρίσεις των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Τέλος, το κεφάλαιο 8 παραθέτει τα συμπεράσματα, που εξάγονται από τα αποτελέσματα και τις συγκρίσεις του κεφαλαίου 7. Ακόμη, προτείνονται κάποιες λύσεις με σκοπό την καλύτερη συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε περίπτωση που αυτές υποστούν κεραυνικό πλήγμα και τελικά γίνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

# Κεφάλαιο 1: Φωτοβολταϊκές διατάξεις

---

## 1.1 Εισαγωγή

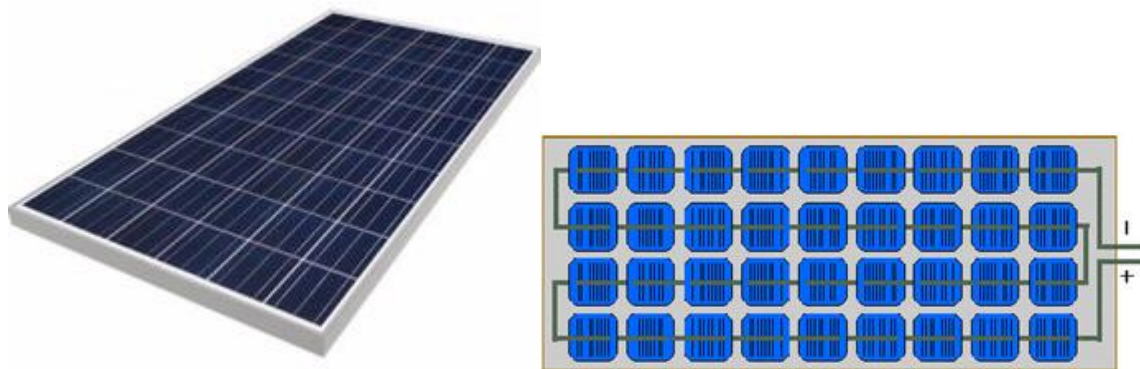
Οι φωτοβολταϊκές (ή φ/β) διατάξεις, ή φωτοβολταϊκά συστήματα, αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με τεράστιο ενδιαφέρον τόσο για την Ελλάδα, όσο και για χώρες του εξωτερικού, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη ηλιοφάνεια. Εκμεταλλευόμενες το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, οι συγκεκριμένες διατάξεις παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πάνελ (ή «πλαίσια», ή PV modules, ή όπως λέγονται συχνά στο εμπόριο «κρύσταλλα»), που το καθένα από αυτά αποτελείται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων (ή «κυψελών», ή «κυττάρων», είναι οι ηλεκτρονικές διατάξεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχονται ακτινοβολία) (σχήμα 1-1) ηλεκτρικά συνδεδεμένων μεταξύ τους, μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή [2, 9].



Σχήμα 1-1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο [34]

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ (σχήμα 1-2) συνδεδεμένα μεταξύ τους δημιουργούν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία (ή αλλιώς PV array ή «string») (σχήμα 1-3). Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να περιλαμβάνει από δύο έως και αρκετές εκατοντάδες φωτοβολταϊκά πάνελ. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια φ/β συστοιχία είναι συνεχούς (DC) ρεύματος και γι' αυτό το λόγο οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης. Κλασικά παραδείγματα είναι ο υπολογιστής τσέπης «κομπιουτεράκι» και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αντιστροφείς (inverters) – που έχουν σκοπό τη μετατροπή της συνεχούς τάσης της φ/β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη (AC) τάση. Με τον τρόπο αυτό το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει οποιαδήποτε σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, μονάδα παραγωγής κλπ.), που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος [2, 9].



**Σχήμα 1-2** Φωτοβολταϊκό πάνελ (αριστερά) και η εσωτερική εν σειρά συνδεσμολογία πολλών φ/β στοιχείων για τη δημιουργία ενός φ/β πάνελ (δεξιά) [35, 36]



**Σχήμα 1-3** Φωτοβολταϊκές συστοιχίες [37]

## **1.2 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών διατάξεων**

Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία στην ενεργειακή τροφοδοσία.

Τα φωτοβολταϊκά, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα, θεωρούνται τα ιδανικά συστήματα ενεργειακής μετατροπής καθώς χρησιμοποιούν την

πλέον διαθέσιμη πηγή ενέργειας στον πλανήτη και παράγουν ηλεκτρισμό, που αποτελεί την πιο χρήσιμη μορφή ενέργειας [9].

Παρακάτω απαριθμούνται μερικά από τα πλεονεκτήματα τα οποία εμφανίζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- Μηδενική ρύπανση και πλήρης απουσία αποβλήτων ή άλλων άχρηστων παραπροϊόντων.
- Ελάχιστες απαιτήσεις επίβλεψης και συντήρησης.
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Υψηλή αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 20 έτη).
- Αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες (ισχυρούς άνεμους, ακραία χαλαζόπτωση κλπ.).
- Σχετικά απλή μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες.
- Γρήγορη και σχετικά εύκολη εγκατάσταση.
- Εύκολη επέκταση της υπάρχουσας εγκατάστασης.
- Δυνατότητα ανεξαρτησίας από τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής για απομακρυσμένες περιοχές (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα).
- Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές.
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών, όσον αφορά την ισχύ (από μερικά Watt μέχρι μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μερικών MW) [2, 3, 5, 9].

Φυσικά, τα φ/β συστήματα έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία όμως στο σύνολο τους δεν είναι ικανά να αναιρέσουν τα πλεονεκτήματα και να αποτελέσουν τροχοπέδη για την περαιτέρω ανάπτυξη τους:

- Υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, το οποίο οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο υψηλό κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πολύ λιγότερο στο κόστος της υπόλοιπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός) .
- Λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών.
- Σε εφαρμογές που απαιτείται η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα), αυτή γίνεται με μη αποδοτικό τρόπο, με περιορισμένες δυνατότητες, ενώ και το κόστος των συσσωρευτών είναι υψηλό.
- Η πηγή ενέργειας, ο ήλιος δεν παράγει συνεχώς την ίδια ακτινοβολία (χαμηλής αξιοπιστίας πηγή), με συνέπεια να υπάρχει εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις καιρικές συνθήκες [2, 3, 5, 9].

## 1.3 Αρχή λειτουργίας

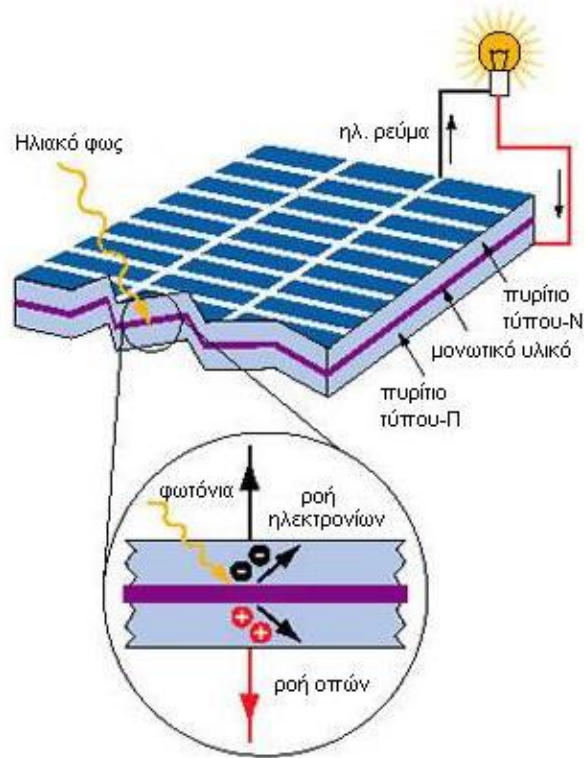
### 1.3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από το Γάλλο Φυσικό Alexandre Edmond Becquerel το 1839, ο οποίος ανακάλυψε ότι μπορεί να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν συγκεκριμένες κατασκευές εκτεθούν στο φως. Οι Αμερικάνοι Adams και Day το 1876 χρησιμοποιώντας έναν κρύσταλλο σεληνίου είχαν κάνει επίδειξη αυτού του φαινομένου. Η απόδοση σε αυτή την περίπτωση ήταν μόνο 1% [4, 5].

Το 1905, ο Albert Einstein διατύπωσε την εξήγηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου (υπόθεση του φωτονίου). Στη συνέχεια, το 1949 οι Αμερικάνοι Shockley, Bardeen και Brattain ανακάλυψαν το τρανζίστορ διευκρινίζοντας τη φυσική των p και n ενώσεων των ημιαγωγικών υλικών. Το πρώτο φωτοβολταϊκό κύτταρο με απόδοση κοντά στο 6%. Ύστερα, το 1958, στάλθηκαν στο διάστημα 108 ηλιακά κύτταρα για δοκιμή. Η σύνδεση σε σειρά άρχισε αργότερα σε μικρότερο αριθμό. Το 1970 η ετήσια παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων για διαστημικές εφαρμογές ήταν 500 m<sup>2</sup>. Η επίγεια χρήση ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '70, ενισχυόμενη από την πετρελαϊκή κρίση του 1973-74 και δίνοντας ερεθίσματα για την εκπόνηση πληθώρας ερευνητικών μελετών. Η προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας ήταν να μειωθεί το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, με την εύρεση νέων φθηνότερων υλικών. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία βρίσκονται παντού στην καθημερινότητα μας, με αποδόσεις που φτάνουν και το 19% υπό συγκεκριμένες συνθήκες [4, 5].

Με τον όρο φωτοβολταϊκό φαινόμενο εννοούμε την άμεση μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια σε ατομικό επίπεδο. Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, τότε ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό. Η απορρόφηση του φωτός, έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας, η οποία συνήθως είναι η θερμότητα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, σε ηλεκτρική ενέργεια [4, 5].

Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, λοιπόν, είναι δίοδοι κάποιου ημιαγωγού με τη μορφή ενός λεπτού δίσκου, που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1-4. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (οπών – ηλεκτρονίων) πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας [4, 5].



**Σχήμα 1-4** Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η ηλιακή ενέργεια, προσπίπτοντας στη δίοδο p-n, διαχωρίζει οπές και ηλεκτρόνια δημιουργώντας διαφορά δυναμικού [5]

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, δύναται να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου.

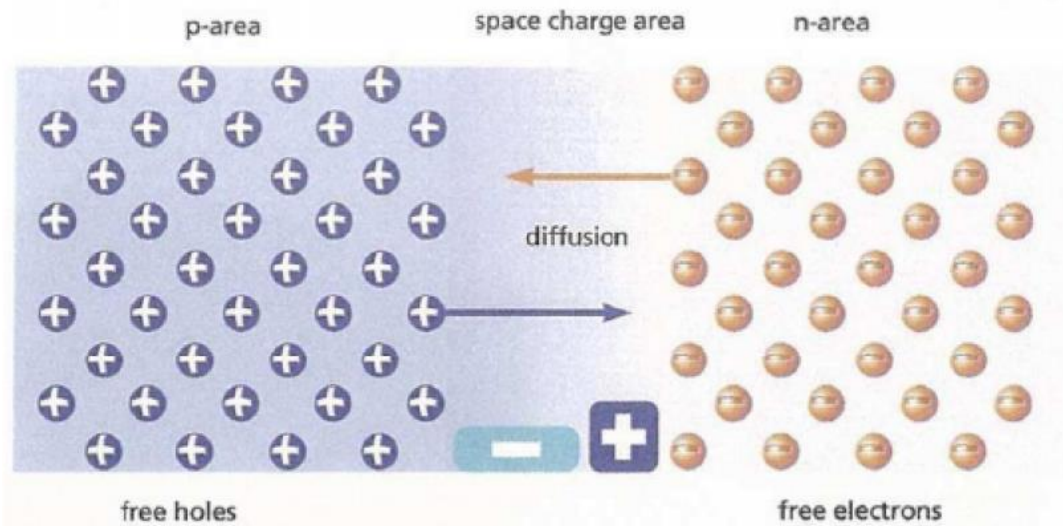
Η εκδήλωση της τάσης αυτής ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αν στους ακροδέκτες συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο (σχήμα 1-4). Τελικά, όλη η διάταξη αποτελεί μια πηγή ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου [4, 5].

### 1.3.2 Η επαφή p - n

Αν φέρουμε σε επαφή ένα υλικό τύπου-n και ένα υλικό τύπου-p, η διαχωριστική γραμμή που καλείται επαφή (JUNCTION) αποτελεί την εστία δημιουργίας του φράγματος δυναμικού, που αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για την λειτουργία του ηλιακού κυττάρου.

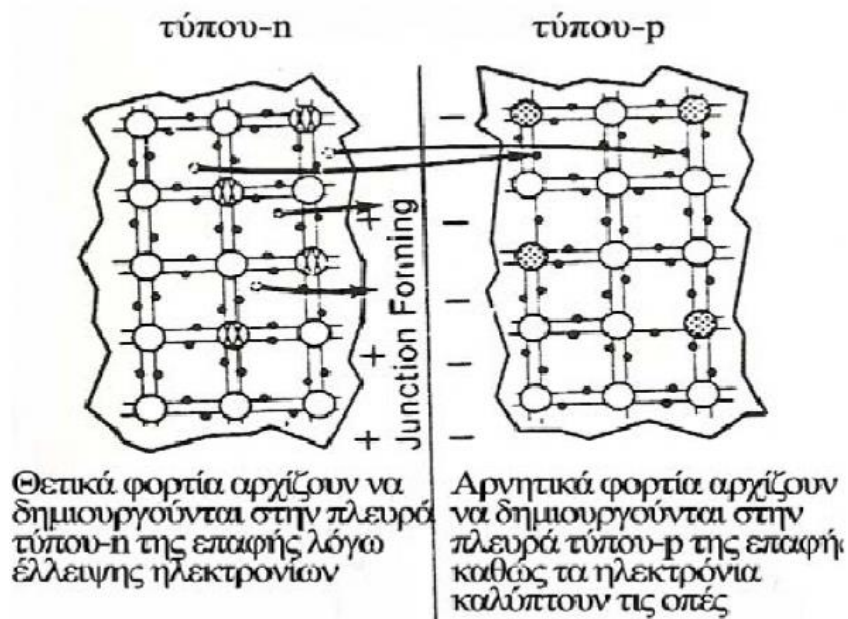


Όταν λοιπόν τα δυο υλικά έλθουν σε επαφή, ελεύθερα ηλεκτρόνια από το υλικό τύπου-n μεταπηδούν (με τη διαδικασία της διάχυσης) μέσω της επαφής στο υλικό τύπου-p και συνδέονται με αντίστοιχες οπές, αφού το υλικό αυτό διαθέτει μεγάλο αριθμό οπών (σχήμα 1-5) [3].



Σχήμα 1-5 Το φαινόμενο της διάχυσης [3]

Από την άλλη μεριά, οπές από το υλικό τύπου-p μεταπηδούν (με τη διαδικασία της διάχυσης) στο υλικό τύπου-n. Αυτή η διαδικασία μεταφοράς των φορτίων (σχήμα 1-6) δημιουργεί μια ανισορροπία φορτίων στις δυο πλευρές της επαφής: αρνητικά φορτία (επί πλέον ηλεκτρόνια) στην πλευρά τύπου-p της επαφής και θετικά φορτία (ιόντα) στην πλευρά τύπου-n της επαφής [3].

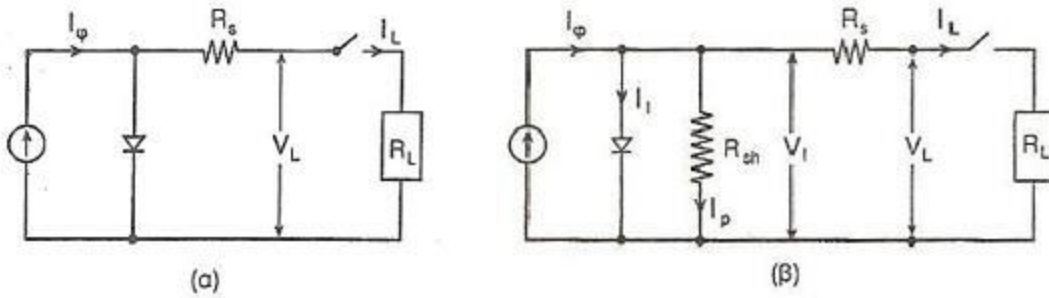


Σχήμα 1-6 Υλικό τύπου-n σε επαφή με υλικό τύπου-p (μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών) [3]



### 1.3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το απλοποιημένο και το πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός μη ιδανικού φ/β στοιχείου δίνεται στο σχήμα 1-7. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Η πηγή εντάσεως παράγει το “φωτόρευμα” (photocurrent),  $I_p$ , το οποίο είναι ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το μη ιδανικό τμήμα του φ/β στοιχείου περιλαμβάνει την παράλληλη αντίσταση  $R_{Sh}$  ( $R_{SHUNT}$ ) και την αντίσταση σειράς  $R_s$  [5].



Σχήμα 1-7 Απλοποιημένο (α) και πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα (β) του φ/β στοιχείου [5]

Η παράλληλη αντίσταση  $R_{SHUNT}$  αποδίδει τους πρόσθετους μηχανισμούς μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων εκατέρωθεν του φράγματος (πέραν της διάχυσης). Με άλλα λόγια, η αντίσταση αυτή συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου [5, 6].

Η αντίσταση σειράς  $R_s$  αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή κατά τη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου και στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους. Άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της  $R_s$  είναι η δραστική ελάττωση της αντίστοιχης μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο [5, 6].

Τυπικές τιμές για την αντίσταση σειράς είναι  $R_s = 2 - 5 \Omega$ , ενώ για την  $R_{SHUNT} = 10^8 \Omega$ . Οι ιδανικές τιμές προκύπτουν καθώς  $R_s \rightarrow 0$  και  $R_{SHUNT} \rightarrow \infty$ .

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως, η τιμή της αντίστασης φορτίου,  $R_L$ , επιλέγεται ούτως ώστε να αποδίδεται η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς κατά το φωτισμό [5, 6].

### 1.3.4 Η χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Πειραματικά προκύπτει ότι για μία ορισμένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η χαρακτηριστική Τάσεως-Εντάσεως (V-I) ενός φ/β στοιχείου έχει τη μορφή του σχήματος 1-8, όπου διακρίνονται:

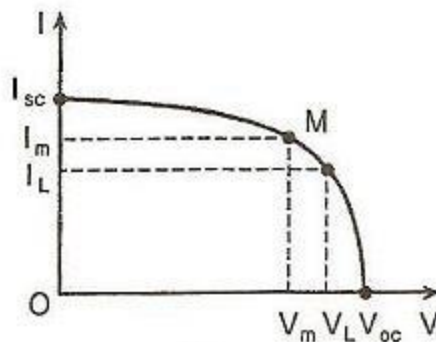
$V_{OC}$ , η τάση ανοιχτοκυκλώματος,

$I_{SC}$ , η ένταση βραχυκυκλώσεως,

$V_m$  και  $I_m$ , η τάση και η ένταση της μέγιστης ισχύος

$P_m = V_m \cdot I_m$ , το σημείο στο οποίο η παραγόμενη ισχύς γίνεται μέγιστη, είναι γνωστό ως το γόνατο της V-I χαρακτηριστικής καμπύλης, MPP (Maximum Power Point).

$V_L$  και  $I_L$ , η τάση και η ένταση τυχόντος σημείου στο οποίο το φ/β στοιχείο λειτουργεί, όταν παράγει ένταση  $I_L$  και ισχύ:  $P_L = V_L \cdot I_L$  [5].



Σχήμα 1-8 Η χαρακτηριστική Τάσεως-Εντάσεως (V-I) [5]

### 1.3.5 Επίδραση εξωτερικών παραγόντων στη λειτουργία των φ/β στοιχείων

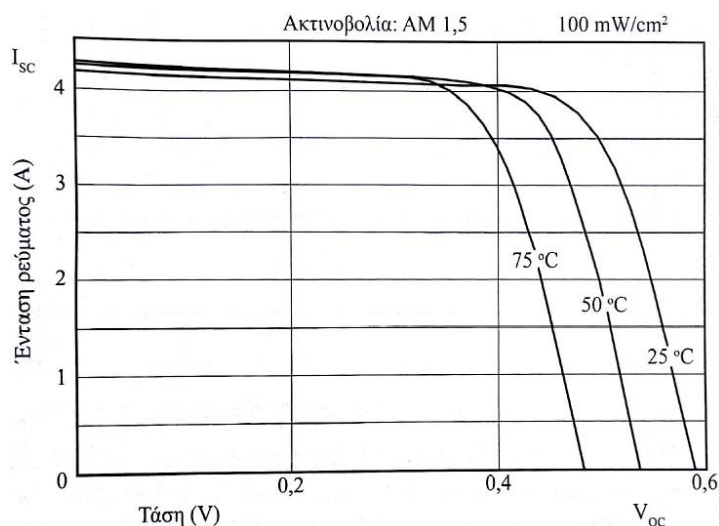
#### 1.3.5.1 Θερμοκρασιακή επίδραση

Η θερμοκρασιακή επίδραση στη χαρακτηριστική ρεύματος - τάσεως (I-V) ενός φωτιζόμενου φ/β στοιχείου πυριτίου υψηλής απόδοσης απεικονίζεται στα πειραματικά αποτελέσματα του σχήματος 1-9. Παρατηρούμε ότι, με την αύξηση της θερμοκρασίας του φ/β στοιχείου η τάση ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται σημαντικά ( $V_{OC} = 0,58$  V για τους  $25^\circ\text{C}$ , και  $V_{OC} = 0,47$  V στους  $75^\circ\text{C}$ ). Το ποσοστό μείωσης της τάσεως  $V_{OC}$  για αύξηση της θερμοκρασίας του φ/β στοιχείου κατά  $1^\circ\text{C}$  ποικίλλει από περίπου  $-0,25\%$  μέχρι  $-0,45\%$  για το σύννηθες θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας [6].

Επίσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{SC}$ ) τείνει να αυξηθεί με τη θερμοκρασία αλλά με πολύ αργό ρυθμό. Το ποσοστό αύξησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης,  $I_{SC}$ , για αύξηση της

θερμοκρασίας του φ/β στοιχείου κατά 1°C ποικίλλει από περίπου +0,01 % μέχρι +0,12% για το σύνθετες θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας [6].

Η μετατόπιση των χαρακτηριστικών I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στη μείωση της παρεχόμενης ισχύος από το φ/β στοιχείο. Πρακτικά, έχει διαπιστωθεί ότι σε σταθερές συνθήκες ηλιοφάνειας, η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς  $P_{MAX}$  μειώνεται από -0,3% μέχρι -0,5% ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας (°C). Οι κατασκευαστές οφείλουν να παρέχουν τη θερμοκρασία λειτουργίας, κατά την οποία εμφανίζεται η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς [6].



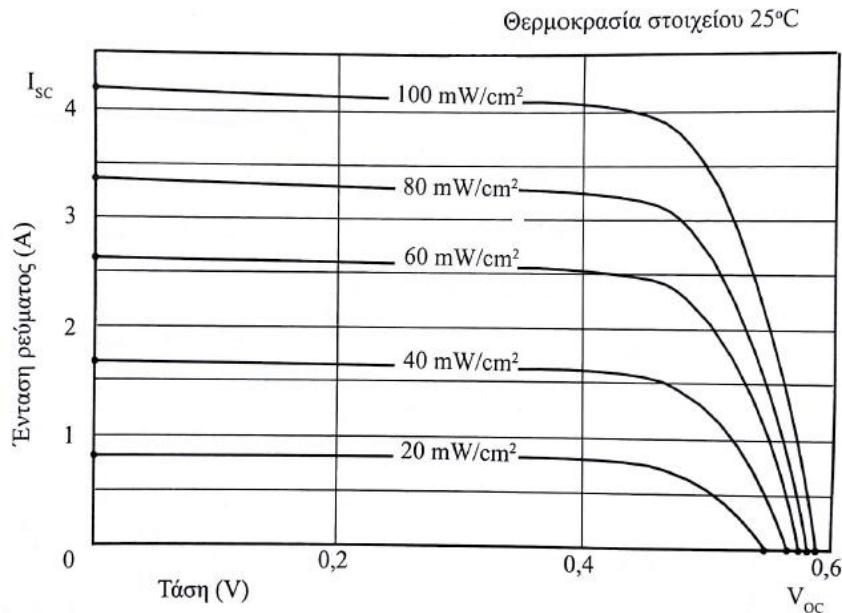
**Σχήμα 1-9** Μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V ενός φ/β στοιχείου ως προς τη θερμοκρασία του για εργαστηριακές συνθήκες ακτινοβολίας (φωτεινή ισχύς 100 mW/cm<sup>2</sup> και Αέριος μάζα = 1,5 - Η αέριος μάζα εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και ορίζεται ως ο λόγος της διαδρομής μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης προς το πάχος της ατμόσφαιρας ) [6]

Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία ενός φ/β πλαισίου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το υλικό των φ/β στοιχείων θερμαίνεται από την απορρόφηση των φωτονίων. Ως εκ τούτου, το φ/β στοιχείο εμφανίζει θερμοκρασία υψηλότερη κατά ΔT από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT εξαρτάται τόσο από την πυκνότητα της προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος στο φ/β στοιχείο, όσο και από το υλικό και τη γεωμετρία κατασκευής του [6].

### 1.3.5.2 Επίδραση της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας

Η επίδραση της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στην αποδιδόμενη χαρακτηριστική ρεύματος - τάσεως (I-V) ενός φ/β στοιχείου πυριτίου υψηλής απόδοσης απεικονίζεται στα πειραματικά αποτελέσματα του σχήματος 1-10. Παρατηρούμε ότι για σταθερή θερμοκρασία του φ/β στοιχείου (25°C) το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  αυξάνει (σχεδόν) γραμμικά με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας. Στα πειραματικά δεδομένα του σχήματος 1-10 έχουν εξεταστεί οι πυκνότητες ισχύος  $H = 20 \text{ mW/cm}^2$ ,  $40 \text{ mW/cm}^2$ ,  $60 \text{ mW/cm}^2$ ,  $80 \text{ mW/cm}^2$  και η ισχύς ενός ηλίου  $100 \text{ mW/cm}^2$  (ο ήλιος είναι μία μονάδα μέτρησης της φωτεινής ακτινοβολίας), με αποτέλεσμα το ρεύμα βραχυκύκλωσης που αναλογεί να μεταβάλλεται περίπου κατά πέντε φορές [6].

Αντιθέτως, η τάση ανοιχτοκύκλωσης δεν αυξάνει σημαντικά για την εξεταζόμενη μεταβολή στην πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σχήματος 1-10, η τάση ανοιχτοκύκλωσης,  $V_{OC}$ , μεταβάλλεται από την τιμή 0,55 V που αναλογεί για  $H = 20 \text{ mW/cm}^2$  μέχρι 0,59 όταν  $H = 100 \text{ mW/cm}^2$ . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το συνολικό ποσοστό μεταβολής του  $V_{OC}$  ανέρχεται στο 7,35% [6].



**Σχήμα 1-10** Η μεταβολή στη χαρακτηριστική I-V ενός φ/β στοιχείου υψηλής απόδοσης σε σχέση με τις συνθήκες φωτισμού (πυκνότητα φωτεινής ισχύος) για αμετάβλητη θερμοκρασία του υλικού του φ/β στοιχείου (25°C) [6]

### 1.3.5.3 Η επίδραση της ρύπανσης

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των φ/β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειάς τους από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φ/β πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των φ/β πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη [8].

Όταν η φ/β γεννήτρια βρίσκεται σε μια περιοχή όπου εκτιμάται ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φ/β πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή ( $\sigma_p$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο φ/β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνεια του είναι εντελώς καθαρή [8].

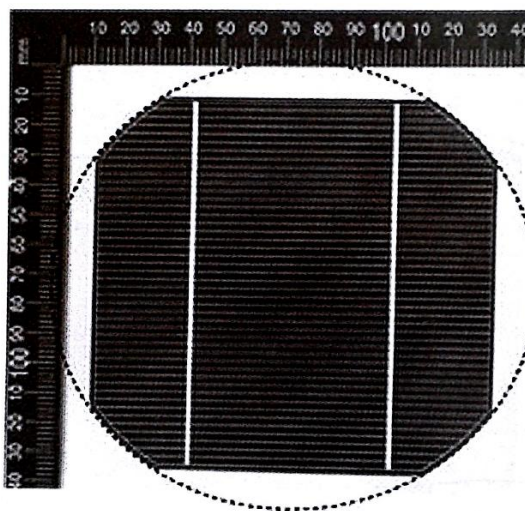
## 1.4 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατατάσσονται, ανάλογα με το υλικό της κατασκευής τους, σε φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (συντομογραφία «mono»), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (συντομογραφία «poly»), λεπτών υμενίων (συντομογραφία «tibbon») και αμόρφου πυριτίου (συντομογραφία «a-Si»), με πιο διαδεδομένους στο εμπόριο τους τρεις πρώτους τύπους.

### 1.4.1 Μονοκρυσταλλικά φ/β στοιχεία

Συνήθως, τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν κυκλικό σχήμα (διαμέτρου της τάξης των 6 ιντσών κατά μέγιστον), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν αποκοπεί οι απολήξεις από τις τέσσερις αντιδιαμετρικές χορδές των τόξων (όπως φαίνεται στο σχήμα 1-11), προκειμένου να επιτευχθεί μια πυκνότερη στοίβαση των στοιχείων σε δεδομένο εμβαδόν φέροντος πλαισίου. Η διάμετρος του κύκλου που εφάπτεται περιμετρικά στο στοιχείο, αποκαλύπτει τη διάμετρο του αρχικού μονοκρυστάλλου που αναπτύχθηκε με τη μέθοδο Czochralski. Ακολούθησε η κοπή του κρυστάλλου σε δίσκους (wafers) πάχους περίπου 300  $\mu\text{m}$ , από τους οποίους κατασκευάστηκε το μονοκρυσταλλικό φ/β στοιχείο πυριτίου του σχήματος 1-11 [6].

Οι υπόλοιποι τύποι φ/β στοιχείων παρέχονται συνήθως σε ορθογωνική γεωμετρία (τετραγωνική ή παραλληλόγραμμη), που επιτρέπει τη διαδοχική τοποθέτησή τους χωρίς την παρεμβολή ενδιάμεσων κενών χώρων, παρέχοντας με τον τρόπο αυτόν τη μεγαλύτερη δυνατή πυκνότητα στοίβασης φ/β στοιχείων ανά φέρον πλαίσιο [6].



**Σχήμα 1-11** Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου από το οποίο έχουν αποκοπεί τέσσερις αντιδιαμετρικοί κυκλικοί τομείς για την αύξηση της πυκνότητας στοίβασης των στοιχείων [6]

Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο έχουν πάχος γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 11 - 19% για το κάθε πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Τέλος, ένα

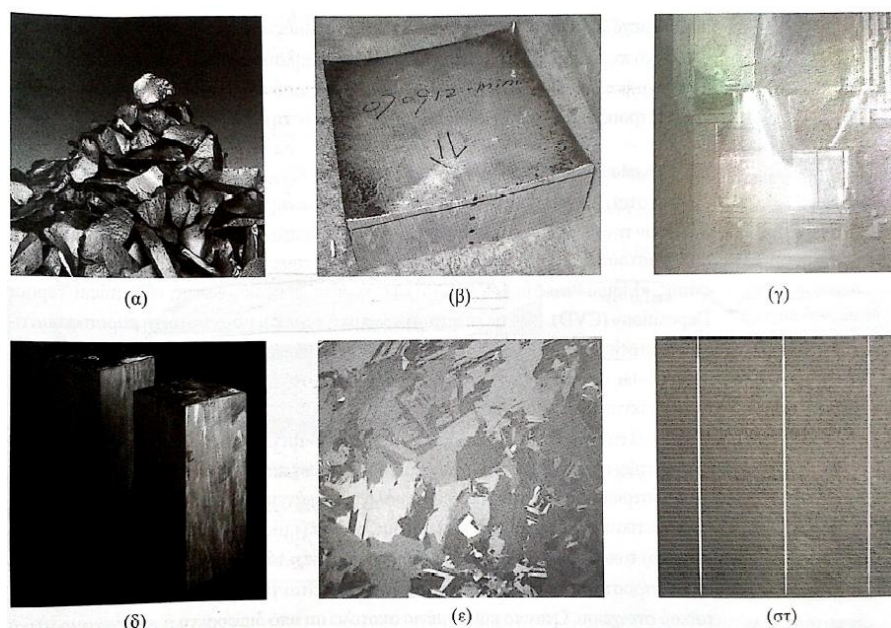


ακόμη χαρακτηριστικό αυτού του τύπου πλαισίων, είναι ότι έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και γι' αυτό είναι τα ακριβότερα στο εμπόριο.

## 1.4.2 Πολυκρυσταλλικά φ/β στοιχεία

Οι κρύσταλλοι του πολυκρυσταλλικού πυριτίου παράγονται σε μεγάλο βαθμό από πρώτη ύλη που προέρχεται από επαναχρησιμοποιημένο πυρίτιο ηλεκτρονικής καθαρότητας. Υπάρχουν δύο διαφορετικές κατασκευαστικές προσεγγίσεις για την κατασκευή τετραγωνικών δίσκων πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-silicon wafers) [6].

Στην πρώτη κατασκευαστική τεχνική, που αποτυπώνεται διεξοδικά στο σχήμα 1-12, οι μικροκρύσταλλοι του πυριτίου (σχήμα 1-12.α) τοποθετούνται σε καλούπι ορθογωνικής γεωμετρίας (από Quartz), το οποίο θερμαίνεται στο σημείο τήξης, και παρέχεται πολυκρύσταλλος στον οποίο πολλά μικρά τμήματά του έχουν κρυσταλλωθεί αυτοτελώς σε μονοκρυσταλλική μορφή. Υπάρχουν αρκετά κοινά με τη μέθοδο Czochralski, αλλά το λαμβανόμενο προϊόν μετά τη χύτευση εμφανίζει πολυκρυσταλλική μορφή και έχει γεωμετρία ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις στη βάση περίπου 50 x 50 cm (σχήμα 1-12.β). Στη συνέχεια, ο πολυκρύσταλλος καθαρίζεται από το εξωτερικό τμήμα του, καθώς κόβεται με αδαμαντοτροχούς κατά το μήκος του (σχήμα 1-12.γ). Μετά την κοπή προκύπτουν επιμέρους ράβδοι μικρότερου μεγέθους (poly-silicon bricks) γεωμετρίας ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με διάσταση στη βάση τους περίπου 15 cm x 15 cm (σχήμα 1-12.δ). Η κάθε μία ορθογωνική ράβδος κόβεται σε λεπτά εγκάρσια φύλλα (wafers), πάχους περίπου 350 μm, που αποτελούν το βασικό υλικό για την κατασκευή των πολυκρυσταλλικών φ/β στοιχείων (σχήμα 1-12.ε). Στη συνέχεια, με τη χρήση χημικών μεθόδων και τεχνολογία μικροηλεκτρονικής καθαρότητας διαμορφώνεται το πολυκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου, που βασίζει τη λειτουργία του στη δίοδο επαφής p-n (σχήμα 1-12.στ) [6].



**Σχήμα 1-12** Τα διαδοχικά στάδια για την κατασκευή ενός πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου [6]

Σε μια εναλλακτική κατασκευαστική τεχνική, μικρο-κρύσταλλοι πυριτίου τοποθετούνται σε λεπτό επίπεδο ορθογώνιο καλούπι, στο οποίο θερμαίνονται και συντήκονται στα όρια των κόκκων τους, και με διεργασία πυροσυσσωμάτωσης διευρύνουν το μέγεθός τους, κατασκευάζοντας απευθείας το «wafer» [6].

Το πάχος των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως χαμηλότερη στο εμπόριο. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 11 έως και 16% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ).

### 1.4.3 Φ/β στοιχεία λεπτών υμενίων

Τα φ/β στοιχεία λεπτών υμενίων καταλαμβάνουν σημαντικό τμήμα της αγοράς και βασίζουν την κατασκευή τους σε συμφέρουσες βιομηχανικές τεχνικές, που μπορούν να εφαρμοστούν σε παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Τέτοιες τεχνικές είναι η επιταξία υγρής φάσης, «Liquid Phase Epitaxy» (LPE), και η επιταξία αερίου φάσης, «Chemical Vapour Deposition» (CVD). Μια άλλη κατασκευαστική τεχνική, με αντίστοιχη παρασκευαστική δυνατότητα και πολύ καλύτερα αποτελέσματα, αποτελεί η μοριακή επιταξία δέσμης, «Molecular Beam Epitaxy» (MBE). Η μέθοδος αυτή είναι πρωτίστως ερευνητική και αντενδείκνυται για βιομηχανική χρήση και εφαρμογή μεγάλης κλίμακας [6].

Τα φ/β στοιχεία λεπτών υμενίων κατασκευάζονται από την εναπόθεση τουλάχιστον δύο λεπτών ημιαγωγικών υμενίων (πάχους  $\approx 1 \mu\text{m}$ ) πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα. Το υπόστρωμα ενδείκνυται να είναι υάλινη επιφάνεια, ή μεταλλική, ή κρύσταλλος διαφορετικού ημιαγωγού). Τα ημιαγωγικά υμενία (ημιαγωγός τύπου n και ημιαγωγός τύπου p) τοποθετούνται στην άνω όψη, η οποία δέχεται το φωτισμό, και εγκαθίστανται το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού που απαιτείται για τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [6].




Ουσιαστικά πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου και γι' αυτό τα φ/β στοιχεία λεπτών υμενίων αποτελούν τη φθηνότερη λύση στο εμπόριο. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτού του τύπου έχει φτάσει πλέον γύρω στο 11-12% ενώ το πάχος τους είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18% [6].

Για τα φ/β στοιχεία πυριτίου δεν υφίσταται καμία απολύτως ανησυχία ή/και κανένας προβληματισμός ως προς τις ενδεχόμενες επιπτώσεις των χρησιμοποιούμενων υλικών στην υγεία των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται κοντά σε αυτά. Όμως, στην τεχνολογία φ/β λεπτών υμενίων ενδεχομένως να υπάρχουν ορισμένα τοξικά υλικά κατασκευής, λόγω

των οποίων θα πρέπει να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των πλαισίων στην κάθε εφαρμογή, πριν από την τελική επιλογή και χρήση [6].

Για ευκολότερη μελέτη των χαρακτηριστικών του κάθε τύπου φωτοβολταϊκών στοιχείων παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας.

**Πίνακας 1-1** Σύγκριση των διάφορων τύπων φ/β στοιχείων [9]

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών			
ΤΥΠΟΣ	'Λεπτού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	a-Si: 4,5-6,5% μ-Si: 8-9% CIS-CIGS: 6-12% CdTe: 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m <sup>2</sup>	7-9 m <sup>2</sup>	5,5-9 m <sup>2</sup>

## 1.5 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων

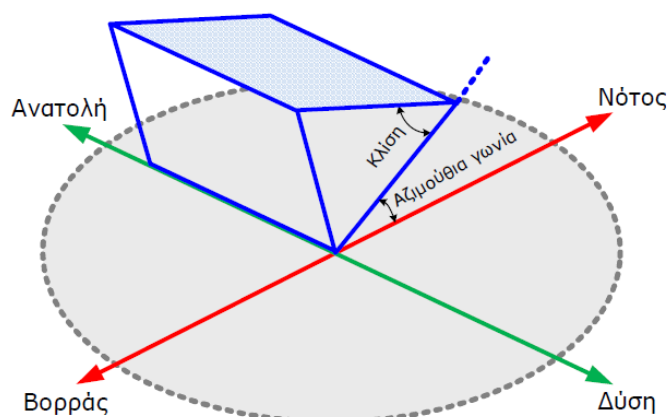
### 1.5.1 Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγικότητας των Φ/Β πλαισίων, θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, εφόσον η πορεία του ήλιου αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με τη μέρα του έτους, τεκμαίρεται πως, για να παράγει ένα πλαίσιο τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφεται ώστε να μπορεί να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας [7].

Πρακτικά, η μηχανική πολυπλοκότητα και το κόστος ενός μηχανισμού που θα επέτρεπε την κίνηση των πλαισίων σύμφωνα με τον παραπάνω τρόπο, καθιστά εξαιρετικά δύσκολη και δαπανηρή την εφαρμογή του σε κτηριακά φ/β συστήματα, αλλά και σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πάρκων. Έτσι στη πλειονότητα των φ/β συστημάτων επιλέγεται σταθερός προσανατολισμός των πλαισίων, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στις 90°. Η επίτευξη αυτού του στόχου έγκειται στη σωστή επιλογή της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας του πλαισίου. Η κλίση του πλαισίου εκφράζεται με τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο της επιφάνειας του φ/β πλαισίου και το οριζόντιο επίπεδο, ενώ η αζιμούθια γωνία σχηματίζεται



πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κεκλιμένης πλευράς του πλαισίου και τον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-13 [7].

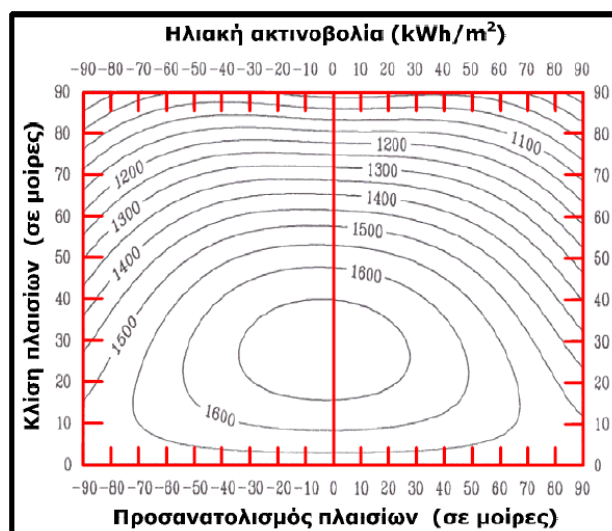


**Σχήμα 1-13** Γραφική απεικόνιση της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας ενός φ/β πλαισίου που βρίσκεται στο Βόρειο ημισφαίριο [7]

Για το βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του φ/β πλαισίου για τη μέγιστη παραγωγή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι περίπου  $0^\circ$  (κατεύθυνση προς νότο). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια σταθερής κλίσης, επιτυγχάνεται για Νότιο προσανατολισμό και κλίση περί των  $30^\circ$  [7].

Δεδομένου ότι στην περίπτωση των περισσότερων φ/β εγκαταστάσεων οι βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού της φ/β συστοιχίας μπορεί να είναι ανέφικτες (λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από τις δεδομένες διαθέσιμες επιφάνειες), θα πρέπει να γίνει εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί η φ/β συστοιχία. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που προκύπτουν από τις διαθέσιμες επιφάνειες, όπου θα τοποθετηθούν τα φ/β πλαίσια, προτιμώνται γενικά επιφάνειες νότιου προσανατολισμού με απόκλιση έως  $70^\circ$  από την κατεύθυνση του Νότου, και κλίσης στο εύρος  $0^\circ$ - $50^\circ$ . Σημειώνεται ότι η χρήση γωνιών κλίσης άνω των  $10^\circ$ - $15^\circ$  διευκολύνει τον αυτοκαθαρισμό των πλαισίων από σωματίδια σκόνης και άλλους ρύπους μέσω της βροχής [7].





Στο σχήμα 1-14 και στον πίνακα 1-2 παρατίθενται ενδεικτικά η επίδραση της τιμής της κλίσης και του προσανατολισμού στην ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα ενός φ/β συστήματος σε απόλυτες τιμές και σε επί τοις εκατό ποσοστά αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις υποτίθεται ότι δεν υπάρχουν σκιασμοί. [7]



**Σχήμα 1-14** Επίδραση της τιμής της κλίσης και του προσανατολισμού στην διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>/έτος) στο επίπεδο των ηλιακών πλαισίων ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος στην Αττική [7]

**Πίνακας 1-2** Ποσοστά παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος για διαφορετικές γωνίες εγκατάστασης των φ/β πλαισίων και διαφορετικούς προσανατολισμούς στον ορίζοντα. Οι γωνίες εγκατάστασης παραμένουν σταθερές καθ' όλο το έτος. Ως βέλτιστη γωνία κλίσης έχει ληφθεί η γωνία των 30° [9]

**Ενδεικτική απόδοση ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση**

Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο	Προσανατολισμός		
	Νότιος	Νοτιοανατολικός Νοτιοδυτικός	Ανατολικός Δυτικός
0 ° 	90%	90%	90%
15 ° 	98%	95%	88%
30 ° 	100%	95%	85%
90 ° 	60%	60%	50%

## 1.5.2 Προβλήματα σκιασμών

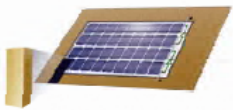




Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας ο οποίος επιδρά καθοριστικά στην ενεργειακή αποδοτικότητα ενός φ/β συστήματος είναι η ύπαρξη σκιασμών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ένα φ/β πλαίσιο τόσο τα φ/β στοιχεία (ή μέρος αυτών) όσο και τα φ/β πλαίσια μιας στοιχειοσειράς συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά, γίνεται κατανοητό ότι ακόμα κι ο σκιασμός ενός μέρους της φ/β συστοιχίας μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος συγκριτικά με την αναμενόμενη τιμή αυτής. Αναλυτικότερα, το συνολικό ρεύμα μιας στοιχειοσειράς φ/β πλαισίων καθορίζεται από το μειωμένο ρεύμα του σκιασμένου τμήματος της φ/β συστοιχίας. Βέβαια στην περίπτωση που ο σκιασμός περιορίσει την τάση του (των) σκιασμένου(ων) πλαισίου(ων) αρκετά χαμηλά ώστε να εισέλθει σε αγωγή η δίοδος παράκαμψης (·η δίοδος αυτή αναλαμβάνει να δημιουργήσει εναλλακτική διαδρομή ρεύματος όταν υπάρχουν σκιασμένα, ή κατεστραμμένα φ/β στοιχεία, ή ομάδες φ/β στοιχείων), το πλαίσιο αυτό εξαιρείται της ηλεκτροπαραγωγής. [7, 6]

Από μία άλλη οπτική γωνία, μόνιμοι και επαναλαμβανόμενοι τοπικοί σκιασμοί σε ώρες υψηλής ακτινοβολίας δύναται να καταπονήσουν το σκιαζόμενο φ/β πλαίσιο, προκαλώντας την πρόωρη γήρανση αυτού. Συνεπώς είναι σημαντικό να αποφεύγονται σκιασμοί, έστω και από αντικείμενα μικρού όγκου όπως κολώνες, κεραιές ή ηλεκτρικά καλώδια ή, ακόμη περισσότερο, από δένδρα, παρακείμενα κτήρια, ακόμα και από μικρά χορτάρια (αν πρόκειται για φ/β πάρκο) κλπ.

Η επιλογή της θέσης έδρασης της φ/β συστοιχίας θα πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρξουν σκιασμοί καθ' όλο το έτος και ειδικά τις ώρες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Εάν στην τοποθεσία έδρασης του φ/β εξοπλισμού υπάρχουν μόνιμοι ή επαναλαμβανόμενοι σκιασμοί (π.χ. σκίαση από παρακείμενα κτήρια, κολώνες, στηθαίο, δέντρα κλπ.) για μεγάλο χρονικό διάστημα γύρω από το ηλιακό μεσημέρι (από 09:00 έως 15:00), τότε η θέση εγκατάστασης θεωρείται ακατάλληλη. Τέλος, για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας απρόσκοπτης λειτουργίας του Φ/Β συστήματος θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο εμφάνισης μελλοντικών σκιασμών λόγω ανοικοδόμησης παρακείμενων κτηρίων. Εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε ότι ο γενικός κανόνας ορθής τοποθεσίας έδρασης του Φ/Β εξοπλισμού είναι ο ορίζοντας προς Νότο να είναι ελεύθερος και χωρίς εμπόδια [9].

Στον πίνακα 1-3 φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές απώλειας ισχύος για τέσσερις διαφορετικούς τρόπους σκίασης σε δύο διαφορετικές τοπολογίες φωτοβολταϊκών συστοιχιών [9].

Πίνακας 1-3 [9]

Απώλειες από σκίαση			
			
Τρόπος σκίασης	Σκίαση (%)	Ενδεικτική απώλεια ισχύος (1 string x 9 modules)	Ενδεικτική απώλεια ισχύος (3 string x 3 modules)
	0,15%	-3,7%	-1,7%
	2,6%	-16,7%	-7%
	11,1%	-36,5%	-30,5%
	12,5%	-18,3%	-17%

### 1.5.3 Βάσεις στήριξης και ιχνηλάτες

Ο ήλιος ακολουθεί την ίδια πορεία κατά την διάρκεια όλων των εποχών από την ανατολή στην δύση καθημερινά όλες τις εποχές. Παράλληλα κινείται επίσης από το Βορρά μέχρι το Νότο, καθώς οι εποχές αλλάζουν. Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά πλαίσια έχουν μέγιστη απόδοση και παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια όταν είναι τοποθετημένα 90° σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία .

Η στήριξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται συνήθως με βάσεις αλουμινίου ή γαλβανισμένες (ή με συνδυασμό υλικών). Στο εμπόριο διατίθενται τυποποιημένες βάσεις για διάφορους τύπους πλαισίων. Τα πιο εξελιγμένα συστήματα στήριξης πληρούν τις προδιαγραφές DIN 1055, DIN 4113, DIN 18800 και έχουν μεγάλη αντοχή στην καταπόνηση. Η τοποθέτηση σε οικόπεδα γίνεται είτε με τιμεντένιες βάσεις ή με πασσαλόπηξη ή με ειδικές βιδωτές βάσεις. Για τα κτίρια (δώματα και στέγες) υπάρχει μεγάλη ποικιλία τυποποιημένων βάσεων στήριξης για όλες τις εφαρμογές [8, 9].

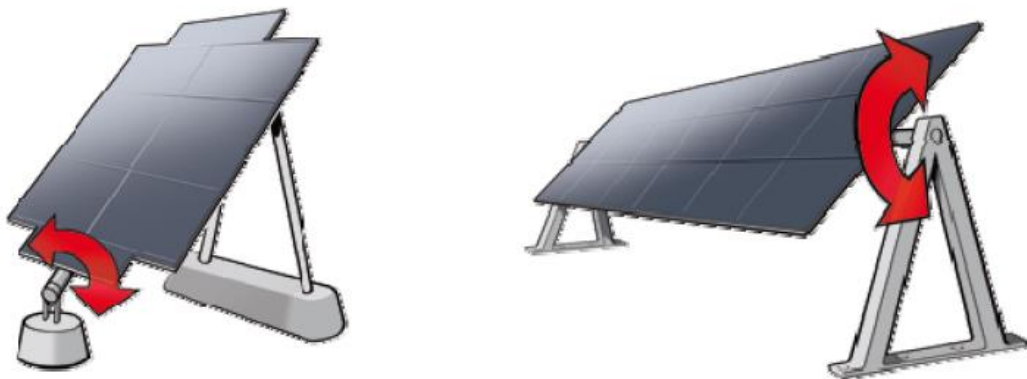


**Σχήμα 1-15** Βάσεις στήριξης φ/β πλαισίων σε φ/β πάρκα [9, 34]

Ένας δεύτερος τρόπος στήριξης είναι οι ιχνηλάτες, ή ηλιοστάτες (trackers). Οι ιχνηλάτες είναι συστήματα στήριξης επί εδάφους που ακολουθούν την πορεία του ήλιου εκμεταλλευόμενοι περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και αυξάνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος (συνήθως κατά 25%-40% - εκτίμηση για ένα έτος, για την Ελλάδα), αυξάνοντας παράλληλα το κόστος και τα λειτουργικά έξοδα της επένδυσης. Διακρίνονται σε:

- Ιχνηλάτες καθέτου άξονα (μονού συστήματος άξονα) για κάθετη παρακολούθηση του ήλιου
- Ιχνηλάτες οριζόντιου άξονα (μονού συστήματος άξονα) για οριζόντια παρακολούθηση του ήλιου
- Ιχνηλάτες διπλού άξονα (διαξονικού συστήματος άξονα) για παράλληλη κάθετη και οριζόντια παρακολούθηση του ήλιου.

Για να αποφεύγονται οι σκιάσεις μεταξύ τους, απαιτείται μεγαλύτερη έκταση απ' ό,τι για τις σταθερές βάσεις (συνήθως 1,5-3 φορές μεγαλύτερη έκταση). [8, 9]



**Σχήμα 1-16** Παραδείγματα μονοαξονικών ιχνηλατών [9]



Σχήμα 1-17 Παραδείγματα διαξονικών ιχνηλατών [9]

### 1.5.4 Η μέγιστη δυνατή συλλογή ακτινοβολίας από σταθερό συλλέκτη

Όσον αφορά τον τρόπο εγκατάστασης ενός απλού-σταθερού ηλιακού συλλέκτη, για την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής συλλογής ακτινοβολίας, ο συλλέκτης σταθερής γωνίας πρέπει να είναι προσανατολισμένος προς τον Ισημερινό (προς το Νότο για το Βόρειο ημισφαίριο) με κλίση περίπου ίση προς το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής [6].

Εναλλακτικά, για την επίτευξη μεγαλύτερης απορρόφησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο εποχικές γωνίες κλίσης για την καλύτερη αντιστάθμιση της γωνίας ύψους του Ηλίου, ενώ η αζιμούθια γωνία του πλαισίου εξακολουθεί να παραμένει πάντοτε προσανατολισμένη προς το Νότο. Κατά τη χειμερινή περίοδο η κλίση του φ/β πλαισίου (γωνία  $\alpha$ ) θα πρέπει να ορίζεται περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  της περιοχής επαυξημένη κατά  $10^\circ$ , ( $\varphi + 10^\circ$ ), ενώ για τη θερινή περίοδο η κλίση θα πρέπει να ορίζεται περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  ελαττωμένη κατά  $10^\circ$ , ( $\varphi - 10^\circ$ ) [6].

Για ακόμα μεγαλύτερη συλλογή της ηλιακής ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα προσαρμοσμένο σε τρεις διαφορετικές γωνίες κλίσης των πλαισίων, ανάλογα με την εποχή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1-4. [6]

**Πίνακας 1-4** Η επιλογή για τις βέλτιστες γωνίες ( $\alpha$ ,  $\theta$ ) του συλλέκτη ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη συλλογή ενέργειας από ένα σταθερό συλλέκτη ανάλογα με την περίοδο του έτους ( $\alpha$  = κλίση συλλέκτη,  $\theta$  αζιμούθια γωνία συλλέκτη και  $\varphi$  γεωγραφικό πλάτος της περιοχής) [6]

Περίοδος	Χειμερινή	Εαρινή Ισημερία	Θερινή	Φθινοπωρινή ισημερία
Διάρκεια	15/10 – 29/2	1/3 – 11/4	12/4 – 2/9	3/9 – 14/10
Βέλτιστη θέση πλασίου (γωνίες $\alpha$ , $\theta$ )	$\alpha = \varphi + 10^\circ$ $\theta = 0^\circ$	$\alpha = \varphi$ $\theta = 0^\circ$	$\alpha = \varphi - 10^\circ$ $\theta = 0^\circ$	$\alpha = \varphi$ $\theta = 0^\circ$



## 1.5.5 Καλωδιώσεις

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτεί τη χρήση καλωδίων DC και AC. DC καλώδια χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των πάνελ μεταξύ τους και για τη σύνδεση των κλάδων/στοιχειοσειρών/συστοιχιών (string) με τις εισόδους του αντιστροφέα ενώ AC καλώδια ισχύος, συμβατικού τύπου, χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των αντιστροφέων σε τριφασικό σύστημα και την τελική σύνδεση με το ΔΕΔΗΕ [8].

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση εν σειρά των φ/β πάνελ είναι συνήθως κατασκευασμένα για χρήση σε εξωτερικούς χώρους. Η διατομή τους είναι συνήθως  $4 \text{ mm}^2$  –  $6 \text{ mm}^2$ . Τα καλώδια αυτά είναι συνήθως μονοπολικά και με διπλή μόνωση, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου των Φ/Β πάνελ ή σφάλματα γης. Κατασκευάζονται επίσης πολύκλινα ώστε να διαθέτουν την απαραίτητη ευελιξία για τη σύνδεση τους, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται γύρω στο 1 μέτρο [8].

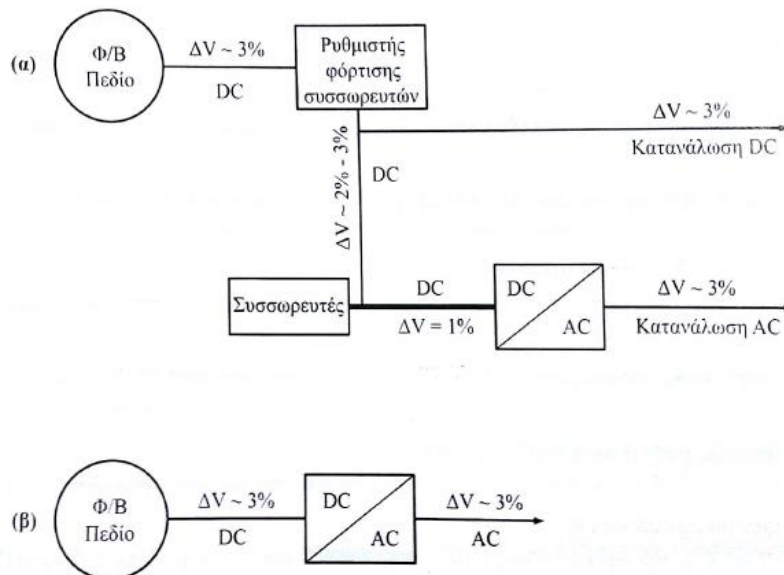


**Σχήμα 1-18** Τυπικά καλώδια φωτοβολταϊκών πλαισίων [8]

Το συχνά χρησιμοποιούμενο σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καλώδιο με μόνωση λάστιχο και μανδύα από νεοπρένιο τύπου H07 RN-F στην τυπική (standard) έκδοση του επιτρέπεται σε θερμοκρασίες έως  $60^\circ\text{C}$  και έτσι είναι κατάλληλο για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα σε περιορισμένο εύρος. Για το σκοπό αυτό, οι κατασκευαστές προχώρησαν στη δημιουργία ειδικών καλωδίων για φωτοβολταϊκές εφαρμογές (solar cables). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους είναι ότι είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες και στην υπεριώδη (UV) ακτινοβολία με μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών (της τάξης από  $-55^\circ\text{C}$  έως  $125^\circ\text{C}$ ). Επιπλέον κάποιοι κατασκευαστές προσφέρουν καλώδια με μεταλλικό πλέγμα για μεγαλύτερη προστασία από τα τρωκτικά και καλύτερη προστασία από υπερτάσεις [8].

Οι διατομές των DC καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των φ/β πάνελ με τους αντιστροφείς (αναλύονται στο επόμενο υποκεφάλαιο) κυμαίνονται συνήθως από  $4$ - $16 \text{ mm}^2$ . Ο ακριβής προσδιορισμός της διατομής εξαρτάται κυρίως από τις απώλειες του καλωδίου (σχήμα 1-19) και όχι ιδιαίτερα από τη θερμική φόρτιση η οποία είναι μικρή,

λόγω του μικρού σχετικά ρεύματος λειτουργίας των Φ/Β πάνελ. Έτσι, με δεδομένη την γραμμική αύξηση των απωλειών με το μήκος των καλωδίων, είναι σκόπιμο ο κάθε μελετητής να προβαίνει σε υπολογισμούς απωλειών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αποστάσεων αρκετών δεκάδων μέτρων, λαμβάνοντας υπόψη και την αντίσταση των καλωδίων. Είναι επίσης σκόπιμο να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χρωματισμοί καλωδίων για το θετικό και τον αρνητικό πόλο, συνήθως κόκκινο και μαύρο. Είναι δυνατόν επίσης να χρησιμοποιηθούν και μεγαλύτερες διατομές DC καλωδίων της τάξης των 25-70 mm<sup>2</sup>, σε περιπτώσεις που δεν επαρκεί ο αριθμός των εισόδων ενός αντιστροφέα για την απευθείας σύνδεση όλων των επιμέρους DC καλωδίων των κλάδων. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά συνηθισμένη κυρίως σε κεντρικούς αντιστροφείς ονομαστικής ισχύος 100kW και άνω. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα κυτία τα οποία ομαδοποιούν πολλά ζεύγη καλωδίων κλάδων σε ένα ζεύγος. Στις περιπτώσεις αυτές τα κυτία αυτά είναι επίσης συνήθως εφοδιασμένα με απαγωγείς υπερτάσεων και DC διακόπτες φορτίου [8].



**Σχήμα 1-19** Οι μέγιστες επιτρεπτές απώλειες στους κλάδους μιας φ/β εγκατάστασης (ως ποσοστό της ονομαστικής τάσεως λειτουργίας του κλάδου). (α) Εγκατάσταση με αποθήκευση της ενέργειας σε συσσωρευτές, (β) εγκατάσταση χωρίς αποθήκευση της ενέργειας [6]

Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις διαθέτουν και διατάξεις επιτήρησης κλάδων (string monitoring) ώστε να δίνεται πληροφορία στον αντιστροφέα και το σύστημα εποπτείας για τη δυσλειτουργία ενός κλάδου. Στις περιπτώσεις αυτές ο μελετητής μηχανικός θα πρέπει να λαμβάνει επίσης υπόψη του για τον υπολογισμό της διατομής, πέραν των απωλειών, και το θερμικό φορτίο λόγω του παραλληλισμού σημαντικού αριθμού κλάδων [8].

Επιπλέον, κατά τη φάση κατασκευής του έργου, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την προσεκτική όδευση των καλωδίων κατά τις συνήθεις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η γεινίαση των καλωδίων, η χρήση σωλήνων και η ανάγκη προστασίας από τα τρωκτικά [8].



Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται για τη σωστή διασύνδεση των καλωδίων τόσο μεταξύ των πάνελ (δηλαδή από το (+) ενός πάνελ στο (-) του επόμενου κτλ.) όσο και μεταξύ των κλάδων των πάνελ και των εισόδων του αντιστροφέα. Σε περίπτωση χαλαρής σύνδεσης είναι πιθανόν να εμφανιστεί τόξο αυξάνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Επιπλέον, η ύπαρξη υψηλής σχετικά DC τάσης επιβάλλει ώστε η σύνδεση των καλωδίων να πραγματοποιείται από εξειδικευμένο προσωπικό με τη δέουσα προσοχή. Επίσης, συνίσταται η σύνδεση αυτών των καλωδίων να πραγματοποιείται τη νύχτα, που ο ήλιος έχει δύσει, ώστε να προστατεύονται οι σύνδεσμοι, (σχήμα 1-20), κατά το μέγιστο δυνατό από την εμφάνιση του προαναφερθέντος τόξου [8].

Έτσι, οι παραπάνω απαιτήσεις οδήγησαν στην επικράτηση στην αγορά λύσεων τύπου “plug and play” με συνδέσμους καλωδίων που εξασφαλίζουν την απουσία επαφής με γυμνό αγωγό και τη μικρή ωμική αντίσταση (της τάξης των 5mΩ και μικρότερη). Το σχήμα 1-20 παρουσιάζει παραδείγματα συνδέσμων καλωδίων:

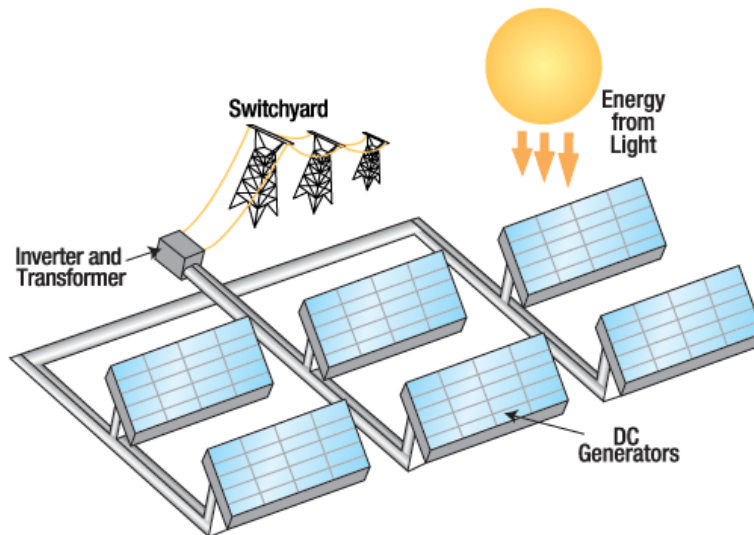


**Σχήμα 1-20** Σύνδεσμοι DC φωτοβολταϊκών καλωδίων [8]

Αναφορικά με τα καλώδια του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) χρησιμοποιούνται οι συμβατικοί τύποι καλωδίων (π.χ. NYY, NYM, NYCWY) εφαρμόζοντας τις συνήθειες πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας αναφορικά με τον υπολογισμό της διατομής τους, τον τρόπο τοποθέτησης και την προστασία τους. [8]

### **1.5.6 Αντιστροφείς**

Ως γνωστόν η ισχύς που παράγεται από τα φ/β πλαίσια είναι σε DC μορφή. Προκειμένου η ισχύς αυτή να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις ανάγκες μας μέσω της υπάρχουσας δομής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να μετατραπεί σε AC. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω κατάλληλων διατάξεων που ονομάζονται αντιστροφείς (inverters) [5].



**Σχήμα 1-21** Σχηματική αναπαράσταση φ/β πάρκου με αντιστροφείς για επικοινωνία με το υπάρχον AC δίκτυο [5]

Ο αντιστροφέας (inverter) είναι η καρδιά του φ/β συστήματος και σε αυτόν αναφέρονται οι κώδικες και τα πρότυπα για τις προδιαγραφές κατασκευής, απόδοσης, ασφάλειας και σύνδεσης με το δίκτυο. Ένας ηλιακός αντιστροφέας, ή φωτοβολταϊκός αντιστροφέας, μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ένα εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) κατάλληλης συχνότητας που να μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο ή ένα απομονωμένο φορτίο. Η μετατροπή αυτή γίνεται με τη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος [5].

Μια πολύ σημαντική λειτουργία των φ/β αντιστροφέων είναι αυτή του εντοπισμού του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPPT –Maximum Power Point Tracker), μέσω της οποίας καταφέρνουν να πάρουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα φ/β πάνελ. Τα φ/β στοιχεία παρουσιάζουν μια σύνθετη σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της συνολική αντίστασης, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα μία μη γραμμική καμπύλη απόδοσης εξόδου. Ο σκοπός του συστήματος MPPT είναι να δοκιμάζει την έξοδο των στοιχείων και να καθορίσει το ζεύγος τάσης και ρεύματος που επιτυγχάνει τη μέγιστη ισχύ για κάθε δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες. [5]

### 1.5.6.1 Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)

Οι κεντρικοί αντιστροφείς παρουσιάζουν μεγάλα επίπεδα ισχύος (από 30-50 kW έως 1-2 MW) και χρησιμοποιούνται σε σταθμούς μεγάλης ισχύος. Σε περιπτώσεις αρκετά μεγάλης ισχύος συνοδεύονται και από μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης για την απευθείας διασύνδεση στο δίκτυο Μέσης Τάσης του ΔΕΔΗΕ.

Οι σύγχρονοι κεντρικοί αντιστροφείς χρησιμοποιούν insulated-gate bipolar transistor (IGBT) με μεγάλες συχνότητες μεταγωγής, τα οποία σε συνδυασμό με εξελιγμένες τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) υλοποιούμενων ψηφιακά δημιουργούν σχεδόν ημιτονοειδή ρεύματα εξόδου, κάτι που καθιστά χαμηλή την χρήση φίλτρων. [8]

### **1.5.6.2 Αντιστροφείς συστοιχιών (string inverters)**

Οι αντιστροφείς συστοιχιών χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθμούς μικρής και μέσης ισχύος. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη παράλληλη σύνδεση ενός αριθμού συστοιχιών (strings) στις αντίστοιχες εισόδους του αντιστροφέα. Οι συγκεκριμένοι αντιστροφείς μπορεί να είναι μονοφασικοί και τριφασικοί, ενώ μπορεί να είναι με μετασχηματιστή ή χωρίς. Διαθέτουν αρκετή ευελιξία αναφορικά με τον αριθμό των πάνελ που μπορεί να συνδεθεί στις εισόδους τους, αρκεί φυσικά να μην παραβιάζονται οι μέγιστες τιμές ασφαλείας τους για την τάση και το ρεύμα. Ακόμη είναι πολύ σημαντικό να συνδέονται στις εισόδους τους με τον ίδιο αριθμό και τύπο φωτοβολταϊκών πλαισίων. [8]

### **1.5.6.3 Αντιστροφείς πολλαπλών συστοιχιών (multi-string inverters)**

Οι αντιστροφείς πολλαπλών συστοιχιών χρησιμοποιούνται όταν σε έναν αντιστροφέα είναι απαραίτητο να συνδεθούν διαφορετικά πάνελ, όσον αφορά την ονομαστική ισχύ τους, τον αριθμό των πάνελ που αποτελούν τη συστοιχία, τον κατασκευαστή κτλ. Στην περίπτωση αυτή στην ουσία κάθε είσοδος είναι ανεξάρτητη από τις άλλες και διαθέτει τους δικούς της ελεγκτές μέγιστης ισχύος (MPPT) και μετατροπείς. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων επιβάλλει τη σύνδεση διαφορετικών πλαισίων ή σε περιπτώσεις όπου μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά εγκατάστασης που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας, όπως είναι η κλίση των πάνελ, ή ο προσανατολισμός τους, ή η ύπαρξη προβλημάτων σκίασης, γεγονός τα οποία οδηγούν σε διαφορετικά σημεία μέγιστης ισχύος για την κάθε συστοιχία και συνεπώς απαιτείται η σύνδεση τους σε διαφορετικό ελεγκτή μέγιστης ισχύος (MPPT), ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση της απόδοσης. [8]

### **1.5.6.4 Μικρο-αντιστροφείς πλαισίου (micro inverters)**

Οι μικρο - αντιστροφείς πλαισίου αποτελούν μία σχετικά νέα κατηγορία χαμηλής ισχύος (έως περίπου 300W) και ενσωματώνονται στην πίσω όψη των φ/β πάνελ. Σκοπός της χρήσης τους αποτελεί η βέλτιστη λειτουργία της Φ/Β εγκατάστασης ανά κάθε πάνελ χωριστά. Οι αντιστροφείς αυτοί παρουσιάζουν ενδιαφέρον κυρίως για μικρές οικιακές εγκαταστάσεις με σημαντικά προβλήματα σκίασης, ή προβλήματα διαφορετικών κλίσεων μεταξύ των πλαισίων, ή έντονης τοπικής ρύπανσης σωματιδιακής φύσης (όπως σκόνη) [6, 8].

## **1.6 Ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων**

Η ισχύουσα σήμερα νομοθεσία δεν προβλέπει την υποχρεωτική συλλογή και ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών, ενώ σχεδιάζεται και υλοποιείται εθελοντικά από τη βιομηχανία φωτοβολταϊκών. Συγκεκριμένα, η ευρωπαϊκή βιομηχανία φωτοβολταϊκών έχει δεσμευτεί να συλλέγει το 65% κατ' ελάχιστον των φωτοβολταϊκών που έχουν εγκατασταθεί στην Ευρώπη από το 1990 και να ανακυκλώνει το 85% των υλικών (Πρωτοβουλία PVCYCLE) [9].

Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών τεχνολογίας τελουριούχου καδμίου (CdTe) η υποχρέωση ανακύκλωσης αποτελεί ήδη πάγια πρακτική. Με την προμήθεια των πλαισίων αυτών, ο τελικός χρήστης δεσμεύεται με συμβόλαιο να παραδώσει τα φωτοβολταϊκά στην κατασκευάστρια εταιρία μετά τον ωφέλιμο χρόνο ζωής τους και η δε κατασκευάστρια εταιρία δεσμεύεται να τα ανακυκλώσει και να ανακτήσει το CdTe. Στην αρχική τιμή των πλαισίων αυτών περιλαμβάνεται και το κόστος συλλογής και ανακύκλωσης, έστω κι αν κάτι τέτοιο θα συμβεί μετά από 20-30 χρόνια. Έχει δημιουργηθεί μάλιστα και ειδικό ασφαλιστικό ταμείο το οποίο διασφαλίζει τη συλλογή και ανακύκλωση των πλαισίων ακόμη κι αν εν τω μεταξύ εκλείψουν οι κατασκευάστριες εταιρίες [9].

## **1.7 Αναγκαιότητα αντικεραυνικής προστασίας φωτοβολταϊκών συστημάτων**

Οι φ/β εγκαταστάσεις, τόσο λόγω της θέσης τους (στις στέγες των σπιτιών, στις προσόψεις των κτιρίων ή σαν ανεξάρτητες μονάδες σε απομονωμένες περιοχές) καθώς επίσης και εξαιτίας της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνουν, είναι περισσότερο ευάλωτες στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα και στις εισερχόμενες υπερτάσεις από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι βλάβες που παρατηρούνται τόσο στην DC όσο και στην AC πλευρά του συστήματος σε περίπτωση άμεσου κεραυνικού πλήγματος ποικίλουν. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της αντικεραυνικής προστασίας στις εγκαταστάσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντική.

## **Κεφάλαιο 2: Αντικεραυνική προστασία και προστασία από υπερτάσεις σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου**

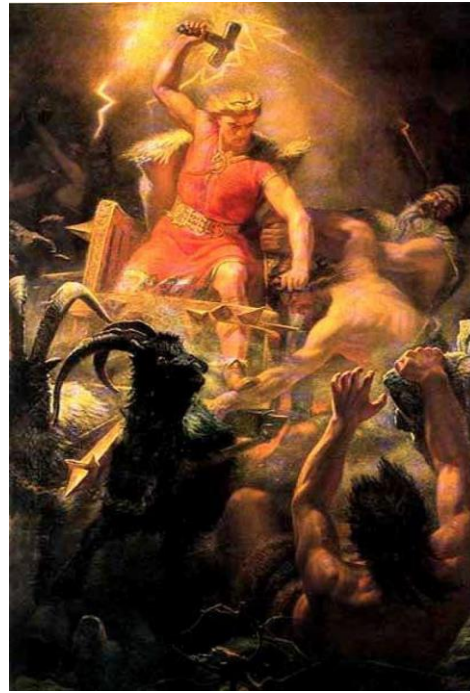
---

### **2.1 Κεραυνός**

#### **2.1.1 Ιστορική αναδρομή**

Φαινόμενα ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού όπως ο κεραυνός προκαλούσαν από αρχαιοτάτων χρόνων τόσο το δέος όσο και το θαυμασμό του ανθρώπου απέναντι στη φύση. Η άγνοια και η μη δυνατότητα ερμηνείας τους οδηγούσε συχνά στην απόδοσή τους σε υπερφυσικές δυνάμεις. Στις πλείστες των περιπτώσεων μάλιστα, ο άνθρωπος αδυνατώντας να τα εξηγήσει τα θεωρούσε θεϊκά σημάδια και οιωνούς με τα οποία η εκάστοτε θεότητα φανέρωνε είτε την αγανάκτηση είτε την ικανοποίησή της για τα ανθρώπινα έργα [10, 11].

Στην αρχαία ελληνική μυθολογία, κεραυνούς κατασκεύαζε ο Ήφαιστος στη Λήμνο και ήταν αποκλειστικό προνόμιο του Δία να τους εξαπολύει από τον Όλυμπο. Με τον κεραυνό, ο πατέρας των θεών, (Δίας), απειλεί τους εχθρούς του και τον στέλνει στη γη για να ευεργετήσει τους αγαθούς ή να τιμωρήσει τους υβριστές και τους άδικους. Για το σκανδιναβικό πολιτισμό των Βίκινγκς, η αστραπή δημιουργείται από το θεό Thor καθώς το σφυρί του χτυπούσε ένα αμόνι, ενώ οδηγούσε το άρμα του στα σύννεφα. Στην ανατολή, τα πρώτα αγάλματα του Βούδα τον εμφανίζουν να φέρει έναν κεραυνό με βέλη σε κάθε άκρη. Στην Ιταλία, οι πρόδρομοι των Ρωμαίων, οι Ετρούσκοι, είχαν μελετήσει λεπτομερώς το θέμα των κεραυνών και είχαν υποδιαιρέσει τον ουρανό σε 16 τομείς. Ανάλογα από ποιον τομέα ερχόταν και σε ποια κατεύθυνση έπεφτε ο κεραυνός, είχε διαφορετική σημασία για την ερμηνεία των μελλοντικών γεγονότων. Η εντύπωση των Ετρούσκων ότι κατά την εξέλιξη των κεραυνών έπεφταν στη γη ογκώδεις λίθοι, διατηρήθηκε στη λαϊκή πίστη μέχρι το τέλος του μεσαίωνα. Στην αρχαία Ρώμη, οι Ρωμαίοι υιοθέτησαν τις ελληνικές απόψεις για τα μετεωρολογικά φαινόμενα, προσαρμόζοντας μόνο τα ονόματα των θεών. Τα αντικείμενα που είχαν κτυπηθεί από κεραυνό ανήκαν στην ιδιοκτησία του Jupiter, ενώ όσοι πέθαιναν από κτύπημα κεραυνού θεωρούνταν ευνοημένοι των θεών. Στην αντίληψη των Ίνκας κατά τον 13ο-16<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. η βροντή και η αστραπή ήταν παιδιά του ήλιου και της σελήνης και ελέγχονταν από τον παντοδύναμο βασιλιά, ο οποίος ήταν και ο ίδιος θεός. Οι ινδικές φυλές, στη Βόρεια Αμερική, θεωρούσαν ότι η αστραπή οφειλόταν στα φτερά ενός μυστικού πουλιού που αναβόσβηναν και όταν πέταγε χτυπούσαν τα φτερά κάνοντας τον ήχο της βροντής [10, 11].



**Σχήμα 2-1** Θεότητες των κεραυνών στους αρχαίους πολιτισμούς της Ελλάδας (Δίας – αριστερά) και των Βίκινγκς (Thor – Δεξιά) [40]

Αρκετά νωρίς, παρ' όλα αυτά, άρχισαν οι φιλόσοφοι να ξεφεύγουν από τις θεοκρατικές αντιλήψεις και να συσχετίζουν τον κεραυνό με τη νέφωση. Οι μαθητές του Θαλή, Αναξίμανδρος και Αναξίμενης τον 6ο αιώνα π.Χ. έδωσαν μάλλον την πρώτη φυσική εξήγηση για το φαινόμενο του κεραυνού. Θεωρούσαν ότι αιτία του κεραυνού ήταν ο άνεμος. Η πίεση του αέρα στα σύννεφα οδηγούσε σε τριβές, οι οποίες δημιουργούσαν τη λάμψη και τη βροντή. Ο Λεύκιππος και ο Δημόκριτος θεωρούσαν ότι οι κερανοί κρύβονται από τη φύση στα σύννεφα και διαφεύγουν προς τη γη με διάφορες αφορμές. Στην κωμωδία του Αριστοφάνη «Νεφέλες» εξηγεί ο Σωκράτης στο μαθητή του Στρεψιάδη ότι ο κεραυνός αποτελεί «στεγνό αέρα» που είναι συμπιεσμένος στα σύννεφα. Ο μαθητής του Αριστοτέλη Θεόφραστος, κατά τον 3ο αιώνα π.Χ., δίνει επτά αίτια για τη βροντή και ανάλογα για την αστραπή. Επιπλέον, σημαντικές αναφορές στα φαινόμενα του κεραυνού και της αστραπής συναντά κανείς τόσο στο έργο του Έλληνα συγγραφέα Πλούταρχου (50-120 μ.Χ.) όσο και σε αυτό του Γάλλου αστρονόμου Φλαμμαρίονα (Camille Flammarion 1846-1936) [10, 11].

Ένας Αμερικάνος, προγενέστερος του Φλαμμαρίονα ωστόσο, ήταν αυτός ο οποίος κατάφερε να απομυθοποιήσει τον κεραυνό, αποκλείοντας παράλληλα κάθε θεοκεντρική θεωρία που αφορούσε την ερμηνεία του φυσικού αυτού φαινομένου: ο Βενιαμίν Φραγκλίνος (Benjamin Franklin 1706-1790). Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας στην Πενσυλβάνια των ΗΠΑ, ο Βενιαμίν Φραγκλίνος πέταξε έναν αετό από μεταξωτό ύφασμα. Στο σπάγκο είχε δέσει ένα μεταλλικό κλειδί, το οποίο προσέγκυσε το αντίθετο προς το δικό του φορτίο των νεφών. Έτσι δημιουργήθηκε ο πρώτος τεχνητός κεραυνός στην ιστορία. Με το πείραμα αυτό ο Φραγκλίνος απέδειξε ότι πίσω από τα καταιγιδοφόρα νέφη δεν κρύβεται η μήνις των θεών, αλλά κάτι πολύ πιο απλό: ένα ηλεκτρικό φορτίο αντίθετο από εκείνο της Γης [10, 11].

Βέβαια ο Φραγκλίνος φρόντισε να απομονώσει τον εαυτό του από την όλη διάταξη, και να μην εκτεθεί στη βροχή όταν εκτέλεσε το συγκεκριμένο πείραμα, και έτσι δεν έπαθε ηλεκτροπληξία, όπως συνέβη με άλλους που προσπάθησαν να το επαναλάβουν.

Ο διαπρεπής αυτός φυσικός και πολιτικός κατάφερε να αποδείξει ότι ο κεραυνός δεν είναι τίποτα περισσότερο παρά μία ηλεκτρική εκκένωση. Με την απόδειξή του αυτή προσπάθησε να εξαλείψει κάθε ίχνος θεοκεντρισμού από την εξήγηση του κεραυνού [10, 11].

### **2.1.2 Το φαινόμενο του κεραυνού**

Σε όλη τη γη εκτιμάται ότι πέφτουν περίπου 100 κεραυνοί το δευτερόλεπτο. Μετρώνται δηλαδή, κάθε μέρα στον πλανήτη περισσότερες από 40.000 καταιγίδες, οι οποίες συνοδεύονται από 10.000.000 κεραυνούς. Ο κάθε κεραυνός έχει τεράστια ισχύ, αλλά η πρακτική αξιοποίηση του είναι αδύνατη, λόγω της στοχαστικής εμφάνισής του και της πολύ μικρής διάρκειας του [11].

Η εκδήλωση του κεραυνού είναι συνέπεια της ηλεκτρικής εκκένωσης ανάμεσα σε δύο σύννεφα, είτε ανάμεσα σε σύννεφο και το έδαφος. Τα σύννεφα και κυρίως οι σωρειτομελανίες (cumulonimbus) συγκεντρώνουν τα ηλεκτρικά φορτία που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα από διάφορες αιτίες και, όταν κατά την κίνησή τους πλησιάζουν άλλο σύννεφο φορτισμένο με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία ή όταν περάσουν πάνω από έδαφος που εμφανίζει προεξοχές (λόφοι, δέντρα, ψηλά κτίρια), δημιουργείται ο κεραυνός, εφόσον βέβαια η διαφορά δυναμικού γίνει αρκετά μεγάλη [11].

Ο κεραυνός αποτελείται από ένα οπτικό φαινόμενο, την αστραπή, που οφείλεται στην πυράκτωση των μορίων του αέρα, και από το καθαρά ηλεκτρικό φαινόμενο, δηλ. τη ροή ηλεκτρικών φορτίων, που συνοδεύεται από τη βροντή, εξαιτίας της απότομης εκτόνωσης των αερίων της περιοχής. Πρώτα γίνεται αντιληπτή η αστραπή και μετά η βροντή [11].

Έτσι τα 10 εκατομμύρια κεραυνών που πέφτουν κάθε ημέρα, μεταφέρουν ηλεκτρικά φορτία στη Γη, που μοιάζει με τεράστιο συσσωρευτή. Η θερμοκρασία της αστραπής φτάνει τους 30.000 °C. Το πλάτος της λάμψης είναι από 25 mm μέχρι 30 cm. Η ένταση του ρεύματος ξεπερνάει τα 100.000 αμπέρ (ανάλογα με την περίπτωση του κεραυνού) και η διαφορά δυναμικού έχει τιμές από 100 μέχρι 1000 MV [11].

### **2.1.3 Είδη κεραυνικών εκκενώσεων**

Τα είδη των κεραυνικών εκκενώσεων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Κεραυνοί εντός του ίδιου συννέφου**

Οι υπάρχουσες πληροφορίες για τους κεραυνούς αυτού του τύπου είναι λίγες και επιπλέον συχνά αντιφάσκουν μεταξύ τους. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές μερικές εκατοντάδες A ως 1kA [13].

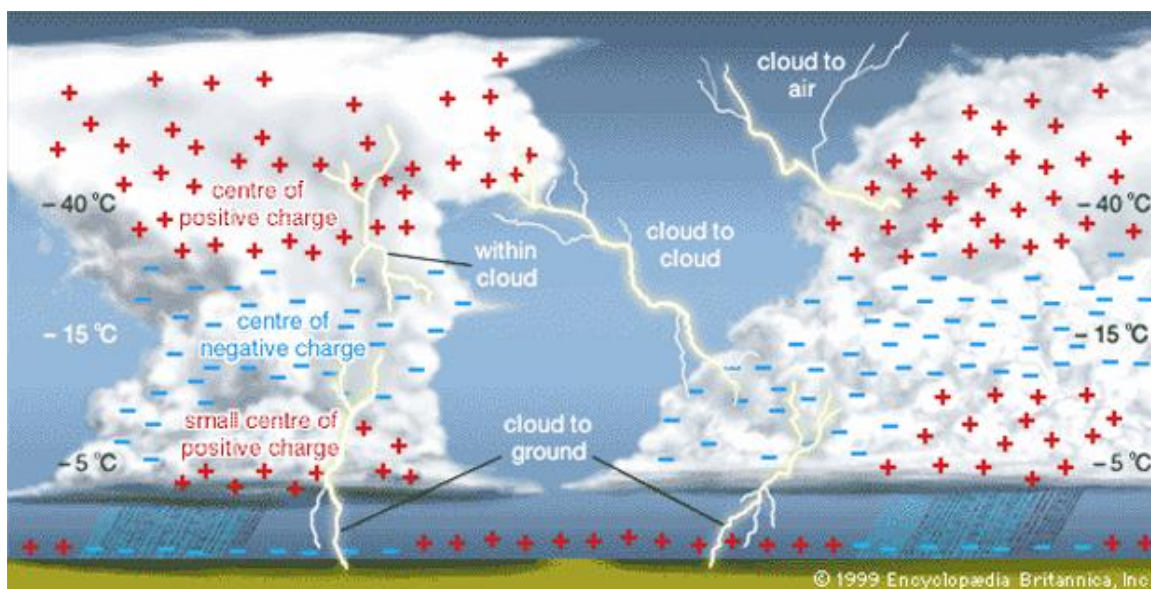


- **Κεραυνοί μεταξύ δύο συννέφων**

Οι κεραυνοί αυτοί εμφανίζονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1km και μικρότερο των 10 km. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου, μέχρι και 40km [13].

- **Κεραυνοί μεταξύ συννέφου και γης**

Οι κεραυνοί της κατηγορίας αυτής παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους (εκκένωση κατερχόμενη), ή πλησίον της γης (εκκένωση ανερχόμενη). Σαν πολικότητα της εκκένωσης λαμβάνεται εκείνη του φορτίου του κάτω μέρους του συννέφου που την προκάλεσε. Το 80% των κεραυνών που κατευθύνονται στη γη προέρχονται από σύννεφα αρνητικά φορτισμένα στην κάτω περιοχή τους και γι' αυτό είναι κεραυνοί αρνητικής πολικότητας [13].



**Σχήμα 2-2** Κατανομή ηλεκτρικού φορτίου κατά την καταιγίδα και τα είδη των κεραυνικών εκκενώσεων [13]



**Σχήμα 2-3** Κεραυνός μεταξύ δύο νεφών (αριστερά) και μεταξύ νέφους και γης (δεξιά) [13]



## 2.1.4 Παράμετροι κεραυνού

Η κεραυνική εκκένωση ως ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- **Πολικότητα**, η οποία καθορίζεται από το πρόσημο του φορτίου του κεραυνού και εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων (90%) το φορτίο του κεραυνού είναι αρνητικό (αρνητικοί κεραυνοί).
- **Κατεύθυνση**, η οποία καθορίζεται από το μέσο εκκίνησης του κεραυνού, από το σύννεφο προς τη γη ή από τη γη προς το σύννεφο.
- **Ρεύμα**, το οποίο εμφανίζεται υπό τη μορφή μίας ή περισσοτέρων κρούσεων με απότομο μέτωπο, που η κάθε μια τους μετά το μέγιστο εύρος μειώνεται με σχετικά αργό ρυθμό. Χαρακτηριστικά μεγέθη του ρεύματος κεραυνού αποτελούν:
  - Η **μέγιστη τιμή ρεύματος**. Το εύρος του ρεύματος ενός κεραυνού μπορεί να ποικίλει από μερικές εκατοντάδες αμπέρ μέχρι εκατοντάδες kA. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος του κεραυνού σε συνδυασμό με την αντίσταση που θα αναγκαστεί να διαρρεύσει, καθορίζουν τη μέγιστη αναπτυσσόμενη εξαιτίας του τάση.
  - Η **μέση κλίση** ( $\frac{di}{dt}$ ) αποτελεί το μέσο ρυθμό ανόδου του ρεύματος και υπολογίζεται στο τμήμα του μετώπου της κυματομορφής του ρεύματος που βρίσκεται μεταξύ του 30% και 90% του μέγιστου εύρους,  $\frac{di}{dt} = (I_{90} - I_{30}) / (t_{90} - t_{30})$  kA/μs.
- Το **ολικό φορτίο (Qtotal)**: το ολοκλήρωμα του ρεύματος του κεραυνού στο χρόνο, για όλη τη διάρκειά του,  $\int_0^{\infty} i(t) dt$ .
- Το **κρουστικό φορτίο (Qimpulse)**: το ολοκλήρωμα της κρουστικής συνιστώσας του ρεύματος του κεραυνού στο χρόνο.
- Η **ειδική ενέργεια (SE)**: η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη ροή του ρεύματος του κεραυνού σε μοναδιαία αντίσταση. Υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος του κεραυνού στο χρόνο για όλη τη διάρκειά του,  $\int_0^{\infty} i(t)^2 dt$ . Εκφράζει την ενέργεια που συνοδεύει την ηλεκτρική εκκένωση του κεραυνού σε μονάδες A<sup>2</sup>s ή ισοδύναμα σε J/Ω.
- Ο **αριθμός διαδοχικών εκκενώσεων**. Ο κεραυνός μπορεί να αποτελείται από μία απλή εκκένωση ή από πολλαπλές διαδοχικές εκκενώσεις. Στις Η.Π.Α. για το έτος 1991 στο σύνολο των 7.9 εκατομμυρίων αρνητικών κεραυνών που παρατηρήθηκαν, περίπου το 50% του συνόλου ήταν απλής εκκένωσης, ενώ παρατηρήθηκε μόνο ένας κεραυνός με 16 και ένας με 20 διαδοχικές εκκενώσεις. Για το ίδιο έτος, στο σύνολο των 1.4 εκατομμυρίων θετικών κεραυνών που παρατηρήθηκαν, λιγότερο από 10% του συνόλου των κεραυνών είχαν πάνω από μία διαδοχικές εκκενώσεις. Ωστόσο, ο αριθμός των διαδοχικών εκκενώσεων που συνοδεύουν ένα κεραυνό καθορίζεται και από τα κριτήρια, τα οποία θέτονται για τη μέτρησή τους, όπως η πολικότητα καθώς και το χρονικό διάστημα και η απόσταση μεταξύ της πρώτης ή της προηγούμενης διαδοχικής εκκένωσης [18].

### **2.1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό**

Σε μια περιοχή με εύκρατο κλίμα τα χαρακτηριστικά του κεραυνού επηρεάζονται από την ορογραφική κατάσταση της περιοχής. Στις ορεινές περιοχές η ένταση του ρεύματος του κεραυνού όπως και το σχετικό φορτίο είναι μικρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μικρή απόσταση γης - νέφους προκαλεί εκκενώσεις στη γη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία φορτίσεως του νέφους και στο ότι το μικρό σχετικά μήκος του αγωγού του κεραυνού έχει σαν επακόλουθο τη συσσώρευση ενός μικρού μόνο φορτίου κατά μήκος αυτού [14].

Ο αριθμός των εκκενώσεων στις ορεινές περιοχές είναι πάντοτε μεγαλύτερος από εκείνο στις πεδινές. Στις πεδινές περιοχές, όπου η απόσταση νέφους - γης είναι μεγαλύτερη σημειώνονται λιγότερες εκκενώσεις αλλά με υψηλή ένταση ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σπάνια, σχετικά, το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει κεραυνό νέφους - γης. Η μεγάλη ένταση ρεύματος οφείλεται στην παρουσία νεφών πολύ φορτισμένων και οχετών εκκενώσεως μεγάλου μήκους [14].

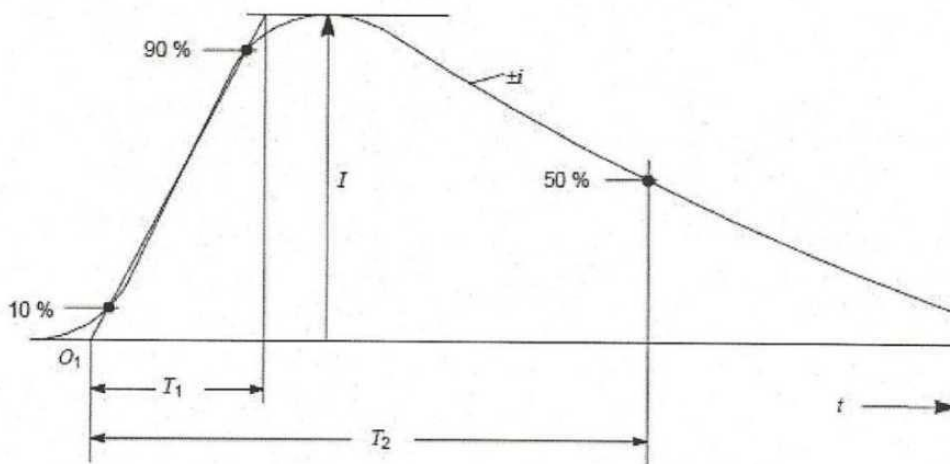
Επίσης σημαντικό ρόλο στη δημιουργία κεραυνικών εκκενώσεων παίζει και η εποχή. Το καλοκαίρι λόγω του σημαντικού ύψους των νεφών από το έδαφος πολλές εκκενώσεις πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους ή μεταξύ νεφών. Αυτό έχει σαν συνέπεια μία απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους [14].

### **2.1.6 Διάρκεια κεραυνών και χαρακτηριστικές I-t**

Οι κεραυνοί ανάλογα με το χρόνο που διαρκούν διακρίνονται σε:

- Μικρής διάρκειας κεραυνοί, με διάρκεια μικρότερη των 2 ms (σχήμα 2-4).
- Μεγάλης διάρκειας κεραυνοί, με διάρκεια μεγαλύτερη των 2 ms (σχήμα 2-5) [15].

Στο σχήμα 2-4 φαίνεται η γραφική παράσταση του ρεύματος κεραυνού μικρής διάρκειας σε συνάρτηση με το χρόνο, ή όπως αλλιώς είναι γνωστή, η χαρακτηριστική κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας. Ακολουθώς δίνονται οι βασικοί ορισμοί των παραμέτρων που διέπουν αυτή τη χαρακτηριστική.



**Σχήμα 2-4** Γραφική παράσταση του ρεύματος κεραυνού μικρής διάρκειας ( $I$ ) συναρτήσει του χρόνου ( $t$ ) (ή αλλιώς χαρακτηριστική κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας) [16]

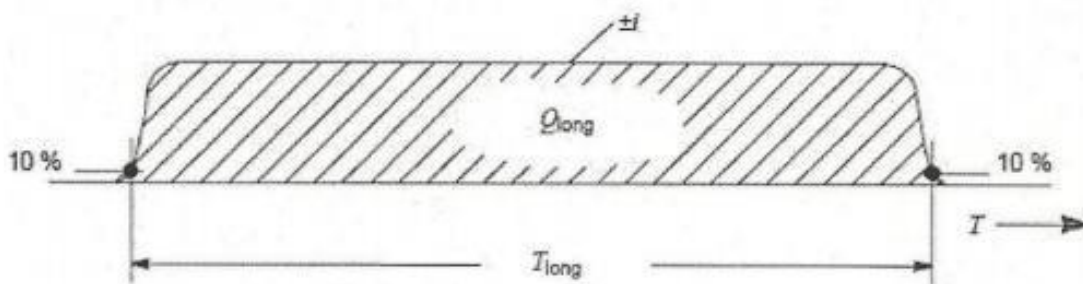
**Όπου:**

$T_1$  : Διάρκεια μετώπου κρουστικού ρεύματος, (χρόνος μετώπου) · Ισοδυναμεί με 1,25 φορές τη διάρκεια  $T$ , η οποία ορίζεται μεταξύ των στιγμών, όπου στο μέτωπο το ρεύμα λαμβάνει τιμές από 10% μέχρι το 90% της μέγιστης του τιμής [16].

$O_1$  : Συμβατική αρχή του κρουστικού ρεύματος · Είναι το σημείο τομής του άξονα του χρόνου με την ευθεία που περνά από τα σημεία της καμπύλης του κρουστικού ρεύματος, όπου παίρνει τιμές 10% και 90% της μέγιστης του τιμής [16].

$T_2$  : Διάρκεια ημίσεως εύρους κρουστικού ρεύματος, (χρόνος ουράς) · Ορίζεται ως η διάρκεια μεταξύ της συμβατικής αρχής του κρουστικού ρεύματος ( $O_1$ ) μέχρι τη στιγμή που το ρεύμα μειώνεται στο 50% της μέγιστης του τιμής [16].

Στη συνέχεια φαίνεται η γραφική παράσταση του ρεύματος κεραυνού μακράς διάρκειας συναρτήσει του χρόνου (σχήμα 2-5), ή αλλιώς χαρακτηριστική κρουστικής τάσης μακράς διάρκειας και δίνονται οι βασικοί ορισμοί των παραμέτρων που διέπουν αυτή τη χαρακτηριστική.



**Σχήμα 2-5** Γραφική παράσταση του ρεύματος κεραυνού μακράς διάρκειας ( $I$ ) συναρτήσει του χρόνου ( $t$ ) (ή αλλιώς χαρακτηριστική κρουστικής τάσης μεγάλης διάρκειας) [16]

**Όπου:**

$T_{LONG}$  : Διάρκεια κεραυνικού ρεύματος μακράς διάρκειας (LongStroke) · Ορίζεται ως η διάρκεια μεταξύ της στιγμής κατά την οποία το ρεύμα έχει τιμή ίση με το 10% της μέγιστης του τιμής κατά την αύξηση του ρεύματος, έως τη στιγμή που λαμβάνει τιμή για δεύτερη φορά ίση με 10% της μέγιστης του τιμής κατά τη μείωση του ρεύματος [16].

$Q_{LONG}$  : Φορτίο κεραυνικού ρεύματος μακράς διάρκειας (LongStroke) · Χρονικό ολοκλήρωμα της συνιστώσας του ρεύματος κεραυνού μακράς διάρκειας [16].

## 2.2 Εκτίμηση κινδύνου και προσδιορισμός απαιτούμενου επιπέδου αντικεραυνικής προστασίας

Ένα Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) δε μπορεί να εμποδίσει το σχηματισμό κεραυνού. Γενικά ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος είναι πάντα ένας συμβιβασμός μεταξύ αποτελεσματικότητας και κόστους. Άρα, δεν εξασφαλίζει την απόλυτη προστασία της κατασκευής, ωστόσο μπορεί να μειώσει σε αποδεκτό βαθμό τις επιζήμιες επιπτώσεις του κεραυνού σε αυτή. Ο σχεδιασμός κάθε ΣΑΠ συνίσταται στην επιλογή της αποδεκτής στάθμης προστασίας. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας είναι οι διαστάσεις, η θέση και το υλικό της κατασκευής, η κατηγορία στην οποία αυτή κατατάσσεται σύμφωνα με τη χρήση της, οι συνέπειες που θα έχει η καταστροφή της στον άνθρωπο ή στο περιβάλλον καθώς και η κεραυνική δραστηριότητα στην περιοχή [17].

### 2.2.1 Εκτίμηση κινδύνου ζημίας από κεραυνό

Η εκτίμηση του κινδύνου ζημίας από κεραυνούς σε μία κατασκευή έχει σκοπό να βοηθήσει το μελετητή μηχανικό αντικεραυνικής προστασίας στην απόφαση του εάν συνιστάται ή όχι η προστασία της κατασκευής και εάν ναι, να επιλέξει τα κατάλληλα μέτρα προστασίας [19].

Οι ζημιές που προκαλούνται από κεραυνούς εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, μεταξύ των οποίων τα σπουδαιότερα είναι:

- ο Φύση των υλικών κατασκευής
- ο Περιεχόμενα και προορισμός (χρήση)
- ο Εισερχόμενες παροχές στην κατασκευή
- ο Μέτρα για περιορισμό των ζημιών [19]

Οι κίνδυνοι που πρέπει να περιοριστούν με ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ), όπως ορίζονται στο EN 62305-2, είναι:

- α) Κίνδυνος απώλειας ανθρώπινης ζωής
- β) Κίνδυνος απώλειας κοινωφελούς δικτύου (π.χ. Ενέργεια, Ύδρευση, Τηλεπικοινωνία κτλ.)
- γ) Κίνδυνος απώλειας αναντικατάστατης πολιτιστικής κληρονομιάς
- δ) Κίνδυνος οικονομικών απωλειών [16]

Αν ένας από τους τρεις πρώτους τύπους κινδύνων εμφανιστεί σε μία κατασκευή, η απόφαση για τη λήψη ή όχι μέτρων προστασίας θα λαμβάνεται συγκρίνοντας την πραγματική τιμή της πιθανότητας ζημίας της κατασκευής με την οριακή τιμή που καθορίζεται από τις Εθνικές Επιτροπές ή τις υπεύθυνες Αρχές.

Αν οι ζημίες δεν περιλαμβάνουν ανθρώπινες, πολιτιστικές και περιβαλλοντικές απώλειες, η απόφαση εάν θα ληφθούν ή όχι μέτρα προστασίας μπορεί να ληφθεί στη βάση καθαρά οικονομικών κριτηρίων, συγκρίνοντας το ετήσιο κόστος των μέτρων προστασίας με το εκτιμώμενο ετήσιο κόστος των αναμενόμενων απωλειών λόγω κεραυνών.

Ανάλογα με τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπ' όψη, η απόφαση για τη λήψη μέτρων προστασίας και την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας λαμβάνεται μετά από ακριβή ανάλυση κινδύνου, όπως αυτή αναλύεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ 1412 [19].

## 2.2.2 Στάθμη προστασίας

Η στάθμη προστασίας ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) αναφέρεται στην κατάταξη του συγκεκριμένου ΣΑΠ σύμφωνα με την αποτελεσματικότητά του. Στην πραγματικότητα προσδιορίζει την πιθανότητα με την οποία ένα ΣΑΠ προστατεύει ένα χώρο από τις επιπτώσεις του κεραυνού.

Τέσσερις διαφορετικές στάθμες προστασίας λαμβάνονται υπ' όψη. Η αποτελεσματικότητα του ΣΑΠ μειώνεται βαίνοντας από τη στάθμη προστασίας I στη στάθμη προστασίας IV. Η σχέση μεταξύ στάθμης προστασίας και αποτελεσματικότητας δίνεται στον πίνακα 2-1, για την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας [19].

**Πίνακας 2-1** Αποτελεσματικότητα σε σχέση με την στάθμη προστασίας [19]

Στάθμες προστασίας	Αποτελεσματικότητα
P	E
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Οι τιμές των παραμέτρων του κεραυνού που αντιστοιχούν σε κάθε στάθμη προστασίας δίνονται στον πίνακα 2-2.

**Πίνακας 2-2** Τιμές των παραμέτρων του κεραυνού ανάλογα με την στάθμη προστασίας [19]

Παράμετροι κεραυνού	Σύμβολο	Μονάδα Μέτρησης	Στάθμη προστασίας		
			I	II	III-IV
Μέγιστη τιμή ρεύματος	I	kA	200	150	100
Ολικό φορτίο	$Q_{total}$	C	300	225	150
Κρουστικό φορτίο	$Q_{impulse}$	C	100	75	50
Ειδική ενέργεια	SE	kJ/Ω	10000	5600	2500
Μέση κλίση	di/dt	kA/μs	200	150	100

## 2.2.3 Επιλογή στάθμης προστασίας του ΣΑΠ

Σκοπός της επιλογής της κατάλληλης στάθμης προστασίας είναι να μειώσει, κάτω από τη μέγιστη ανεκτή στάθμη, τον κίνδυνο ζημίας από άμεσο πλήγμα στη κατασκευή.

Η επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας που πρέπει να εξασφαλίζεται με το ΣΑΠ μπορεί να βασίζεται στην αναμενόμενη συχνότητα πληγμάτων από άμεσους κεραυνούς,  $N_d$ , στην κατασκευή που χρήζει προστασίας και στην αποδεκτή συχνότητα ζημιών από κεραυνό,  $N_c$  [19].

### 2.2.3.1 Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή ( $N_d$ )

Η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια περιοχή,  $N_d$ , εκφράζει τον μέσο αριθμό κεραυνών που μπορούν να πλήξουν άμεσα μια κατασκευή ανά έτος και υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_d = N_g * A_e * C_1 * 10^{-6}$$

### Όπου:

**N<sub>g</sub>**: μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος, δηλαδή ο αναμενόμενος μέσος αριθμός κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο και έτος στην περιοχή εγκατάστασης της προς μελέτη κατασκευής, (αναλύεται στο επόμενο υποκεφάλαιο) [17].

**C<sub>1</sub>**: περιβαλλοντικός συντελεστής, ο καθορισμός του οποίου γίνεται ανάλογα της θέσης της κατασκευής και οι τιμές που παίρνει φαίνονται στον πίνακα 2-3 [17].

**A<sub>e</sub>**: ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια της κατασκευής, σε τετραγωνικά μέτρα, που ορίζεται ως μια επίπεδη επιφάνεια εδάφους ίδιας μέσης ετήσιας συχνότητας πληγμάτων κεραυνού με την κατασκευή (αναλύεται σε επόμενο υποκεφάλαιο) [17].

**Πίνακας 2-3** Τιμές του περιβαλλοντικού συντελεστή C<sub>1</sub> [19]

Σε σχέση με την θέση κατασκευής	C <sub>1</sub>
Κατασκευή σε περιοχή που περιέχει κατασκευές ή δέντρα του ίδιου ύψους ή ψηλότερα	0,25
Κατασκευή περιτριγυριζόμενη από χαμηλότερες κατασκευές	0,5
Απομονωμένη κατασκευή σε πεδιάδα και δεν υπάρχουν άλλες κατασκευές σε απόσταση 3H	1
Απομονωμένη κατασκευή που δεσπόζει ή πάνω σε κορυφή λόφου ή κάποιας εξοχής σε πεδιάδα	2

#### 2.2.3.2 Μέση ετήσια πυκνότητα πλήγματος κεραυνού στο έδαφος (N<sub>g</sub>)

Η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος, N<sub>g</sub>, δίνεται από ειδικούς χάρτες που δείχνουν την μέση συχνότητα πτώσεως κεραυνού ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Σύμφωνα με την IEC, εάν η τιμή της δεν είναι διαθέσιμη μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά από την κάτωθι εξίσωση:

$$N_g = 0,04 * T_d^{1,25}$$

Το αποτέλεσμα της εξίσωσης δίνει το πλήθος των πληγμάτων κεραυνού ανά km<sup>2</sup>. Ο όρος T<sub>d</sub> συμβολίζει τον αριθμό ημερών καταιγίδας ανά έτος και δίνεται από χάρτες ισοκεραυνικών καμπυλών (γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια κεραυνική στάθμη [14]), που πολλές χώρες έχουν συντάξει για τον σκοπό αυτό. Στο σχήμα 2-6 παρουσιάζεται ο χάρτης ισοκεραυνικών καμπυλών της Ελλάδας [17].





Σχήμα 2-6 Ισοθερμικές καμπύλες στον ελλαδικό χώρο [14]

### 2.2.3.3 Ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια ( $A_e$ )

Η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια μίας κατασκευής ορίζεται ως μία επίπεδη επιφάνεια εδάφους που έχει την ίδια ετήσια συχνότητα άμεσων πληγμάτων όπως η κατασκευή. Για απομονωμένες κατασκευές η επιφάνεια αυτή,  $A_e$ , είναι η επιφάνεια που περικλείεται μέσα στο περίγραμμα που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας του εδάφους και μίας ευθείας γραμμής με κλίση 1/3 η οποία διέρχεται από τα ψηλότερα τμήματα της κατασκευής (εφαπτομένη στην κατασκευή) και περιστρεφόμενη γύρω από αυτή [17].

Εφόσον λοιπόν πρόκειται για συνδυασμό ορθογωνίων κατασκευών, η ισοδύναμη επιφάνεια υπολογίζεται ως εξής:

$$A_e = L * W + 6 * H * (L + W) + 9 * \pi * H^2$$

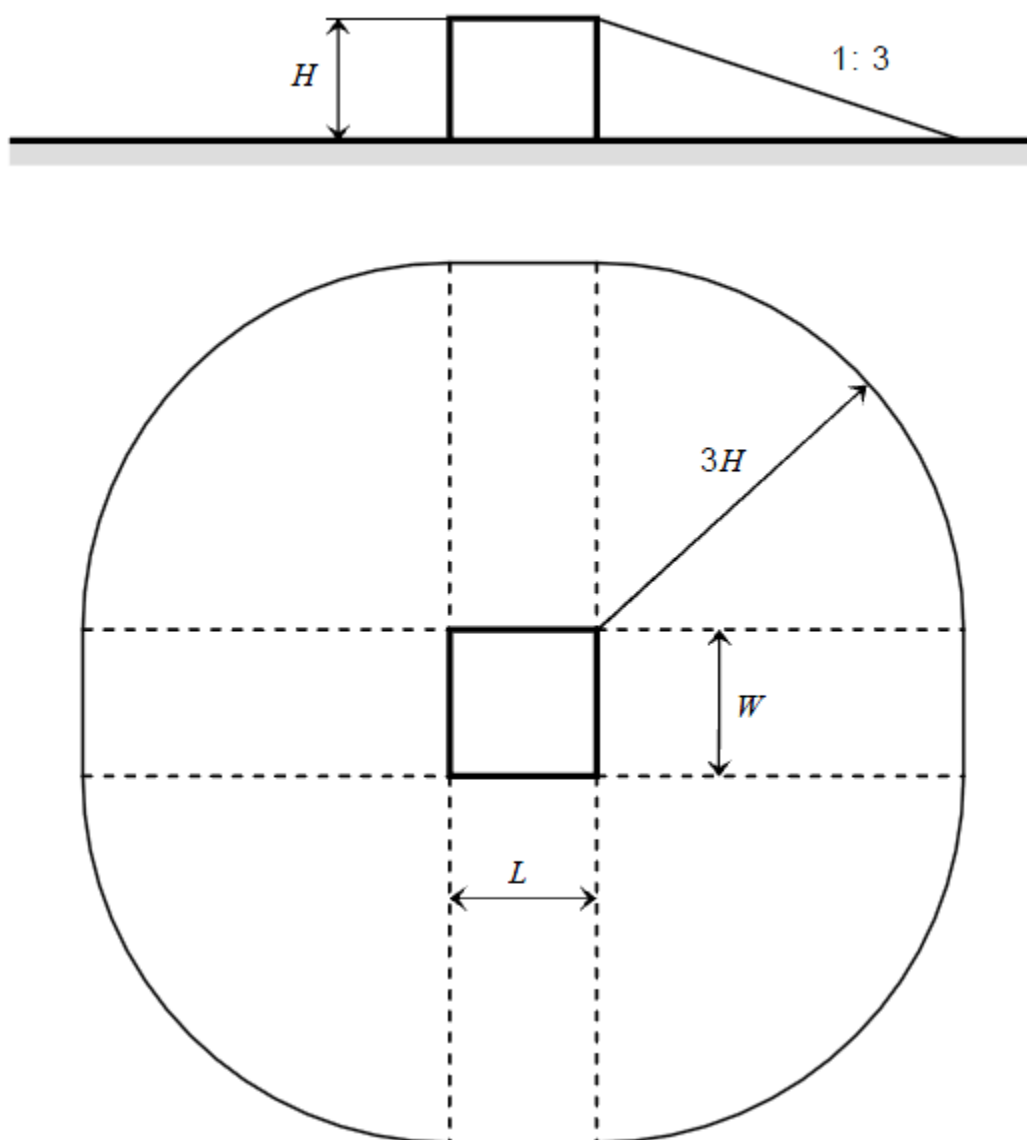
**Όπου:**

**L:** Το μήκος της κατασκευής



**W:** Το πλάτος της κατασκευής

**H:** Το ύψος της κατασκευής [17]



**Σχήμα 2-7** Ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια για κατασκευή σε επίπεδο έδαφος [17]

#### 2.2.3.4 Αποδεκτή συχνότητα ζημιών από κεραυνικά πλήγματα στην κατασκευή (N<sub>c</sub>)

Όταν λέμε αποδεκτή συχνότητα ζημιών, N<sub>c</sub>, από κεραυνό, εννοούμε τη μέγιστη αποδεκτή τιμή της ετήσιας συχνότητας πληγμάτων από κεραυνούς, τα οποία προκαλούν ζημιά σε μία κατασκευή.

Οι τιμές του N<sub>c</sub> μπορούν να καθορίζονται από τον ιδιοκτήτη της κατασκευής ή τον μελετητή του ΣΑΠ όπου οι απώλειες έχουν ιδιωτικό χαρακτήρα μόνον. Οι τιμές της παραμέτρου αυτής εκτιμώνται μέσω ανάλυσης κινδύνου ζημίας λαμβάνοντας υπ' όψη κατάλληλους συντελεστές όπως [19]:

- τύπος δόμησης
- παρουσία εύφλεκτων και εκρηκτικών ουσιών
- ληφθέντα μέτρα για μείωση των επιπτώσεων του πλήγματος
- πλήθος ανθρώπων που επηρεάζονται από την ζημιά
- τύπος και σπουδαιότητα των υπηρεσιών εξυπηρέτησης του κοινού
- αξία των αγαθών που ενδεχομένως καταστραφούν
- άλλοι συντελεστές (όπως αυτοί αναφέρονται σε πίνακες του προτύπου ΕΛΟΤ 1197)

Αναφέρεται ότι σε μερικές περιπτώσεις οι τιμές του  $N_c$  επιβάλλονται από τοπικούς κανονισμούς [19].

### 2.2.3.5 Επιλογή του ΣΑΠ και της στάθμης προστασίας του

Αρχικά, συγκρίνεται η αποδεκτή συχνότητα ζημιών από κεραυνικά πλήγματα σε μία κατασκευή,  $N_c$ , με την αναμενόμενη συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων,  $N_d$  [19].

α) Εάν  $N_d \leq N_c$ , τότε δε χρειάζεται η εγκατάσταση να περιλαμβάνει σύστημα αντικεραυνικής προστασίας.

β) Εάν  $N_d > N_c$ , τότε πρέπει να εγκατασταθεί σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με αποτελεσματικότητα:

$$E \geq 1 - N_c/N_d$$

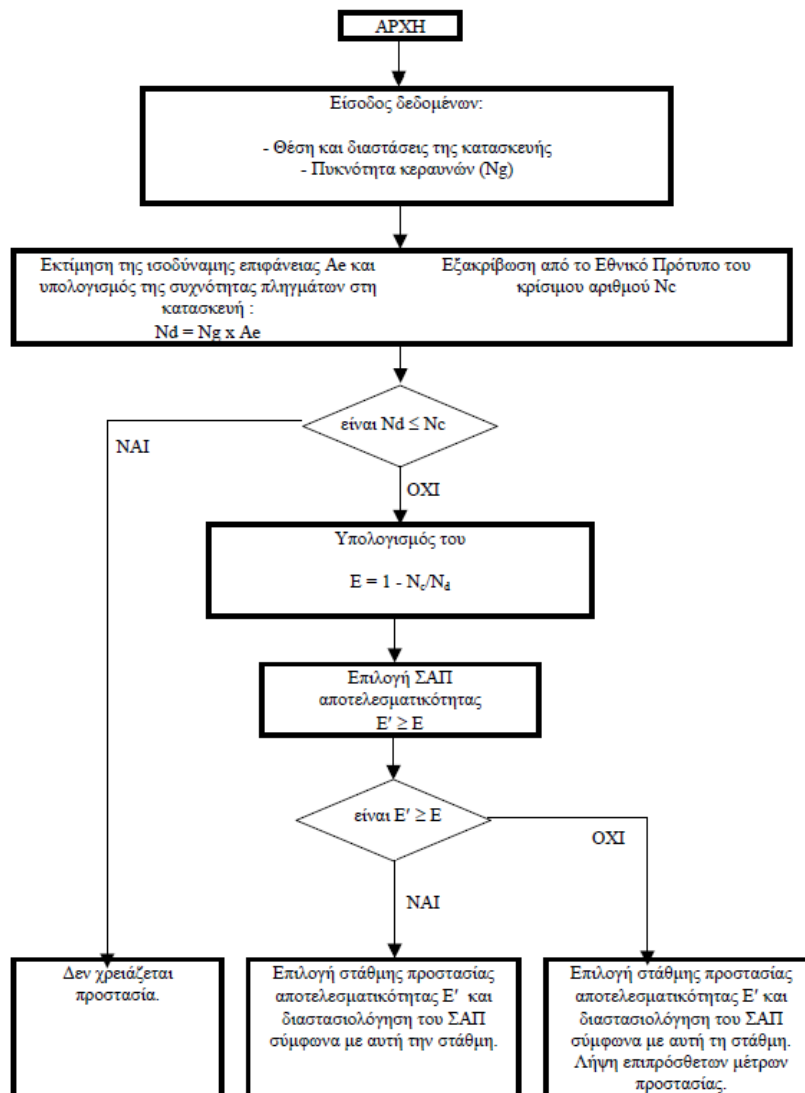
και να επιλεγεί η κατάλληλη στάθμη προστασίας [19].

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| ▪ Εάν $E > 0,98$ , τότε:           | Στάθμη I +επιπλέον προστατευτικά μέτρα |
| ▪ Εάν $0,95 < E \leq 0,98$ , τότε: | Στάθμη I                               |
| ▪ Εάν $0,90 < E \leq 0,95$ , τότε: | Στάθμη II                              |
| ▪ Εάν $0,80 < E \leq 0,90$ , τότε: | Στάθμη III                             |
| ▪ Εάν $0 < E \leq 0,80$ , τότε:    | Στάθμη IV                              |
| ▪ Εάν $E \leq 0$ , τότε:           | Δε χρειάζεται αντικεραυνική προστασία  |

Εάν εγκατασταθεί ένα ΣΑΠ αποτελεσματικότητας  $E'$  μικρότερης από  $E$ , πρέπει να προβλεφθούν επιπλέον μέτρα. Τέτοια επιπλέον προστατευτικά μέτρα για παράδειγμα είναι:

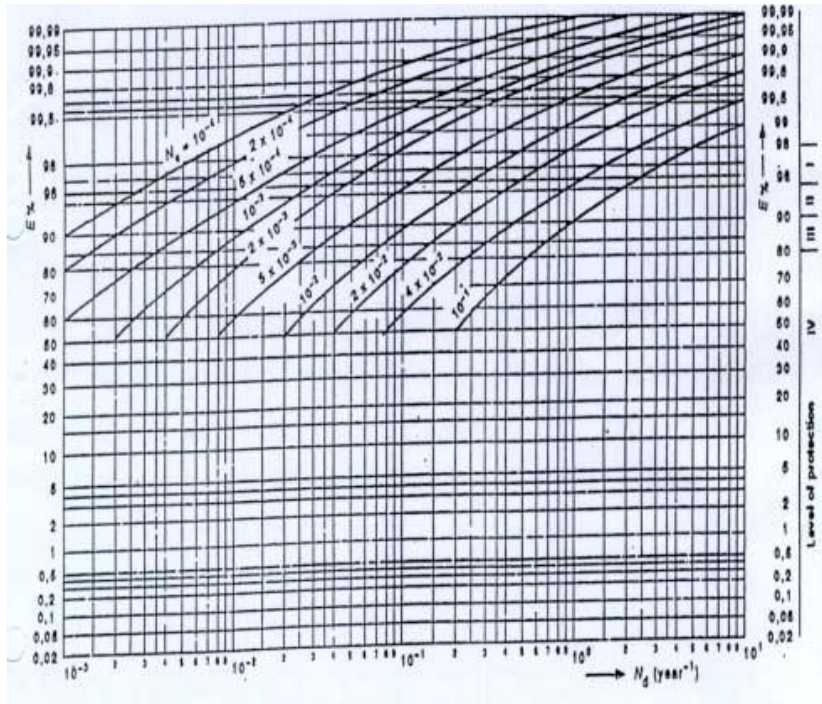
- Μέτρα περιορισμού των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής.
- Μέτρα περιορισμού της διάδοσης της φωτιάς.
- Μέτρα μείωσης των επαγόμενων τάσεων λόγω κεραυνών σε ευαίσθητες συσκευές.

Λεπτομερέστερη επεξήγηση της διαδικασίας επιλογής του ΣΑΠ δίνεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 2-8 [19].



Σχήμα 2-8 Διάγραμμα ροής διαδικασίας επιλογής ΣΑΠ [19]

Οι κρίσιμες τιμές της απαιτούμενης αποτελεσματικότητας,  $E$ , του ΣΑΠ σαν συνάρτηση της αναμενόμενης συχνότητας άμεσων κεραμικών πηγμάτων,  $N_d$ , στην κατασκευή και της αποδεκτής συχνότητας ζημιών από κεραμικά πλήγματα,  $N_c$ , φαίνονται στο σχήμα 2-9 [19].



Σχήμα 2-9 Κρίσιμες τιμές της απαιτούμενης αποτελεσματικότητας ενός ΣΑΠ, σαν συνάρτηση των  $N_d$  και  $N_c$  [19]

## 2.3 Επιλογή Εξωτερικού Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας

Εφόσον αποφασισθεί κατά πόσο η εγκατάσταση θα περιλαμβάνει ή όχι ΣΑΠ ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος. Για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου υπάρχουν οι τρεις πιο κάτω περιπτώσεις:

- 1) **Χωρίς** εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας
- 2) Με **απομονωμένο** σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ όπου το συλλεκτήριο σύστημα και το σύστημα αγωγών καθόδου, -βλέπε §2.3.1 -, τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε η διαδρομή διέλευσης κεραυνικού ρεύματος να είναι απομονωμένη από την υπό προστασία κατασκευή [EN 62305-3])
- 3) Με **μη – απομονωμένο** σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ όπου το συλλεκτήριο σύστημα και το σύστημα αγωγών καθόδου τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε η διαδρομή διέλευσης κεραυνικού ρεύματος να μην είναι απομονωμένη από την υπό προστασία κατασκευή [EN 62305-3]) [16]

Στην περίπτωση 1, η εγκατάσταση μπορεί να μην περιλαμβάνει εξωτερικό ΣΑΠ, αλλά θα εφαρμοστούν ένα σύνολο από μέτρα προστασίας, που θα περιγραφούν στο επόμενο υποκεφάλαιο και αφορούν στην προστασία της εσωτερικής ηλεκτρολογικής εγκατάστασης. Στην περίπτωση που θα εγκατασταθεί ΣΑΠ αυτό μπορεί να είναι απομονωμένο ή όχι. Το απομονωμένο ΣΑΠ χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις, όπου δεν είναι επιθυμητή η διέλευση κεραυνικού ρεύματος από τη μεταλλική κορνίζα υποστήριξης

των φωτοβολταϊκών πλαισίων [panels], για μείωση κινδύνων από θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα [16].

### **2.3.1 Εξωτερική Εγκατάσταση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας**

Στόχος της εξωτερικής εγκατάστασης ΣΑΠ είναι να λαμβάνει τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα και να μεταφέρει το ρεύμα τους, από το σημείο κρούσης προς τη γη, χωρίς να προκαλούνται φυσικές ζημιές στην εγκατάσταση ή τραυματισμοί σε φυσικά πρόσωπα [16]. Αποτελείται από τα πιο κάτω τρία στοιχεία:

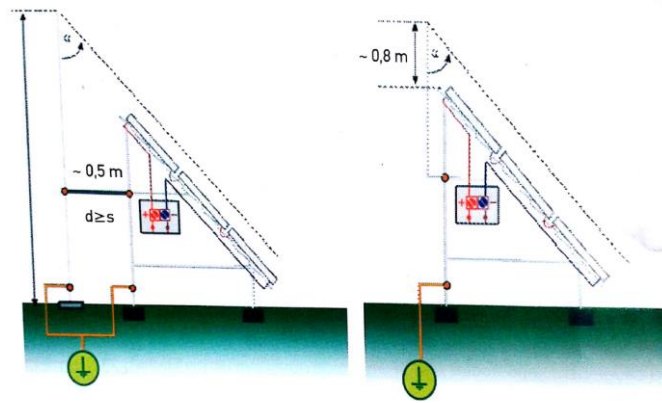
- Συλλεκτήριο σύστημα
- Σύστημα αγωγών καθόδου
- Σύστημα γείωσης

#### **2.3.1.1 Συλλεκτήριο Σύστημα**

Με τον όρο συλλεκτήριο σύστημα εννοούμε, το στοιχείο της εξωτερικής εγκατάστασης αντικεραυνικής προστασίας που προορίζεται για να υποδέχεται τους κεραυνούς [EN 62305-3].

Το συλλεκτήριο σύστημα που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε υπαίθριες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι η ακίδα προστασίας. Είναι ουσιαστικά μια μεταλλική ράβδος η οποία υποδέχεται τον κεραυνό όταν προσπέσει. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλου είδους συλλεκτήρια συστήματα, όπως τεταμένα συρματόσχοινα ή πλέγματα αγωγών τα οποία όμως δεν προτιμώνται γιατί μπορεί να προκαλέσουν σκίαση στα Φ/Β στοιχεία [16].

Η ακίδα προστασίας στα απομονωμένα ΣΑΠ (σχήμα 2-10), τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση,  $S$ , από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο η οποία υπολογίζεται στη συνέχεια. Στα μη απομονωμένα ΣΑΠ (σχήμα 2-10), η ακίδα προστασίας μπορεί να συνδεθεί απευθείας στη μεταλλική κορνίζα υποστήριξης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην περίπτωση που η ακίδα τοποθετηθεί σε μικρότερη από την απόσταση  $S$ , τότε πρέπει να γεφυρώνεται με αγωγό με τη μεταλλική κορνίζα του φ/β και το σύστημα θεωρείται μη απομονωμένο [16].



**Σχήμα 2-10** Απομονωμένο ΣΑΠ σε φ/β πάρκο με ακίδα προστασίας σε απόσταση από τα φ/β (αριστερά) και Μη απομονωμένο ΣΑΠ με ακίδα προστασίας συνδεδεμένη πάνω στη μεταλλική βάση στήριξης του φ/β (δεξιά) [16]

Προκειμένου να καθοριστεί το μήκος, η θέση και ο αριθμός των ακίδων προστασίας, χρησιμοποιούνται ορισμένες μέθοδοι, οι βασικότερες των οποίων είναι η μέθοδος της γωνίας προστασίας και η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας, (οι μέθοδοι αυτές δεν αναλύονται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία) [16].

Επειδή τα φ/β πλαίσια είναι τοποθετημένα συνήθως σε σειρές, για καλύτερη αποτελεσματικότητα του συλλεκτήριου συστήματος οι ακίδες προστασίας τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές κατά μήκος των φ/β πλαισίων. Οι μεταλλικές ράβδοι πρέπει να έχουν τις απαραίτητες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. Συνήθως, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι χαλκός, αλουμίνιο και ανοξείδωτος ή γαλβανισμένος χάλυβας. Η ελάχιστη διατομή ράβδου είναι  $176 \text{ mm}^2$  ανεξάρτητα από το υλικό και μπορεί να μειωθεί μέχρι τα  $70 \text{ mm}^2$  εάν δε χρειάζεται ιδιαίτερη μηχανική αντοχή (συνήθως σε μικρού μήκους ακίδες μέχρι 1 m). Τα υλικά και οι διαστάσεις πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο EN 62561-2 [16].

Η ακίδα προστασίας μπορεί να στηρίζεται με τη βοήθεια ενός τσιμεντένιου μπλοκ ή άλλων υποδομών ικανών να τη στηρίξουν. Η ράβδος διέρχεται από διατομή που υπάρχει στο μπλοκ ενώ στην περίπτωση που χρειάζεται επιπλέον στήριξη, χρησιμοποιούνται μη αγωγικά στηρίγματα που παρεμβάλλονται μεταξύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου και της ακίδας.

Για την απομόνωση του ΣΑΠ από το φωτοβολταϊκό πρέπει να τηρείται μια απόσταση απομόνωσης  $S$ , η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S \geq \frac{K_i}{K_m} * K_C * l$$

**Όπου:**

**$K_i$ :** συντελεστής που εξαρτάται από την επιλεγόμενη στάθμη προστασίας του ΣΑΠ

**K<sub>m</sub>**: συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό απομόνωσης μεταξύ ΣΑΠ και μεταλλικών στοιχείων της εγκατάστασης

**K<sub>c</sub>**: συντελεστής που εξαρτάται από τη διέλευση του κρουστικού ρεύματος

**l**: το μήκος σε μέτρα από το σημείο υπολογισμού της απόστασης απομόνωσης, μέχρι το πλησιέστερο σημείο ισοδυναμικής σύνδεσης, (δημιουργία αγωγίμης οδού μεταξύ δύο τμημάτων για μείωση της μεταξύ τους διαφοράς δυναμικού [EN 62305-3]), ή μέχρι το σύστημα γείωσης σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ισοδυναμικές συνδέσεις [16]

Οι τιμές των παραπάνω συντελεστών φαίνονται στους πίνακες 2-4, 2-5 και 2-6:

**Πίνακας 2-4** Τιμές συντελεστή  $k_i$  [19]

Στάθμη προστασίας	$K_i$
I	0,1
II	0,075
III και IV	0,05

**Πίνακας 2-5** Τιμές συντελεστή  $k_m$  [19]

Υλικό	$K_m$
Αέρας	1
Στερεά	0,5

**Πίνακας 2-6** Τιμές συντελεστή  $k_c$  [16]

Αριθμός αγωγών καθόδου	$K_c$
1 (μόνο στην περίπτωση απομονωμένου ΣΑΠ)	1
2	0,66
3 και περισσότεροι	0,44

Στην περίπτωση του μη απομονωμένου ΣΑΠ η ακίδα προστασίας μπορεί να συνδεθεί απ' ευθείας στη μεταλλική κορνίζα υποστήριξης του φ/β πλαισίου. Η σύνδεση πρέπει να παρέχει απαραίτητη στήριξη στη ράβδο και μπορεί να επιτευχθεί με την παρουσία σφικτήρων, βιδών ασφαλείας, συγκόλλησης κτλ. [16].

### 2.3.1.2 Σύστημα αγωγών καθόδου

Με τον όρο αγωγοί καθόδου εννοούμε το στοιχείο της εξωτερικής εγκατάστασης αντικεραυνικής προστασίας που διοχετεύει το ρεύμα του κεραυνού από το συλλεκτήριο σύστημα στο σύστημα γείωσης [EN 62305-3].

Οι αγωγοί καθόδου πρέπει να παρέχουν τις απαραίτητες αγωγίμες διόδους για τη διέλευση του κεραυνικού ρεύματος από το σημείο κρούσης του κεραυνού. Παρεμβάλλονται μεταξύ

συλλεκτήριου συστήματος και συστήματος γείωσης, και πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο μήκος για καλύτερη αποτελεσματικότητα [16].

Σε φ/β πάρκα η ακίδα προστασίας μπορεί να επιτελεί επίσης και το ρόλο του αγωγού καθόδου δεδομένου ότι φτάνει στο έδαφος. Στην περίπτωση μη απομονωμένου ΣΑΠ όταν η ακίδα είναι συνδεδεμένη στη μεταλλική κορνίζα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η μεταλλική κορνίζα αναλαμβάνει το ρόλο του αγωγού καθόδου [16].

### 2.3.1.3 Θεμελίωση και Σύστημα Γείωσης

Με τον όρο σύστημα γείωσης εννοούμε, το στοιχείο της εξωτερικής εγκατάστασης αντικεραυνικής προστασίας που διοχετεύει και εκκαθαρίζει το ρεύμα του κεραυνού στο έδαφος [EN 62305-3].

Το σύστημα γείωσης αποτελείται από ηλεκτρόδια γείωσης, (στοιχείο ή σύνολο στοιχείων του συστήματος γείωσης που εξασφαλίζουν απ' ευθείας ηλεκτρική σύνδεση με τη γη και διοχετεύουν το ρεύμα του κεραυνού στο έδαφος [EN 62305-3]), ποικίλων σχημάτων και διαστάσεων. Σε φ/β πάρκα το σύστημα γείωσης σχεδιάζεται ειδικά για τη φ/β εγκατάσταση. Για τη διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος στη γη έχει ιδιαίτερη σημασία το σχήμα και οι διαστάσεις του συστήματος γείωσης. Επίσης σε φ/β πάρκα για μείωση του κόστους και αύξηση της αποτελεσματικότητας και του χρόνου ζωής του συστήματος γείωσης, σημαντικό ρόλο παίζει ο τύπος των θεμελίων, στα οποία στηρίζεται ο μεταλλικός σκελετός των φ/β στοιχείων, ο οποίος στη συνέχεια συνδέεται με τα ηλεκτρόδια/σύστημα γείωσης [16].

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι διατάξεων των ηλεκτροδίων γείωσης, που ακολουθούνται σε συστήματα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας, ανάλογα με το είδος ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούν και τον τρόπο τοποθέτησης τους, όπως περιγράφονται πιο κάτω [16].

#### Διάταξη ηλεκτροδίων τύπου Α

Η διάταξη τύπου Α περιλαμβάνει ακτινικά οριζόντια ή κατακόρυφα / κεκλιμένα ηλεκτρόδια γείωσης. Το ελάχιστο μήκος κάθε ηλεκτροδίου καθορίζεται ως  $l_1$  για ακτινικά οριζόντια ηλεκτρόδια και  $0,5 * l_1$  για κατακόρυφα ή κεκλιμένα ηλεκτρόδια όπου  $l_1$  είναι το ελάχιστο μήκος ακτινικού ηλεκτροδίου όπως ορίζεται στον Πίνακα 2-7. Ωστόσο, τα μήκη αυτά μπορούν να μη ληφθούν υπόψη υπό την προϋπόθεση ότι επιτυγχάνεται αντίσταση γείωσης ( ο λόγος των μέγιστων τιμών της τάσης και του ρεύματος που εμφανίζεται στο σύστημα γείωσης, οι οποίες μέγιστες τιμές, γενικώς δεν εμφανίζονται ταυτόχρονα) μικρότερη από 10Ω. Η αντίσταση γείωσης χρησιμοποιείται συμβατικά και χαρακτηρίζει την αποτελεσματικότητα του συστήματος γείωσης [ΕΛΟΤ 1197]. Στην περίπτωση συνδυασμού πολλών ηλεκτροδίων γείωσης λαμβάνεται υπόψη το συνολικό μήκος τους [18].



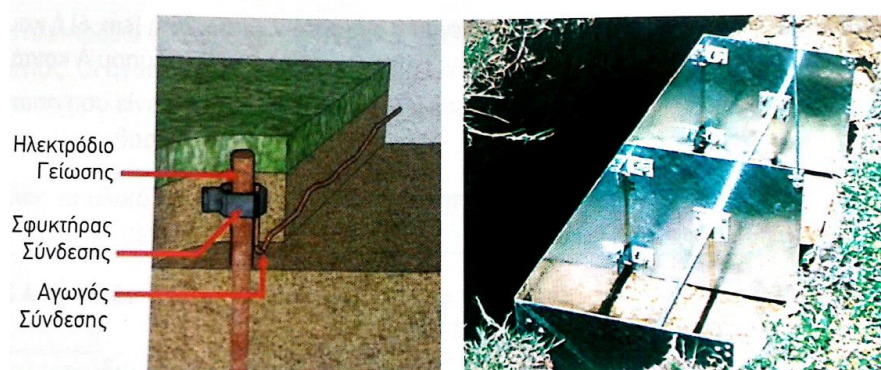
**Πίνακας 2-7** Ελάχιστο μήκος ηλεκτροδίου γείωσης συναρτήσει της στάθμης προστασίας ενός ΣΑΠ [18]

Στάθμη Προστασίας	Ελάχιστο μήκος ηλεκτροδίου γείωσης, $l_1$
I	5 m για $\rho < 500\Omega\text{m}$ $L_1 \text{ (m)} = 0.03\rho - 10$ για $500 < \rho \text{ (}\Omega\text{m)} < 3000$
II ÷ IV	5 m

Η διάταξη ηλεκτροδίων γείωσης τύπου Α είναι κατάλληλη για εδάφη μικρής τιμής ειδικής αντίστασης. Τουλάχιστον δύο ηλεκτρόδια πρέπει να συνδέονται με κάθε συλλεκτήριο σύστημα στην περίπτωση απομονωμένου ΣΑΠ ή με την κορνίζα του φ/β πλαισίου (που περιλαμβάνει ακίδα προστασίας) στην περίπτωση μη απομονωμένου ΣΑΠ με μήκος τουλάχιστον 2,5 m σε έδαφος που έχει ειδική αντίσταση, (αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο), μέχρι  $500\Omega\text{m}$  [16].

Τα ακτινικά ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να ενταφιάζονται σε βάθος όχι μικρότερο από 0.5 m. Το βάθος αυτό του ενταφιασμού ελαχιστοποιεί τις επιδράσεις της διάβρωσης, ξήρανσης ή παγώματος του εδάφους εξασφαλίζοντας σχετικά σταθερή ισοδύναμη ειδική αντίσταση του εδάφους και ανεξάρτητη από την εποχή του έτους. Επιπλέον, το μεγαλύτερο βάθος ενταφιασμού οδηγεί σε μικρότερη ανύψωση δυναμικού του εδάφους σε περίπτωση πλήγματος κεραυνού, και επομένως περιορίζει τις επικίνδυνες επιδράσεις του κεραυνού λόγω υψηλών τιμών τάσης επαφής (διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή), και βηματικής τάσης, (διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των πελμάτων, όταν αυτά απέχουν 1m μεταξύ τους, τη στιγμή εισόδου του ρεύματος του κεραυνού στο έδαφος [38]). Για τους λόγους αυτούς γενικότερα προτιμώνται τα κάθετα ηλεκτρόδια γείωσης [18].

Στις περιπτώσεις όπου έχουμε βραχώδες έδαφος με χαμηλή αγωγιμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια σε σχήμα πλάκας συνήθως σε διαμόρφωση E (σχήμα 2-11).



**Σχήμα 2-11** Ηλεκτρόδιο γείωσης σε σχήμα ράβδου κάθετα τοποθετημένο στο έδαφος (αριστερά) και εγκατάσταση ηλεκτροδίων γείωσης πλάκας σε διαμόρφωση E (δεξιά) [16]

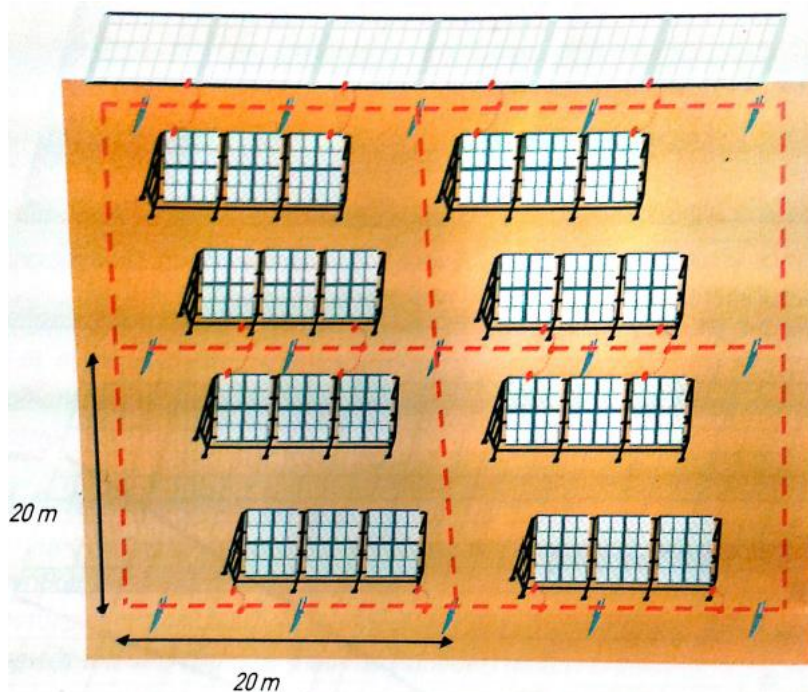
## Διάταξη ηλεκτροδίων τύπου Β

Ο Β τύπος διάταξης δημιουργεί ένα είδος περιμετρικής γείωσης στα φωτοβολταϊκά πάνελα της εγκατάστασης και συνιστάται σε φ/β πάρκα γιατί διευκολύνει τη γείωση του συλλεκτήριου συστήματος και της μεταλλικής βάσης στήριξης. Επίσης, δημιουργεί ισοδυναμική σύνδεση μεταξύ ανεξάρτητων μεταλλικών βάσεων στήριξης προς αποφυγή επικίνδυνων τάσεων επαφής [16].

Η διάταξη αυτού του τύπου αποτελείται από ένα περιμετρικό ηλεκτρόδιο γείωσης τύπου δακτυλίου, εξωτερικά της κατασκευής, με τουλάχιστον το 80% του μήκους του σε επαφή με το έδαφος ή από ένα ηλεκτρόδιο θεμελιακής γείωσης. Το περιμετρικό ηλεκτρόδιο γείωσης τύπου δακτυλίου πρέπει, κατά προτίμηση, να ενταφιάζεται σε βάθος τουλάχιστον 0.5 m και σε απόσταση τουλάχιστον 1 m από τις βάσεις στήριξης των φ/β πλαισίων της κατασκευής. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος γείωσης μειώνεται όταν τμήμα του μήκους του ηλεκτροδίου γείωσης κατανέμεται εκτός εδάφους [18].

Η ακτίνα "r" του δακτυλίου που δημιουργεί ο αγωγός γείωσης δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή  $l_1$ , (Πίνακας 2-7),  $r \geq l_1$ .

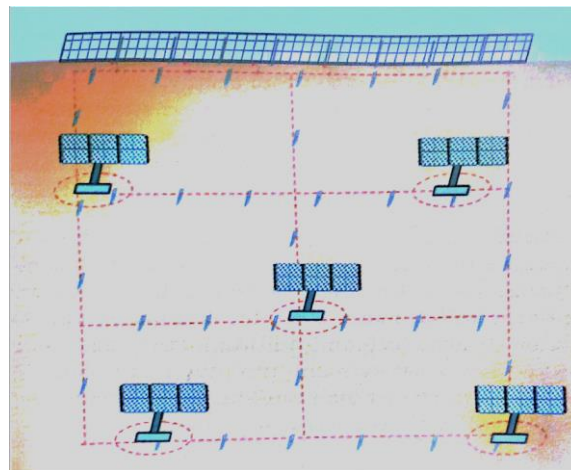
Συνήθως δημιουργούνται ορθογώνια πλέγματα, (πλέγμα γείωσης - σύστημα από οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης που αποτελούνται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων αγωγών θαμμένων στο έδαφος και συνιστούν γείωση για ηλεκτρικές συσκευές ή μεταλλικές κατασκευές [23]), διαστάσεων 20m x 20m (σχήμα 2-12), ή και μεγαλύτερα ειδικά αν το σύστημα γείωσης ενισχύεται με ηλεκτρόδια Τύπου Α κοντά στα ευάλωτα σημεία [16].



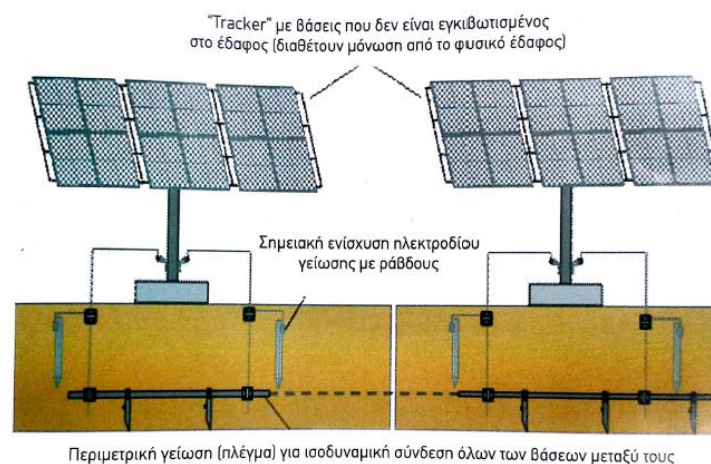
Σχήμα 2-12 Τύπος Β συστήματος γείωσης σε φ/β πάρκο [16]

### 2.3.2 Σύστημα γείωσης σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου με σύστημα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου

Τα συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου γνωστά και ως ηλιοπαρακολουθητές ή "trackers", δεν έχουν άμεση μεταλλική σύνδεση μεταξύ τους όπως συμβαίνει στα συστήματα με σταθερή βάση. Είναι λοιπόν σημαντικό να εγκατασταθεί ένα σύστημα γείωσης το οποίο θα παρέχει ισοδυναμική σύνδεση σε ολόκληρη την εγκατάσταση και θα διανέμει το κεραυνικό ρεύμα σε διάφορα μονοπάτια, βοηθώντας στην ομαλή εκκαθάρισή του στην περίπτωση πτώσης κεραυνού σε κάποιο "tracker". Η καλύτερη πρακτική που ακολουθείται είναι η διασύνδεση των φ/β -"trackers" με ηλεκτρόδιο Τύπου Β (με τυπικές διαστάσεις πλέγματος 20m x 20m), όπως φαίνεται στο σχήμα 2-13. Επίσης το σύστημα γείωσης μπορεί να ενισχυθεί με ηλεκτρόδια Τύπου Α (ράβδοι, πλάκες) σε σημεία κοντά σε κάθε "tracker" (σχήμα 2-14) [16].



**Σχήμα 2-13** Διασύνδεση των φ/β – "trackers" μέσω συστήματος γείωσης για καλύτερη διανομή του κεραυνικού ρεύματος και ισοδυναμική σύνδεση των μεταλλικών στοιχείων ολόκληρης της εγκατάστασης [16]

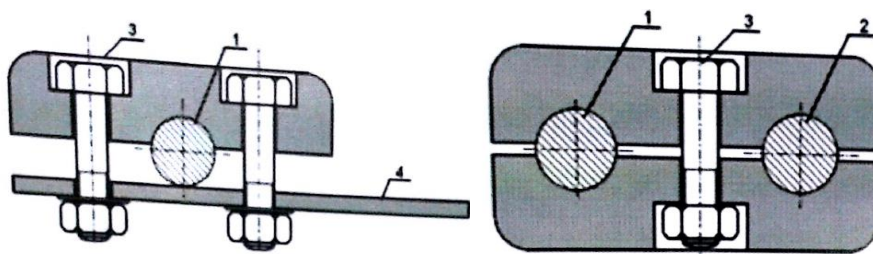


**Σχήμα 2-14** Ενδυνάμωση του συστήματος γείωσης Τύπου Β με εγκατάσταση ηλεκτροδίων Τύπου Α πλησίον των "trackers" [16]

### 2.3.3 Στερέωση

Τα τρία συστατικά στοιχεία ενός ΣΑΠ αγωγοί καθόδου, αγωγοί του συλλεκτήριου συστήματος και αγωγοί του συστήματος γείωσης πρέπει να είναι καλά στερεωμένα, ώστε να αντέχουν σε ηλεκτροδυναμικές και μηχανικές καταπονήσεις, που πιθανόν να εμφανιστούν (από δονήσεις, θερμική διαστολή, συσσώρευση χιονιού κτλ.) χωρίς να παρατηρείται χαλάρωση ή καταστροφή των αγωγών.

Τα εξαρτήματα όπως στηρίγματα, σφικτήρες, συνδετήρες και γενικά τα στοιχεία που έρχονται σε άμεση επαφή με τους αγωγούς του ΣΑΠ, πρέπει να είναι από το ίδιο υλικό ή ηλεκτροχημικά συμβατά, για αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Εάν δεν είναι εφικτή η χρήση ίδιου υλικού, τότε θα πρέπει να παρεμβάλλεται διμεταλλικό περίβλημα (σχήμα 2-16) μεταξύ των δύο ανομοίων υλικών, ή θα χρησιμοποιείται στηρίγμα με υλικό συμβατό με αυτό του αγωγού. Επίσης στο σημείο σύνδεσης δύο ανομοιογενών υλικών μπορεί κάτω από προϋποθέσεις να γίνει χρήση θερμής μονωτικής πίσσας [16].



**Σχήμα 2-15** Παράδειγμα συνδετικού σφικτήρα για σύνδεση μεταξύ αγωγού γείωσης σε σχήμα ταινίας και μεταλλικών ράβδων αγωγών καθόδου (αριστερά)

Παράδειγμα συνδετικού σφικτήρα για σύνδεση μεταξύ αγωγών γείωσης σε σχήμα ράβδου και μεταλλικών αγωγών καθόδου (δεξιά)

1. Μεταλλικός αγωγός καθόδου
2. μεταλλικός αγωγός γείωσης σε σχήμα ράβδου
3. βίδα
4. Μεταλλικός αγωγός γείωσης σε σχήμα ταινίας [16]



**Σχήμα 2-16** Διμεταλλικός σύνδεσμος αγωγών τριών πλακιδίων με ενδιάμεσο ανοξείδωτο πλακίδιο για αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης [16]



## 2.4 Εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας

Η εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας χρησιμοποιείται για την πρόληψη επικίνδυνων σπινθήρων στην υπό προστασία κατασκευή, που πιθανό να προκαλέσει η ροή του κεραυνικού ρεύματος στο εξωτερικό ΣΑΠ ή στα αγωγίμα μέρη της εγκατάστασης. Σε ένα φ/β πάρκο η εσωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας προστατεύει τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όπως inverters, πίνακες - υποπίνακες, όργανα μέτρησης, συσκευές προστασίας, φ/β στοιχεία, αισθητήρια όργανα και προλαμβάνει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας και εκδήλωσης πυρκαγιάς [16].

Δημιουργία ηλεκτρικού τόξου - σπινθήρων μπορεί να εμφανιστεί μεταξύ εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας και των πιο κάτω στοιχείων:

- ❖ μεταλλικών εγκαταστάσεων
- ❖ ηλεκτρικών, ηλεκτρονικών, τηλεπικοινωνιακών συστημάτων
- ❖ εξωτερικών αγωγίμων τμημάτων και συνδεδεμένων γραμμών [16]

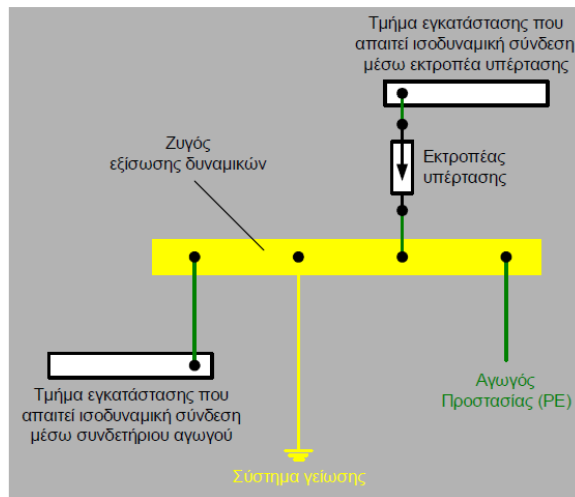
Επίσης μπορεί να δημιουργηθεί σπινθήρας μεταξύ των πιο πάνω στοιχείων σε περίπτωση που διαρρέονται από μέρος του ρεύματος κεραυνού [16].

Οι επικίνδυνοι σπινθήρες αποφεύγονται με μια σειρά μέτρων προστασίας που περιλαμβάνουν:

- ισοδυναμικές συνδέσεις (γεφύρωση δύο τμημάτων ή εγκατάσταση συσκευών περιορισμού υπερτάσεων)
- δημιουργία ηλεκτρικής μόνωσης μεταξύ τμημάτων [16].

### 2.4.1 Ισοδυναμικές συνδέσεις

Οι ισοδυναμικές συνδέσεις έχουν σκοπό να περιορίζουν την πιθανότητα εμφάνισης επικίνδυνων υπερτάσεων σε περίπτωση πλήγματος κεραυνού σε μια κατασκευή, εξασφαλίζοντας την εξίσωση του δυναμικού μεταξύ σημείων του κυκλώματος ή μεταξύ διαφορετικών κυκλωμάτων. Αυτές οι συνδέσεις πραγματοποιούνται είτε μέσω συνδετήρων αγωγών, όπου η ηλεκτρική συνέχεια δεν εξασφαλίζεται με φυσικές συνδέσεις, είτε μέσω συσκευών περιορισμού υπερτάσεων (SPDs), (αναλύονται σε επόμενο υποκεφάλαιο), όπου δεν επιτρέπεται η άμεση αγωγή σύνδεση, είτε με μονωμένο διάκενο σπινθηρισμού (isolated spark gaps ISGs), όπου δεν επιτρέπεται η άμεση γεφύρωση. Για την υλοποίηση των απαιτούμενων ισοδυναμικών συνδέσεων στο υπόγειο ή γενικά στη στάθμη του εδάφους της κατασκευής που χρειάζεται προστασία εγκαθιστούμε ένα ζυγό εξίσωσης δυναμικών ο οποίος συνδέεται με το σύστημα γείωσης και στον οποίο καταλήγουν όλοι οι συνδετήριοι αγωγοί και οι ακροδέκτες γείωσης των εκτροπέων υπέρτασης (συσκευές περιορισμού υπερτάσεων) [21, 16].



**Σχήμα 2-17** Ισοδυναμικές συνδέσεις εγκαταστάσεων μέσω ζυγού εξίσωσης δυναμικών [21]

Είναι σημαντικό οι αγωγοί των ισοδυναμικών συνδέσεων να αντέχουν το ποσοστό του ρεύματος του κεραυνού που τους διαρρέει. Το ποσοστό αυτό θα καθορίσει τις ελάχιστες διαστάσεις των αγωγών ισοδυναμικών συνδέσεων [21].

## 2.4.2 Ελάχιστη διατομή θωράκισης καλωδίων

Όταν τα καλώδια των εισερχόμενων παροχών της κατασκευής είναι θωρακισμένα και η θωράκισή τους είναι γειωμένη και στα δύο άκρα τους, το ρεύμα του κεραυνού θεωρείται ότι διαρρέει τη θωράκισή τους. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης υπέρτασης μεταξύ της θωράκισης και του ενεργού αγωγού του καλωδίου. Η υπέρταση εξαρτάται από το υλικό και τις διαστάσεις της θωράκισης καθώς και από το μήκος και τον τρόπο όδευσης του καλωδίου. Σύμφωνα με την IEC 61024-1-2:1998 η ελάχιστη διατομή της θωράκισης που εξασφαλίζει την αυτοπροστασία ενός καλωδίου, όπου δεν απαιτείται εγκατάσταση εκτροπέα υπέρτασης, θα δίδεται από τη σχέση:

$$A_{min} = \frac{I_f * \rho_c * L_c * 10^6}{U_c}, mm^2$$

, όπου:

- $I_f$  (kA), είναι το ρεύμα του κεραυνού που ρέει στη θωράκισή
- $\rho_c$  ( $\Omega m$ ), είναι η ειδική αντίσταση της θωράκισης, τυπικές τιμές για Cu:  $1,7 \times 10^{-8} \Omega m$ , Al:  $2,7 \times 10^{-8} \Omega m$
- $L_c$  (m), είναι το μήκος του καλωδίου σύμφωνα με τον Πίνακα 2-8
- $U_c$  (kV), είναι η κρουστική τάση αντοχής του καλωδίου ανάλογα με την ονομαστική τάση λειτουργίας του σύμφωνα με τον Πίνακα 2-9 [18]

**Πίνακας 2-8** Μήκος καλωδίου ανάλογα με τη κατάσταση της θωράκισης σε σχέση με το έδαφος.  
Πηγή: IEC 61024-1-2:1998 [18]

Κατάσταση θωράκισης	Lc (m)
Σε επαφή με το έδαφος ειδικής αντίστασης ρ (Ωm)	$Lc \leq 8\sqrt{\rho}$
Απομονωμένη από το έδαφος ή στον αέρα	Lc = απόσταση μεταξύ της κατασκευής και του πλησιέστερου σημείου γείωσης της θωράκισης

**Πίνακας 2-9** Κρουστική τάση αντοχής του καλωδίου ανάλογα με την ονομαστική τάση λειτουργίας. Πηγή: IEC 61024-1-2:1998 [18]

Ονομαστική τάση (kV)	Uc (kV)
≤0.05	5
0.22	15
10	75
15	95
20	125

### 2.4.3 Αντοχή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού έναντι υπερτάσεων

Για τη λήψη μέτρων προστασίας από υπερτάσεις σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις γίνεται διαχωρισμός του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε κατηγορίες, οι οποίες αντικατοπτρίζουν την αντοχή του σε φαινόμενα υπερτάσεων. Βασικές παράμετροι για την κατηγοριοποίηση κάθε στοιχείου είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας του στοιχείου, το σημείο εγκατάστασης του και η διηλεκτρική αντοχή του βάσει του EN 60664-1 [16].

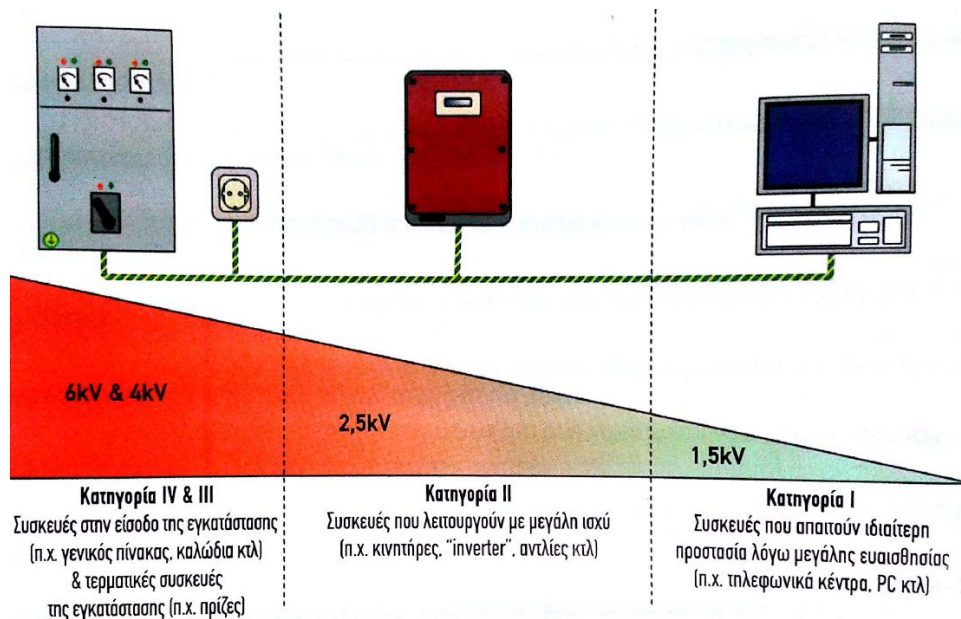
Σε συστήματα χαμηλής τάσης (230V/400V) διακρίνουμε τις τέσσερις πιο κάτω κατηγορίες με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά:

**Κατηγορία 4:** Συσκευές που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση, όπως ηλεκτρολογικοί πίνακες, ασφάλειες, καλώδια, όργανα μέτρησης κτλ.

**Κατηγορία 3:** Συσκευές μόνιμα συνδεδεμένες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για τη διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος, όπως υποπίνακες.

**Κατηγορία 2:** Συσκευές μόνιμα συνδεδεμένες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό υψηλής ισχύος, όπως γεννήτριες, κινητήρες, αντλίες νερού κτλ.

**Κατηγορία 1:** Ηλεκτρονικές συσκευές χαμηλής ισχύος που περιέχουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα και χρειάζονται ειδική προστασία [16].



Σχήμα 2-18 Κατηγοριοποίηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε φ/β εγκαταστάσεις ανάλογα με τη διηλεκτρική τους αντοχή [16]

## 2.4.4 Συσκευές περιορισμού υπερτάσεων

### 2.4.4.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Οι συσκευές περιορισμού υπερτάσεων, ( Surge Protective Devices — SPDs), χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα χαμηλής τάσης για προστασία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και τη δημιουργία ισοδυναμικών συνδέσεων στους αγωγούς ηλεκτροδότησης. Στόχος τους είναι η προστασία των ηλεκτρικών συστημάτων και του εξοπλισμού από ανεπιθύμητες υπερτάσεις και κρουστικά ρεύματα, που πιθανόν να εμφανιστούν από κεραυνικά πλήγματα ή διακοπτικές υπερτάσεις (switching overvoltages). Περιλαμβάνουν τουλάχιστον ένα μη γραμμικό στοιχείο (βαρίστορ μεταλλικού οξειδίου ή σπινθηριστή διακένου) [16].

Η λειτουργία τους περιγράφεται ως εξής:

A. Στην περίπτωση απουσίας υπέρτασης στο σύστημα ηλεκτροδότησης οι συσκευές υπερτάσεων δεν επηρεάζουν το σύστημα.

B. Στην περίπτωση εμφάνισης υπέρτασης η συσκευή ανταποκρίνεται και μειώνοντας την αντίσταση της, αφήνει το ρεύμα να εκτονωθεί διαμέσου της, μέχρι να φτάσει σε ασφαλή επίπεδο.

Γ. Μετά την απόσβεση της υπέρτασης, η αντίσταση της συσκευής ανεβαίνει σε υψηλά επίπεδα, ώστε να μην υπάρχει διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος [16].



#### **2.4.4.2 Διαχωρισμός συσκευών περιορισμού υπερτάσεων ανάλογα με την απόκριση τους σε ρεύμα υπερεντάσεως**

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι συσκευών περιορισμού υπερτάσεων που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, ανάλογα με την απόκριση τους σε ρεύμα υπερεντάσεως [16].

**Τύπος 1 (T1):** που προσφέρει πρωτεύουσα προστασία από κεραυνικά πλήγματα και ανταποκρίνεται σε κυματομορφές ρεύματος 10/350μs. Αυτός ο τύπος τοποθετείται στα σημεία που ενδέχεται να έχουν τη μεγαλύτερη συμφόρηση από το κεραυνικό πλήγμα δηλαδή στα σημεία πτώσης του κεραυνού.

**Τύπος 2 (T2):** που προσφέρει δευτερεύουσα προστασία από υπερεντάσεις και ανταποκρίνεται σε κυματομορφές ρεύματος 8/20μs. Αυτός ο τύπος τοποθετείται στα σημεία που δέχονται έμμεσα το κεραυνικό πλήγμα, (σημεία όπου το κεραυνικό πλήγμα είναι πιο εξασθενημένο λόγω εκτόνωσης του από πολλαπλές διόδους) [16].

#### **2.4.4.3 Επιλογή στάθμης προστασίας συσκευών περιορισμού υπερτάσεων**

Η σημαντικότερη παράμετρος στην επιλογή μιας συσκευής SPD είναι η στάθμη προστασίας. Ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός έχει συγκεκριμένη αντοχή σε υπερτάσεις, ανάλογα με το σημείο εγκατάστασης και την ονομαστική τάση λειτουργίας του. Η τιμή της τάσης  $U_p$  (από αυτή την τιμή της τάσης και πάνω το SPD τίθεται σε λειτουργία και απομονώνει τον υπό προστασία εξοπλισμό) πρέπει να είναι πιο μικρή από τα όρια αντοχής του εξοπλισμού προκειμένου να τον προστατεύει. Η τιμή  $U_p$  καθορίζεται από τον κατασκευαστή [16].

### **2.4.5 Προστασία φ/β στοιχείων από υπερρεύματα και διακόπτης φορτίου**

#### **Ασφάλειες gPV**

Για την προστασία των φ/β στοιχείων από υπερεντάσεις που πιθανόν να εμφανιστούν, είτε λόγω κάποιου βραχυκυκλώματος, ή απότομης αλλαγής της τιμής του ρεύματος, υπάρχουν ειδικές ασφάλειες για φ/β εγκαταστάσεις που φέρουν τη σήμανση “gPV”. Επειδή, το ρεύμα που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες έχει ρυθμό αύξησης από το μηδέν στη μέγιστή του τιμή, πέντε φορές πιο γρήγορα από ότι στις συνηθισμένες πηγές DC ρεύματος, οι παραδοσιακές ασφάλειες δεν μπορούν να ανταποκριθούν επαρκώς [16].

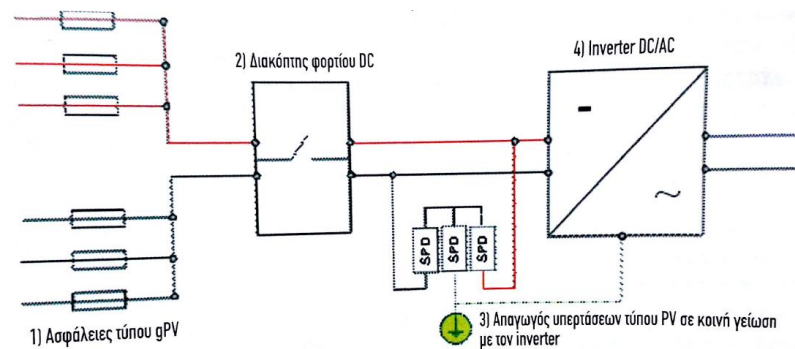
Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι όταν γίνεται παραλληλισμός των καλωδιώσεων υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας αναστροφου ρεύματος στα άκρα κάποιου string, π.χ. στην περίπτωση που εμφανιστεί παροδική σκίαση τμήματος της φ/β εγκατάστασης. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιφέρει ζημιά στα φ/β στοιχεία, αφού πρόκειται για ένα ρεύμα διόλου αμελητέο. Έτσι, είναι αναγκαίο όταν υπάρχει παραλληλισμός περισσότερων από δύο κλάδων (strings) να τοποθετούνται ασφάλειες προστασίας “gPV”. (Σημ. μπορεί να γίνει και χρήση

διόδων κάτι το οποίο δεν συνίσταται, γιατί οι διόδοι δεν αποτελούν εν γένει συσκευές προστασίας και επιπλέον προκαλούν απώλειες στο κύκλωμα).

Οι ασφάλειες τοποθετούνται σε σειρά με την καλωδίωση κάθε σειράς φ/β στοιχείων και πρέπει να είναι τοποθετημένες σε ασφαλειοθήκες ικανές να αντέξουν καταπόνηση ακόμα και στις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας (σχήμα 2-19). (Σημ. αντί ασφαλειών μπορεί να γίνει χρήση μικροαυτομάτων (MCB) μια λύση τεχνικά ανώτερη αλλά με σημαντικά μεγαλύτερο κόστος) [16].

### Διακόπτης φορτίου

Είναι αναγκαίο να υπάρχει ένας διακόπτης φορτίου πριν από κάθε σετ από SPDs ούτως ώστε, να απομονώνει την εγκατάσταση σε περιπτώσεις ανάγκης αντικατάστασης των SPDs. Ο συγκεκριμένος διακόπτης φορτίου πρέπει να είναι ικανός να διακόπτει το κύκλωμα ακόμα και αν είναι υπό φορτίο για αυτό πρέπει να έχει τα κατάλληλα τεχνικά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν ειδικοί διακόπτες για αυτή τη χρήση με την ονομασία DC - απομονωτές (DC - isolators) που είναι σχεδιασμένοι για συνεχή ρεύματα (σχήμα 2-19). Ως επί το πλείστον περιλαμβάνουν ένα θάλαμο σβέσης του ηλεκτρικού τόξου για καλύτερη αποτελεσματικότητα. Σε αντίθεση με του κοινούς διακόπτες φορτίου οι DC - απομονωτές επιδεικνύουν πολικότητα για αυτό πρέπει να εξετάζονται τα φύλλα των κατασκευαστών πριν συνδεθούν στην εγκατάσταση. Λανθασμένη σύνδεση εγκυμονεί κινδύνους πυρκαγιάς από πιθανή ανάφλεξη - καταστροφή της συσκευής [16].

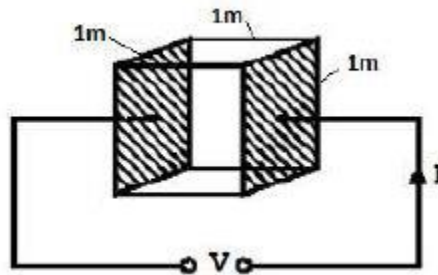


**Σχήμα 2-19** Παράδειγμα σχηματικής διαμόρφωσης προστασίας στην DC - πλευρά (κάθε string περιλαμβάνει ασφάλεια gPV, ενώ στη συνέχεια αφότου παραλληλιστεί η καλωδίωση, τοποθετείται DC - isolator και στη συνέχεια ένα σετ SPDs) [16]

## Κεφάλαιο 3: Ειδική αντίσταση εδάφους

### 3.1 Ορισμός

Ως ειδική αντίσταση του εδάφους,  $\rho$ , ορίζεται η αντίσταση του υλικού του εδάφους που παρουσιάζει ένας μοναδιαίος κύβος ( $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ ), όταν τοποθετηθούν επίπεδα ηλεκτρόδια σε δύο απέναντι πλευρές του, μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού  $U$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3-1. Μετριέται συνήθως σε  $\Omega\text{m}$  [12].



Σχήμα 3-1 Ορισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους [12]

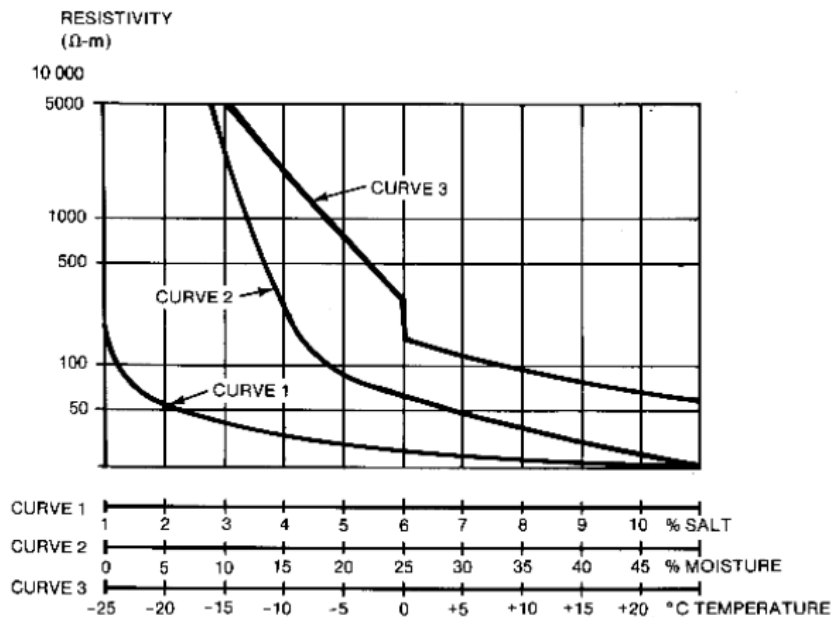
Με άλλα λόγια, η ειδική αντίσταση είναι ένα χαρακτηριστικό του εδάφους, το οποίο δείχνει πόσο αγωγίμη ηλεκτρικά είναι η γη. Συνήθως δεν έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σημεία του εδάφους. Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους [22].

### 3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών (εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ.), με αντιστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του,  $\rho$ , μετρούμενη συνήθως σε  $\Omega\text{m}$ . Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική, περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [12, 23].

Ειδικότερα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Το περιεχόμενο των διαφόρων εδαφών σε υγρασία μπορεί να κυμαίνεται μέσα σε ένα ευρύ φάσμα τιμών, αναλόγως της γεωγραφικής τοποθεσίας και των καιρικών συνθηκών, από ένα χαμηλό ποσοστό σε περιοχές ερήμου μέχρι περίπου 80% σε βλατώδεις περιοχές. Για την κατανόηση της μεγάλης επίδρασης της υγρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους, αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Συγκεκριμένα, η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται απότομα με την αύξηση της υγρασίας όταν το περιεχόμενο της (στο έδαφος) είναι μικρότερο από 15% κατά

βάρος. Στην καμπύλη 2 του σχήματος 3-2 φαίνεται ότι για ποσοστά μεγαλύτερα από 22% η υγρασία έχει ελάχιστη επίδραση στην αντίσταση  $\rho$  [12, 23].



**Σχήμα 3-2** Επίδραση υγρασίας, θερμοκρασίας και άλατος στην ειδική αντίσταση του εδάφους [12]

Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), θειικό χαλκό ( $\text{CuSO}_4$ ), ή θειικό μαγνήσιο ( $\text{MgSO}_4$ ) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Η επίδραση των διακυμάνσεων αυτών στην αποτελεσματικότητα της γείωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος [23].

Συμπερασματικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι οι εξής:

### 3.2.1 Είδος του εδάφους

Το είδος του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ωστόσο, δεν είναι δυνατό να ορισθούν καθαρά οι τύποι του εδάφους. Για παράδειγμα, με τη λέξη αργιλώδη, μπορεί να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Επιπλέον, ακόμα και για τον ίδιο γενικό τύπο εδάφους η τιμή της ειδικής αντίστασης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Ένας αριθμός ερευνητών έχει μετρήσει κατά καιρούς την ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους, είτε

παίρνοντας δείγματα στο εργαστήριο, είτε επί τόπου. Στον Πίνακα 3-1 παρατίθενται οι προσεγγιστικές τιμές της ειδικής αντίστασης για διάφορους τύπους εδαφών [24].

**Πίνακας 3-1** Ειδικές αντιστάσεις εδαφών [22, 23]

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος	1000
Αμμόλιθος	2500
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000
Λιθώνας	Πάνω από 30000
Γρανίτης	Πάνω από 50000

### 3.2.2 Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

Η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Η αντίσταση μειώνεται αυξανομένης της υγρασίας του εδάφους σύμφωνα με το σχήμα 3-2. Η αγωγιμότητα του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, γεγονός που σημαίνει ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων σε αυτό αλάτων, παίζουν μεγάλο ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Η περιεκτικότητα σε νερό μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Σπάνια το έδαφος είναι πολύ ξηρό, με εξαίρεση την άμμο της ερήμου όπου το έδαφος θεωρείται, προσεγγιστικά, ότι παρουσιάζει μεγάλο βαθμό ξηρότητας. Από την άλλη, δεν εμφανίζονται συχνά εδάφη με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη του 40% [24].

Στον Πίνακα 3-2 καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία.

**Πίνακας 3-2** Επίδραση της υγρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [24]

Περιεκτικότητα σε υγρασία (% κατά βάρος)	Ειδική αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )	
	Άνω στρώμα εδάφους	Κάτω στρώμα εδάφους
0,0	$10^7$	$10^7$
2,5	2500	1500
5,0	1650	430
10,0	530	220
15,0	210	130
20,0	120	100
30,0	100	80

### 3.2.3 Θερμοκρασία και πίεση

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας φθάνει περίπου τα 130% κατά τη διάρκεια του έτους. Από τον Ιανουάριο έως τον Φεβρουάριο είναι υψηλότερη και από τον Ιούλιο έως τον Αύγουστο χαμηλότερη. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο σχήμα 3-2, καθώς επίσης και στον πίνακα 3-3 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους και γίνεται αρκετά έντονη για θερμοκρασίες υπό του μηδενός [23].

**Πίνακας 3-3** Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [24]

Θερμοκρασία (°C)	Ειδική αντίσταση (Ωm)
20	72
10	99
0 (νερό)	138
0 (πάγος)	300
-5	790
-15	3300

Όσον αφορά στην επίδραση της πίεσης, έχει παρατηρηθεί ότι υψηλότερες πιέσεις, που οφείλονται σε πιο συμπαγείς δομές του εδάφους, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης [24].

### 3.2.4 Διαλυμένα άλατα στο νερό

Το νερό περιέχει διαλυμένα άλατα, τα οποία είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την ειδική αντίστασή του. Στο σχήμα 3-2 παρουσιάζεται η επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση σε σχέση με την τιμή που αυτή έχει όταν το νερό είναι απιονισμένο. Διαφορετικά είδη αλάτων επιδρούν με διαφορετικό τρόπο και πιθανώς, αυτό εξηγεί γιατί η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών από διαφορετικές περιοχές παρουσιάζει σημαντικές διαφορές [24].

### 3.2.5 Μέγεθος των κόκκων του εδάφους

Το μέγεθος των κόκκων, αλλά και η παρουσία κόκκων διαφορετικών μεγεθών, διαδραματίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης τους εδάφους. Η ειδική αντίσταση μάλιστα φαίνεται να αυξάνεται αναλογικά με το μέγεθος των κόκκων [24].

Επίσης, το μέγεθος των κόκκων, αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος, επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία, αφού στην περίπτωση κόκκων μεγάλου μεγέθους η υγρασία κατακρατείται λόγω της επιφανειακής τάσης. Στην περίπτωση που το

μέγεθος των κόκκων ποικίλλει, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγάλων σε μέγεθος κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους κόκκους και έτσι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται [24].

### 3.2.6 Μορφή της τάσης

Σε κρουστικές τάσεις, αλλά και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της αντίστασης. Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο της τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση [24].

### 3.2.7 Ηλεκτρικό ρεύμα

Η ειδική αντίσταση στην περιοχή των ηλεκτροδίων γείωσης επηρεάζεται από τη ροή ρεύματος από τα ηλεκτρόδια προς το περιβάλλον έδαφος. Η επίδραση αυτή εξαρτάται από το ποσό υγρασίας στο έδαφος και τη θερμοκρασία του, καθώς και το μέγεθος και τη διάρκεια της ροής ρεύματος που προκαλεί ξήρανση του εδάφους και επομένως αύξηση της αντίστασής του. Ανεκτό όριο για την πυκνότητα ρεύματος είναι τα  $200 \text{ A/m}^2$  με διάρκεια 1s [23].

### 3.2.8 Ένταση του πεδίου (Voltage gradient)

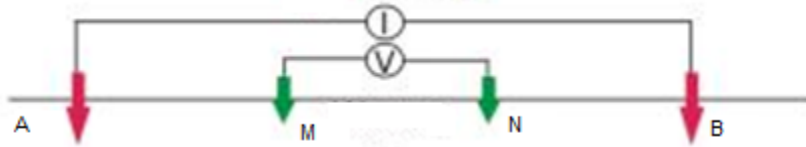
Η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζεται από την ένταση του πεδίου, εκτός εάν η τελευταία υπερβαίνει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με το είδος του εδάφους, συνήθως όμως είναι της τάξης μερικών kV/cm. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, θα δημιουργηθούν τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, τα οποία οδηγούν στη συνέχεια σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα τόξα θα εκδηλώνονται σε εκείνη την περιοχή όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θα ξεπερνά την κρίσιμη τιμή, ενώ σε όλο τον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη [24].

## 3.3 Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους

Εκτιμήσεις της ειδικής αντίστασης βάσει των χαρακτηριστικών του εδάφους δίνουν προσεγγιστικές τιμές. Επιπλέον η ειδική αντίσταση ποικίλλει ανάλογα με το βάθος χωρίζοντας το έδαφος σε στρώματα διαφορετικής ειδικής αντίστασης το καθένα. Για τον καθορισμό των στρωμάτων και της ειδικής αντίστασης καθενός έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι κυριότερες των οποίων είναι [23]:

- Μέθοδος των 4 σημείων (ηλεκτροδίων) (Four point method)
- Μέθοδος των 3 σημείων (ηλεκτροδίων) (Three point method ή Variation of Depth Method ή Fall of potential)
- Μέθοδος των 2 σημείων (ηλεκτροδίων) (Two point method)

Η μέθοδος των 4 σημείων φαίνεται στο σχήμα 3-3:



Σχήμα 3-3 Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης [24]

Τα ηλεκτρόδια A και B είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος: ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται στο υπέδαφος από το θετικό ηλεκτρόδιο A και εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο B. Τα ηλεκτρόδια M και N είναι τα ηλεκτρόδια δυναμικού, με τα οποία μετρείται η διαφορά δυναμικού  $\Delta U$ .

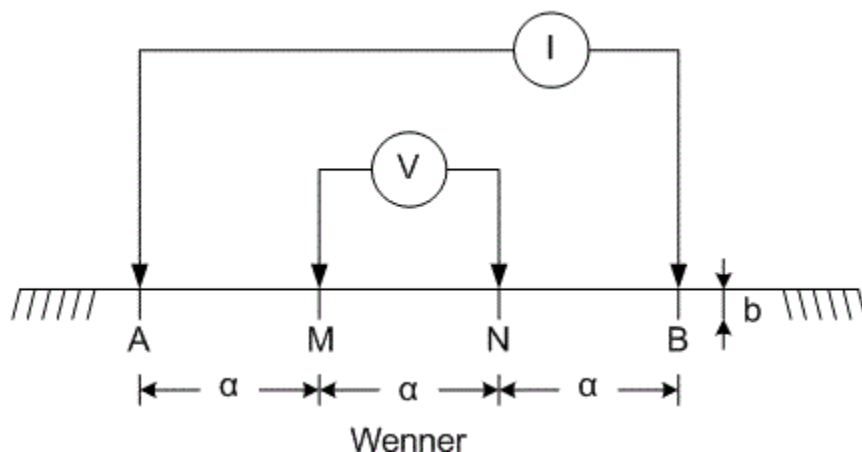
Κατά καιρούς οι ερευνητές πρότειναν διαφορετικούς τρόπους διάταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων και έτσι προέκυψαν οι εξής τεχνικές μέτρησης της ειδικής αντίστασης:

- Μέθοδος Wenner
- Μέθοδος Schlumberger – Palmer
- Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου
- Μέθοδος Lee
- Μέθοδος διπόλου-διπόλου
- Τετραγωνική διάταξη [24]

Από τις παραπάνω μεθόδους μέτρησης αναφέρουμε τη μέθοδο Wenner και τη μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού.

### 3.3.1 Μέθοδος Wenner

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο συχνά εφαρμοζόμενη. Χρησιμοποιεί τέσσερα ηλεκτρόδια θαμμένα στο έδαφος σε βάθος  $b$ , σε ευθεία και σε ίση απόσταση  $a$  μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-4 [23].



Σχήμα 3-4 Διάταξη Wenner [24]



Η τάση μεταξύ των δύο μεσαίων ηλεκτροδίων μετριέται με βολτόμετρο και διαιρείται με το ρεύμα που διαρρέει τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια, το οποίο μετριέται με αμπερόμετρο. Το πηλίκο δίνει την αντίσταση R [24].

Για διαφορετικές αποστάσεις  $a$ , παίρνουμε μια δεδομένη τιμή για το ρεύμα που εισρέει στη γη. Όσο αυξάνεται το  $a$ , τόσο βαθύτερα εισρέει το ρεύμα στη γη. Εφαρμόζοντας στα άκρα των ηλεκτροδίων A και B ρεύμα σταθερής έντασης, η τάση που μετριέται στα άκρα του εσωτερικού ζευγαριού ηλεκτροδίων πρέπει να μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση  $a$ . Επομένως οι τιμές  $V/I$  ποικίλλουν για τις διάφορες αποστάσεις  $a$ . Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους [24].

Η ειδική αντίσταση του εδάφους  $\rho$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

όπου:

$\rho$ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε  $\Omega\text{m}$

$R$ , η μετρούμενη αντίσταση σε  $\Omega$

$a$ , η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων σε m

$b$ , το βάθος στο οποίο φτάνουν τα ηλεκτρόδια σε m [23]

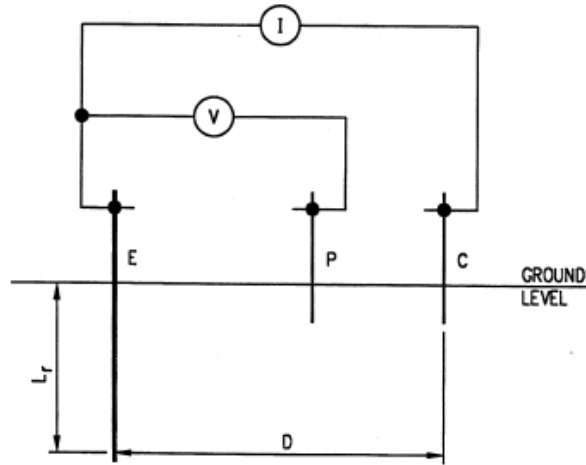
Αν  $b \ll a$  η ειδική αντίσταση δίνεται από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$\rho = 2\pi aR$$

Με τους παραπάνω τύπους υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση  $\rho$  σε βάθος  $a$  σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην ειδική αντίσταση από στρώμα σε στρώμα [23].

### 3.3.2 Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού (fall-of-potential)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τρία ηλεκτρόδια, εκ των οποίων το ένα είναι θαμμένο σε βάθος  $L_r$ , μεταβαλλόμενο. Τα δύο άλλα ηλεκτρόδια, γνωστά ως ηλεκτρόδια αναφοράς, θάβονται σε μικρό βάθος, κατακόρυφα. Η σύνδεσή τους φαίνεται στο σχήμα 3-5 [23].



Σχήμα 3-5 Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων [23]

Η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1}$$

όπου:

$\rho$ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε  $\Omega\text{m}$

$L_r$ , το βάθος του ηλεκτροδίου E σε m

$d$ , η διάμετρος του σε m

$R$ , η μετρούμενη μέσω των οργάνων αντίσταση σε  $\Omega$

Η σχέση αυτή δίνει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος [23].

### 3.3.3 Σύγκριση μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης

Η μέθοδος Wenner είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης. Αυτό οφείλεται στην απλότητα της εφαρμογής της και του εξοπλισμού καθώς και στο γεγονός ότι δίνει τιμές της ειδικής αντίστασης σε στρώματα μεγάλου βάθους χωρίς την οδήγηση ηλεκτροδίων σε τέτοιο βάθος. Επιπλέον, οι μετρήσεις δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις αντιστάσεις των ηλεκτροδίων [23].

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου των τριών ηλεκτροδίων είναι ο προσδιορισμός του βάθους, όπου μπορεί να οδηγηθεί το ηλεκτρόδιο. Αυτό καθορίζει το εάν και με ποιον τρόπο είναι δυνατή η εγκατάσταση πλέγματος γείωσης σε αυτό το βάθος. Παρά το τεχνικής φύσεως πλεονέκτημα αυτό, η εν λόγω μέθοδος αδυνατεί να εφαρμοστεί σε βραχώδη εδάφη και παρουσιάζει σφάλμα στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης όταν το ηλεκτρόδιο οδηγείται

σε μεγάλο βάθος. Αυτό οφείλεται στην απώλεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος εξαιτίας δονήσεων και μεγαλύτερης διαμέτρου συνδέσεων που οδηγούν σε μετρήσεις μεγαλύτερες του πραγματικού και επακόλουθα σε εγκατάσταση υπερεκτιμημένης γείωσης.

Γενικά, στην εφαρμογή μεθόδου μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους πρέπει να καταγράφονται εκτός από τις μετρήσεις η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη οποιαδήποτε αγώγιμα αντικείμενα είναι θαμμένα στην περιοχή της μέτρησης, καθώς αυτά επηρεάζουν τη μετρούμενη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος. Συγκεκριμένα στην περίπτωση όπου πλέγμα γείωσης έχει ήδη εγκατασταθεί στην περιοχή, οι μετρήσεις ενδείκνυται να γίνονται σε μικρή απόσταση από το πλέγμα και με τέτοιο τρόπο (απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων) ώστε το πλέγμα να μην επιδρά στο μετρούμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης στην περιοχή του πλέγματος με την προϋπόθεση ότι το έδαφος θεωρείται ομογενές [23].

### 3.4 Καθορισμός της δομής του εδάφους

Βασική παράμετρος στη μελέτη του συστήματος γείωσης μιας εγκατάστασης είναι η δομή του εδάφους ακριβώς κάτω από αυτήν.

Εάν το έδαφος είναι **ομοιογενές** (έδαφος του οποίου η ειδική αντίσταση έχει μία τιμή), η ακριβής τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι ανεξάρτητη του  $a$  (βλέπε §3.3.1) και σχεδόν ίση με την πραγματική ειδική αντίσταση της γης [25].

Πρακτικά όμως, το έδαφος έχει συνήθως **πολυστρωματική** δομή (πολυστρωματικά εδάφη – εδάφη των οποίων η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται αξιοσημείωτα απ' το ένα στρώμα στο άλλο ή ακόμα και σε διαφορετικά βάθη του ίδιου στρώματος) καθώς η ειδική του αντίσταση δεν έχει μια σταθερή τιμή αλλά διαφέρει ανάλογα με το εξεταζόμενο βάθος, τη θερμοκρασία κλπ. Στο σχεδιασμό συστημάτων γείωσης, αυτή η πολυστρωματική δομή εΐθισται να μοντελοποιείται με το διαχωρισμό του εδάφους σε στρώματα, με σταθερή ειδική αντίσταση το καθένα. Η μορφή των στρωμάτων αυτών δύναται να είναι οριζόντια, κατακόρυφη, σφαιρική κλπ. [25].

Ο καθορισμός των παραμέτρων της δομής του εδάφους (ειδική αντίσταση και βάθος του κάθε στρώματος του εδάφους) είναι συνεπώς απαραίτητος για το σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων για διστρωματική και τριστρωματική δομή του εδάφους χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους [26, 27, 28, 29].



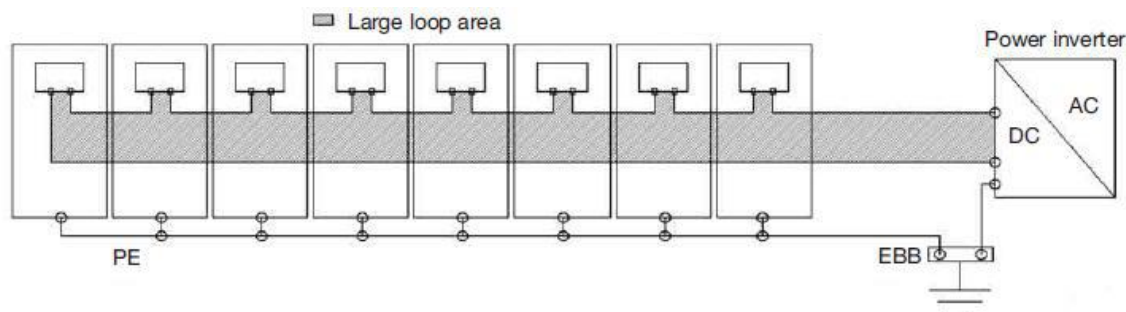
## Κεφάλαιο 4: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η μελέτη και η κατασκευή του κατάλληλου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας για ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, απαιτεί τη σε βάθος γνώση του θέματος, καθώς επίσης και συνεχή ενημέρωση για τα νέα δεδομένα που προκύπτουν. Γι' αυτό το λόγο, κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο να αναφερθούν ορισμένα βασικά σημεία από μερικές δημοσιευμένες εργασίες, που αφορούν διάφορα ευρήματα σχετικά με την αντικεραυνική προστασία φ/β πάρκων, ερευνητών ανά τον κόσμο.

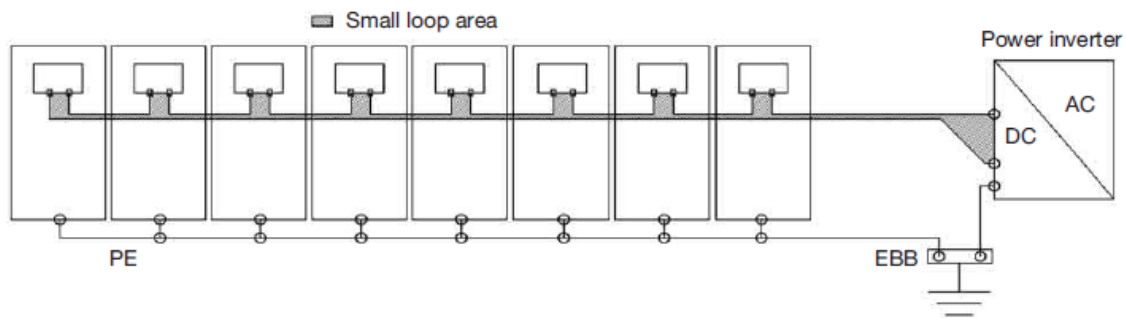
### 4.1 Τρόποι μείωσης επαγόμενων υπερτάσεων σε φ/β συστήματα

Το 2009 οι Giovanni Luca Amicucci και Fabio Fiamingo αναλύουν λεπτομερώς διάφορους τρόπους μείωσης των επαγόμενων υπερτάσεων στα φ/β συστήματα. Οι τρόποι αυτοί είναι [1]:

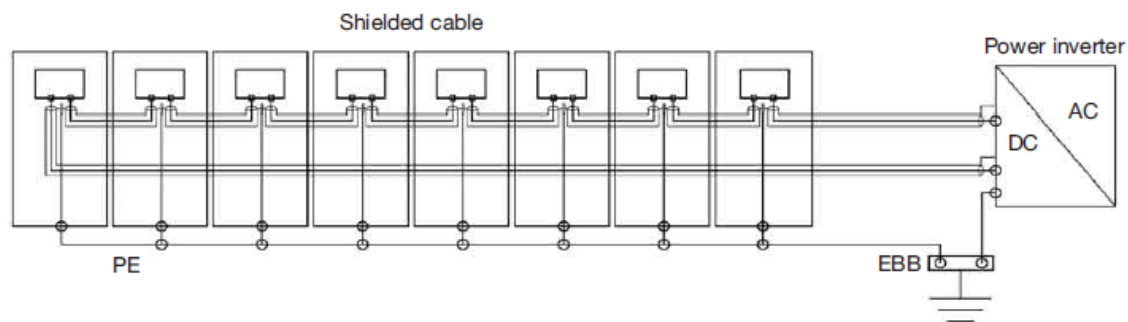
- **Μείωση μήκους αγωγών και επιφάνειας βρόχων:** στην AC πλευρά μειώνεται το μήκος των αγωγών, ενώ στη DC πλευρά είναι αδύνατο να μειωθεί το μήκος των αγωγών διασύνδεσης των πλαισίων γι' αυτό περιστρέφονται, ώστε να επιτευχθεί μικρότερος βρόχος (σχήματα 4-1 και 4-2). Η μέθοδος αυτή παρέχει σημαντική μείωση των επαγόμενων υπερτάσεων μόνο στη περίπτωση μικρών φ/β συστημάτων (ισχύς μικρότερη των 10 kWp ).
- **Χρήση θωρακισμένων αγωγών:** για φ/β συστοιχίες με περισσότερα από 200 πλαίσια προτείνεται η λύση των θωρακισμένων αγωγών αν και δαπανηρή (σχήμα 4-3).
- **Απαγωγείς υπερτάσεων (SPDs):** στο σχήμα 4-4 φαίνεται πως ο απαγωγέας πρέπει να εγκατασταθεί κοντά στον αντιστροφέα. Σε αυτή τη περίπτωση, αν δεν έχουν ελαχιστοποιηθεί οι σχηματιζόμενοι βρόχοι, τότε μπορεί να υπάρξουν υπερτάσεις στα πλαίσια που δεν θα ενεργοποιήσουν τον απαγωγέα, αλλά θα βραχυκυκλώσουν τις διόδους παράκαμψης. Ως λύση του προβλήματος αυτού πρέπει οι διόδοι να παρακαμφθούν με αντίστροφη τάση μεγαλύτερη του 1 kV [1].



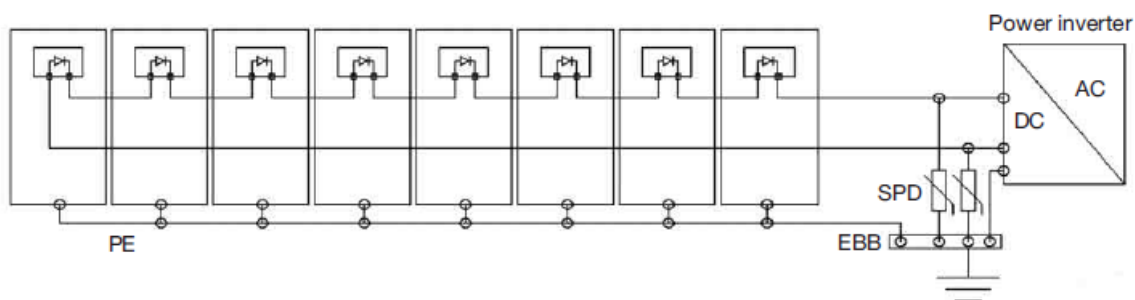
Σχήμα 4-1 Σχηματιζόμενος βρόχος λόγω αγωγών διασύνδεσης [1, 33]



Σχήμα 4-2 Ελαχιστοποίηση σχηματιζόμενου βρόχου [1, 33]



Σχήμα 4-3 Χρήση θωρακισμένων αγωγών [1, 33]



Σχήμα 4-4 Χρήση απαγωγέα υπερτάσεων [1, 33]

## 4.2 Πειραματική σύγκριση απομονωμένου και μη απομονωμένου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας για μεγάλης κλίμακας φ/β πάρκο

Το 2012 ο Νικόλαος Κόκκινος κ.α., διερεύνησαν μέσω ενός πειράματος στο εργαστήριο της ΕΛΕΜΚΟ την καταλληλότητα συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας σε ένα μεγάλο φ/β πάρκο ισχύος 2 MWp στην Ελλάδα [31].

Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πάρκο που μελέτησαν είναι εγκατεστημένο στην κορυφή ενός βουνού, σε επίπεδη περιοχή, καταλαμβάνοντας μια συνολική επιφάνεια περίπου 115,000 m<sup>2</sup>. Συνολικά περιέχει 180 αντιστροφείς DC / AC ονομαστικής ισχύος 11kW, που

λειτουργούν στα 800 VDC και 7.300 φωτοβολταϊκά πάνελ ονομαστικής ισχύος 270 Wp με διαστάσεις 2m x 1m καθένα. Το φωτοβολταϊκό πάρκο συνδέεται με το σύστημα διανομής 21 kV μέσης τάσης (MT) μέσω 8 υποσταθμών (MT / XT). Το έδαφος είναι βραχώδες ( $\rho > 2000 \Omega m$ ) και η δομή στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι ένας συνδυασμός οπλισμένου σκυροδέματος για τη στήριξη των βάσεων στο έδαφος και αλουμινίου για την στήριξη πάνω από το έδαφος.

Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας που μελετήθηκαν για το εν λόγω πάρκο ήταν το μη απομονωμένο (σχήμα 4-5) και το απομονωμένο (σχήμα 4-6).



**Σχήμα 4-5** Μη απομονωμένο ΣΑΠ [31]



**Σχήμα 4-6** Απομονωμένο ΣΑΠ [31]

Η μικρής κλίμακας πειραματική εγκατάσταση που μελέτησαν στο εργαστήριο ήταν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 2 kWp (σχήμα 4-7). Η συγκεκριμένη πειραματική εγκατάσταση αποτελούταν από 9 φωτοβολταϊκά πλαίσια που συνδέονταν σε σειρά

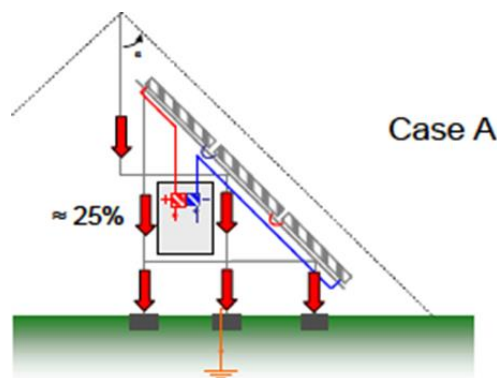


δίνοντας στο σύνολο 200V τάση εξόδου και ρεύμα 10A. Κατά τη διάρκεια των κρουστικών πειραμάτων τα εργαστηριακά φώτα έσβηναν, ώστε να υπάρχει μηδενική τάση στο βρόχο καλωδίου συνεχούς ρεύματος, το οποίο είχε μήκος περίπου 18 μέτρα.



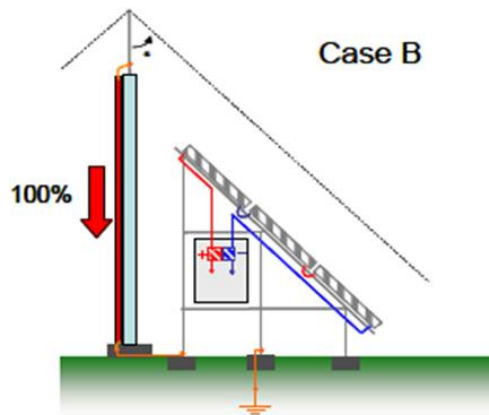
**Σχήμα 4-7** Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο και ο σχηματισμός βρόχου του DC καλωδίου (κόκκινο (+) και μαύρο (-)) [31]

Ο σκοπός της εργαστηριακής δοκιμής ήταν να διερευνηθεί ποια από τις ακόλουθες δύο ενδεχόμενες περιπτώσεις θα έδινε τη χαμηλότερη επαγόμενη τάση κατά μήκος του βρόχου καλωδίου DC της συστοιχίας των φ/β πλαισίων. Στην περίπτωση A (σχήμα 4-8), το κρουστικό ρεύμα (100kA 10/350 μs) εγχύθηκε απευθείας στη μεταλλική βάση στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ μέσω μιας ακίδας, η οποία στηρίχθηκε στην άκρη της βάσης στήριξης των φ/β (μη απομονωμένο ΣΑΠ). Στην περίπτωση B (σχήμα 4-9), το κρουστικό ρεύμα (ίδιο με πριν) εγχύθηκε απευθείας στο πάνω μέρος μιας απομονωμένης ακίδας, η οποία στηριζόταν στο πάτωμα του εργαστηρίου σε απόσταση περίπου 0,7 m από τη βάση στήριξης των φ/β.



**Σχήμα 4-8** Μη απομονωμένο ΣΑΠ, το ρεύμα του κεραυνού διανέμεται κατά μήκος της μεταλλικής βάσης στήριξης των φ/β πλαισίων [31]





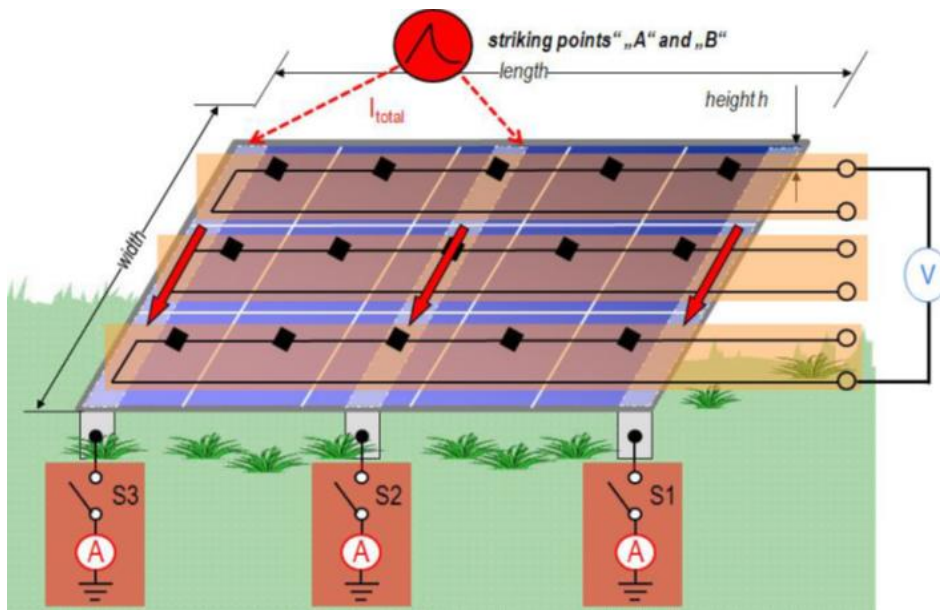
**Σχήμα 4-9** Απομονωμένο ΣΑΠ σε απόσταση 0,7 m πίσω από το χαλύβδινο πλαίσιο της φωτοβολταϊκής δομής. Το ρεύμα του κεραυνού οδηγείται στη γη μέσω μιας ξεχωριστής ακίδας σύλληψης η οποία δε συνδέεται με τη βάση στήριξης των φ/β πλαισίων. Η μεταλλική βάση στήριξης συνδέεται με το ΣΑΠ μόνο μέσα στη γη [31].

Τα αποτελέσματα, έδειξαν ότι στην περίπτωση του μη απομονωμένου ΣΑΠ οι επαγόμενες υπερτάσεις στην καλωδίωση σε περίπτωση άμεσου κεραυνικού πλήγματος είναι μειωμένες σε σχέση με την περίπτωση του απομονωμένου ΣΑΠ. Πιο συγκεκριμένα, η τάση ανοικτού κυκλώματος μεταξύ θετικού (+) και αρνητικού πόλου (-) της στοιχειοσειράς ήταν 82V για την περίπτωση του μη απομονωμένου ΣΑΠ, ενώ για το απομονωμένο ΣΑΠ ήταν 390V, το οποίο είναι σχεδόν 480% παραπάνω [31].

### **4.3 Επαγόμενες υπερτάσεις από κεραυνικά πλήγματα διαφόρων μορφών σε φ/β εγκαταστάσεις σε σχέση με το σημείο πτώσης του κεραυνού**

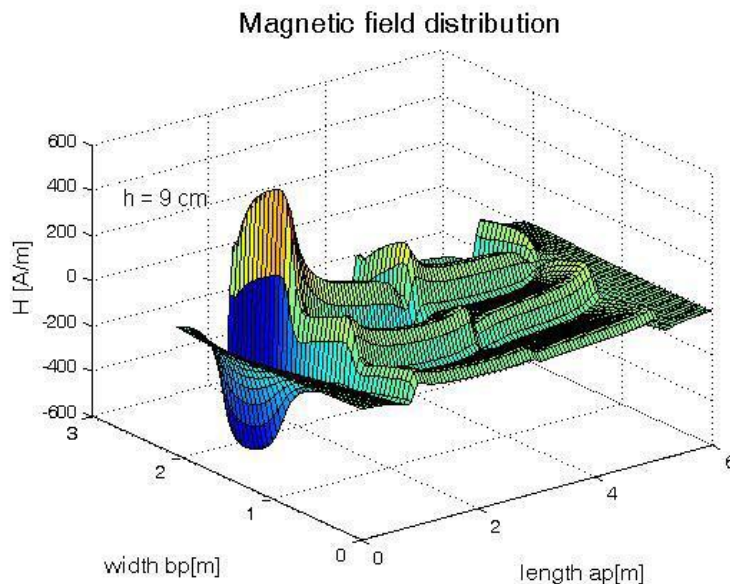
Το 2012 ο Z. Benesova, κ.α., διερεύνησαν μέσω προσομοιώσεων ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, που αποτελούνταν από μια τυπική διάταξη φ/β πάνελ. Η επιρροή του κεραυνικού πλήγματος στη φ/β εγκατάσταση προσομοιώθηκε με διαφορετικά κεραυνικά ρεύματα και σε διαφορετικά σημεία πτώσης του κεραυνού στη φ/β εγκατάσταση [32].

Το απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις ήταν μια φ/β εγκατάσταση με τρεις παράλληλες συστοιχίες που η καθεμιά από αυτές είχε 5 εν σειρά συνδεδεμένα φ/β πάνελ, (σχήμα 4-10). Επίσης, στο σχήμα 4-10 φαίνονται και τα δύο σημεία πτώσης κεραυνού (striking points) A και B, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

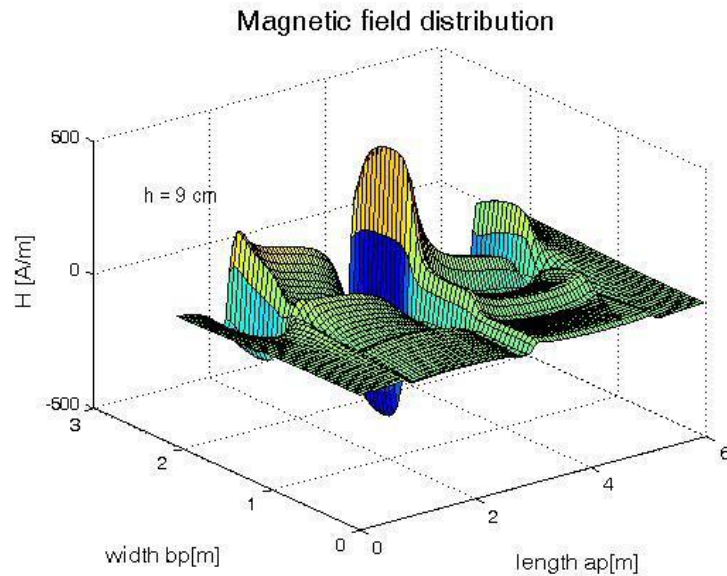


**Σχήμα 4-10** Βασικό μοντέλο προσομοίωσης (σημεία πτώσης κεραυνικών πληγμάτων: A υποδεικνύεται με το αριστερό κόκκινο βέλος και B υποδεικνύεται με το δεξί κόκκινο βέλος) [32]

Παρατηρήθηκε ότι, όταν ο κεραυνός πέφτει στο σημείο A τότε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στην εγκατάσταση είναι πολύ ισχυρό κοντά στο σημείο A και η κατανομή του στην υπόλοιπη εγκατάσταση είναι πολύ ασύμμετρη (σχήμα 4-11). Αντίθετα, όταν ο κεραυνός προσομοιώνεται να πέφτει στο σημείο B, τότε οι μέγιστες τιμές του μαγνητικού πεδίου είναι λίγο μικρότερες από πριν και η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στην εγκατάσταση είναι περισσότερο συμμετρική (σχήμα 4-12).



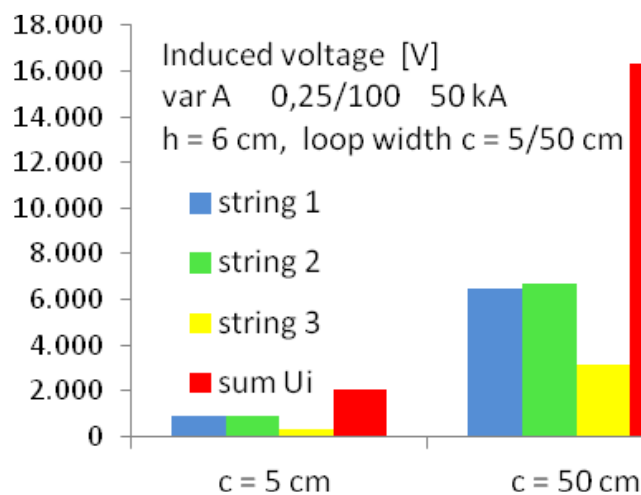
**Σχήμα 4-11** Μαγνητικό πεδίο στην περίπτωση πτώσης κεραυνού στο σημείο A [32]



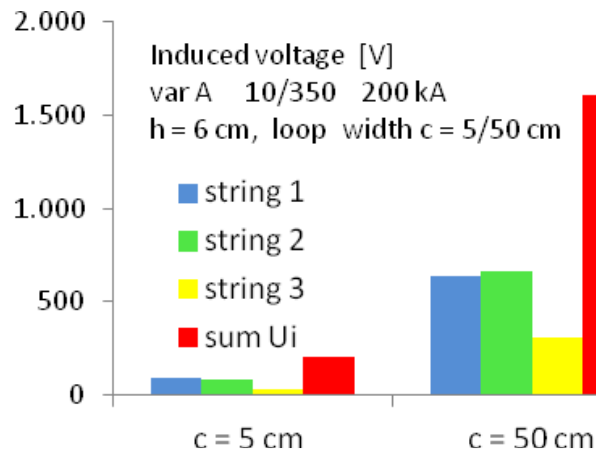
**Σχήμα 4-12** Μαγνητικό πεδίο στην περίπτωση πτώσης κεραυνού στο σημείο B [32]

Επιπροσθέτως, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, το μέγεθος των επαγόμενων υπερτάσεων που δημιουργούνται κατά την πτώση κεραυνού σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χρόνο μετώπου που χαρακτηρίζει το κεραυνικό πλήγμα, αλλά και από το μέγεθος των σχηματιζόμενων βρόχων καλωδίων που υπάρχουν στη φ/β εγκατάσταση.

Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν κεραυνικά πλήγματα 0,25/100  $\mu$ s, πλάτους 50 kA, στο σημείο A (σχήμα 4-13) και 10/350  $\mu$ s, πλάτους 200kA στο ίδιο σημείο (σχήμα 4-14) όταν το πλάτος των σχηματιζόμενων βρόχων από τα DC καλώδια ήταν ίσο με 5 cm και 50 cm.



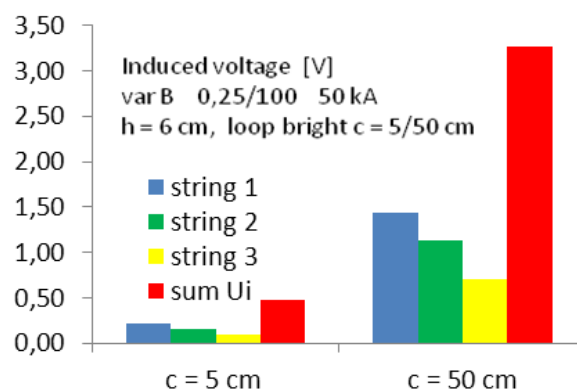
**Σχήμα 4-13** Επαγόμενες τάσεις για κεραυνό 0,25/100  $\mu$ s, 50kA στο σημείο A [32]



**Σχήμα 4-14** Επαγόμενες τάσεις για κεραυνό 10/350  $\mu$ s, 200kA στο σημείο A [32]

Στα σχήματα 4-13 και 4-14 φαίνεται ότι, οι επαγόμενες τάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες όταν ο χρόνος μετώπου του κεραυνικού ρεύματος είναι μικρός (0,25  $\mu$ s), παρά το μεγαλύτερο πλάτος κρουστικού ρεύματος στη δεύτερη περίπτωση (200 kA), καθώς επίσης ότι, οι επαγόμενες τάσεις αυξάνονται και στις δύο περιπτώσεις, καθώς αυξάνεται το πλάτος του βρόχου.

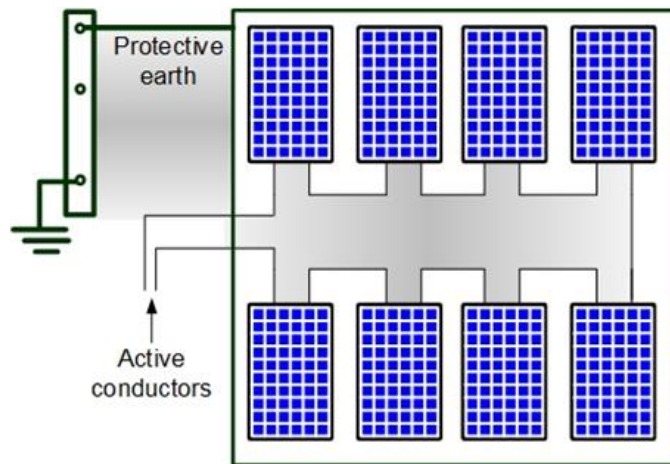
Τέλος, ανάλογα με το σημείο πτώσης του κεραυνικού πλήγματος οι τιμές των επαγόμενων τάσεων διαφέρουν σημαντικά. Συγκεκριμένα, κεραυνικό πλήγμα 0,25/100  $\mu$ s, 50 kA, στο σημείο B επιφέρει σημαντικά μικρότερες τιμές επαγόμενων τάσεων σε σχέση με το σημείο A όπως φαίνεται στο σχήμα 4-15.



**Σχήμα 4-15** Επαγόμενες τάσεις για κεραυνό 0,25/100  $\mu$ s, 50kA στο σημείο B [32]

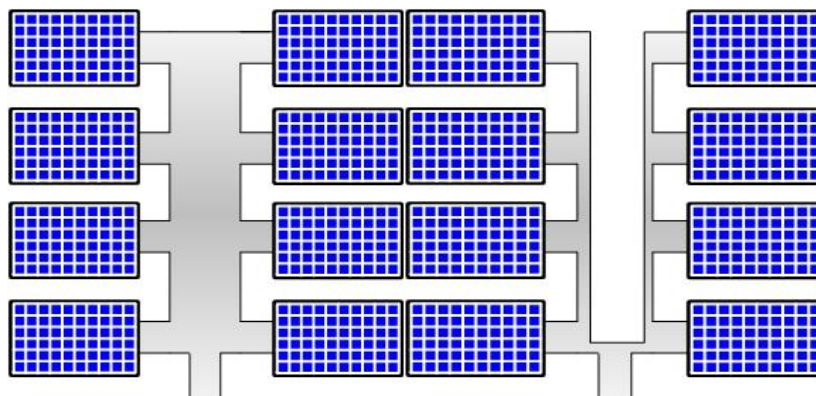
#### 4.4 Επαγόμενες υπερτάσεις και τάσεις επαφής λόγω σχηματιζόμενων βρόχων καλωδίων

Το 2015 ο Χρήστος Χριστοδούλου κ.α., μελέτησαν μέσω εκτέλεσης προσομοιώσεων το μέγεθος επιρροής των σχηματιζόμενων από τα καλώδια βρόχων (σχήμα 4-16) στις επαγόμενες υπερτάσεις και τάσεις επαφής σε μια φ/β εγκατάσταση κατά τη διάρκεια κεραυνικού πλήγματος [30].



**Σχήμα 4-16** Σχηματιζόμενοι βρόχοι καλωδίων σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [30]

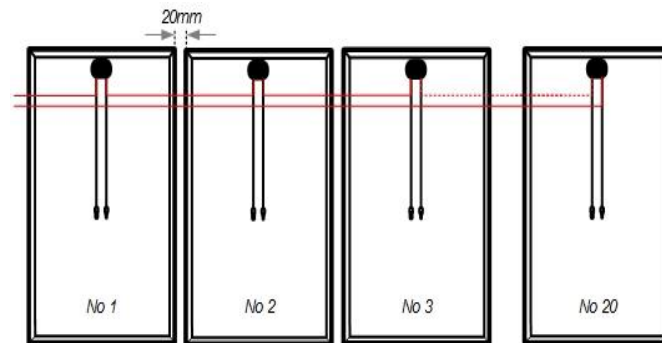
Στην εργασία τους αναφέρουν ότι το μέγεθος των επαγόμενων υπερτάσεων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κεραυνού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και τη θέση του κεραυνικού πλήγματος. Αναλυτικότερα, η κλίση του ρεύματος του κεραυνού καθορίζει το επίπεδο της επαγόμενης υπέρτασης, δεδομένου ότι οι επαγόμενες υπερτάσεις είναι ανάλογες με την αυτεπαγωγή του βρόχου πολλαπλασιασμένη με την κλίση του ρεύματος του κεραυνού. Οι επαγόμενες υπερτάσεις αυξάνονται επίσης με τις διαστάσεις του βρόχου (δηλ με τη δρομολόγηση των καλωδίων, το μήκος του κυκλώματος, την απόσταση μεταξύ αγωγών προστασίας και ενεργών καλωδίων, σχήμα 4-17) και μειώνονται με την εξασθένηση της ισχύος του μαγνητικού πεδίου.



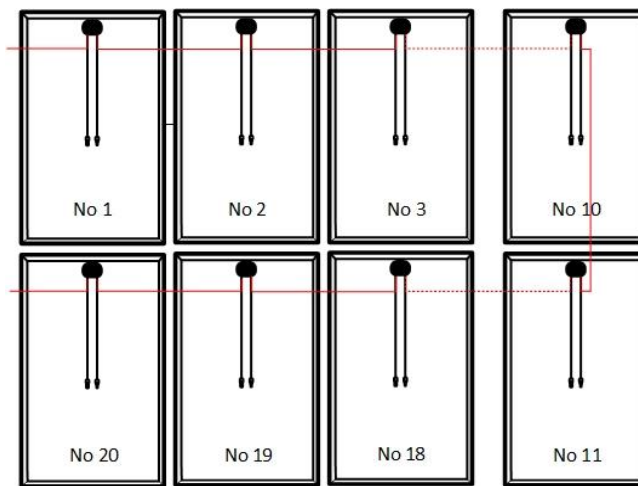
**Σχήμα 4-17** Μείωση της επιφάνειας των βρόχων [30]

Στις προσομοιώσεις τους χρησιμοποίησαν φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ισχύος 100 kWp προκειμένου να υπολογίσουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής και επαγόμενες υπερτάσεις, λαμβάνοντας υπόψη δύο πιθανές γεωμετρικές δομές. Το κάθε ένα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποίησαν ήταν των 250 Wp και ανά 80 συνδέονταν σε έναν αντιστροφέα (inverter) σε σχηματισμό τεσσάρων συστοιχιών (από 20 φ/β πλαίσια η κάθε μία), που ανά δύο ήταν παράλληλα συνδεδεμένες και συνδέονταν στις 2 εισόδους (MPPT inputs) του φ/β αντιστροφέα.

Οι δύο περιπτώσεις συνδεσμολογίας των φ/β πλαισίων που εξετάστηκαν φαίνονται στα σχήματα 4-18 και 4-19.

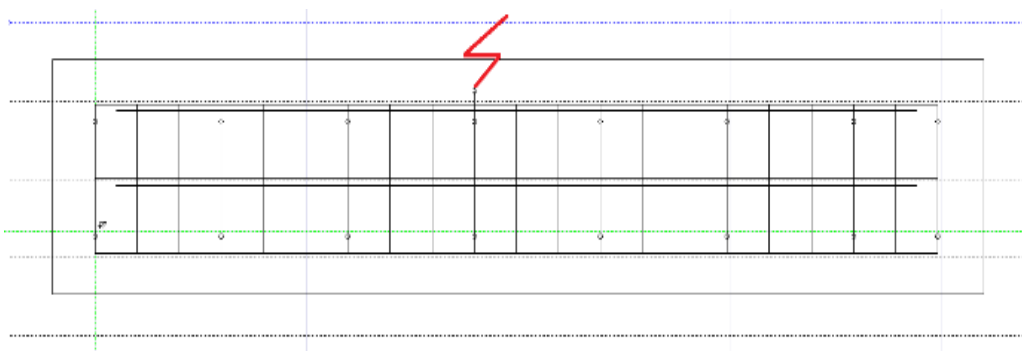


**Σχήμα 4-18** Γεωμετρική δομή μιας συστοιχίας (1<sup>η</sup> περίπτωση) [30]

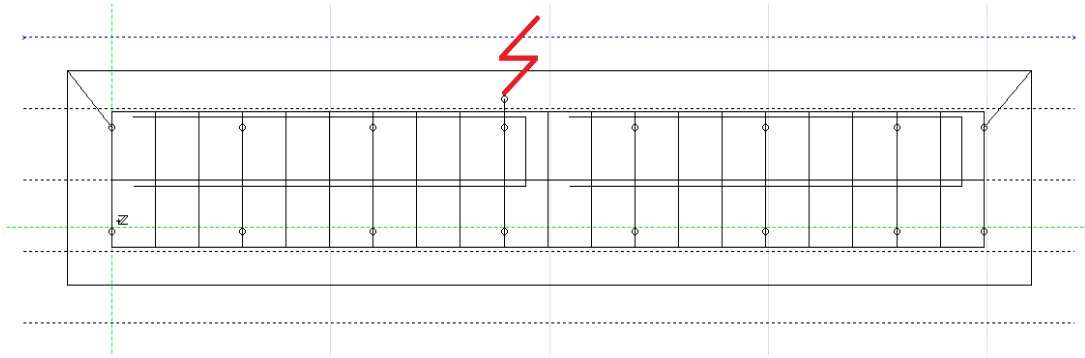


**Σχήμα 4-19** Γεωμετρική δομή μιας συστοιχίας (2<sup>η</sup> περίπτωση) [30]

Οι αντίστοιχες διατάξεις που σχεδιάστηκαν στο λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις προσομιώσεις (CDEGS) φαίνονται στα σχήματα 4-20 και 4-21.



**Σχήμα 4-20** Μοντέλο προσομοίωσης για την περίπτωση 1 στο CDEGS [30]



**Σχήμα 4-21** Μοντέλο προσομοίωσης για την περίπτωση 2 στο CDEGS [30]

Με την εκτέλεση των προσομοιώσεων κατέληξαν στο ότι οι τάσεις επαφής είναι ανεξάρτητες από την επιφάνεια του βρόχου και επηρεάζονται από το ρεύμα κορυφής του κεραυνού και την αντίσταση γείωσης που έχει επιτευχθεί.

Εν αντιθέσει, οι αναπτυσσόμενες επαγόμενες υπερτάσεις εξαρτώνται από την επιφάνεια των βρόχων που σχηματίζουν τα DC καλώδια (όσο μεγαλύτερες οι επιφάνειες βρόχων, τόσο μεγαλύτερες οι επαγόμενες υπερτάσεις), καθώς επίσης και από την κλίση του ρεύματος του κεραυνού (kA/μs).

Επομένως, συμπεράναν πως η περίπτωση 1 είχε καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά τις επαγόμενες τάσεις λόγω κεραυνικού πλήγματος [30].





## Κεφάλαιο 5: Τοπολογίες

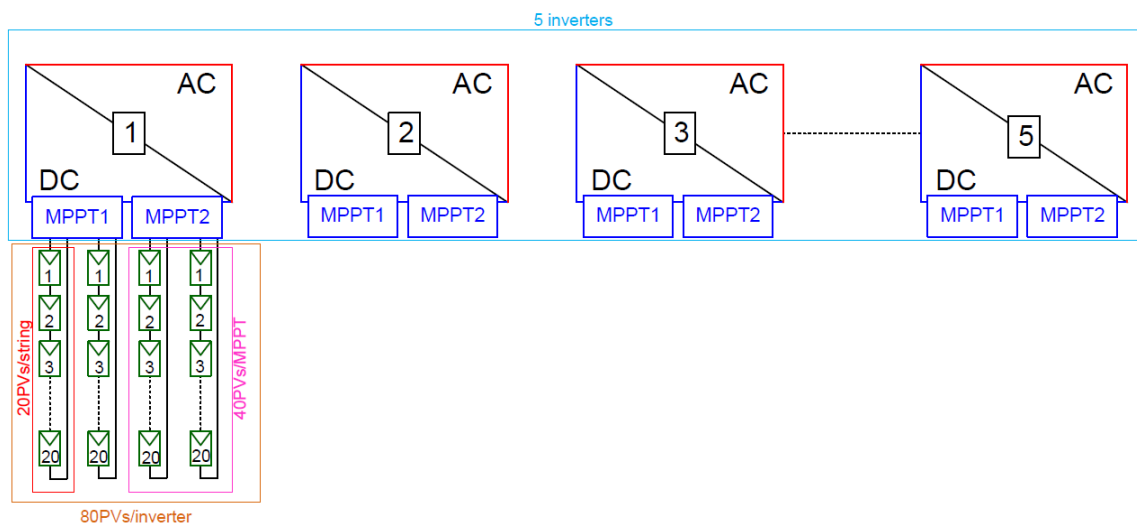
### 5.1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στον υπολογισμό του δυναμικού και των τάσεων επαφής που αναπτύσσονται λόγω κεραυνικών πληγμάτων σε συνθήκες μη ηλιοφάνειας, σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, για διάφορες περιπτώσεις και μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους κάθε φορά. Σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις έχουμε ίδιο αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τον ίδιο τρόπο.

### 5.2 Περιγραφή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

#### 5.2.1 Τρόπος διασύνδεσης και σχηματιζόμενες συστοιχίες

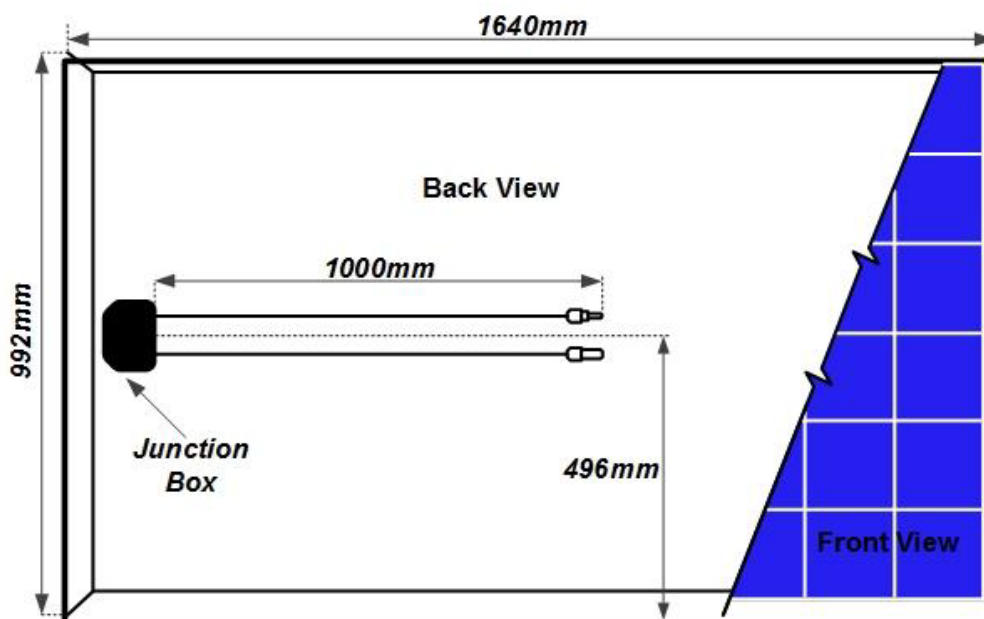
Στην εργασία αυτή εξετάζεται μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ισχύος 100 kW<sub>p</sub>, που αποτελείται από πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Si) ισχύος 250W<sub>p</sub> το καθένα. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται πέντε αντιστροφείς των 20kW, που ο καθένας τους διαθέτει δύο εισόδους MPPT (Maximum Power Point Trackers). Έτσι, σε κάθε αντιστροφέα συνδέονται 80 φ/β πλαίσια, σχηματίζοντας τέσσερις συστοιχίες με 20 φ/β πλαίσια η κάθε μία. Οι συστοιχίες αυτές, ανά δύο παραλληλίζονται και συνδέονται σε μια είσοδο MPPT. Η συγκεκριμένη δομή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης παρουσιάζεται συνοπτικά στο σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1 Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που χρησιμοποιήθηκε [1]

#### 5.2.2 Λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φ/β πλαισίων

Στο σχήμα 5-2 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 5-2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν [1]

Σημειώνεται εδώ ότι, το υλικό του μεταλλικού πλαισίου των φ/β πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ανοδοιωμένο αλουμίνιο.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων φ/β πλαισίων φαίνονται στον πίνακα 5-1.

**Πίνακας 5-1** Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, σε STC συνθήκες (Standard Test Conditions – συνθήκες οι οποίες προδιαγράφονται από: πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας = 100 mW/cm<sup>2</sup>, Αέριος μάζα (AM) 1,5 και θερμοκρασία του υλικού των φ/β στοιχείων = 25°C), των φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν

$P_{max}$ (Μέγιστη ισχύς πλαισίου)	250 W
Απόδοση πλαισίου	15,36 %
$V_{mp}$ (Τάση που αντιστοιχεί στην $P_{max}$ )	30,3 V
$I_{mp}$ (Ένταση ρεύματος που αντιστοιχεί στην $P_{max}$ )	8,25 A
$V_{oc}$ (Τάση ανοιχτού κυκλώματος)	37,47 V
$I_{sc}$ (Ένταση ρεύματος βραχυκυκλώματος)	8,9 A
Μέγιστη τάση συστήματος	1000 V
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας	45,3 ± 2 °C
Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης	0,34 % / °C

Σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά η μέγιστη τάση που μπορεί να εμφανιστεί σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος για θερμοκρασία περιβάλλοντος -10°C (για τα ελληνικά δεδομένα) είναι:

$$V_{oc}' = 37,47 - \left(\frac{0,34}{100}\right) * 37,47 * (-10 - 25) = 41,93 V$$

Οπότε για τη συστοιχία των 20 πλαισίων έχουμε (μέγιστη τάση που μπορεί να εμφανιστεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $-10^{\circ}C$ ):

$$V_{oc}'_{\text{συστοιχίας}} = 20 * 41,93 = 839 V$$

Επίσης, για την ελάχιστη τάση έχουμε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $70^{\circ}C$  (για τα ελληνικά δεδομένα), έχουμε:

$$V_{oc}'' = 37,47 - \left(\frac{0,34}{100}\right) * 37,47 * (70 - 25) = 31,74 V$$

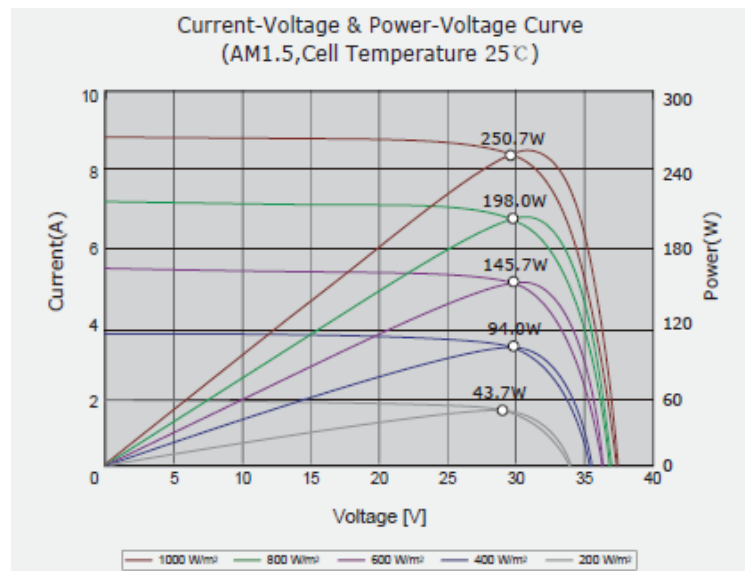
και

$$V_{oc}''_{\text{συστοιχίας}} = 20 * 31,74 = 635 V$$

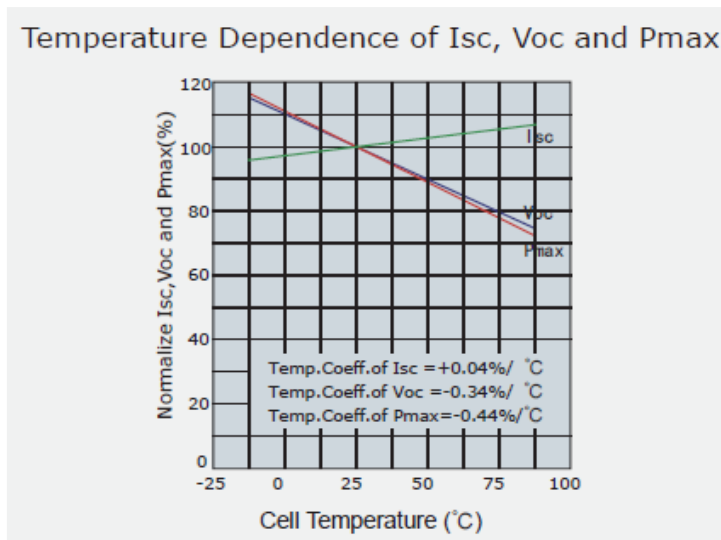
Ακόμη, το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να εμφανιστεί μεταξύ των δύο παραλληλισμένων συστοιχιών, θα είναι:

$$I_{max} = 1,25 * 2 * I_{sc} = 1,25 * 2 * 8,9 = 22,25 A$$

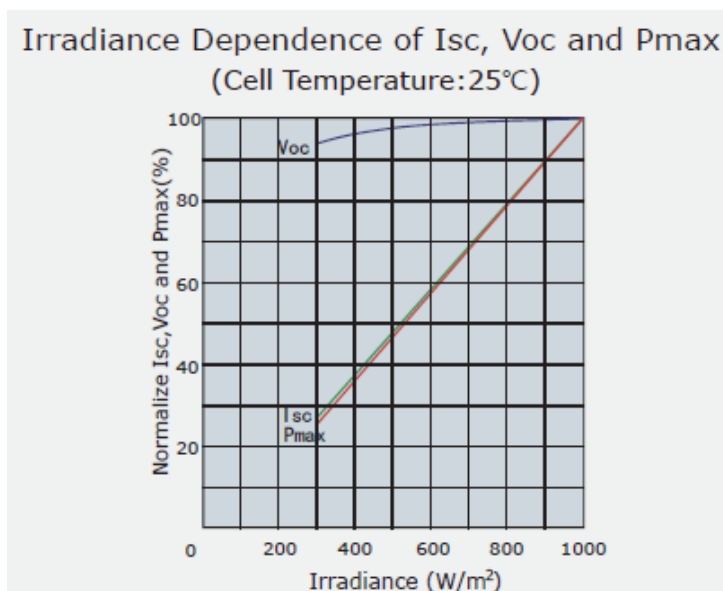
Επομένως, για τους αντιστροφείς που επιλέγονται, θα πρέπει οι παραπάνω τιμές να είναι μέσα στα όρια τους για την τάση και το ρεύμα. Ακολούθως, στα σχήματα 5-3, 5-4, 5-5 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των εν λόγω φ/β πλαισίων.



Σχήμα 5-3 Χαρακτηριστική I-V και P-V σε STC συνθήκες [1]



Σχήμα 5-4 Isc, Voc, Pmax συναρτήσει της θερμοκρασίας [1]



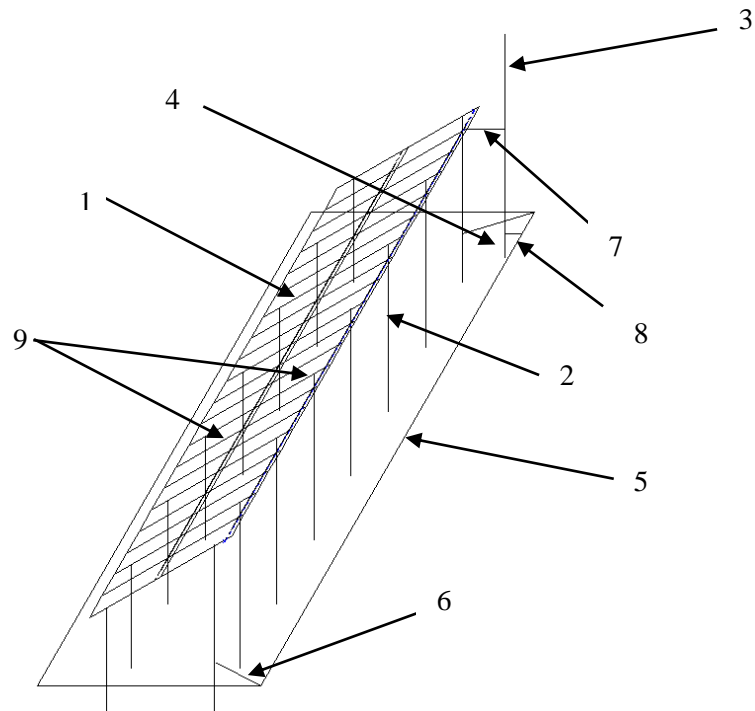
Σχήμα 5-5 Isc, Voc, Pmax συναρτήσει τις ακτινοβολίας [1]

### 5.2.3 Γείωση και σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

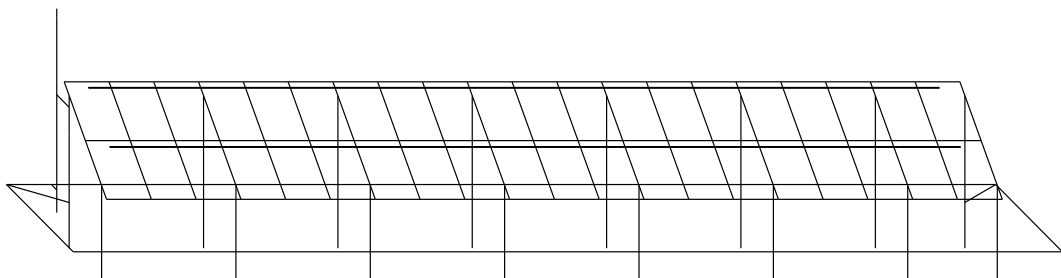
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια γειώνονται μέσω της βάσης στήριξης, επάνω στην οποία είναι συνδεδεμένα με βίδες και με σφικτήρες. Το υλικό της βάσης στήριξης είναι χάλυβας και τα πόδια της (και αυτά χαλύβδινα) φτάνουν σε βάθος 1,5m κάτω από τη γη. Ακόμη, η βασική διάταξη που προσομοιώθηκε περιλαμβάνει μια περιμετρική γείωση από χαλκό, η οποία είναι τοποθετημένη σε βάθος 0,5m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση περίπου 1m από τα πόδια της βάσης στήριξης. Η περιμετρική γείωση συνδέεται με τη φωτοβολταϊκή διάταξη στις δύο από τις τέσσερις γωνίες της.

Όσον αφορά το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, χρησιμοποιείται και προσομοιώνεται απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (βλέπε §2.3.1), με

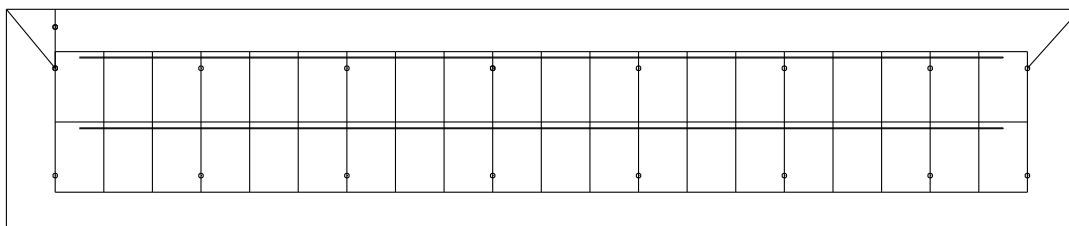
ακίδα σύλληψης (αλεξικέραυνο) η οποία στηρίζεται μέσω μιας βάσης στο έδαφος και στο κάτω μέρος της συνδέεται ένα κάθετο ηλεκτρόδιο, που φτάνει 1m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Επιπλέον, η ακίδα σύλληψης τοποθετείται σε διάφορες αποστάσεις, από 0,1m μέχρι 1,2m, από τη φωτοβολταϊκή διάταξη για την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Σημειώνεται εδώ ότι, στις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των προσομοιώσεων δε σχεδιάστηκε η βάση στήριξης του αλεξικέραυνου, αλλά μόνο η ακίδα σύλληψης και το κάθετο ηλεκτρόδιο με απ' ευθείας σύνδεση μεταξύ τους. Τα παραπάνω απεικονίζονται στα σχήματα 5-6, 5-7 και 5-8.



**Σχήμα 5-6** Η βασική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των προσομοιώσεων (τρισδιάστατη όψη)



**Σχήμα 5-7** Η βασική διάταξη από άλλη όψη (τρισδιάστατη όψη)



**Σχήμα 5-8** Κάτοψη της βασικής διάταξης

Στο σχήμα 5-6 απεικονίζονται τα παρακάτω:

1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια από ανοδοιωμένο αλουμίνιο
2. Βάση στήριξης των φ/β πλαισίων
3. Ακίδα σύλληψης (αλεξικέραυνο)
4. Κάθετο ηλεκτρόδιο (μέσα στο έδαφος) συνδεδεμένο στο κάτω μέρος της ακίδας σύλληψης
5. Περιμετρική γείωση από χαλκό
6. Αγωγοί που συνδέουν τη βάση στήριξης με την περιμετρική γείωση
7. Μονωτικός βραχίονας για τη στήριξη της ακίδας σύλληψης από fiberglass
8. Αγωγός σύνδεσης της ακίδας σύλληψης με την περιμετρική γείωση
9. DC καλώδια ισχύος για τη διασύνδεση των φ/β πλαισίων

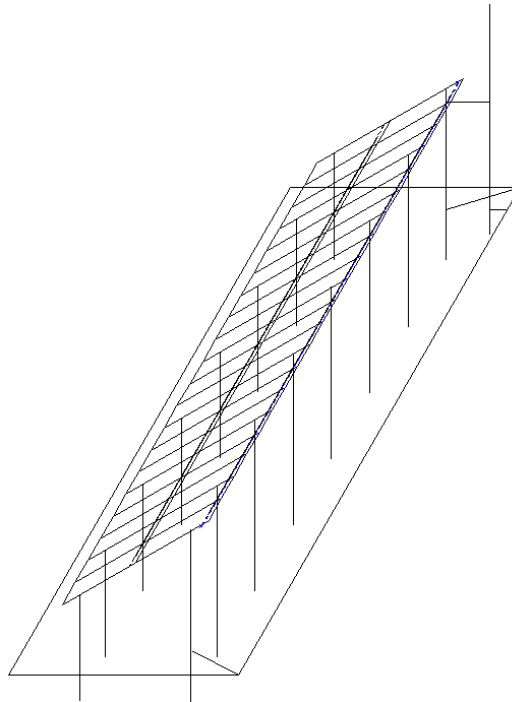
Κατά τη διαδικασία εκτέλεσης των προσομοιώσεων με το λογισμικό πακέτο CDEGS, πολλά από τα παραπάνω χαρακτηριστικά της διάταξης μεταβάλλονταν, ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προεκύπταν (όπως θα δούμε και παρακάτω).

## 5.3 Εξεταζόμενες περιπτώσεις

Παρακάτω περιγράφονται οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν μεταβάλλοντας κάθε φορά κάποιο ή κάποια από τα χαρακτηριστικά της διάταξης. Σε όλες τις περιπτώσεις το κεραυνικό ρεύμα που χρησιμοποιούσαμε είχε χρόνο μετώπου 10μs, χρόνο ημίσεως εύρους 350μs, πλάτος 50kA και διάρκεια 1200μs [EN 62305-3]. Το σημείο πτώσης του κεραυνικού πλήγματος ήταν πάντα η ακίδα σύλληψης (αλεξικέραυνο).

### 5.3.1 Διάταξη με περιμετρική γείωση στα 0,5m βάθος

Σε αυτήν την περίπτωση είχαμε τη διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 5-9 με την περιμετρική γείωση τοποθετημένη στα 0,5m βάθος. Σε αυτές τις προσομοιώσεις οι παράμετροι που μεταβάλλονταν ήταν η απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φωτοβολταϊκή διάταξη και η σύσταση του εδάφους, όπως φαίνονται στον πίνακα 5-2.



**Σχήμα 5-9** Διάταξη με περιμετρική γείωση σε βάθος 0,5m με απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

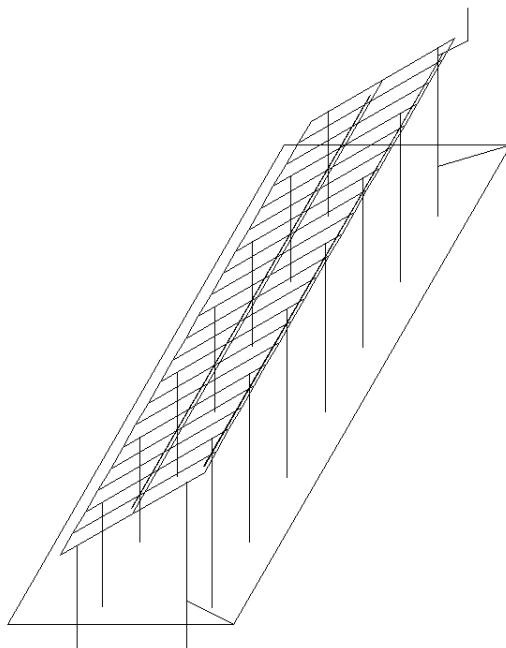
**Πίνακας 5-2** Παράμετροι που μεταβάλλονταν στις προσομοιώσεις

Σύσταση εδάφους	Απόσταση ακίδας σύλληψης από τη φ/β διάταξη [m]			
1000Ωm-100Ωm-2m	0,1	0,5	0,75	1
1000Ωm-100Ωm-3m				
100Ωm-1000Ωm-2m				
100Ωm-1000Ωm-3m				

Σημειώνεται εδώ ότι, σε όλη την εργασία θα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός XXXX-YYYY-Z για τη σύσταση του εδάφους (διστρωματικό έδαφος), όπου:

- XXXX: δηλώνει την ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος του εδάφους σε Ω
- YYYY: δηλώνει την ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους σε Ω
- Z: δηλώνει το βάθος του πρώτου στρώματος του εδάφους σε m

Επίσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε προσομοίωση και για μη απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, για τις ίδιες συστάσεις εδαφών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-10.

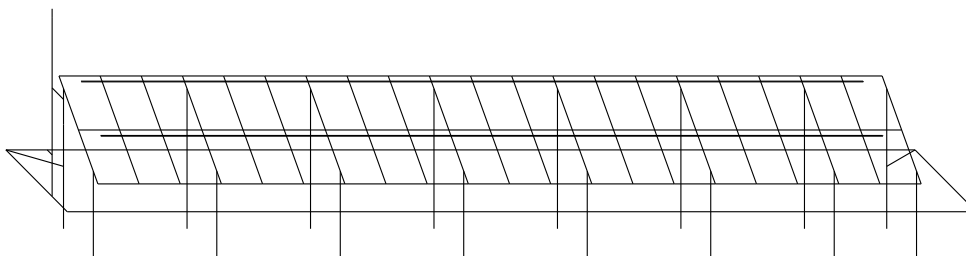


**Σχήμα 5-10** Διάταξη με περιμετρική γείωση σε βάθος 0,5m με μη απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

### 5.3.2 Διάταξη με περιμετρική γείωση στην επιφάνεια του εδάφους

Σε ορισμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις έχει παρατηρηθεί ότι, η περιμετρική γείωση τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους (πιθανόν λόγω μικρότερου κόστους). Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση προσομοιώθηκαν ξανά όλες οι περιπτώσεις της §5.3.1 οι οποίες αναφέρονται στο απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, με σκοπό να γίνει σύγκριση.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (σχήμα 5-11) σε αυτές τις προσομοιώσεις ήταν ίδια με αυτή της §5.3.1, εκτός από το ότι η περιμετρική γείωση ήταν μετατοπισμένη από τα 0,5m στην επιφάνεια του εδάφους.



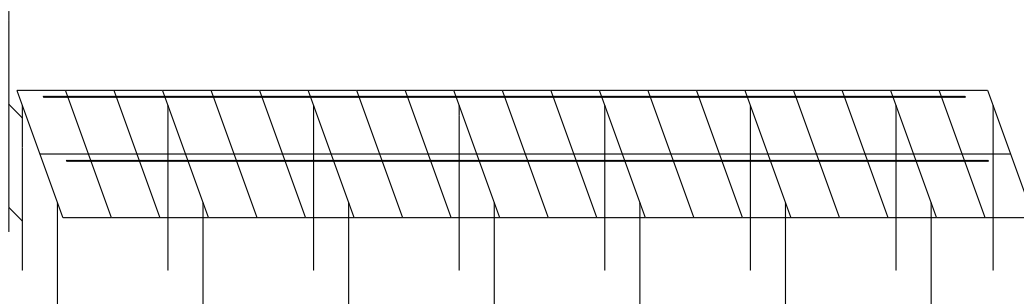
**Σχήμα 5-11** Διάταξη με την περιμετρική γείωση τοποθετημένη στην επιφάνεια του εδάφους και με απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας



### 5.3.3 Διάταξη χωρίς περιμετρική γείωση

Σε αυτήν την περίπτωση εξετάστηκε η ίδια διάταξη της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με τις §5.3.1 και §5.3.2, μόνο που τώρα είχε αφαιρεθεί η περιμετρική γείωση, για να διαπιστωθεί η συνεισφορά της στη μείωση των δυναμικών και των τάσεων επαφής που εμφανίζονται σε μια φ/β εγκατάσταση, όταν αυτή πλήττεται από κεραυνό. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες προσομοιώσεις με την §5.3.1 για το απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την περίπτωση (σχήμα 5-12) ήταν ίδια με προηγουμένως, με τη διαφορά ότι δεν υπήρχε η περιμετρική γείωση.

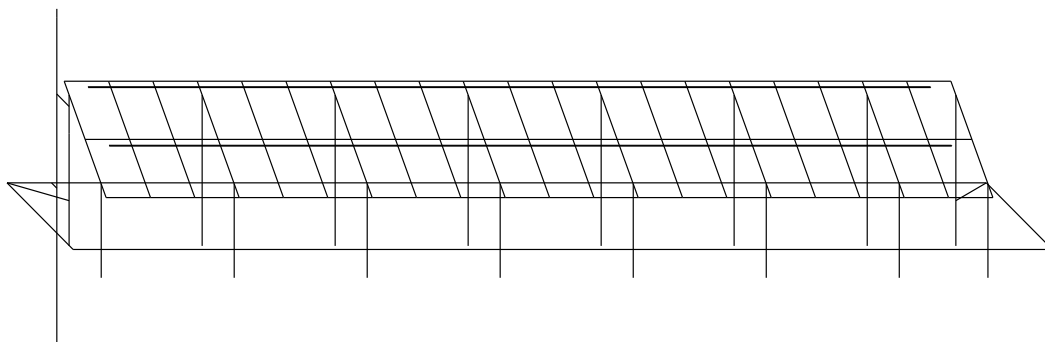


Σχήμα 5-12 Διάταξη με απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας και χωρίς περιμετρική γείωση

### 5.3.4 Διάταξη με το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με την ακίδα σύλληψης σε διάφορα βάθη κάτω από το έδαφος

Σε αυτήν την περίπτωση, μελετήθηκε η συμπεριφορά της φωτοβολταϊκής διάταξης, μεταβάλλοντας το βάθος, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, στο οποίο φτάνουν οι διάφορες ακίδες του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (όπως το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται στο κάτω μέρος του αλεξικέραυνου και τα πόδια της βάσης στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων). Οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν για το διστρωματικό έδαφος 1000-100-3 (ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος  $1000\Omega\text{m}$ , ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος  $100\Omega\text{m}$  και βάθος πρώτου στρώματος 3m).

Αρχικά, προσομοιώθηκε η φωτοβολταϊκή διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 5-13, στην οποία μεταβάλλονταν το βάθος μέχρι το οποίο έφτανε το κάθετο ηλεκτρόδιο κάτω από τη γη και η απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φωτοβολταϊκή διάταξη. Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν σε αυτές τις προσομοιώσεις φαίνονται στον πίνακα 5-3.

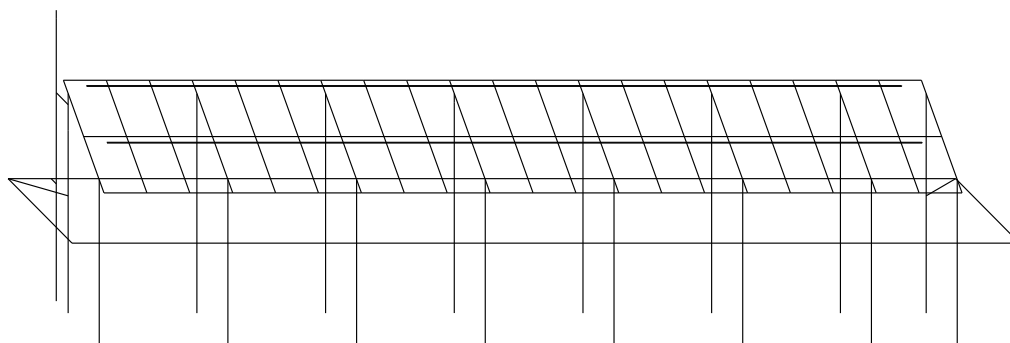


**Σχήμα 5-13** Διάταξη με το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται στο κάτω μέρος του αλεξικέρανου σε μεγαλύτερο βάθος

**Πίνακας 5-3** Παράμετροι που μεταβάλλονταν στις προσομοιώσεις

Βάθος κάθετου ηλεκτροδίου [m]	Απόσταση ακίδας σύλληψης από τη φ/β διάταξη [m]			
	0,1	0,5	0,75	1
1	0,1	0,5	0,75	1
3,2				
4				
5				

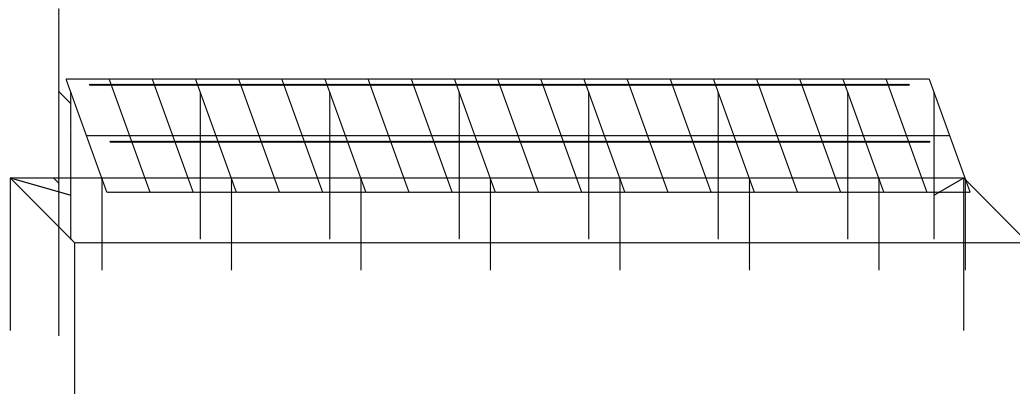
Ακολούθως, δοκιμάστηκε και προσομοιώθηκε η φωτοβολταϊκή διάταξη με τα πόδια της βάσης στήριξης να βρίσκονται στα 3,2m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αντί των 1,5m που ήταν προηγουμένως. Επίσης, και το κάθετο ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε στα 3,2m. Σε αυτήν τη διάταξη έγιναν προσομοιώσεις για το έδαφος 1000-100-3 και για αποστάσεις του αλεξικέρανου από τη φ/β διάταξη 0,1m, 0,5m, 0,75m και 1m. Η συγκεκριμένη διάταξη φαίνεται στο σχήμα 5-14.



**Σχήμα 5-14** Διάταξη με το κάθετο ηλεκτρόδιο και τα πόδια της βάσης στήριξης σε βάθος 3,2m

Αυτή η περίπτωση βέβαια είναι μη πραγματοποιήσιμη στην πράξη, καθώς οι βάσεις στήριξης των φ/β πλαισίων παράγονται σε καθορισμένες διαστάσεις και επίσης το κόστος υλοποίησης της παραπάνω διάταξης θα είναι πολύ μεγάλο. Παρόλα αυτά, οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν ώστε να διαπιστωθεί η απόκλιση που εμφανίζουν τα αποτελέσματα σε σύγκριση με τη συμβατική βάση στήριξης.

Τέλος, για να υπάρξουν και καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά τη συμπεριφορά της διάταξης σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος, αλλά και το κόστος κατασκευής της εγκατάστασης να είναι ανεκτό, διαμορφώθηκε η διάταξη του σχήματος 5-15, στην οποία εγκαθίστανται στις 4 γωνίες της περιμετρικής γείωσης 4 επιπλέον κάθετα ηλεκτρόδια, τα οποία φτάνουν σε βάθος 4m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται στο κάτω μέρος της ακίδας σύλληψης φτάνει κι αυτό σε βάθος 4m. Όπως και στην προηγούμενη διάταξη, έτσι και σε αυτήν έγιναν προσομοιώσεις για το έδαφος 1000-100-3 και για αποστάσεις του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη 0,1m, 0,5m, 0,75m και 1m. Η συγκεκριμένη διάταξη φαίνεται στο σχήμα 5-15.



**Σχήμα 5-15** Διάταξη με την ακίδα σύλληψης και τέσσερα ηλεκτρόδια στις τέσσερις γωνίες της περιμετρικής γείωσης σε βάθος 4m

### **5.3.5 Διάταξη με αγωγίμο βραχίονα στήριξης της ακίδας σύλληψης**

Σε αυτή την περίπτωση, προσομοιώθηκαν όλες οι περιπτώσεις των §5.3.1, §5.3.3, §5.3.4 για τις ίδιες διατάξεις της φ/β εγκατάστασης, για απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, με τη μόνη διαφορά ότι τώρα ο βραχίονας που χρησιμοποιείται για τη στήριξη της ακίδας σύλληψης και συνδέεται με τη βάση στήριξης των φ/β πλαισίων έγινε αγωγίμος αντί για μονωτικός. Ο βραχίονας αυτός φαίνεται στο σχήμα 5-6 του υποκεφαλαίου 5.2.3 (στοιχείο με αριθμό 7).

Τα αποτελέσματα των προαναφερθεισών προσομοιώσεων περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

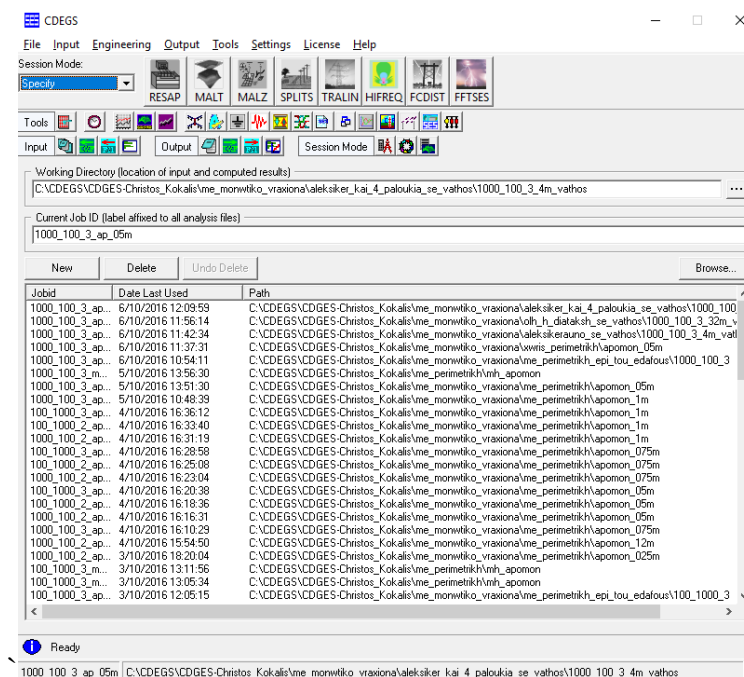


## Κεφάλαιο 6: Περιγραφή του λογισμικού CDEGS

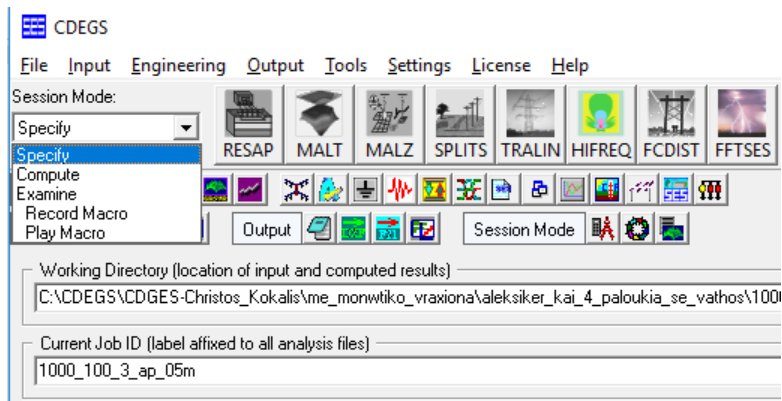
Το πακέτο λογισμικού CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis, Version 15.1.4080) της εταιρείας SES χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση κεραυνικού πλήγματος σε φ/β συστήματα. Η διαδικασία που ακολουθείται διακρίνεται σε τρία μέρη, την καταχώρηση δεδομένων, όπου γίνεται ο σχεδιασμός του φ/β συστήματος, ο ορισμός του κεραυνικού ρεύματος και των λοιπών παραμέτρων, την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος υπό τις συνθήκες που ορίσαμε στο κεφάλαιο 5 και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, αριθμητικά και με τη μορφή γραφημάτων [1].

### 6.1 Εισαγωγή

Αφού εκτελέσουμε το πρόγραμμα CDEGS.exe (εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο που φαίνεται στο σχήμα 6-1), θα πρέπει να επιλέξουμε ένα JobID το οποίο εισάγεται στο όνομα των αρχείων εισόδου και εξόδου, ώστε να αναγνωρίζονται εύκολα από το χρήστη, ανάλογα με την εκάστοτε προσομοίωση. Μετά την επιλογή του JobID μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε Specify, Compute, Examine πατώντας το πλαίσιο πάνω αριστερά (σχήμα 6-2) και τον επιλύτη που μας ενδιαφέρει. Οι επιλύτες που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εργασία είναι οι FFTSES και HIFREQ (σχήμα 6-2) [1].



Σχήμα 6-1 Αρχική οθόνη του CDEGS



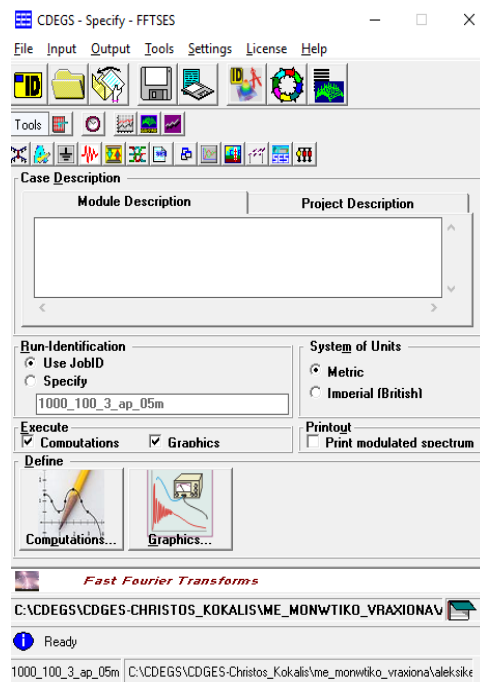
Σχήμα 6-2 Επιλογή λειτουργίας και επιλύτη

## 6.2 Ταχύς μετασχηματισμός Fourier του κεραυνικού ρεύματος

### 6.2.1 Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη FFTSES

Επιλέγοντας την εφαρμογή FFTSES μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ταχύ μετασχηματισμό Fourier, από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων, καθώς και αντίστροφο.

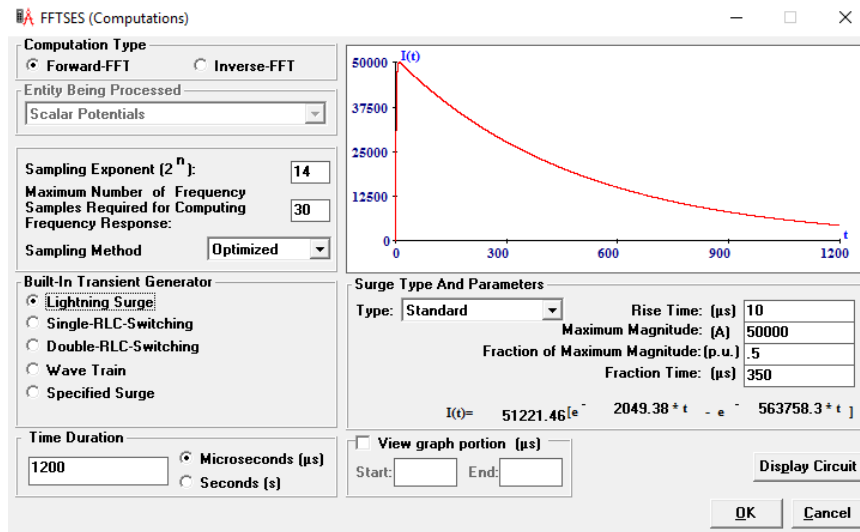
Στην αρχική οθόνη της εφαρμογής υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής σχολίων για την δοκιμή που θα πραγματοποιήσουμε, με την επιλογή Module Description. Επίσης, μπορούμε όπως και στον επιλύτη HIFREQ να επιλέξουμε σύστημα μονάδων, μεταξύ μετρικού και βρετανικού, για την ανάλυσή μας (σχήμα 6-3) [1].



Σχήμα 6-3 Αρχική οθόνη του επιλύτη FFTSES

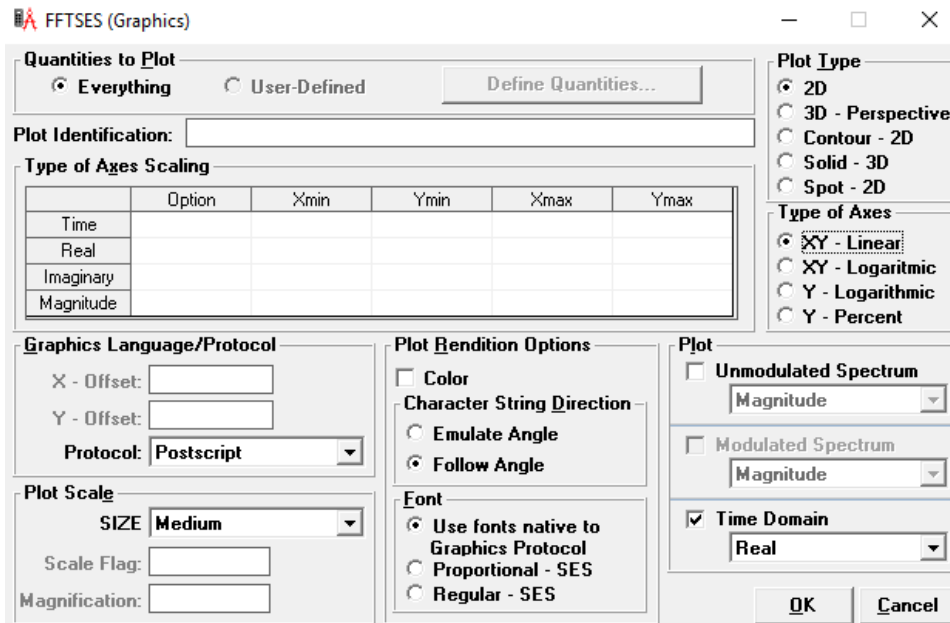
Επιλέγοντας το κουμπί Computations (σχήμα 6-3), επιλέγουμε τι είδος μετασχηματισμού Fourier θέλουμε να πραγματοποιήσουμε (ευθύ ή αντίστροφο) και ποιες φυσικές ποσότητες θα μετέχουν σε αυτόν. Επιλέγοντας ευθύ μετασχηματισμό, το κουμπί Lightning Surge είναι προεπιλεγμένο, ενεργοποιώντας μια εσωτερική συνάρτηση του προγράμματος (σχήμα 6-4).

Στο πεδίο Sampling Exponent καθορίζουμε τον αριθμό των σημείων (N) που ενεργοποιούνται για τον υπολογισμό και την ψηφιοποίηση του χρονικού σήματος ( $N=2^n$ ). Το χρονικό παράθυρο T του σήματος που εισάγουμε στην επιλογή Time - Duration καθορίζει το βήμα συχνότητας  $\Delta f$  και τον εκθέτη n. Βασικό κριτήριο στην επιλογή του T είναι ότι το σήμα πρέπει, για χρόνους μεγαλύτερους του T, να γίνεται αμελητέο. Έτσι, το βήμα συχνότητας  $\Delta f=1/T$  γίνεται κανό, ώστε να αναγνωριστεί οποιαδήποτε αιχμή λόγω αντήχησης και να εμφανιστεί στο πεδίο συχνοτήτων. Ισχύει  $N=T/\Delta t$  όπου  $\Delta t$  το βήμα δειγματοληψίας, (στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται  $\Delta t = 0,1\mu s$ ) οπότε αφού υπολογιστεί ο αριθμός N επιλέγεται ο ελάχιστος εκθέτης n που ικανοποιεί τη σχέση  $2^n \geq N$ . Τα πεδία Rise Time (χρόνος ανόδου) και Fraction Time (χρόνος ημίσειας εύρους) καθορίζουν την κλίση του σήματος ενώ το πεδίο Maximum Magnitude το πλάτος [1].



**Σχήμα 6-4** Ευθύς μετασχηματισμός Fourier – εισαγωγή παραμέτρων του κεραυνού που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση

Στην αρχική οθόνη του επιλύτη FFTSES υπάρχει και η επιλογή Graphics (σχήμα 6-3), στην οποία μπορούμε να εισάγουμε τον τίτλο που θέλουμε να εμφανίζεται στις γραφικές μας παραστάσεις, το πρωτόκολλο που ακολουθείται, την κλίμακα, τον τύπο των αξόνων και τον τύπο της γραφικής παράστασης, π.χ. δισδιάστατη. Επίσης, μπορούμε στην επιλογή Unmodulated Spectrum και στην Time Domain, να διαλέξουμε αν θέλουμε να εμφανίζονται στην γραφική, τόσο τα πραγματικά όσο και τα φανταστικά μέρη του σήματος ρεύματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας (σχήμα 6-5) [1].

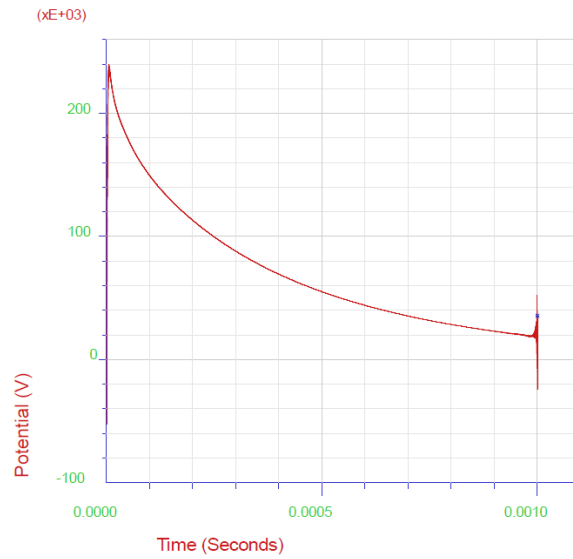


Σχήμα 6-5 Επιλογές σχετικές με τις γραφικές παραστάσεις του επιλύτη FFTSES

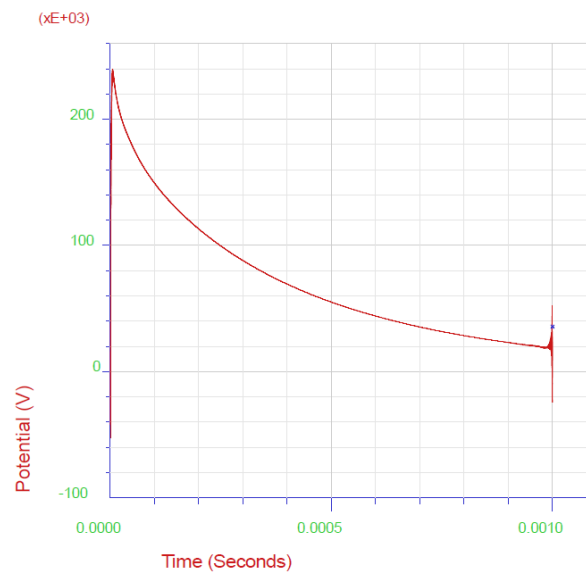
Αφού εισαχθούν τα χαρακτηριστικά του κεραυνικού ρεύματος στον επιλύτη FFTSES (πλάτος, χρόνος μετώπου και ημίσειος εύρους, χρονική διάρκεια), υπολογίζεται το φάσμα συχνότητάς του και επιλέγεται πλήθος κρίσιμων συχνοτήτων από το πρόγραμμα. Αλλάζοντας κάποιο από τα χαρακτηριστικά του σήματος αλλάζουν και οι κρίσιμες συχνότητες που επιλέγονται. Όπως αναφέρεται και παραπάνω η χρονική διάρκεια  $T$  του σήματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να γίνεται αμελητέο για χρόνους μεγαλύτερους του  $T$ . Επίσης, η ανάλυση συχνότητας βελτιώνεται μεγαλώνοντας το παράθυρο χρόνου ενός σήματος. Προφανώς, ένα σήμα με μεγαλύτερη κλίση φθίνει γρηγορότερα και χρειάζεται μικρότερη χρονική διάρκεια  $T$ . Στην εργασία αυτή εξετάστηκε η κλίση  $10/350\mu\text{s}$  με πλάτος  $50\text{kA}$ . Για αυτήν την κλίση,  $10/350\mu\text{s}$ , χρειάζεται αρκετά μεγάλο παράθυρο χρόνου (χρονική διάρκεια), ώστε οι προσομοιώσεις να δώσουν σωστά αποτελέσματα. Όμως αυξάνοντας τη χρονική διάρκεια του σήματος αυξάνεται και ο αριθμός των κρίσιμων συχνοτήτων που επιλέγει ο FFTSES που σημαίνει ότι, αυξάνεται ο χρόνος «τρεξίματος» του επιλύτη HIFREQ.

Για το λόγο αυτό, έγινε διερεύνηση για την εύρεση κατάλληλης χρονικής διάρκειας. Δοκιμάστηκαν τα χρονικά παράθυρα:  $1000\mu\text{s}$ ,  $1200\mu\text{s}$ ,  $1500\mu\text{s}$ . Στις τρεις αυτές περιπτώσεις προκύπτουν διαφορετικές κρίσιμες συχνότητες οπότε τα αποτελέσματα των δυναμικού και βηματικών τάσεων που προκύπτουν από τον επιλύτη HIFREQ δεν είναι συγκρίσιμα. Όμως, ο αντίστροφος Fourier υπολογισμένος στο ίδιο σημείο και στις τρεις περιπτώσεις προκύπτει πρακτικά ίδιος αφού τα αποτελέσματα έχουν διάφορα μικρότερη του 3% (σχήματα 6-6 έως 6-8). Για ρεύματα κλίσης  $10/350\mu\text{s}$ , λοιπόν, επιλέχθηκε το χρονικό παράθυρο  $1200\mu\text{s}$  συνδυάζοντας καλύτερη ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας και λογικό χρόνο προσομοίωσης [1].

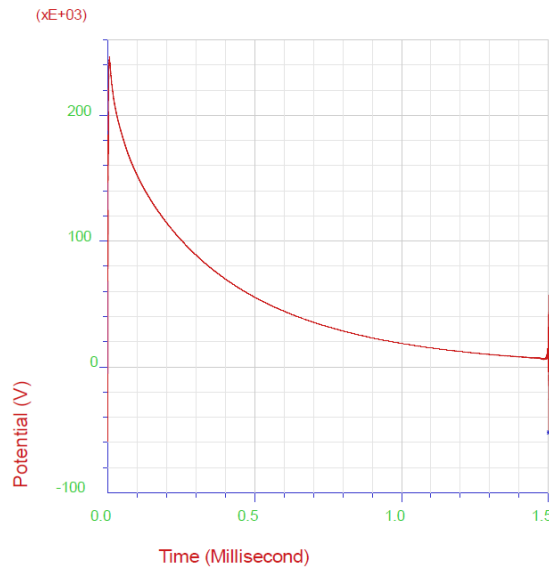




**Σχήμα 6-6** Αντίστροφος Fourier κεραμικού ρεύματος 10/350 $\mu$ s, 50kA για παράθυρο χρόνου 1000 $\mu$ s [1]




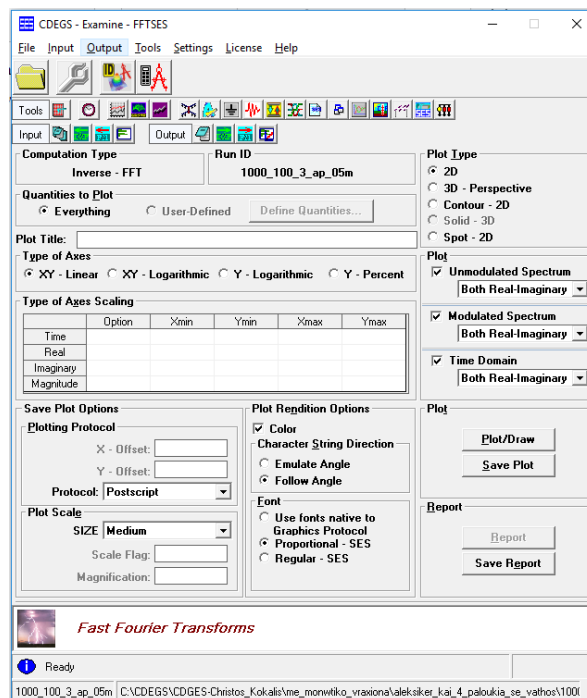
**Σχήμα 6-7** Αντίστροφος Fourier κεραμικού ρεύματος 10/350 $\mu$ s, 50kA για παράθυρο χρόνου 1200 $\mu$ s [1]



Σχήμα 6-8 Αντίστροφος Fourier κεραμικού ρεύματος 10/350 $\mu$ s, 50kA για παράθυρο χρόνου 1500 $\mu$ s [1]

## 6.2.2 Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του επιλύτη FFTSES

Μετά την ολοκλήρωση της καταχώρησης δεδομένων και καθώς βρισκόμαστε στην αρχική οθόνη του επιλύτη, η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί Compute/Submit . Μόλις τελειώσει η προσομοίωση, αυτόματα εμφανίζεται η οθόνη παρουσίασης αποτελεσμάτων (σχήμα 6-9) [1].



Σχήμα 6-9 Επιλογές για τη δημιουργία γραφημάτων του επιλύτη FFTSES

Αφού επιλέξουμε τίτλο για την γραφική παράσταση, μπορούμε να καθορίσουμε ποια από τα μεγέθη που είχαμε επιλέξει να υπολογιστούν, θέλουμε να εμφανίσουμε στην γραφική παράσταση. Έχουμε τη δυνατότητα διαφορετικών τύπων γραφικών παραστάσεων, ενώ μπορούμε να καθορίσουμε και τον τύπο των αξόνων μας (π.χ. λογαριθμικοί).

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του τρόπου εμφάνισης των σχεδιαζόμενων διανυσματικών στοιχείων (σα δiάνυσμα, μόνο το μέτρο, μόνο η γωνία, πραγματικό, φανταστικό μέρος). Ακόμη, μπορούμε να θέσουμε όρια στους άξονες, ώστε να περιορίσουμε το πεδίο ενδιαφέροντός μας με την επιλογή Types of Axes Scaling, ενώ με την επιλογή Plot Scale καθορίζουμε το μέγεθος που θέλουμε να έχουν οι γραφικές μας παραστάσεις. Στις επιλογές Unmodulated Spectrum, Modulated Spectrum και Time Domain επιλέγουμε αν θέλουμε στη γραφική για καθένα από αυτά, να εμφανιστούν και τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη των ποσοτήτων που υπολογίζουμε. Τέλος, με την επιλογή Plot/Draw εμφανίζεται νέο παράθυρο με τις γραφικές παραστάσεις [1].

Οι συχνότητες που προκύπτουν από τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier του κεραυνικού ρεύματος που εξετάστηκε φαίνονται στον πίνακα 6-1.

**Πίνακας 6-1** Κρίσιμες συχνότητες που επιλέχθηκαν από τον επιλύτη FFTSES για το κεραμικό ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε

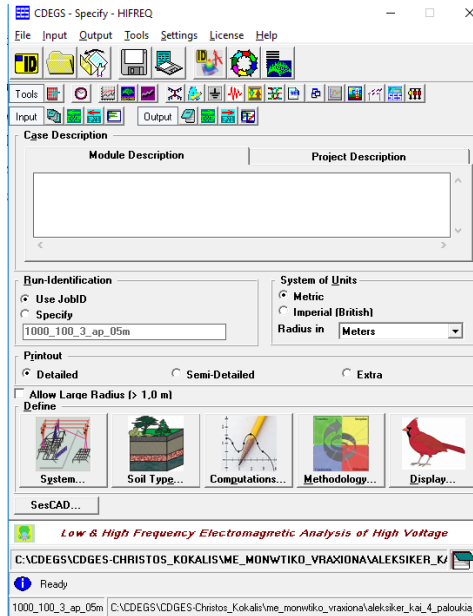
Αύξων αριθμός	10/350μs 50kA 1200μs [Hz]
1η	0
2η	833,33337
3η	1666,6667
4η	2500,0002
5η	3333,3335
6η	4166,667
7η	5000,0005
8η	5833,3335
9η	6666,667
10η	7500,0005
11η	8333,334
12η	10833,334
13η	15833,334
14η	22500,002
15η	188333,34
16η	519166,69
17η	975000,06
18η	1950000,1
19η	2133333,5
20η	2925000,2
21η	3093333,5
22η	3900000,2
23η	4875000
24η	5850000,5
25η	6825000,5
26η	6826667

## 6.3 Απόκριση συστήματος στο πεδίο της συχνότητας

### 6.3.1 Εισαγωγή δεδομένων στον επιλύτη HIFREQ

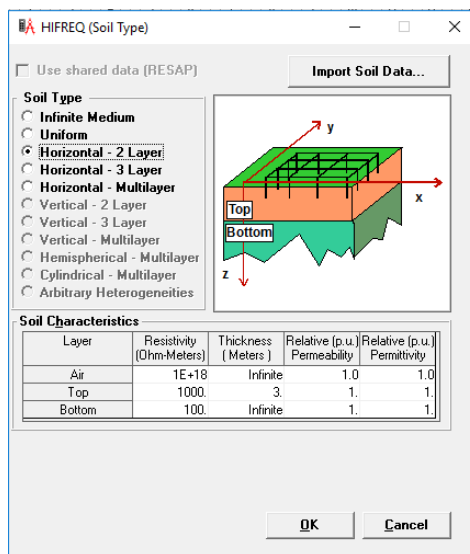
Η εφαρμογή HIFREQ μας επιτρέπει τον υπολογισμό της κατανομής των ρευμάτων σε δίκτυα υπόγειων ή εναέριων αγωγών. Στη συνέχεια, μπορούν να υπολογιστούν και άλλες ηλεκτρομαγνητικές ποσότητες που ενεργοποιούνται εξαιτίας της παραπάνω κατανομής, όπως το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο και τάσεις (είτε σαν διανυσματικές, είτε σαν αριθμητικές ποσότητες).

Στην αρχική οθόνη, στην επιλογή Module Description μπορούμε να εισάγουμε σχόλια για να περιγράψουμε την περίπτωση που θα αναλυθεί στην εφαρμογή. Μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα μονάδων (μετρικό ή βρετανικό) που θα χρησιμοποιήσουμε στην εφαρμογή μας, ενώ με την ένδειξη Run - Identification καθορίζουμε το JobID στο οποίο θα γίνει η αποθήκευση (σχήμα 6-10) [1].



Σχήμα 6-10 Αρχική οθόνη του επιλύτη HIFREQ

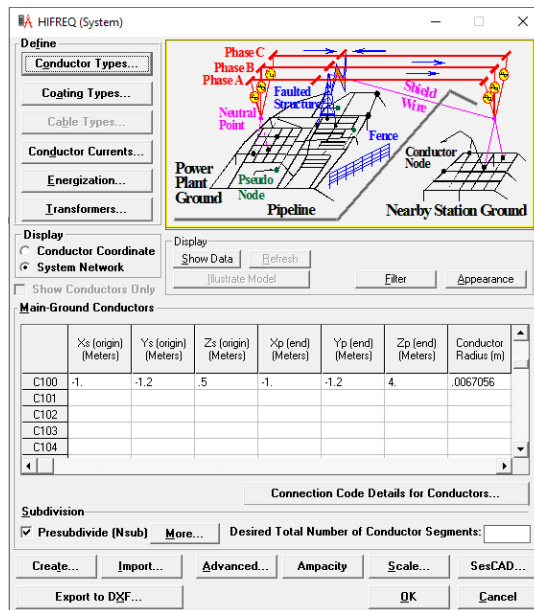
Στην επιλογή Soil Type προσδιορίζουμε το μοντέλο που πιστεύουμε ότι προσεγγίζει το εν λόγω έδαφος, π.χ. οριζόντια πολυστρωματικό (σχήμα 6-11).



Σχήμα 6-11 Επιλογή εδάφους στον επιλύτη HIFREQ

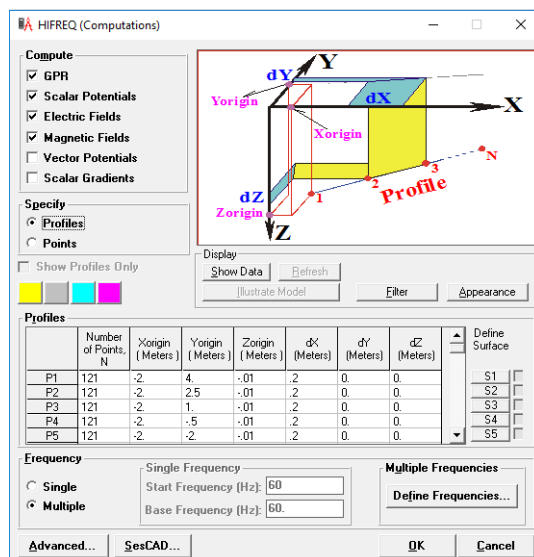
Στην επιλογή System, έχουμε τη δυνατότητα, στις επιλογές Characteristics, Conductor Currents και Energization της υποενότητας Define, να εισάγουμε τα χαρακτηριστικά των αγωγών, όπως ο τύπος και το εξωτερικό τους κάλυμμα, καθώς και τα απαιτούμενα ρεύματα ή τάσεις για την ενεργοποίησή τους. Στη συνέχεια εισάγουμε το δίκτυο των αγωγών και το ενεργοποιούμε στην υποενότητα Main - Ground Conductors (σχήμα 6-12).

Για να δούμε το δίκτυο των αγωγών, μπορούμε στην οθόνη HIFREQ (System) να πατήσουμε την επιλογή Show Data [1].



Σχήμα 6-12 Επιλογή δικτύου και χαρακτηριστικών του

Με την επιλογή Computations, στην αρχική οθόνη (σχήμα 6-10), μπορούμε να προσδιορίσουμε τις φυσικές ποσότητες που θέλουμε να υπολογιστούν, την θέση των σημείων παρατήρησης (Profiles) και τις ζητούμενες συχνότητες για τις οποίες θα γίνουν οι μετρήσεις. Επίσης, μπορούμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματός μας σε διάφορες συχνότητες, επιλέγοντας Multiple στο πεδίο Frequency και ορίζοντας τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν στο πεδίο Define Frequencies. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται στην ανάλυση σφαλμάτων με ευρύ φάσμα συχνοτήτων, όπως είναι οι κερανοί (σχήμα 6-13) [1].



Σχήμα 6-13 Εισαγωγή Profiles και συχνότητων

Τον αριθμό των σημείων παρατήρησης, καθώς και τη μορφή του πεδίου στο οποίο θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις, το καθορίζουμε εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα στον πίνακα

Profiles. Στα πεδία dX, dY, dZ καθορίζεται η απόσταση μεταξύ των Profiles στους τρεις άξονες.

Επιλέγοντας Define Frequencies το πρόγραμμα μας παραπέμπει στο φάκελο με τα αρχεία που περιέχουν τις κρίσιμες συχνότητες που έχουν προκύψει από τον επιλύτη FFTSES. Πρέπει να γίνει επιλογή του αρχείου με το όνομα που αντιστοιχεί στο JobID που δουλεύουμε.

Επίσης, αν θέλουμε να «τρέξουμε προσομοιώσεις για τη μόνιμη κατάσταση, τότε στο πλαίσιο Frequency επιλέγουμε Single, και στο πεδίο Single Frequency βάζουμε και σαν Start Frequency και σαν Base Frequency τη συχνότητα στην οποία θέλουμε να προσομοιώσουμε το σύστημα. Για τη μόνιμη κατάσταση η συχνότητα αυτή για την Ελλάδα είναι η συχνότητα λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου, δηλαδή τα 50 Hz. Σημειώνεται ότι, όταν θέλουμε να «τρέξουμε προσομοίωση για τη μόνιμη κατάσταση δε χρειάζεται να εκτελέσουμε τον FFTSES, ούτε και τον IFFTSES διότι η συχνότητα προσομοίωσης είναι μία κάθε φορά.

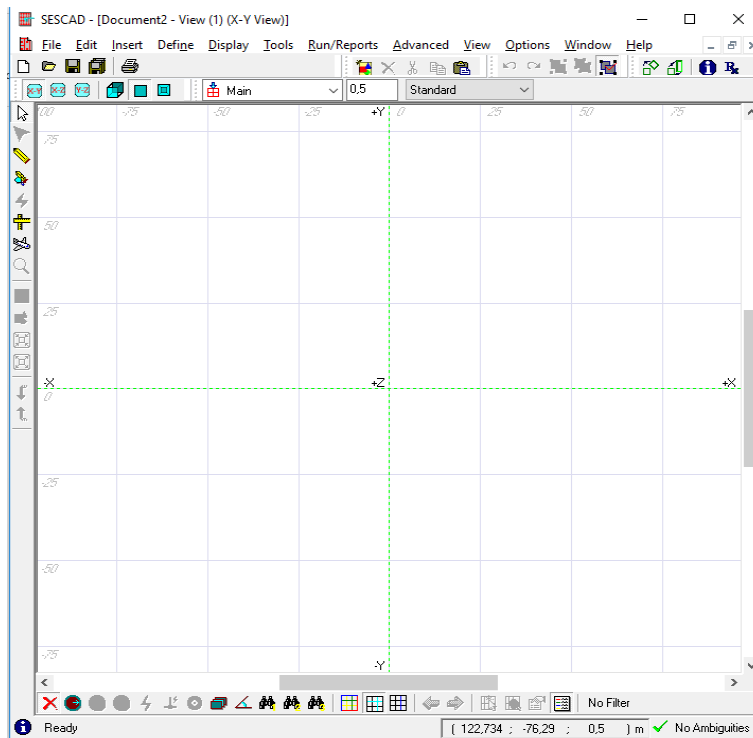
Πατώντας OK επιστρέφουμε στην αρχική οθόνη του HIFREQ (σχήμα 6-10) [1].

Με την επιλογή SesCAD, στην αρχική οθόνη του επιλύτη HIFREQ (σχήμα 6-10), εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο του σχήματος 6-14.

Η εφαρμογή SesCAD είναι ένα γραφιστικό εργαλείο για τον εύκολο σχεδιασμό συστημάτων και δικτύων αγωγών. Παρέχει πολλές ευκολίες για τον σχεδιασμό απλών και πολύπλοκων αντικειμένων, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων, ευκολόχρηστων δυναμικών εργαλείων. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης του σχεδιαζόμενου τρισδιάστατου δικτύου από διαφορετικές οπτικές γωνίες, ενώ έχει και δυνατότητες εστίασης έως και 1 εκατομμύριο φορές.

Με αυτή την εφαρμογή μπορούμε να σχεδιάσουμε μεγάλα ολοκληρωμένα δίκτυα πυλώνων υψηλής τάσης με τις βάσεις, τα πλέγματα γείωσης τους και περιφερειακά στοιχεία που μας ενδιαφέρουν, όπως μεταλλικούς φράχτες, ενώ μπορεί να γίνει και ο γραφικός καθορισμός του πεδίου στο οποίο θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις μας.

Στο γραφικό περιβάλλον SesCAD ο σχεδιασμός του πλέγματος και των αγωγών γίνεται επιλέγοντας Insert → Conductor Grid και Insert → Single Conductor αντίστοιχα όπως επίσης και η εισαγωγή Profile με την επιλογή Insert → Observation Profile. Ακόμα, γίνεται καθορισμός διαφόρων παραμέτρων (είδη αγωγών, είδη καλωδίων, ενεργοποίηση) μέσω της επιλογής Define (σχήμα 6-14) [1].



**Σχήμα 6-14** Γραφικό περιβάλλον SESCAD

Επιλέγοντας Define → Conductor types εισάγουμε τη σχετική ειδική αντίσταση και τη σχετική επιτρεπτότητα των αγωγίμων υλικών που χρησιμοποιούμε. Ο χαλκός θεωρείται προκαθορισμένος αγωγός (default conductor) και υπάρχει ως επιλογή πριν εισάγουμε νέα υλικά. Στον πίνακα 6-2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Με την επιλογή Define → Energization types ορίζουμε το είδος της ενεργοποίησης (ρεύμα ή τάση) και την τιμή του. Όταν το σήμα εισόδου έχει αναλυθεί μέσω του επιλύτη FFTSES, τότε εισάγουμε μοναδιαία τάση ή ρεύμα ώστε να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα των εξισώσεων Fourier. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μοναδιαίο ρεύμα στο σημείο που θεωρούσε ότι εγχέεται ο κεραυνός [1].

**Πίνακας 6-2** Σχετική ειδική αντίσταση και σχετική επιτρεπτότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών

Υλικό	Σχετική ειδική αντίσταση [Ω/km]	Σχετική επιτρεπτότητα [Ω/km]
Χάλυβας	17	300
Αλουμίνιο	1,64	1,0
Fiberglass	$10^{15}$	1,0

Οι αγωγοί του συστήματος θα πρέπει να χωριστούν σε τμήματα μέσω της επιλογής Characteristics → Subdivision Options → Maximum Length και εισάγουμε μέγιστο μήκος των τμημάτων  $\lambda$  που επιλέγουμε. Η λειτουργία αυτή είναι σημαντική για τους



υπολογισμούς ειδικά στις υψηλές συχνότητες. Το άνω επιτρεπτό όριο του λ υπολογίζεται από τους τύπους :

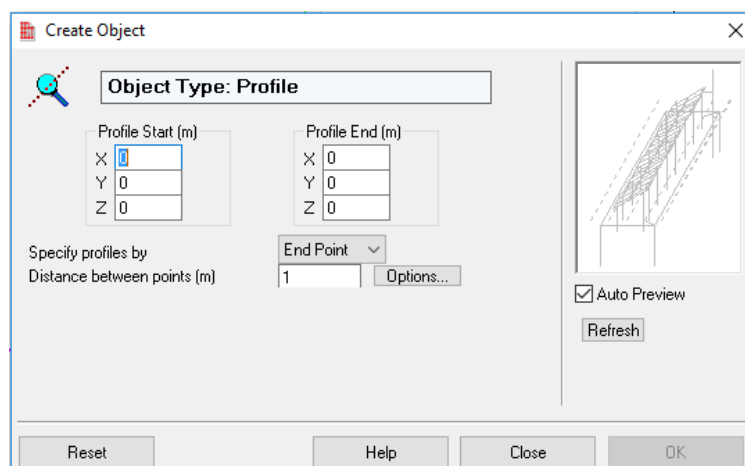
$$\lambda = 3 * \frac{10^8}{f}, \text{ στον αέρα}$$

$$\lambda = 3160 * \sqrt{p/f}, \text{ στο έδαφος}$$

όπου f η συχνότητα και p η ειδική αντίσταση του εδάφους. Πρακτικά θέτουμε το λ αρκετά μικρότερο για μεγαλύτερη ακρίβεια αυξάνοντας βέβαια τον χρόνο προσομοίωσης. Στις προσομοιώσεις επιλέχθηκε λ=0,2m για τους υπολογισμούς [1].

Επίσης, μέσα στο γραφικό περιβάλλον SesCAD μπορούμε να ορίσουμε και τα σημεία παρατήρησης μέσω του καθορισμού προφίλ παρατήρησης. Τα προφίλ παρατήρησης (observation profiles) είναι ευθύγραμμα τμήματα που αποτελούνται από observation points όπου και γίνονται οι υπολογισμοί. Για τη δημιουργία observation profile επιλέγεται Insert → Observation Profile και στη συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 6-15. Έπειτα, ορίζουμε το σημείο που ξεκινάει και τελειώνει το profile ενώ στο πεδίο Distance between points εισάγουμε την απόσταση των σημείων παρατήρησης (observation points) [1].


Στα σχέδια που προσομοιώθηκαν, ορίστηκαν τρία profiles στο έδαφος κατά μήκος της εγκατάστασης, όπου υπολογίζεται το δυναμικό και οι βηματικές τάσεις. Σε κάθε profile η απόσταση των observation points είναι 0,2m.

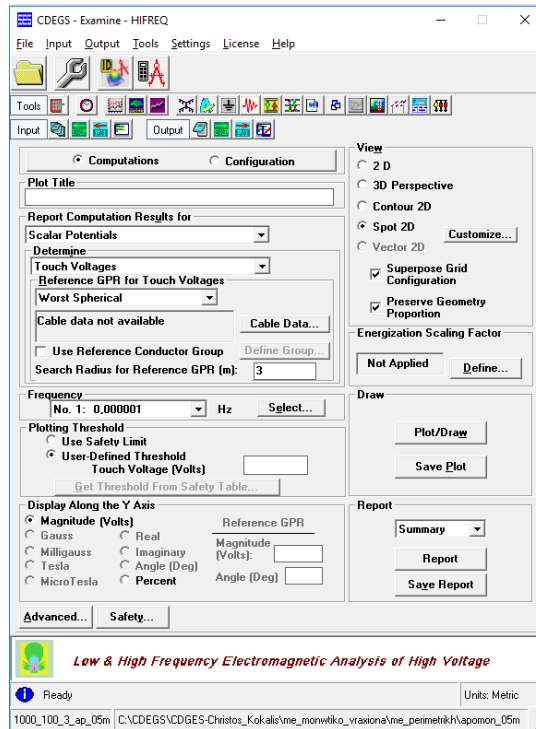


**Σχήμα 6-15** Σχεδίαση observation profile

Τελειώνοντας με τη σχεδίαση στο SESCAD κλείνουμε το παράθυρο του SESCAD και επιστρέφουμε στο παράθυρο του σχήματος 6-10.

## 6.3.2 Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του HIFREQ

Ομοίως, η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί Compute/Submit  και αφού τελειώσει, αυτόματα εμφανίζεται η οθόνη παρουσίασης αποτελεσμάτων (σχήμα 6-16).

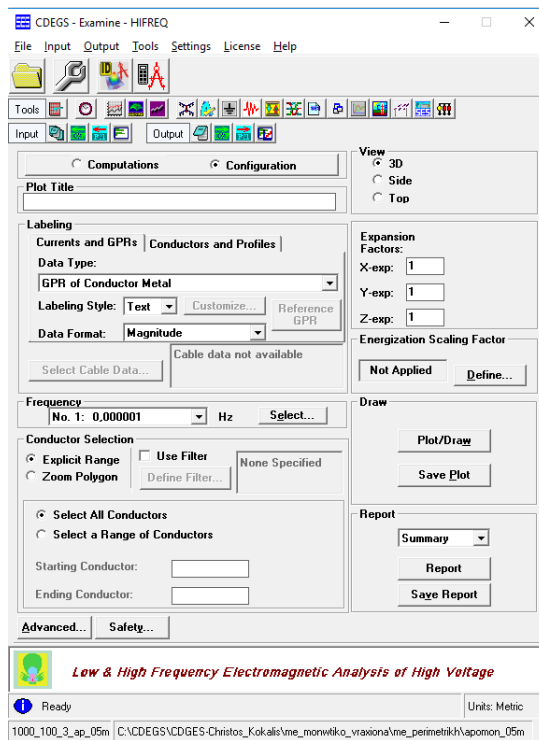


Σχήμα 6-16 Επιλογή γραφημάτων αποτελεσμάτων του επιλύτη HIFREQ

Πατάμε την επιλογή Computations. Μπορούμε να εισάγουμε το όνομα που θέλουμε να δώσουμε στην γραφική παράσταση στο πεδίο Plot Title. Μέσω των πεδίων Report Computation Results for και Determine καθορίζουμε τη παράμετρο της οποίας τα αποτελέσματα θέλουμε να εμφανιστούν.

Επιλέγουμε τη συχνότητα για την οποία θέλουμε να γίνει η γραφική (επιλογή Frequency), ενώ μπορούμε να βάλουμε όρια στις τιμές της γραφικής με βάση κάποιους κανονισμούς, είτε με δική μας πρωτοβουλία αν έχουμε συγκεκριμένες προδιαγραφές (επιλογή Plotting Threshold). Επίσης, επιλέγουμε το είδος της γραφικής που επιθυμούμε (π.χ. τρισδιάστατη) και πατώντας Plot/Draw εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο με τις γραφικές παραστάσεις που επιλέχθηκαν.

Επιλέγοντας Configuration στην αρχική οθόνη (σχήμα 6-16) εμφανίζεται το σχήμα 6-17.



**Σχήμα 6-17** Επιλογή γραφημάτων συστήματος του επιλύτη HIFREQ

Εδώ μπορούμε να εμφανίσουμε γραφήματα με το σχέδιο της διάταξης που προσομοιώνεται επιλέγοντας **Conductors and Profiles**, ενώ με την επιλογή **Currents and GPRs** έχουμε κάποιες επιπλέον δυνατότητες αποτελεσμάτων. Στο πεδίο **Select a Range of Conductors** μπορούμε να επιλέξουμε συγκεκριμένους αγωγούς για τους οποίους θέλουμε να γίνουν οι υπολογισμοί. Αν επιλέξουμε το κουτάκι **Zoom Polygon**, μπορούμε με τα 4 πεδία P1 έως και P4 να καθορίσουμε μία ορθογωνική περιοχή στο επίπεδο X-Y και με το **Depth** να δημιουργήσουμε ένα τρισδιάστατο ορθογωνικό κουτί επιλογής αγωγών, σε αυτήν την περιοχή [1].

Η επιλογή **Energization Scaling Factor** είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη λήψη αποτελεσμάτων προσομοιώσεων. Το δυναμικό, οι τάσεις επαφής, οι βηματικές τάσεις, τα ρεύματα και όλα τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη που υπολογίζουμε είναι ανάλογα του μεγέθους του ρεύματος ή της τάσης ενεργοποίησης του συστήματος. Για παράδειγμα, αν διπλασιαστεί το ρεύμα σφάλματος που εγχέεται στο σύστημα και αυτή είναι η μόνη πηγή ενέργειας που υπάρχει τη δεδομένη στιγμή, τότε και όλες οι παραπάνω ποσότητες θα διπλασιαστούν. Επιλέγοντας, λοιπόν, κατάλληλο συντελεστή ενεργοποίησης προκύπτουν γραφικές ζητούμενων μεγεθών για διαφορετικά σενάρια ενεργοποίησης του δικτύου, χωρίς να χρειάζεται η επανάληψη της διαδικασίας για τον επιλύτη HIFREQ [1].

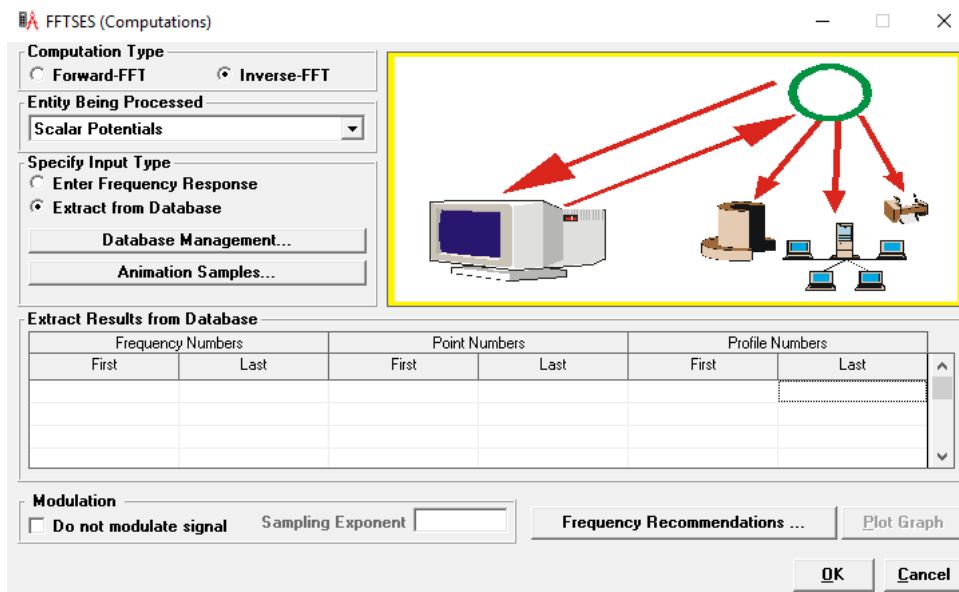
Εκτός από τις γραφικές παραστάσεις που σχεδιάζει το ίδιο το πρόγραμμα μπορούμε να εξάγουμε τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για κάθε επιλεγμένη συχνότητα σε Excel. Επιλέγουμε **Advanced** → **Tab** → **Proceed** και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε txt αρχείο απ' όπου μπορούμε να τα μεταφέρουμε σε αρχείο Excel. Αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούμε όταν παίρνουμε αποτελέσματα για τα «τρεξίματα» της μόνιμης κατάστασης, δηλαδή για τη συχνότητα των 50 Hz.

Για τα αποτελέσματα των δυναμικών επιλέγουμε Report Computation Results for → Scalar Potentials, Determine → Touch Voltages, Reference GPR for Touch Voltages → Worst Spherical και Search Radius for Reference GPR: 1m. Η επιλογή Worst Spherical υπολογίζει την τάση επαφής σε κάθε observation point σε σχέση με τα τμήματα που βρίσκονται εντός της σφαίρας με ακτίνα που ορίζεται στο πεδίο και δίνει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη τιμή. Η ακτίνα ορίζεται 1m σύμφωνα με το πρότυπο IEEE std 80-2000 για τις τάσεις επαφής [1].

## 6.4 Απόκριση συστήματος στο πεδίο του χρόνου


### 6.4.1 Υπολογισμός αντιστρόφου Fourier (IFFT)

Επιλέγοντας Inverse FFT στο σχήμα 6-4 εμφανίζεται στην οθόνη το σχήμα 6-18. Στο κουτάκι Entity Being Processed επιλέγουμε την ποσότητα για την οποία θέλουμε να γίνει αντίστροφος Fourier. Επίσης, μπορούμε στην ένδειξη Specify Input Type να επιλέξουμε αν η απόκριση του συστήματος στο πεδίο συχνοτήτων θα καθοριστεί από δεδομένα που θα εισάγει ο χρήστης ή από αρχεία στη βάση δεδομένων του προγράμματος. Στα πεδία Point Numbers εισάγουμε τα σημεία παρατήρησης και στα πεδία Profile Numbers τα Profiles στα οποία θέλουμε να υπολογιστεί ο IFFT [1].

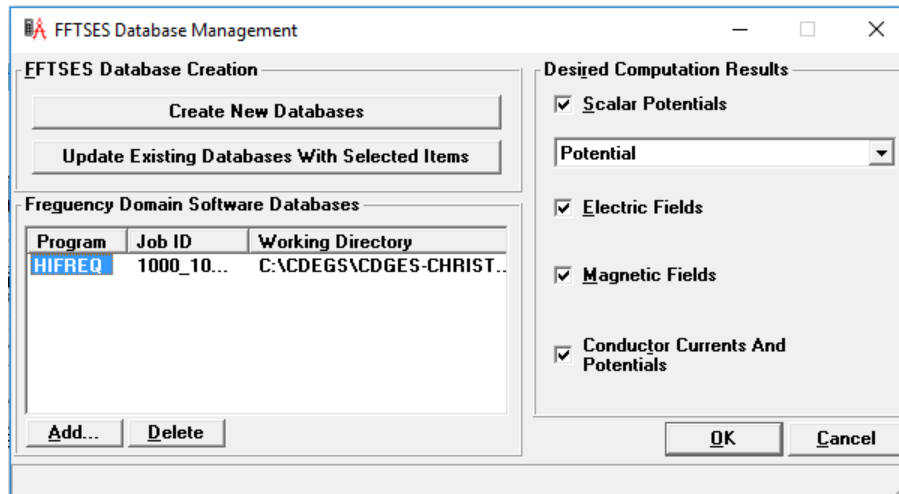


Σχήμα 6-18 Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier

Μετά επιλέγουμε Database Management και εμφανίζεται το σχήμα 6-19. Αρχικά, πατάμε Add και εισάγουμε το αντίστοιχο αρχείο που φέρει το όνομα του JobID στο οποίο δουλεύουμε. Επιλέγουμε από τα πεδία στα αριστερά τις ποσότητες που θέλουμε να υπολογίσουμε και με την επιλογή Create New Databases δημιουργούνται βάσεις δεδομένων όπου θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα του IFFT. Επιλέγουμε OK,

επιστρέφουμε στο σχήμα 6-18 και επιλέγουμε ξανά OK. Στην οθόνη εμφανίζεται το σχήμα 6-3. Η προσομοίωση ξεκινάει πατώντας το κουμπί Compute/Submit .

Τα αποτελέσματα εξάγονται από το σχήμα 6-9 όπως και στον ευθύ μετασχηματισμό Fourier [1].



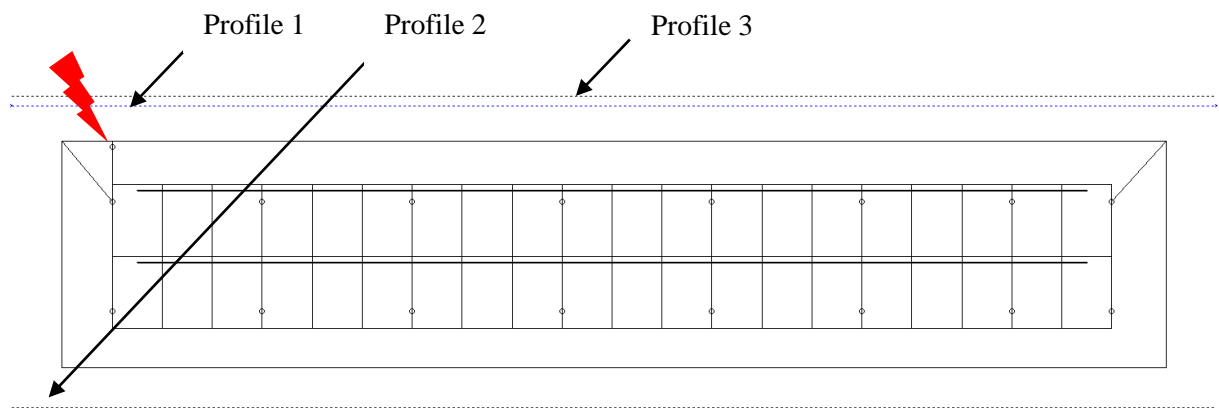
**Σχήμα 6-19** Δημιουργία βάσης δεδομένων για τον υπολογισμό του IFFT



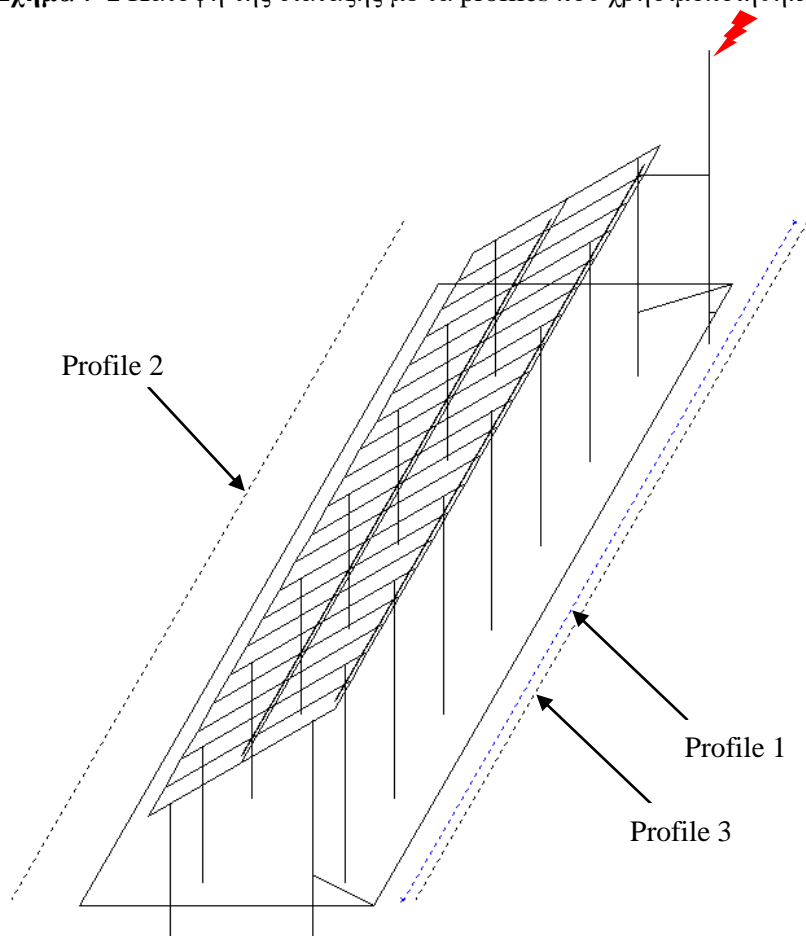
## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα προσομοιώσεων

### 7.1 Διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις τοποθετήθηκαν στη διάταξη τρία προφίλ παρατήρησης (observation profiles), όπως αυτά φαίνονται στα σχήματα 7-1 και 7-2.



Σχήμα 7-1 Κάτοψη της διάταξης με τα profiles που χρησιμοποιήθηκαν



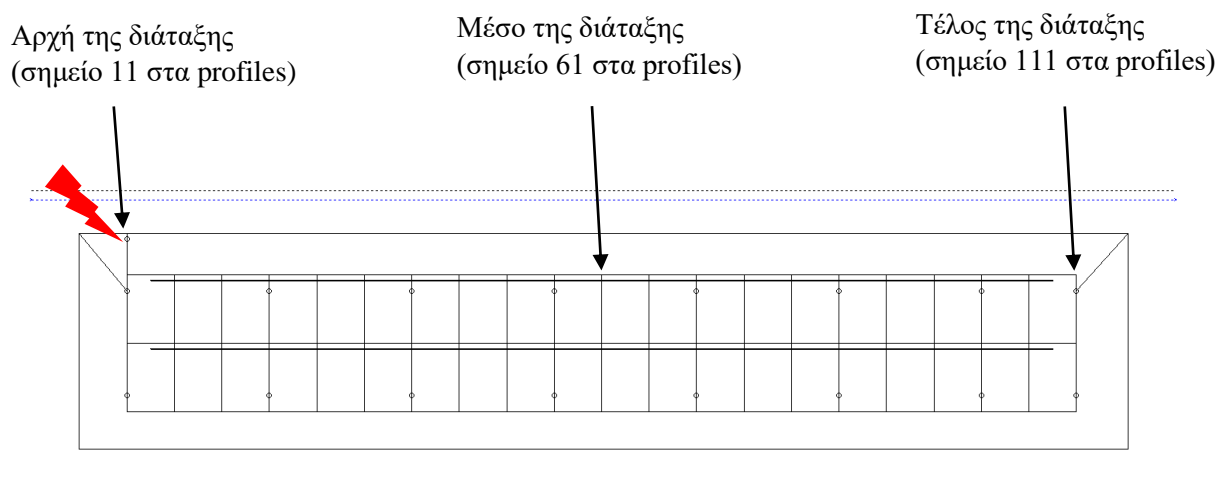
Σχήμα 7-2 Τρισδιάστατη όψη της διάταξης με τα profiles που χρησιμοποιήθηκαν

Τα profiles 1 και 2 τοποθετήθηκαν σε απόσταση περίπου 1,57 m από τη διάταξη των φ/β πλαισίων (όπως φαίνεται στο σχήμα 7-2) και σε όλες τις προσομοιώσεις παρέμεναν σταθερά. Αντίθετα, το profile 3 τοποθετούνταν κάθε φορά σε απόσταση 1 m από την ακίδα σύλληψης (αλεξικέραυνο) ώστε, να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Επίσης, όλα τα profiles ήταν τοποθετημένα στην επιφάνεια του εδάφους.

Τα profiles είχαν μήκος 24 m και αποτελούνταν από 120 σημεία παρατήρησης (observation points), όπου υπήρχε η δυνατότητα να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί.

Εξαγωγή αποτελεσμάτων έγινε στην αρχή, στο μέσο και στο τέλος της διάταξης (σημεία παρατήρησης 11, 61 και 111 όπως φαίνονται στο σχήμα 7-3). Καθώς το κοντινότερο σημείο των προφίλ παρατήρησης στο σημείο έγχυσης του κεραυνικού πλήγματος είναι το σημείο 11, εκεί αναμένονται μέγιστες τιμές δυναμικού και τάσεων επαφής.



Σχήμα 7-3 Σημεία στα οποία λαμβάνονταν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων

## 7.2 Επίδραση της απόστασης του αλεξικέραυνου και της δομής του εδάφους

Για να εξεταστεί η επίδραση της απόστασης του αλεξικέραυνου και της δομής του εδάφους στο αναπτυσσόμενο δυναμικό κατά τη διάρκεια κεραυνικού πλήγματος θεωρήθηκαν και προσομοιώθηκαν οι περιπτώσεις που φαίνονται στον πίνακα 7-1.



**Πίνακας 7-1** Παράμετροι που μεταβάλλονταν στις προσομοιώσεις

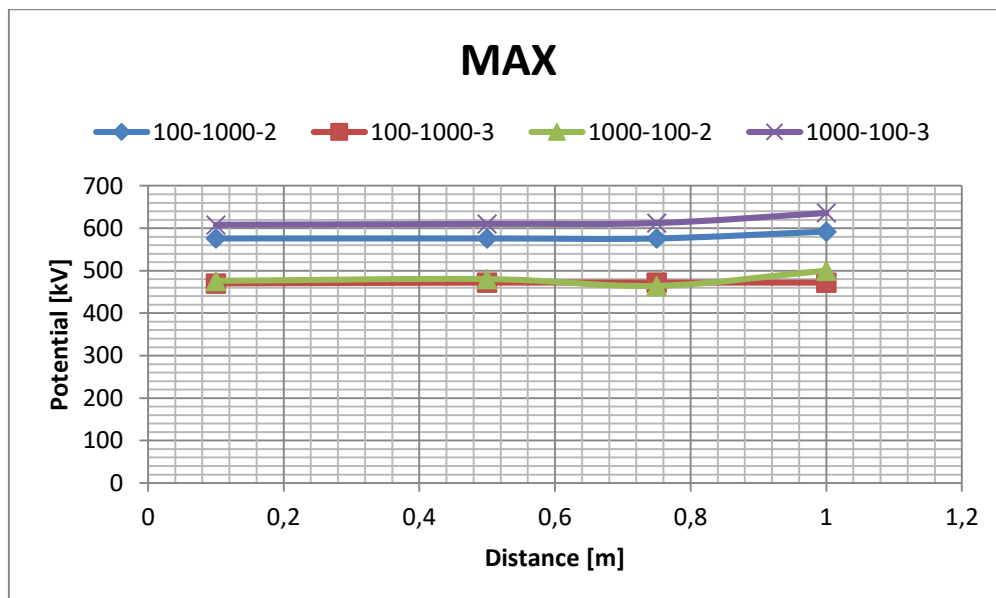
Σύσταση εδάφους	Απόσταση ακίδας σύλληψης από τη φ/β διάταξη [m]			
1000Ωm-100Ωm-2m	0,1	0,5	0,75	1
1000Ωm-100Ωm-3m				
100Ωm-1000Ωm-2m				
100Ωm-1000Ωm-3m				

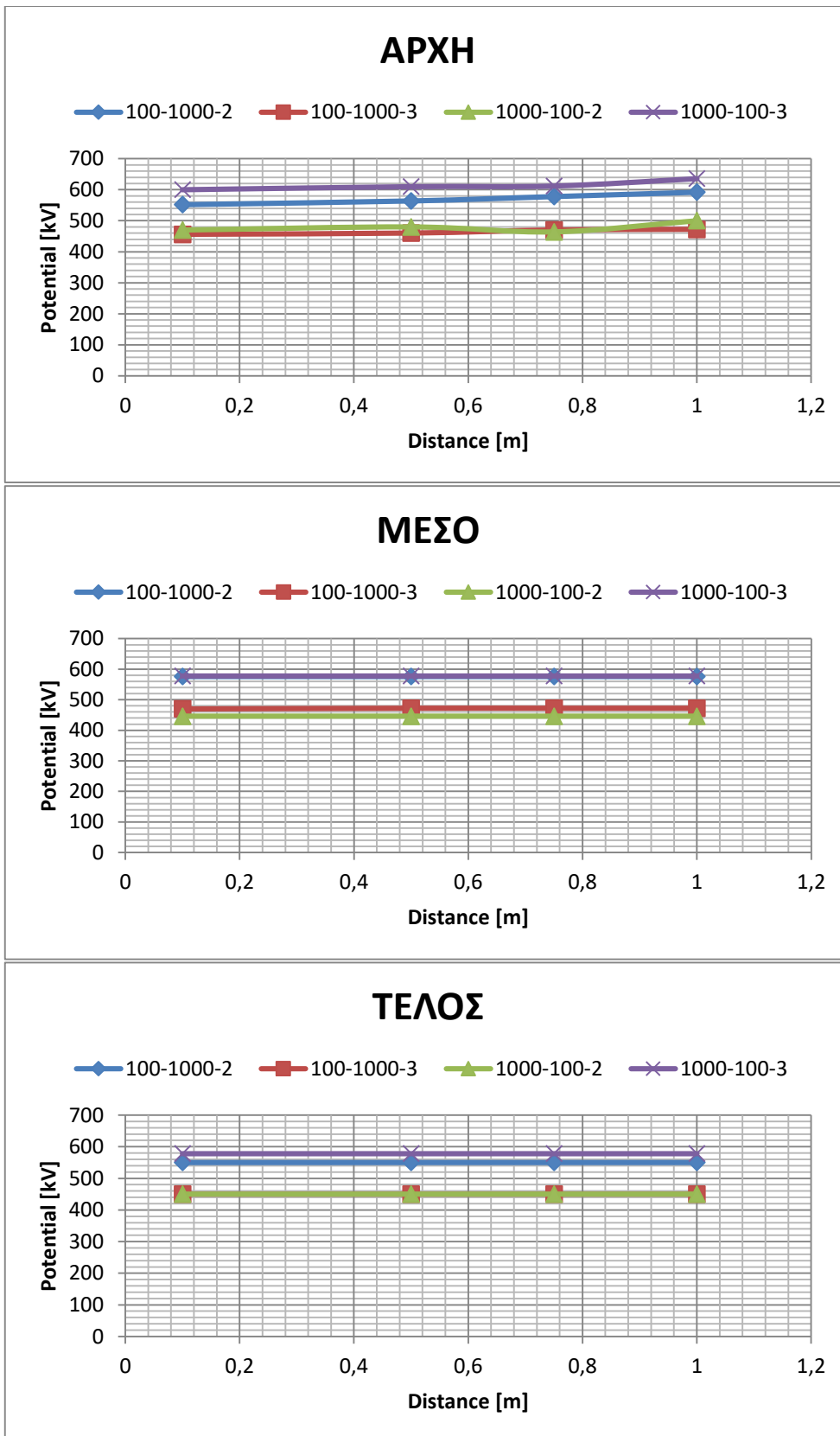
Υπενθυμίζεται εδώ ότι, σε όλη την εργασία θα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός XXXX-YYYY-Z για τη σύσταση του εδάφους (διστρωματικό έδαφος), όπου:

- XXXX: δηλώνει την ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος του εδάφους σε Ω
- YYYY: δηλώνει την ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους σε Ω
- Z: δηλώνει το βάθος του πρώτου στρώματος του εδάφους σε m

Επίσης, το κεραυνικό ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις είχε χρόνο μετώπου 10μs, χρόνο ημίσεως εύρους 350μs, πλάτος 50kA και διάρκεια 1200μs. Το σημείο πτώσης του κεραυνικού πλήγματος ήταν η ακίδα σύλληψης (αλεξικέραυνο). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις ήταν αυτή του σχήματος 5-9. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης (γείωση και σύστημα αντικεραυνικής προστασίας) περιγράφονται στην §5.2.3.

Στο σχήμα 7-4 φαίνονται τα αποτελέσματα για το αναπτυσσόμενο δυναμικό στο profile 1 και στα σημεία παρατήρησης που αναφέρθηκαν στην §7.1.

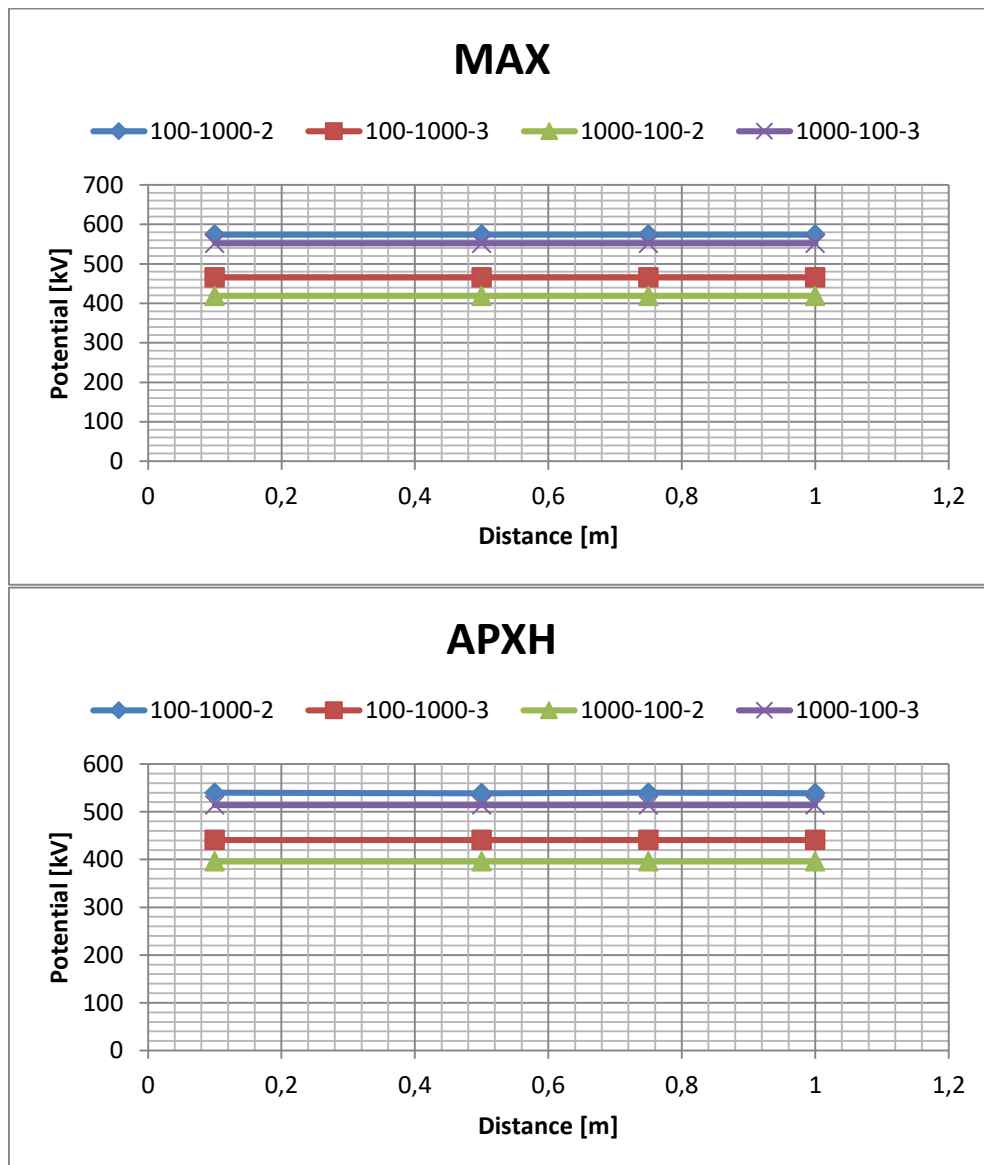


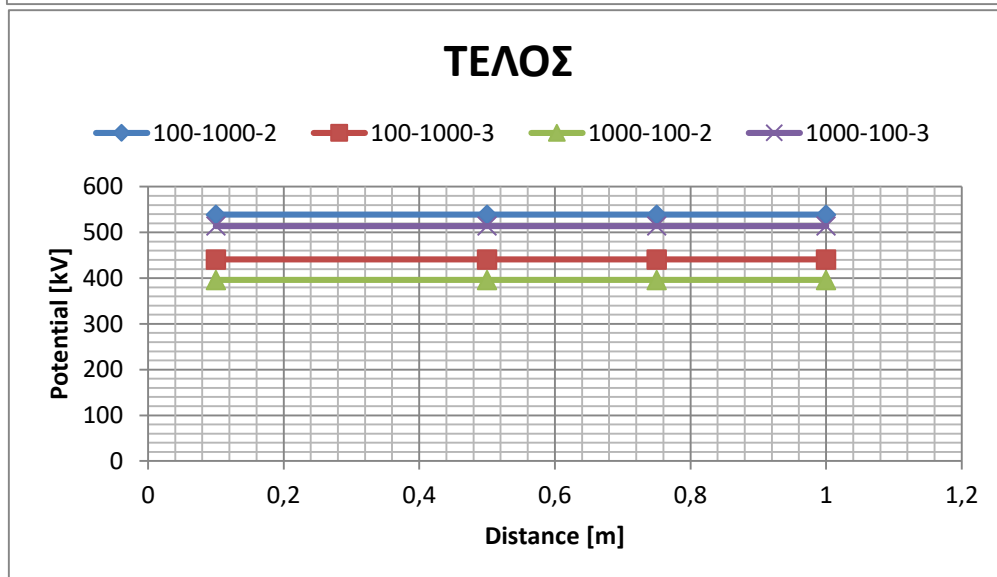
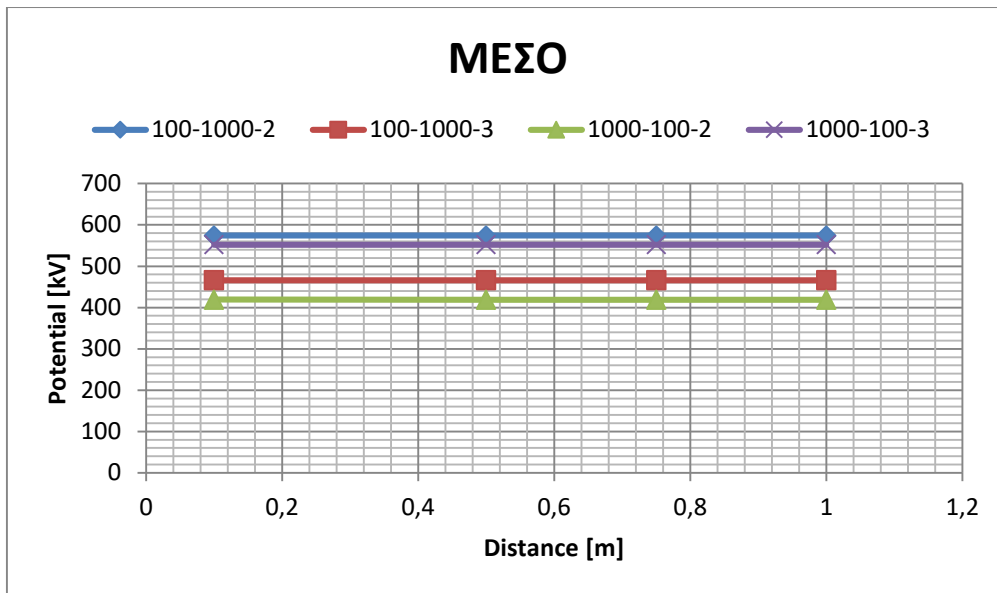


**Σχήμα 7-4** Δυναμικό που αναπτύσσεται στη διάταξη σε σχέση με την απόσταση του αλεξικέραννου και τη σύσταση του εδάφους, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Στο σχήμα 7-4 παρατηρούμε ότι το αναπτυσσόμενο δυναμικό δεν εξαρτάται από την απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη για το profile 1. Βλέπουμε μόνο μια μικρή εξάρτηση στο γράφημα για τη μέγιστη τιμή του δυναμικού (MAX) και για το δυναμικό στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), για απόσταση του αλεξικέραυνου ίση με 1m από τη φ/β διάταξη. Αυτό οφείλεται στο ότι, το αλεξικέραυνο όταν τοποθετείται στο 1m πλησιάζει περισσότερο προς το profile 1, το οποίο είναι σε απόσταση 1,57m περίπου από τη φ/β διάταξη, άρα εμφανίζεται μεγαλύτερο δυναμικό. Επίσης, παρατηρούμε ότι στο μέσο και στο τέλος της διάταξης το δυναμικό είναι ελαφρώς μικρότερο από την αρχή της διάταξης (εκεί δηλαδή που βρίσκεται το αλεξικέραυνο) για όλα τα εδάφη.

Στο σχήμα 7-5 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, που υπολογίστηκαν στο profile 2 που βρίσκεται, όπως έχει προαναφερθεί στο κάτω μέρος της διάταξης.

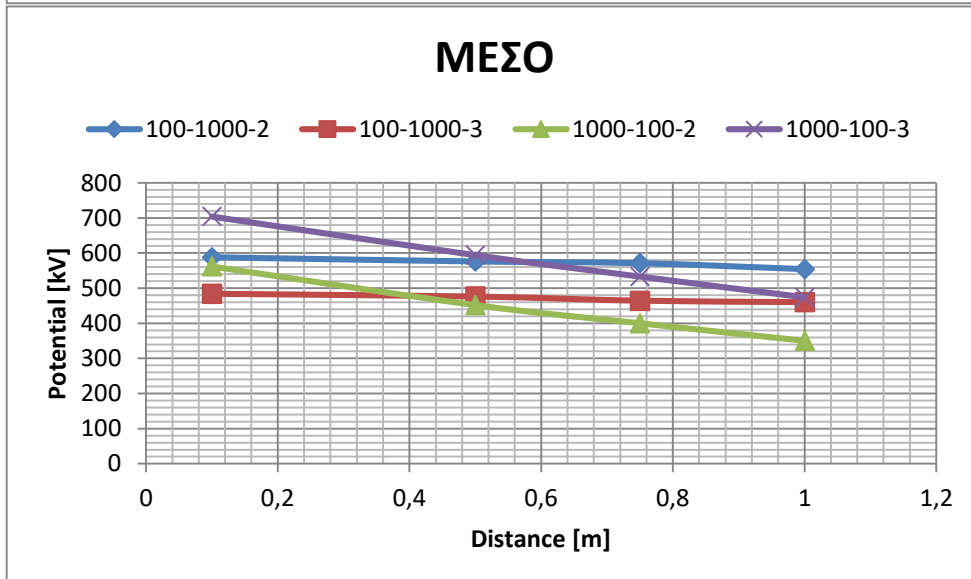
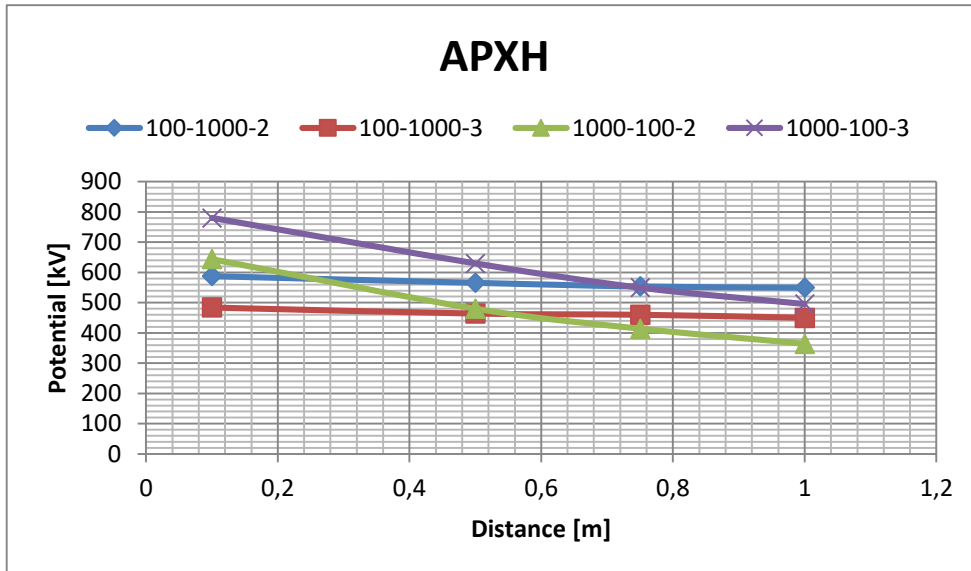
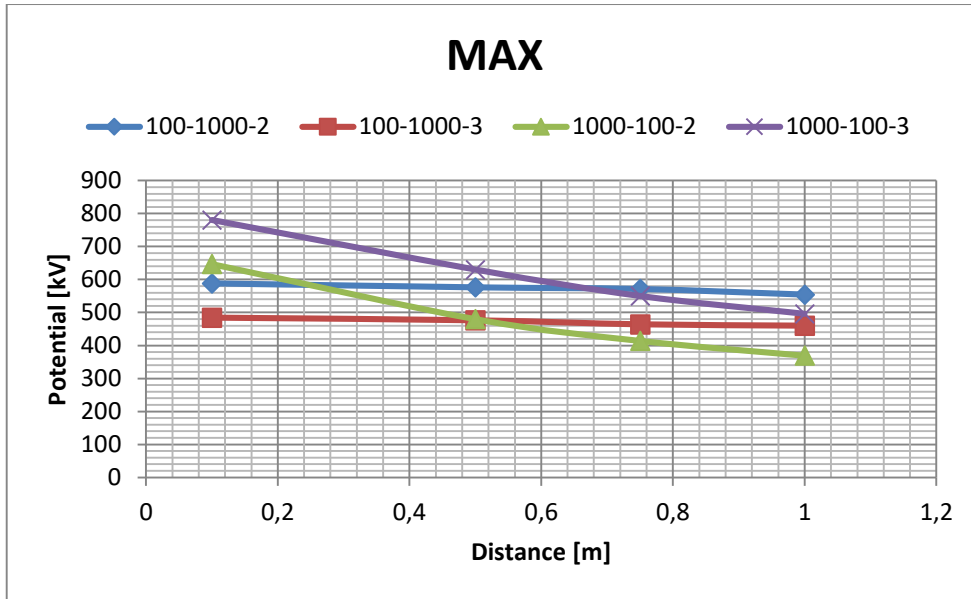


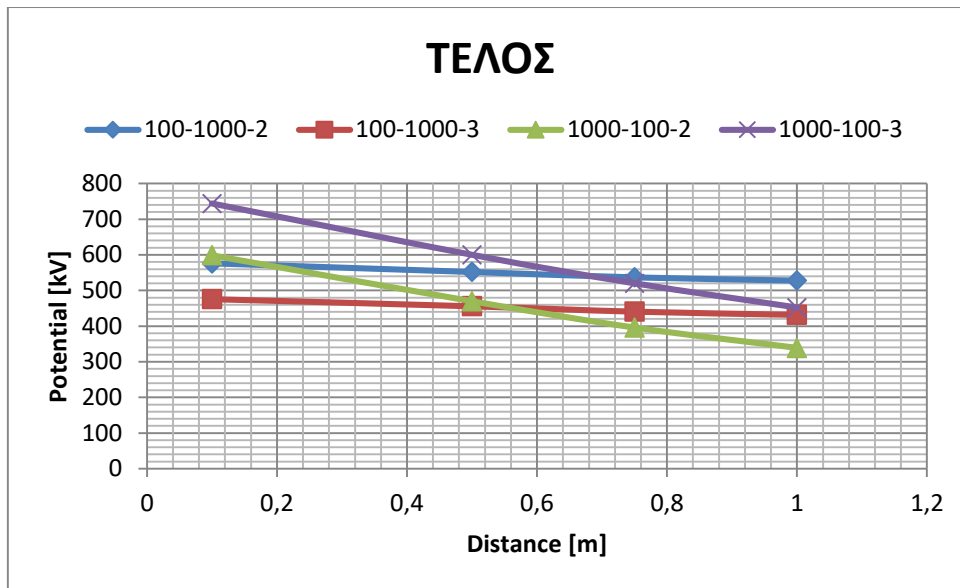


**Σχήμα 7-5** Δυναμικό που αναπτύσσεται στη διάταξη σε σχέση με την απόσταση του αλεξικέραυνου και τη σύσταση του εδάφους, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Στο profile 2 (κάτω μέρος της διάταξης) αυτό που παρατηρείται είναι ότι ούτε εδώ το δυναμικό εξαρτάται από την απόσταση του αλεξικέραυνου από τη διάταξη και ότι έχει μικρότερες τιμές από ότι στο profile 1 (πάνω μέρος της διάταξης).

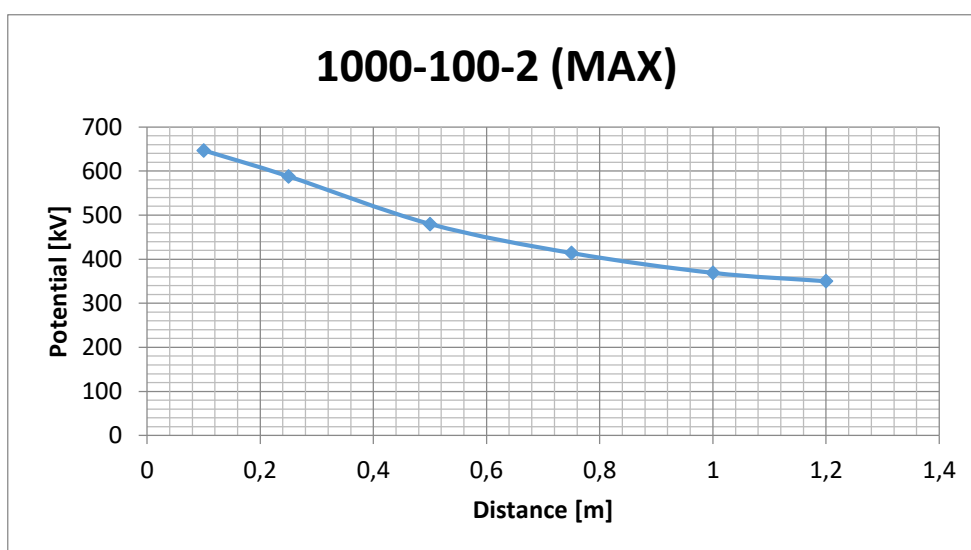
Στο σχήμα 7-6 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, που υπολογίστηκαν στο profile 3, το οποίο τοποθετούνταν κάθε φορά σε απόσταση 1m από το αλεξικέραυνο.

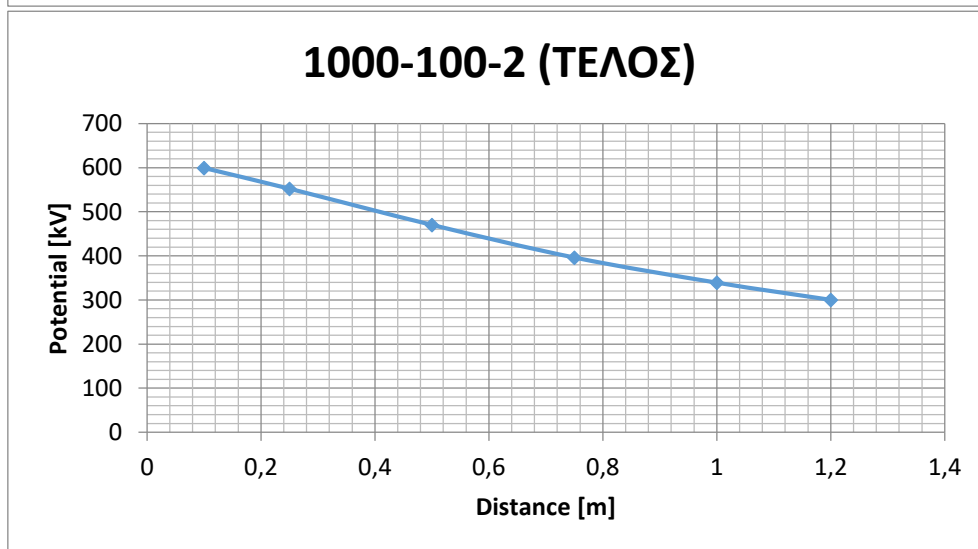
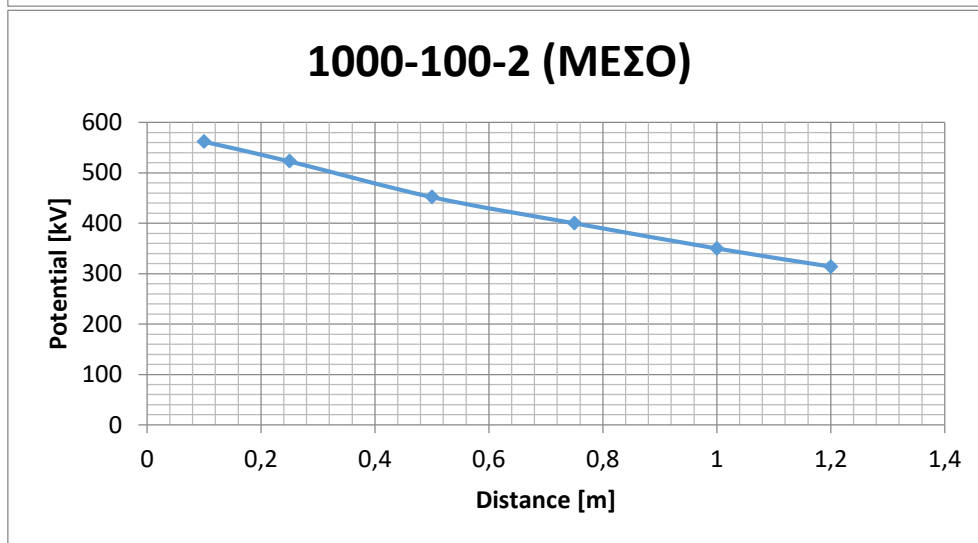
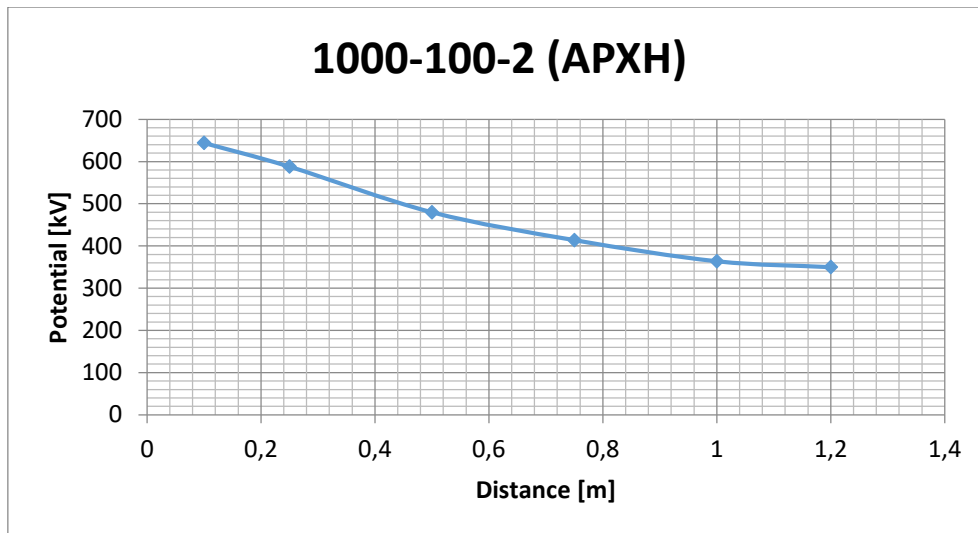




**Σχήμα 7-6** Δυναμικό που αναπτύσσεται στη διάταξη σε σχέση με την απόσταση του αλεξικέρανου και τη σύσταση του εδάφους, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Αυτό που παρατηρούμε στο profile 3, είναι ότι στα εδάφη με ειδική αντίσταση πάνω στρώματος  $1000\Omega\text{m}$  και ειδική αντίσταση κάτω στρώματος  $100\Omega\text{m}$  το εμφανιζόμενο δυναμικό εξαρτάται έντονα από την απόσταση του αλεξικέρανου και πιο συγκεκριμένα, καθώς αυξάνεται η απόσταση του αλεξικέρανου από τη φ/β διάταξη, το εμφανιζόμενο δυναμικό μειώνεται. Παρατηρήθηκε επίσης ότι, αυτή η επίδραση της απόστασης του αλεξικέρανου στο δυναμικό φθίνει για αποστάσεις αλεξικέρανου μεγαλύτερες του 1m, όπως φαίνεται στο σχήμα 7-7 (για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 3). Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε στις προσομοιώσεις, το αλεξικέρανο να φτάνει μέχρι την απόσταση του 1m από τη φ/β διάταξη.





**Σχήμα 7-7** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου (περισσότερα σημεία), για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

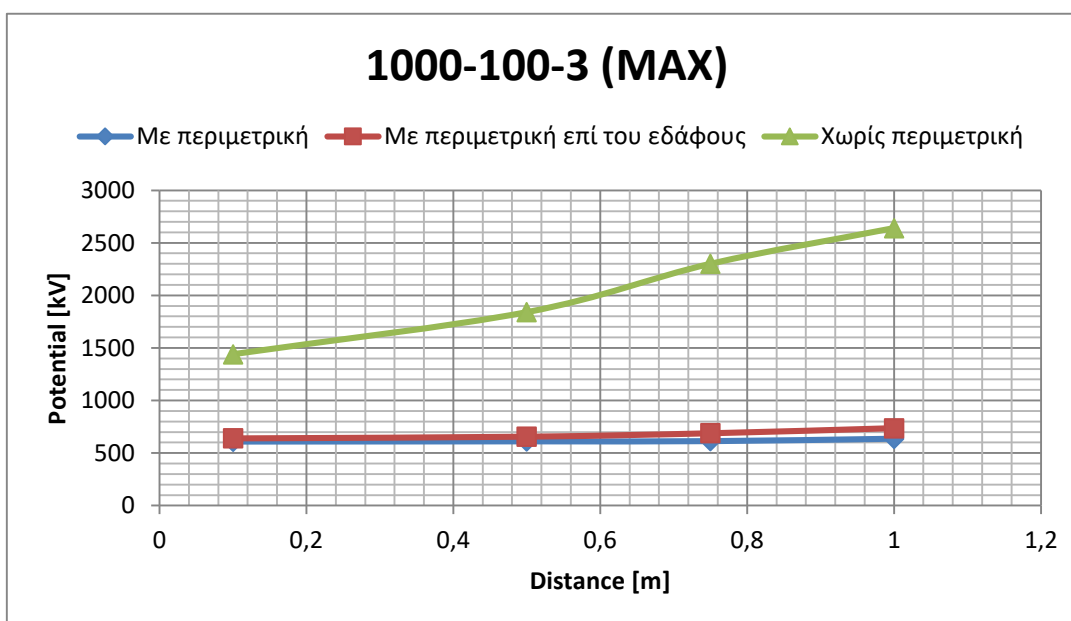
## 7.3 Επίδραση της περιμετρική γείωσης

Για να διερευνηθεί η επίδραση της περιμετρικής γείωσης στο αναπτυσσόμενο δυναμικό αλλά και στις τάσεις επαφής προσομοιώθηκαν οι διατάξεις που περιγράφονται στις §5.3.1, §5.3.2, §5.3.3 και φαίνονται στα αντίστοιχα σχήματα αυτών των παραγράφων. Το κεραυνικό ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε είχε και πάλι χρόνο μετώπου 10μs, χρόνο ημίσεως εύρους 350μs, πλάτος 50kA και διάρκεια 1200μs. Το σημείο πτώσης του κεραυνικού πλήγματος ήταν και σε αυτήν την περίπτωση η ακίδα σύλληψης (αλεξικέραυνο). Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν σε αυτές τις προσομοιώσεις ήταν η απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και η σύσταση του εδάφους. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις με περιμετρική γείωση σε βάθος 0,5m, με περιμετρική γείωση στην επιφάνεια του εδάφους και χωρίς περιμετρική γείωση.

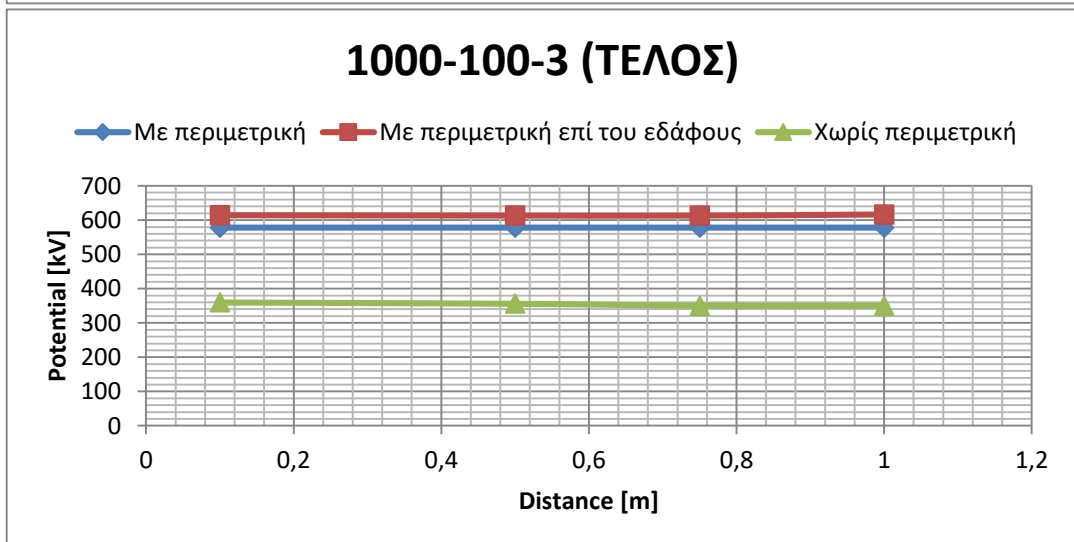
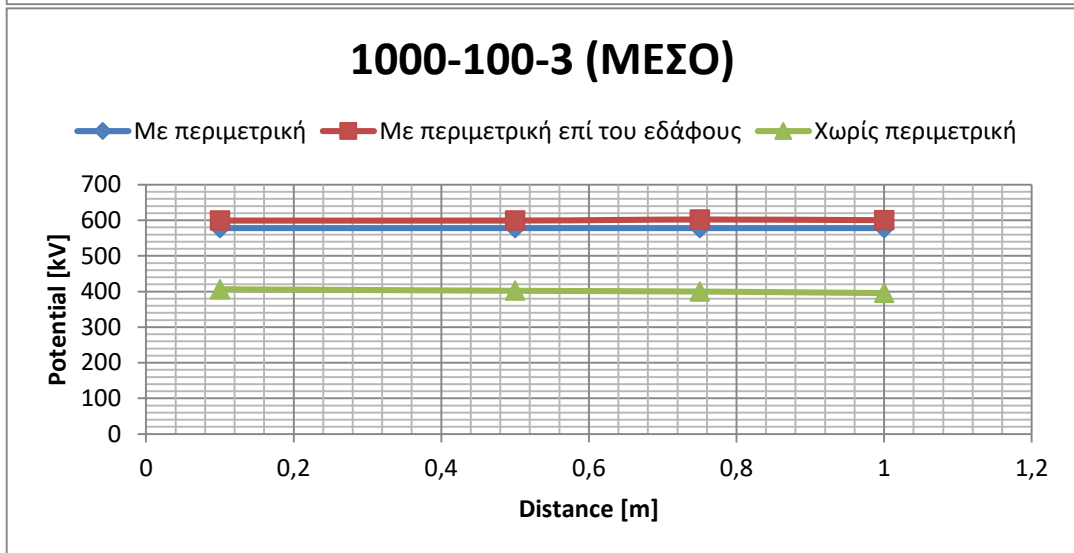
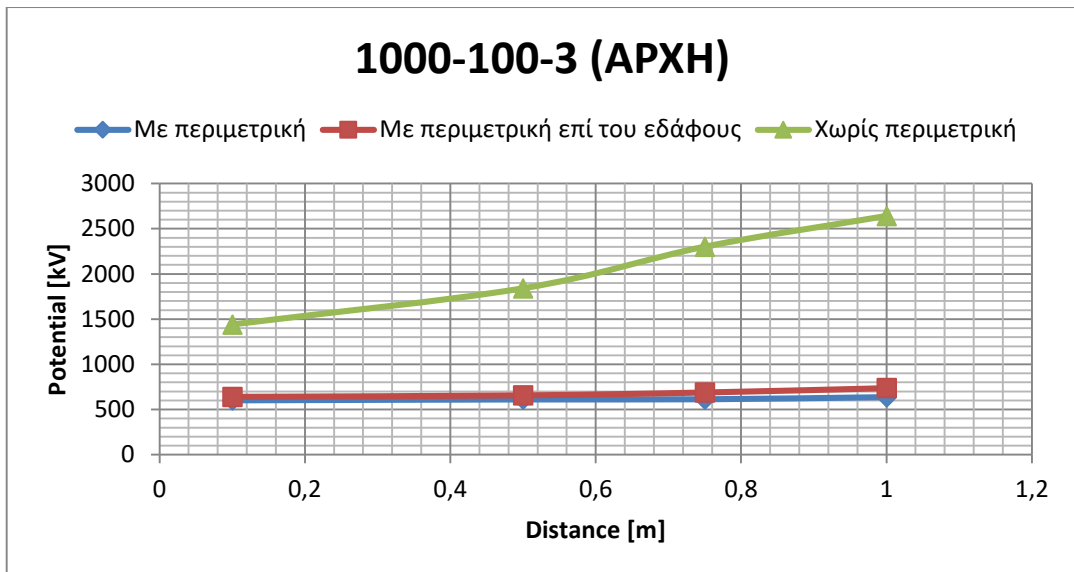
### 7.3.1 Αναπτυσσόμενο δυναμικό

#### Έδαφος 1000-100-3

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για το αναπτυσσόμενο δυναμικό, στο profile 1, για το έδαφος 1000-100-3 φαίνονται στο σχήμα 7-8.



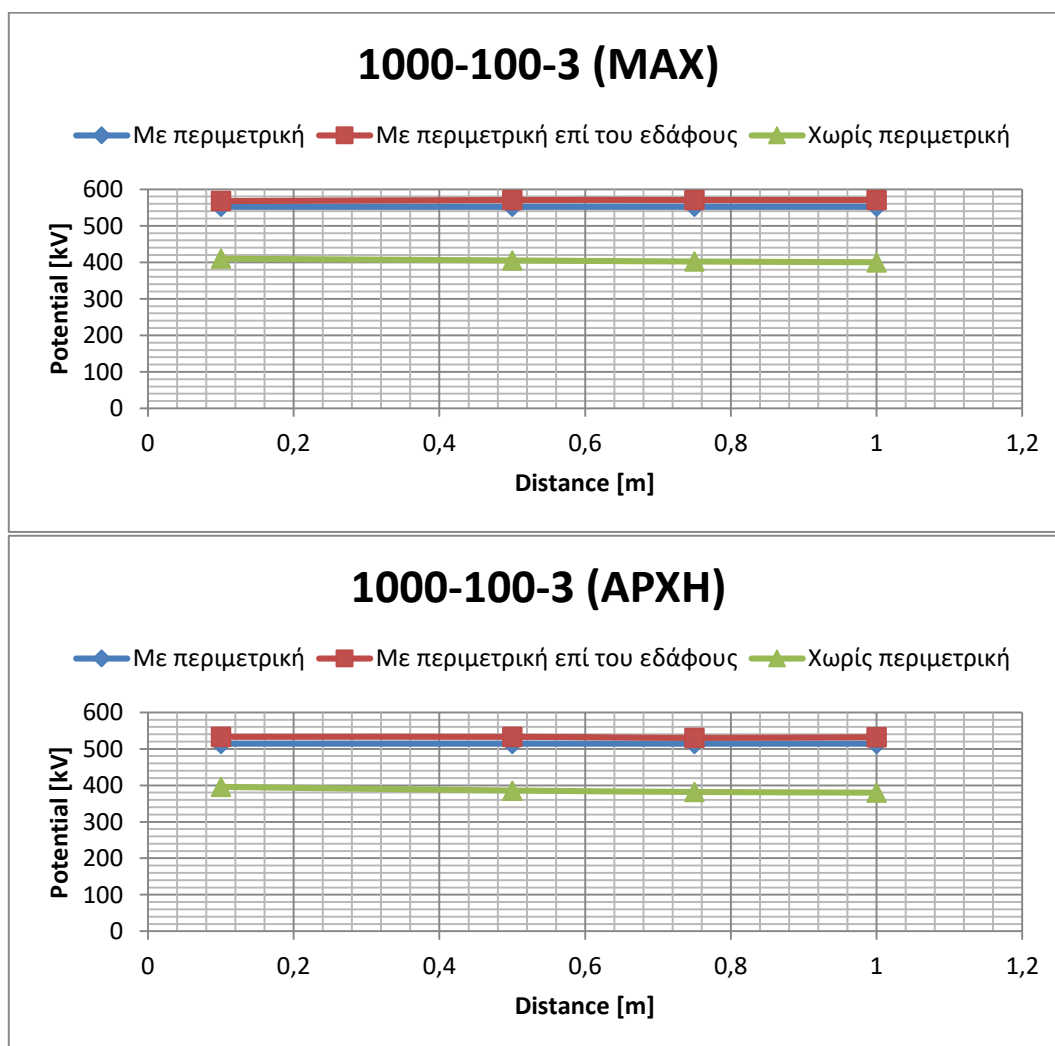


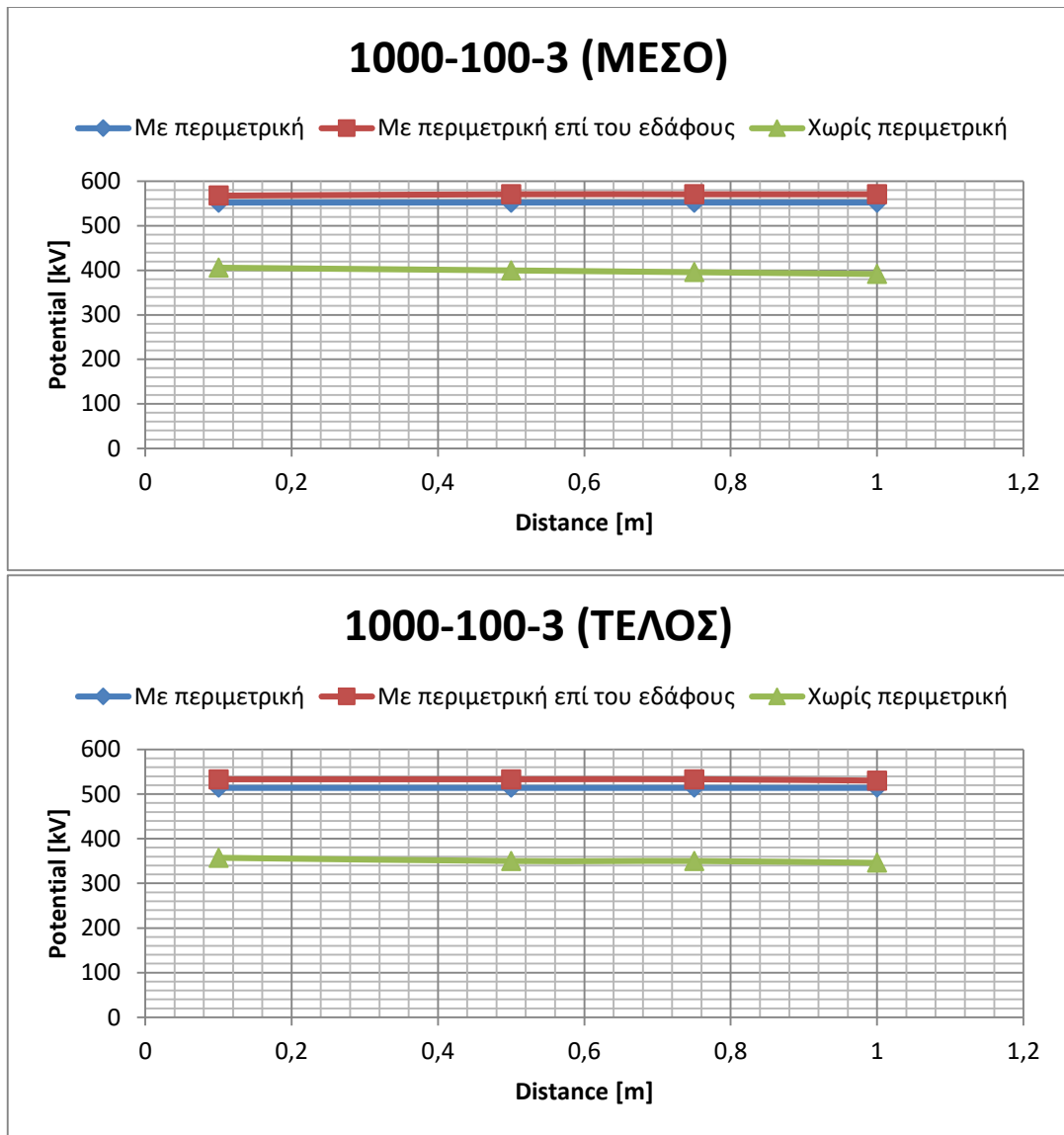


**Σχήμα 7-8** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Στο σχήμα 7-8 (Max και Αρχή) φαίνεται ότι το χαμηλότερο δυναμικό εμφανίζεται όταν υπάρχει περιμετρική γείωση και μάλιστα όταν αυτή είναι θαμμένη κάτω από το έδαφος. Επίσης παρατηρείται ότι, στην αρχή της διάταξης, εκεί δηλαδή που βρίσκεται το αλεξικέραυνο, το δυναμικό αυξάνεται καθώς αυξάνουμε την απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη. Αυτή η αύξηση οφείλεται και πάλι στο ότι το αλεξικέραυνο πλησιάζει όλο και περισσότερο στο profile 1. Επίσης, η αύξηση αυτή είναι πολύ μεγάλη όταν δεν υπάρχει καθόλου περιμετρική γείωση, ενώ όταν υπάρχει είναι πολύ μικρότερη. Τέλος, φαίνεται ότι στο μέσο και στο τέλος της διάταξης το εμφανιζόμενο δυναμικό στη διάταξη χωρίς περιμετρική γείωση είναι μικρότερο από ότι όταν υπάρχει περιμετρική γείωση. Αυτό οφείλεται στο ότι η περιμετρική γείωση διαμοιράζει το ρεύμα του κεραυνού περιμετρικά σε όλη τη διάταξη με αποτέλεσμα την αύξηση του δυναμικού. Αυτός ο διαμοιρασμός που προκαλεί η περιμετρική γείωση έχει σαν αποτέλεσμα σε όλη τη διάταξη να έχουμε δυναμικά κοντά στα 500 με 600kV, ενώ όταν δεν υπάρχει περιμετρική γείωση έχουμε πολύ μεγάλα δυναμικά στην αρχή της διάταξης, της τάξης των 1500 με 2500 kV και πολύ μικρότερα στο μέσο και στο τέλος της διάταξης (300-400kV).

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το έδαφος 1000-100-3, που υπολογίστηκαν στο profile 2, φαίνονται στο σχήμα 7-9.



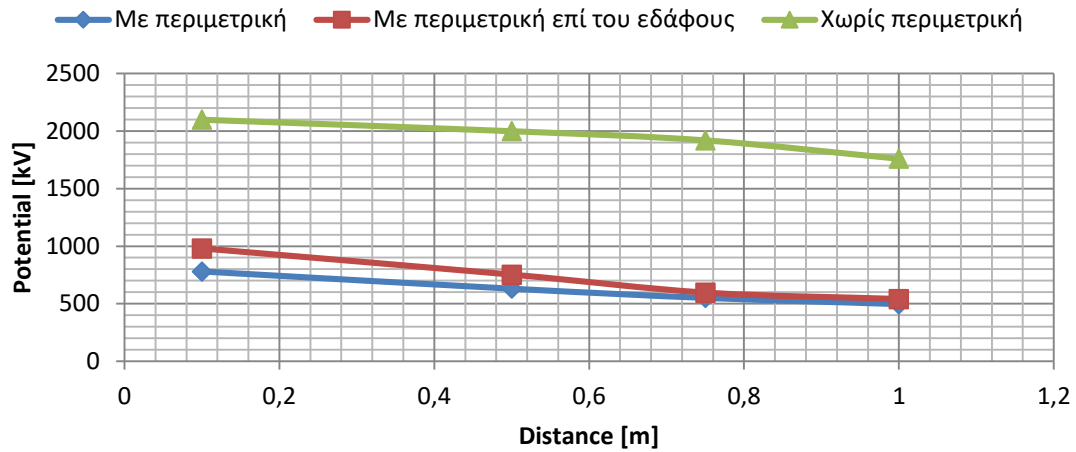


**Σχήμα 7-9** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

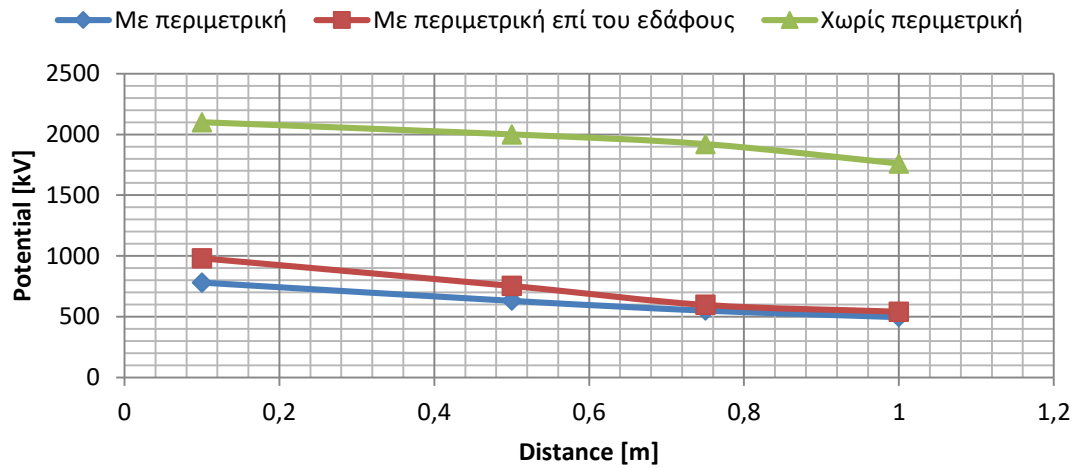
Στο σχήμα 7-9 παρατηρείται πάλι ότι όταν η περιμετρική γείωση τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους, προκαλεί μεγαλύτερα δυναμικά από ότι όταν αυτή τοποθετείται μέσα στο έδαφος. Επίσης, εδώ φαίνεται ότι σε όλη τη διάταξη (Αρχή, Μέση, Τέλος) το δυναμικό που εμφανίζεται χωρίς την περιμετρική γείωση είναι χαμηλότερο από αυτό με περιμετρική γείωση. Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στο λόγο που αναφέρθηκε και προηγουμένως. Παρόλα τα καλύτερα αποτελέσματα στο profile 2 (στην περίπτωση που δεν έχουμε περιμετρική γείωση), τα πολύ κακά αποτελέσματα του profile 1 στην αρχή της διάταξης δεν επιτρέπουν σε καμία περίπτωση να δικαιολογηθεί η μη ύπαρξη περιμετρικής γείωσης.

Στο σχήμα 7-10 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το έδαφος 1000-100-3, που υπολογίστηκαν στο profile 3.

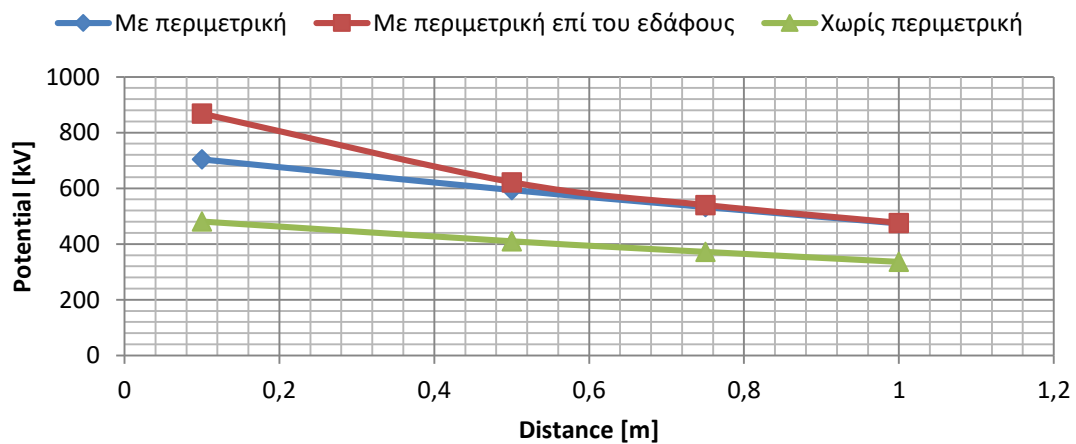
### 1000-100-3 (MAX)

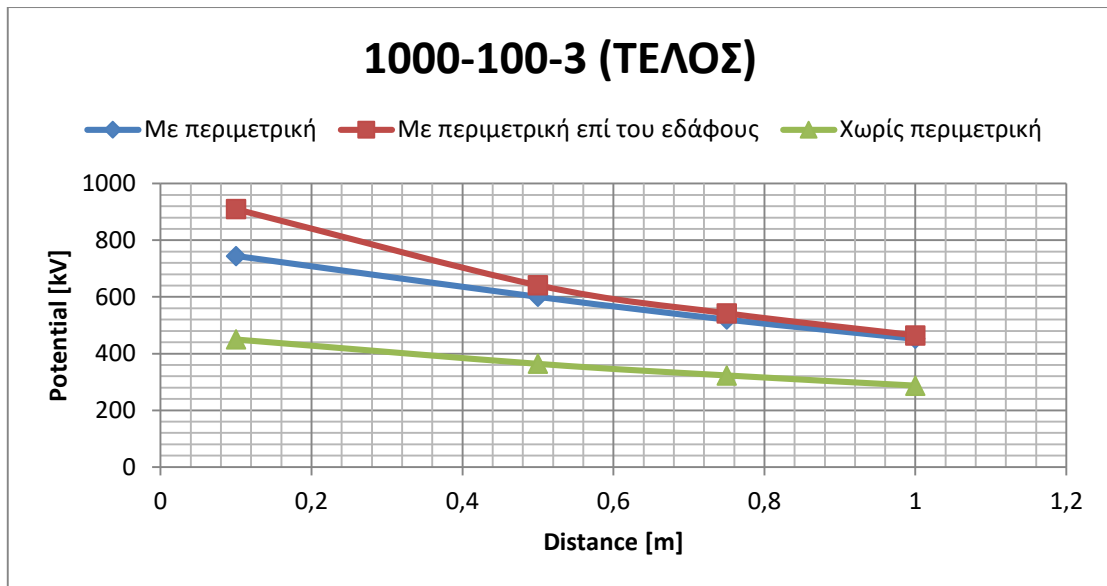


### 1000-100-3 (ΑΡΧΗ)



### 1000-100-3 (ΜΕΣΟ)





**Σχήμα 7-10** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέρανου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Στο profile 3 παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το δυναμικό μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση του αλεξικέρανου. Επίσης, στην αρχή της διάταξης βλέπουμε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται με την περιμετρική γείωση θαμμένη μέσα στο έδαφος και ότι όταν δεν υπάρχει περιμετρική γείωση το δυναμικό που αναπτύσσεται είναι πολύ μεγαλύτερο. Στο μέσο και στο τέλος της διάταξης παρατηρείται πάλι πως η περίπτωση χωρίς περιμετρική γείωση έχει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα με τίμημα όμως τα πολύ χειρότερα αποτελέσματα στην αρχή της διάταξης. Συνεπώς, δε δικαιολογείται η απουσία της περιμετρικής γείωσης.

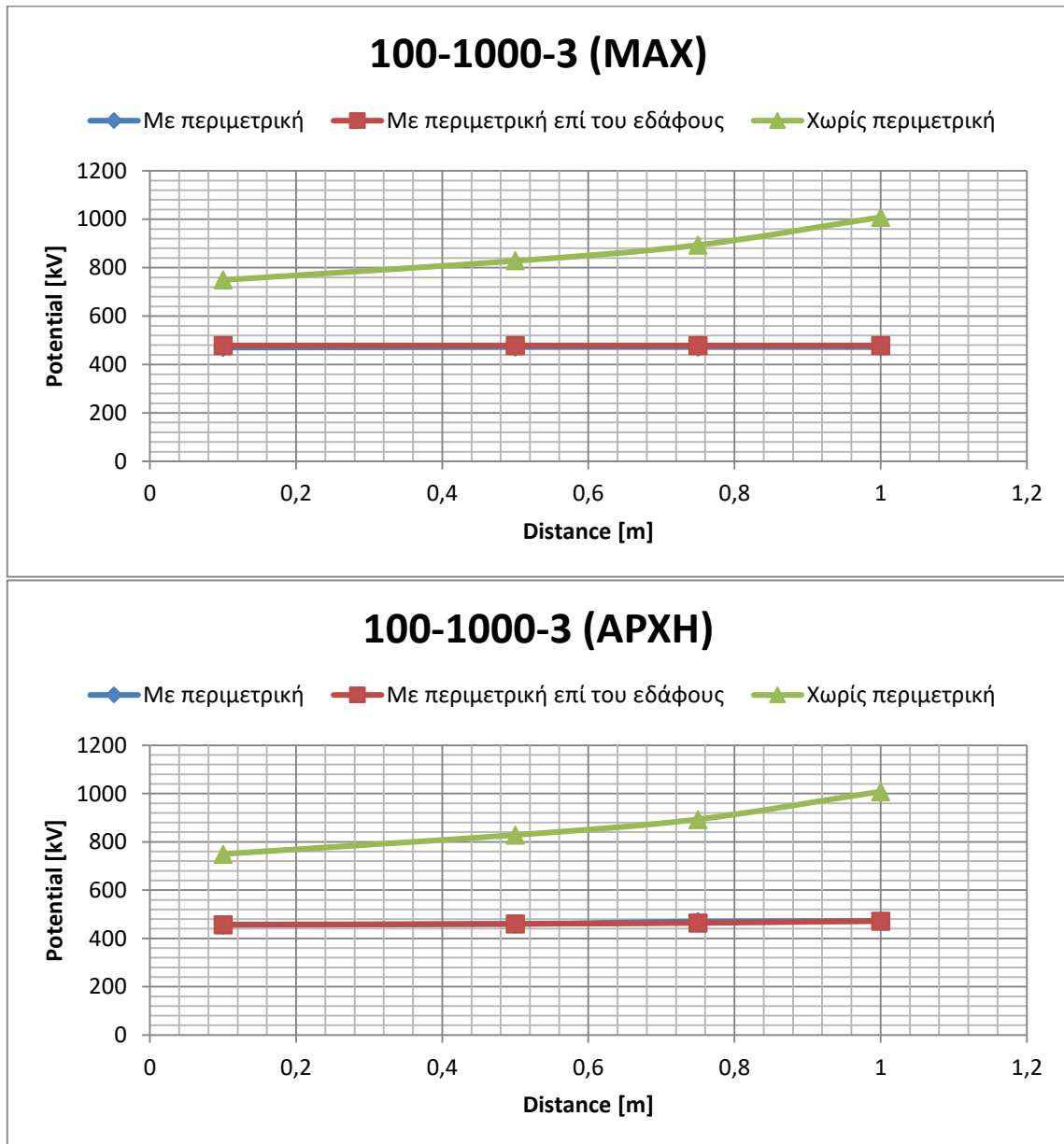
#### Έδαφος 1000-100-2

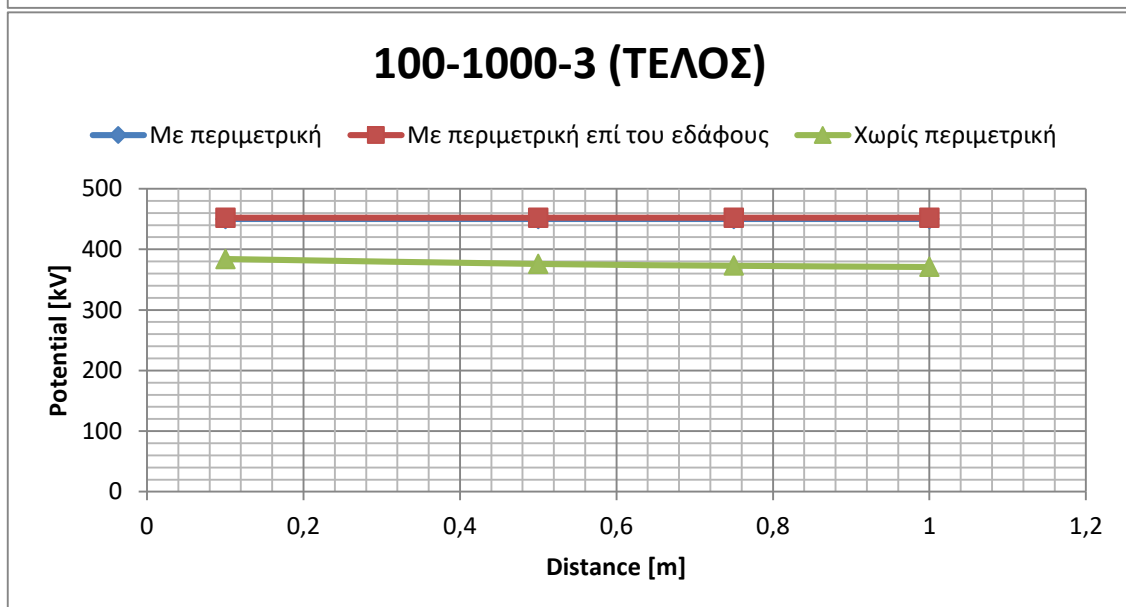
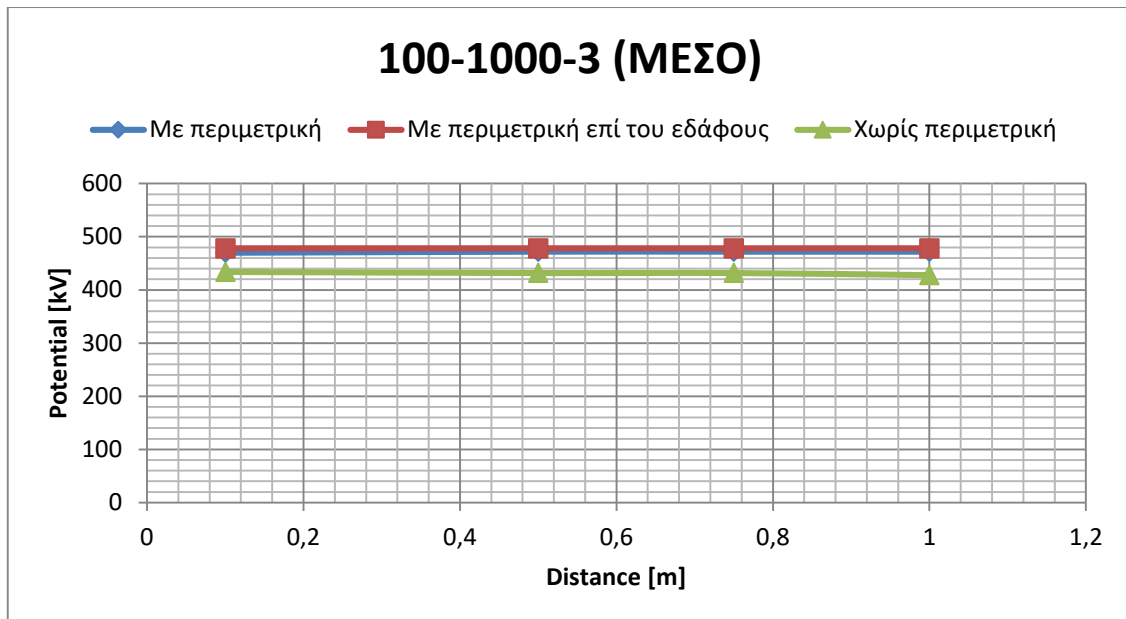
Για την περίπτωση του εδάφους με ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος ίση με 1000Ωm και βάθος 2m και ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος ίση με 100Ωm και απεριόριστο βάθος, παρατηρήθηκε ότι οι γραφικές παραστάσεις για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω και για το έδαφος 1000-100-3 έχουν ίδια μορφή, με μόνη διαφορά την εμφάνιση μικρότερων δυναμικών. Αυτή η μείωση των δυναμικών, στην περίπτωση του εδάφους 1000-100-2, οφείλεται στο ότι το πιο μονωτικό έδαφος με ειδική αντίσταση 1000Ωm εκτείνεται σε μικρότερο βάθος σε σχέση με αυτό του εδάφους 1000-100-3. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που έγιναν για το έδαφος 1000-100-2 φαίνονται στο Παράρτημα Α.

### Έδαφος 100-1000-3

Σε αυτό το διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση πάνω στρώματος ίση με  $100\Omega\text{m}$  και βάθος 3m και κάτω στρώματος ίση με  $1000\Omega\text{m}$  και βάθος απεριόριστο, έγιναν οι ίδιες προσομοιώσεις με των δύο προηγούμενων εδαφών για τις ίδιες διατάξεις.

Τα αποτελέσματα, που υπολογίστηκαν στο profile 1, φαίνονται στο σχήμα 7-11.

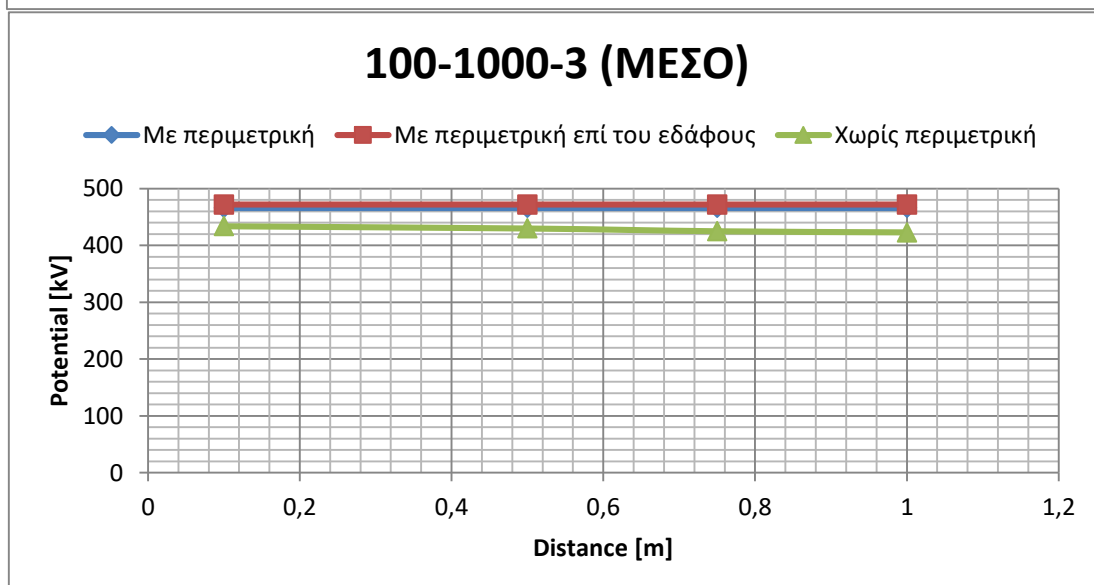
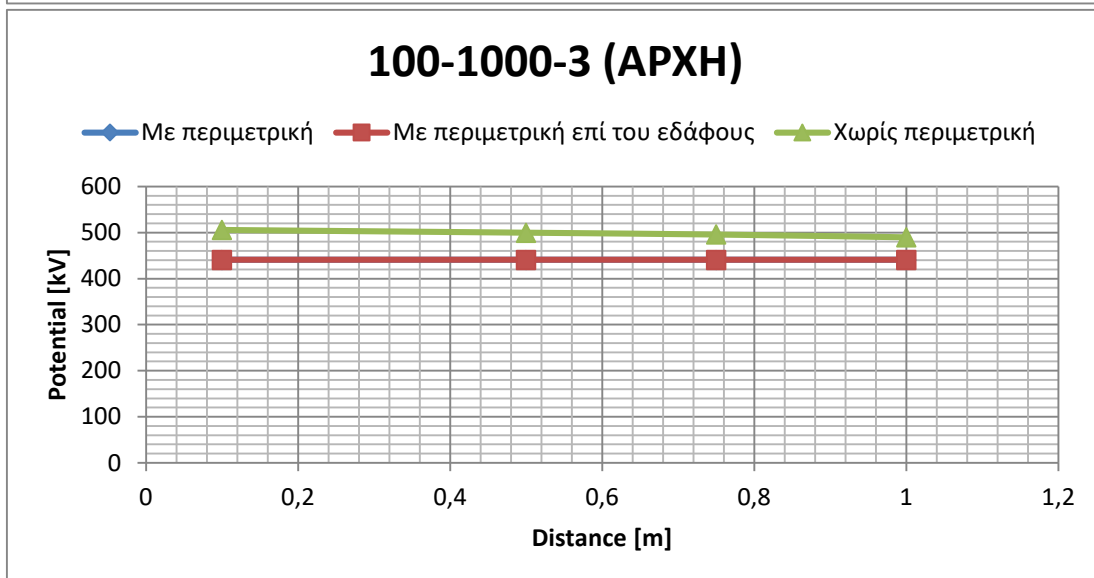
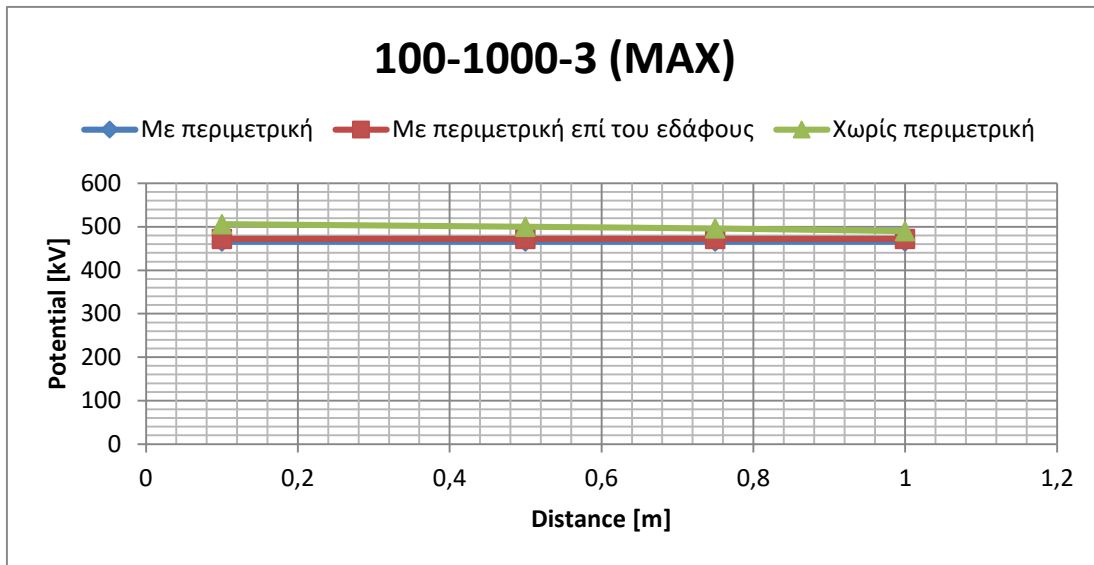




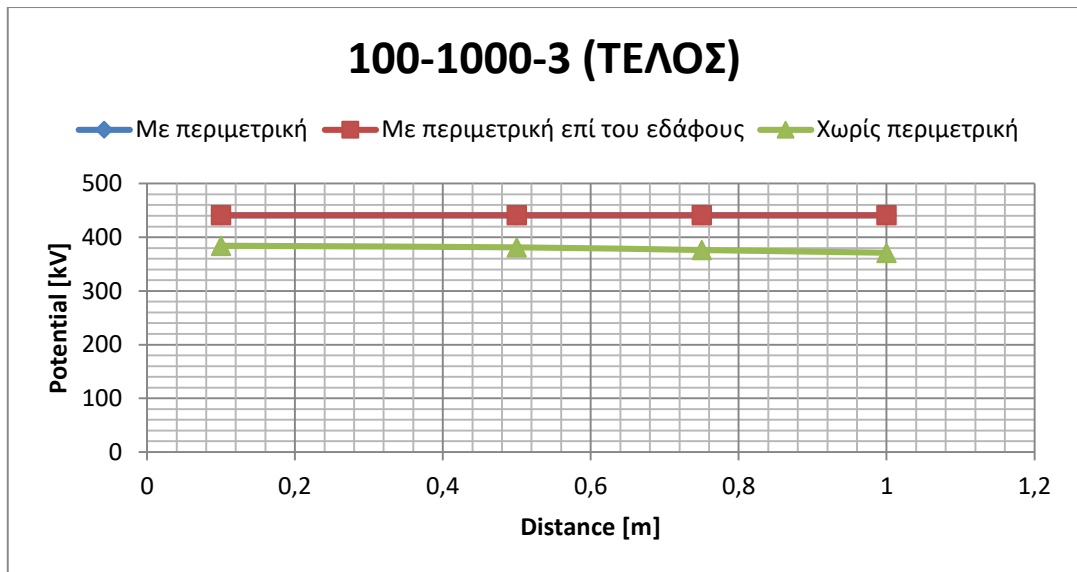
**Σχήμα 7-11** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέρανου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Εδώ παρατηρούμε ότι, όταν έχουμε περιμετρική γείωση μέσα στο έδαφος τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια με όταν η περιμετρική γείωση είναι στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό πιθανόν οφείλεται στην πολύ μικρή ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος και άρα στην πολύ καλή αγωγιμότητά του. Επίσης, παρατηρούμε ότι (όπως και στο έδαφος 1000-100-3) στην αρχή της διάταξης, η περίπτωση χωρίς περιμετρική γείωση έχει πολύ «κακά» αποτελέσματα, ενώ στο μέσο και στο τέλος της διάταξης εμφανίζει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, περιγράφηκε παραπάνω στο έδαφος 1000-100-3.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα, που υπολογίστηκαν στο profile 2, φαίνονται στο σχήμα 7-12.



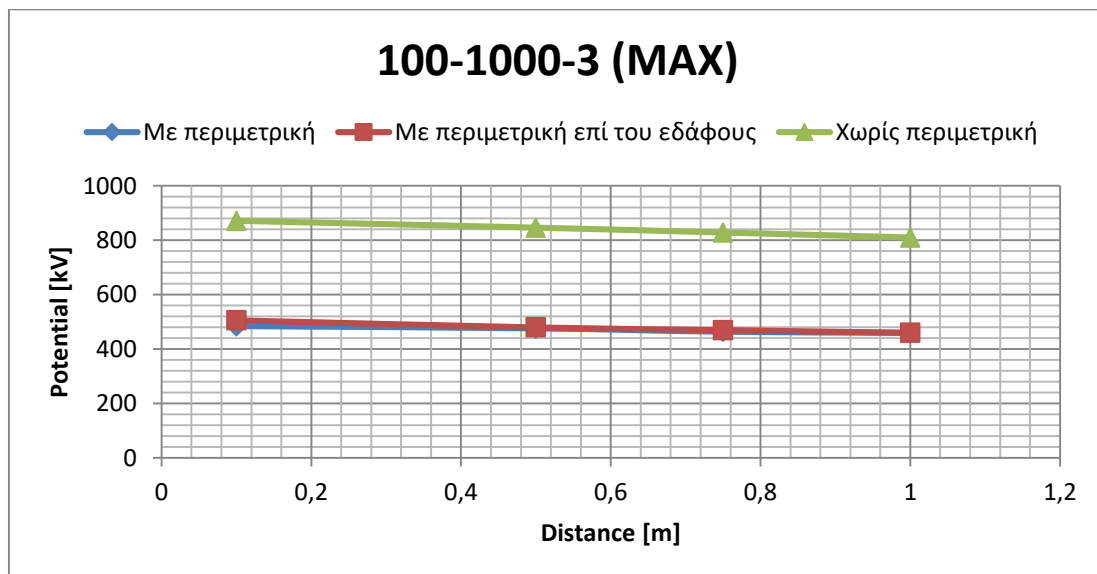


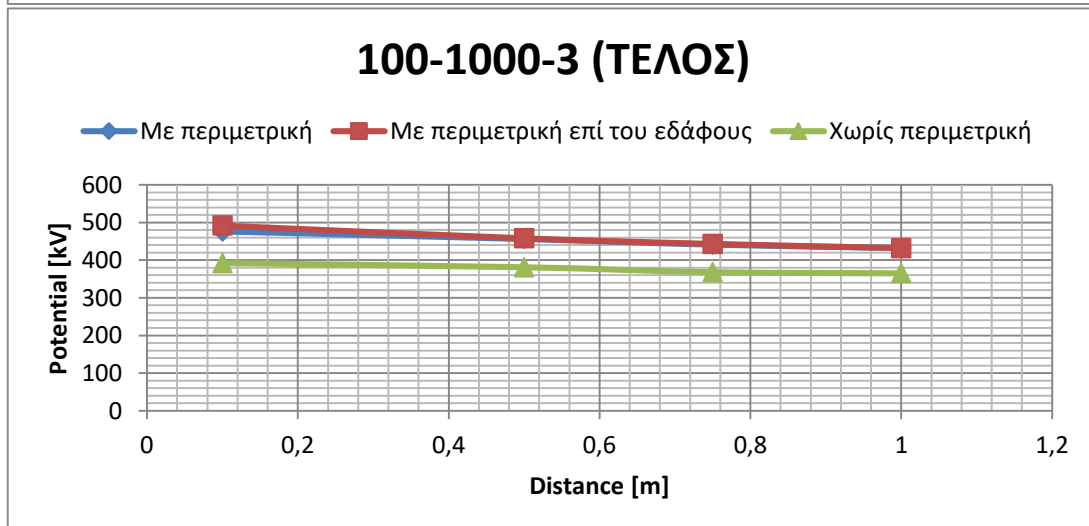
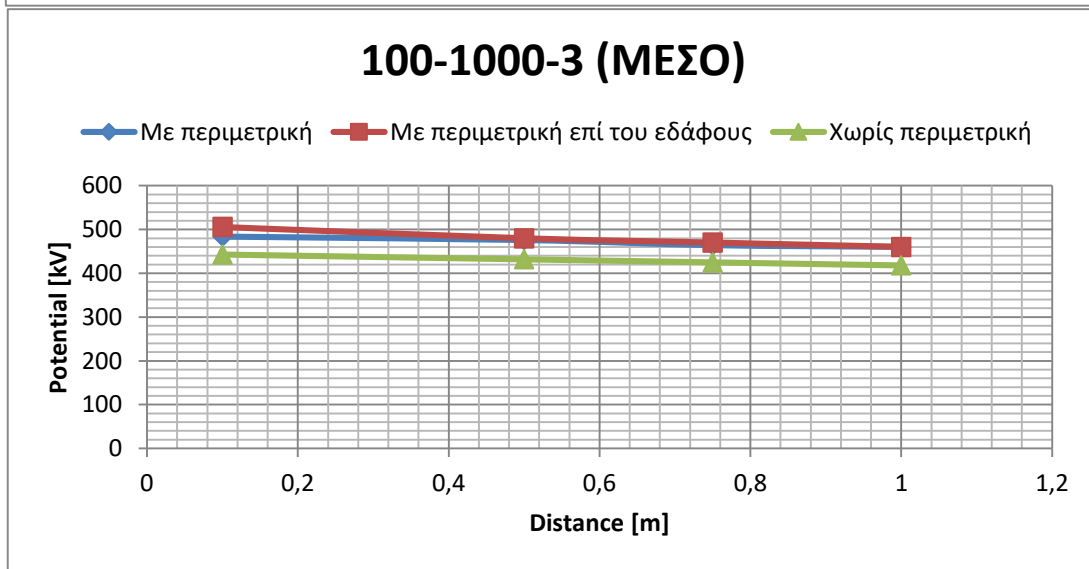
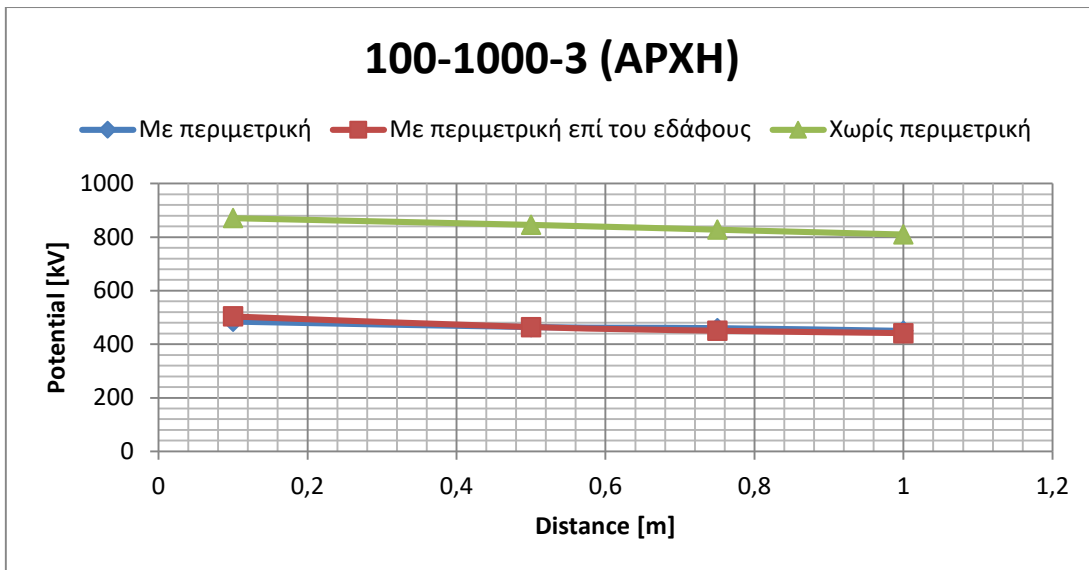


**Σχήμα 7-12** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι, το δυναμικό για την περίπτωση χωρίς περιμετρική γείωση (ΑΡΧΗ και MAX) έχει μειωθεί σε σχέση με αυτό των αντίστοιχων γραφικών παραστάσεων του profile 1. Επίσης, εδώ σε αντίθεση με αυτό που συνέβαινε στο έδαφος 1000-100-3, παρατηρούμε ότι στα γραφήματα MAX και ΑΡΧΗ, η περίπτωση χωρίς περιμετρική γείωση εξακολουθεί να είναι χειρότερη από τις άλλες δύο.

Τέλος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που υπολογίστηκαν στο profile 3 φαίνονται στο σχήμα 7-13.





**Σχήμα 7-13** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέρανου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Σε αυτήν την περίπτωση οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την αντίστοιχη περίπτωση για το profile 3, για έδαφος 1000-100-3, με εξαίρεση ότι τώρα το εμφανιζόμενο δυναμικό εξαρτάται λιγότερο από την απόσταση του αλεξικέρανου από τη φ/β διάταξη.

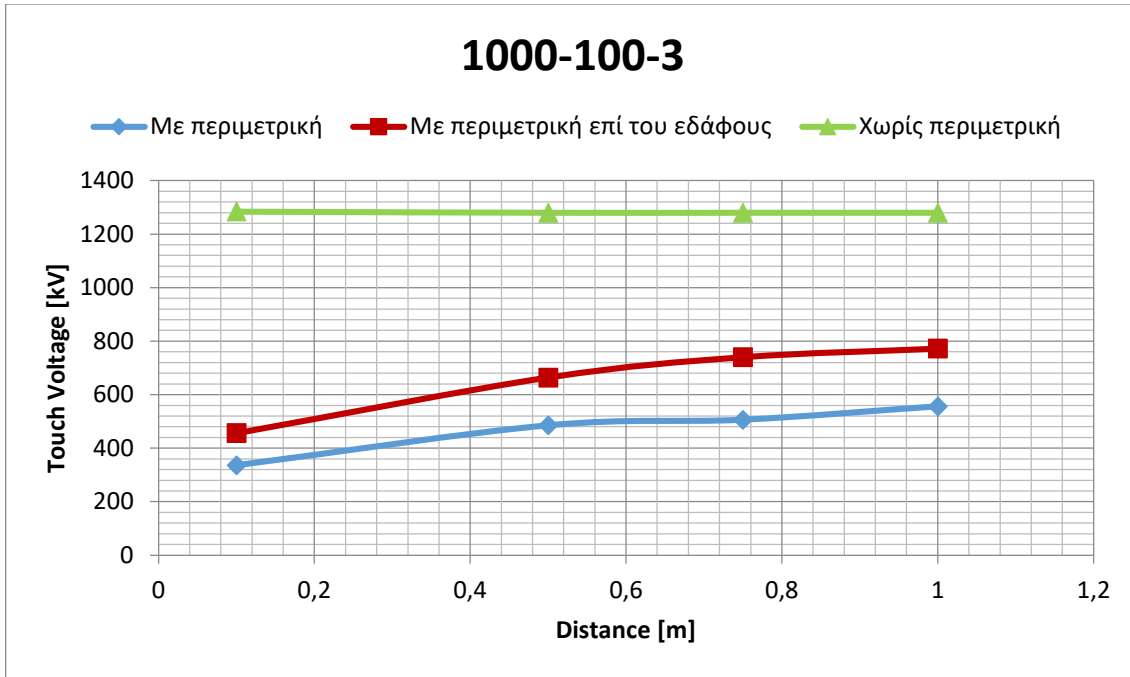
### **Έδαφος 100-1000-2**

Σε αυτές τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος ίση με 100Ωm και βάθος 2m και ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος ίση με 1000Ωm και απεριόριστο βάθος. Η διάταξη και το κεραυνικό πλήγμα και γενικά όλες οι παράμετροι ήταν ίδιες με αυτές των προσομοιώσεων για τα παραπάνω εδάφη. Παρατηρήθηκε εδώ πως, οι γραφικές παραστάσεις και οι καμπύλες έχουν την ίδια μορφή με αυτή των περιπτώσεων για έδαφος 100-1000-3, με τη μόνη διαφορά ότι τώρα όλα τα δυναμικά έχουν κάπως μεγαλύτερες τιμές από ότι στην περίπτωση του εδάφους 100-1000-3. Αυτή η αύξηση των δυναμικών, στην περίπτωση του εδάφους 100-1000-2, οφείλεται στο ότι, το στρώμα του εδάφους με τη μικρότερη ειδική αντίσταση 100Ωm εκτείνεται σε μικρότερο βάθος σε σχέση με αυτό του εδάφους 100-1000-3. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για το έδαφος 100-1000-2 επισυνάπτονται στο Παράρτημα Β.

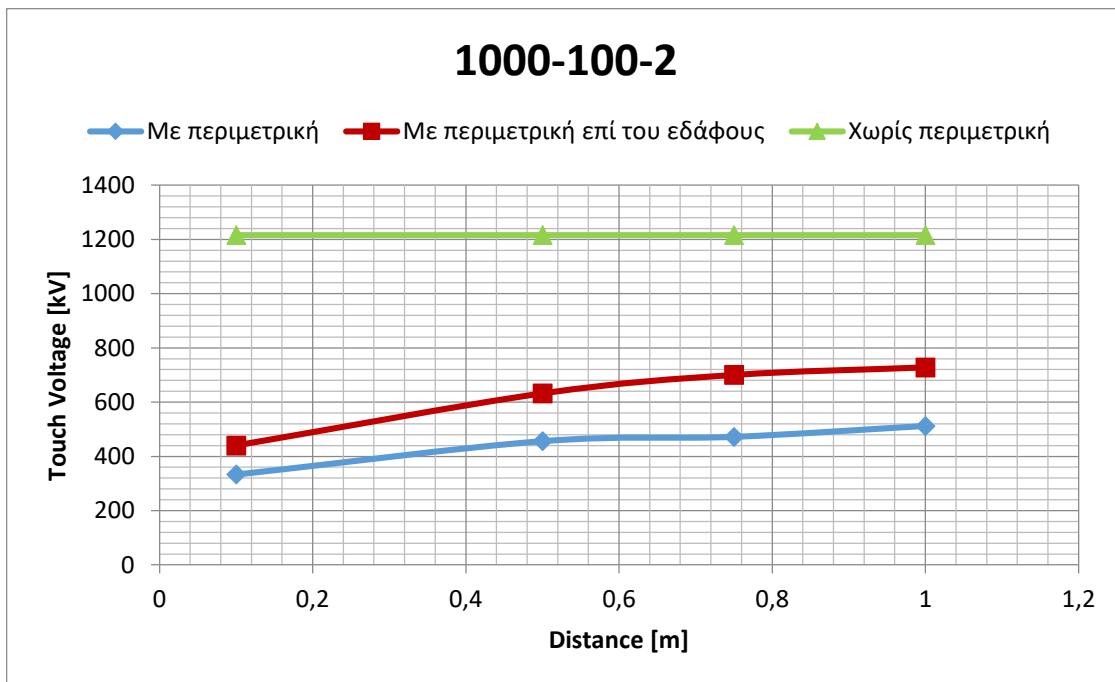
### **7.3.2 Τάσεις επαφής**

Για να διερευνηθεί τι συμβαίνει με τις τάσεις επαφής συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέρανου, καθώς επίσης και ανάλογα με το αν υπάρχει περιμετρική γείωση, ή περιμετρική γείωση επάνω στην επιφάνεια του εδάφους, ή αν δεν υπάρχει καθόλου περιμετρική γείωση προσομοιώθηκαν οι φ/β διατάξεις που περιγράφονται στις §5.3.1, §5.3.2, §5.3.3, για τις τέσσερις προαναφερθείσες δομές εδάφους και λήφθηκαν αποτελέσματα για τις τάσεις επαφής. Τα αποτελέσματα, αυτή τη φορά, λήφθηκαν μόνο από το profile 3, καθώς αυτό ήταν το μόνο που απείχε κάθε φορά 1m από το αλεξικέρανο. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE std 80-2000 οι τάσεις επαφής υπολογίζονται ή μετρώνται σε απόσταση 1m από τον κοντινότερο αγωγό. Επίσης, τα αποτελέσματα λήφθηκαν για το σημείο του profile 3 το οποίο ήταν πιο κοντά στο αλεξικέρανο, δηλαδή για το σημείο 11 του profile 3.

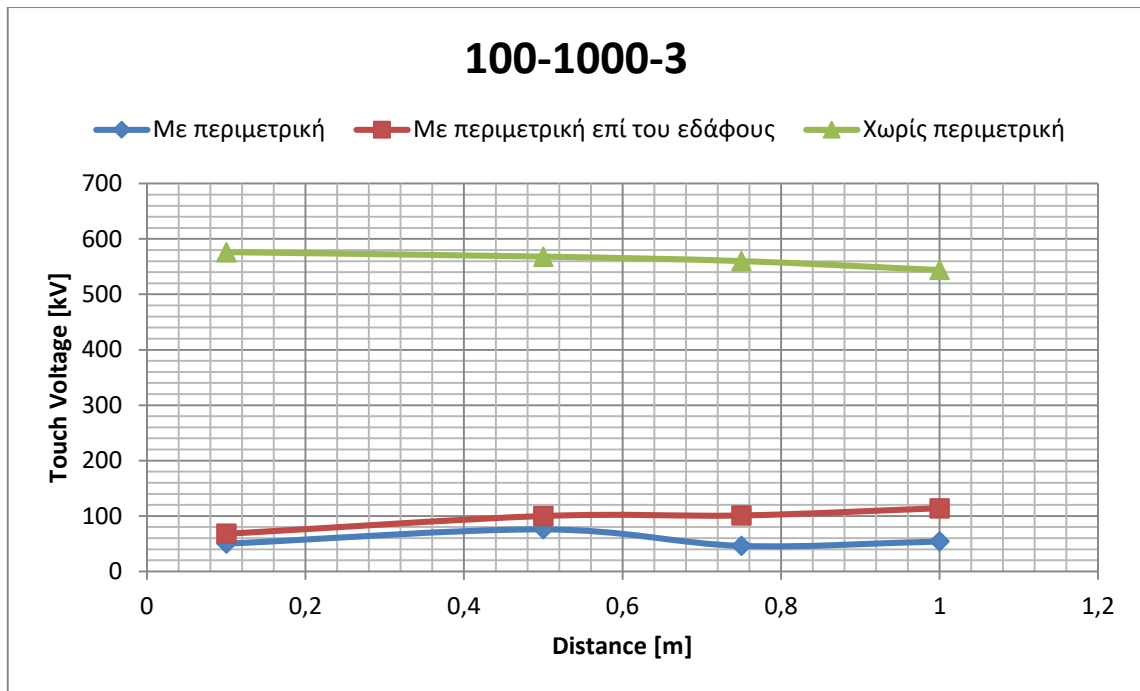
Τα αποτελέσματα για τις τάσεις επαφής για τα διστρωματικά εδάφη 1000-100-3, 1000-100-2, 100-1000-3, 100-1000-2 φαίνονται αντίστοιχα στα σχήματα 7-14, 7-15, 7-16, 7-17.



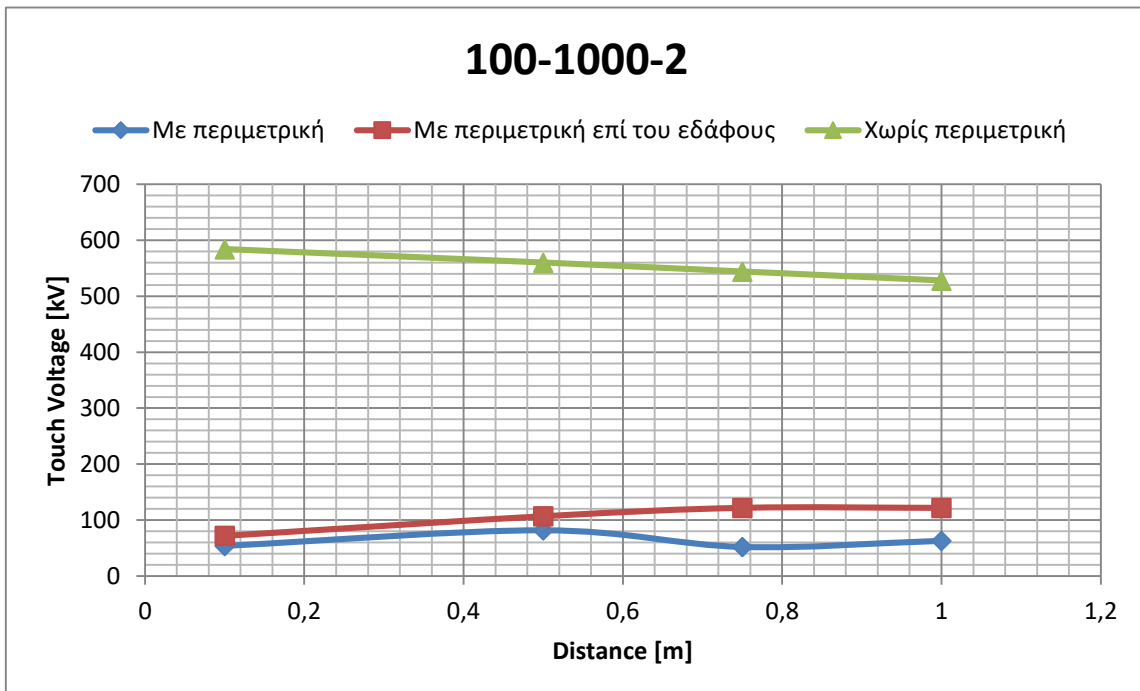
**Σχήμα 7-14** Τάσεις επαφής για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις που υπάρχει περιμετρική γείωση σε βάθος 0,5m κάτω από το έδαφος, που υπάρχει περιμετρική γείωση στην επιφάνεια του εδάφους (χωρίς να είναι θαμμένη στο έδαφος) και που δεν υπάρχει καθόλου περιμετρική γείωση



**Σχήμα 7-15** Τάσεις επαφής για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις που υπάρχει περιμετρική γείωση σε βάθος 0,5m κάτω από το έδαφος, που υπάρχει περιμετρική γείωση στην επιφάνεια του εδάφους (χωρίς να είναι θαμμένη στο έδαφος) και που δεν υπάρχει καθόλου περιμετρική γείωση



**Σχήμα 7-16** Τάσεις επαφής για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις που υπάρχει περιμετρική γείωση σε βάθος 0,5m κάτω από το έδαφος, που υπάρχει περιμετρική γείωση στην επιφάνεια του εδάφους (χωρίς να είναι θαμμένη στο έδαφος) και που δεν υπάρχει καθόλου περιμετρική γείωση



**Σχήμα 7-17** Τάσεις επαφής για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις που υπάρχει περιμετρική γείωση σε βάθος 0,5m κάτω από το έδαφος, που υπάρχει περιμετρική γείωση στην επιφάνεια του εδάφους (χωρίς να είναι θαμμένη στο έδαφος) και που δεν υπάρχει καθόλου περιμετρική γείωση

Αυτό που παρατηρούμε από τα σχήματα 7-14, 7-15, 7-16, 7-17 είναι ότι, σε όλα τα εδάφη οι τάσεις επαφής αυξάνονται, αλλού περισσότερο και αλλού λιγότερο, καθώς αυξάνεται η απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη. Η προηγούμενη παρατήρηση δεν ισχύει για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει καθόλου περιμετρική γείωση στη φ/β εγκατάσταση. Επίσης, παρατηρούμε ότι όταν δεν έχουμε καθόλου περιμετρική γείωση, οι τάσεις επαφής έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από ότι όταν υπάρχει περιμετρική γείωση στη διάταξη. Τέλος, βλέπουμε ότι οι πιο χαμηλές τάσεις επαφής εμφανίζονται στην περίπτωση που η περιμετρική γείωση είναι θαμμένη στο έδαφος.

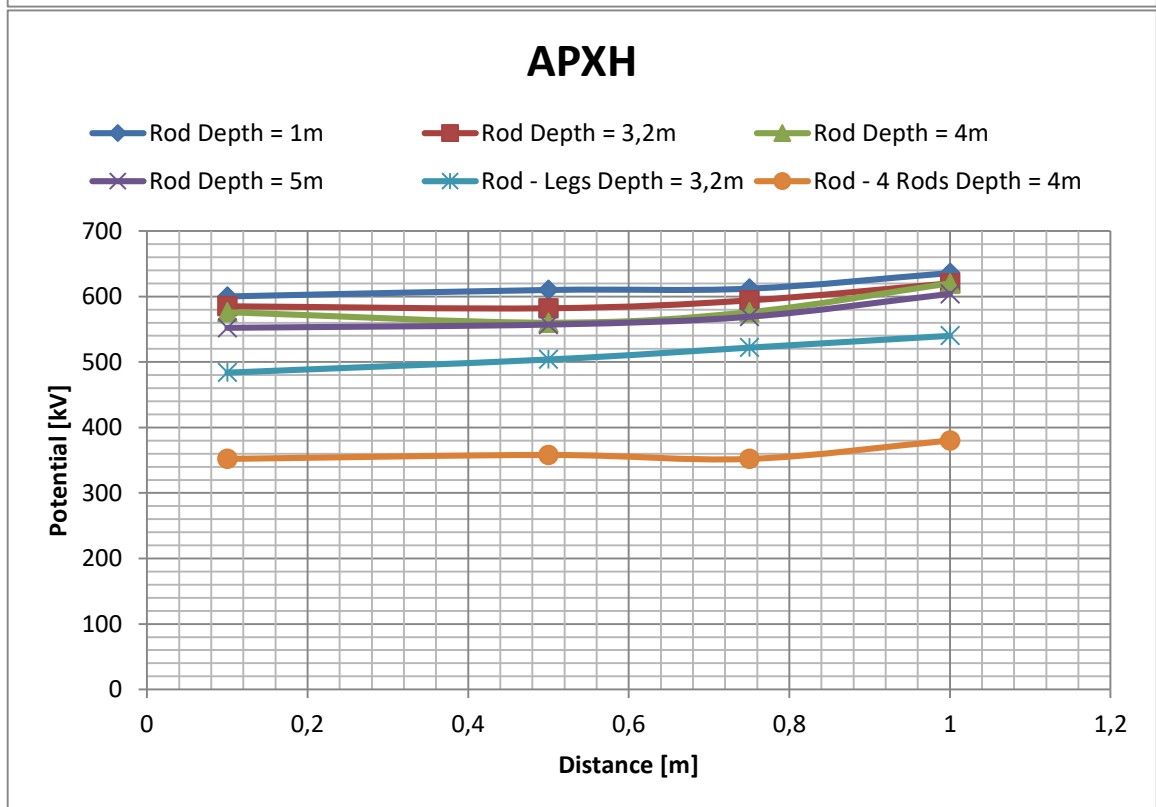
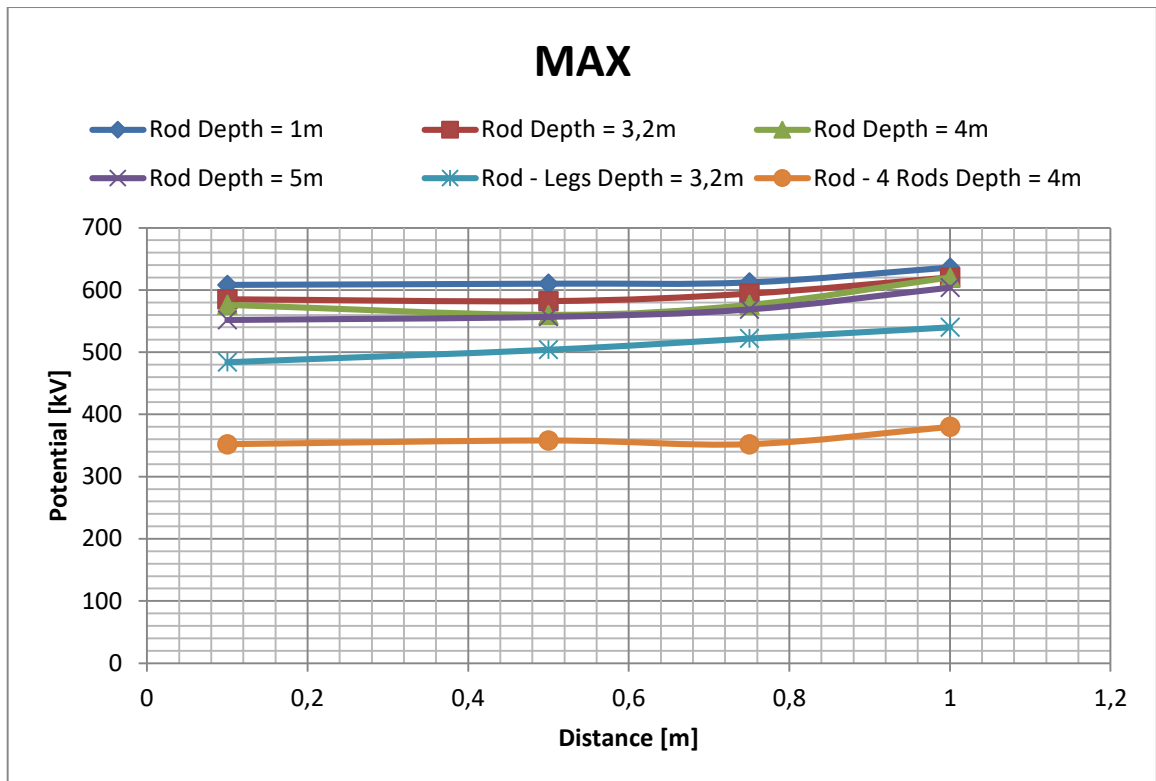
## **7.4 Επίδραση του μήκους του κάθετου ηλεκτροδίου που βρίσκεται μέσα στο έδαφος και συνδέεται στο κάτω μέρος του αλεξικέραυνου**

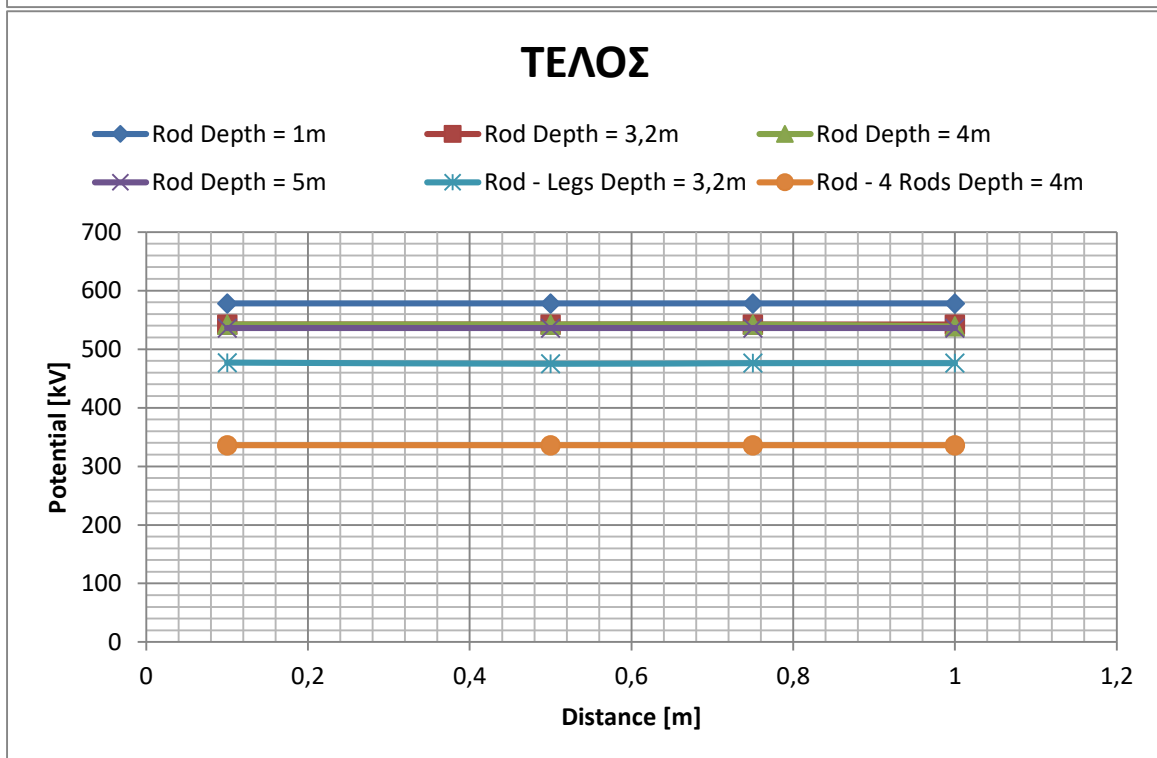
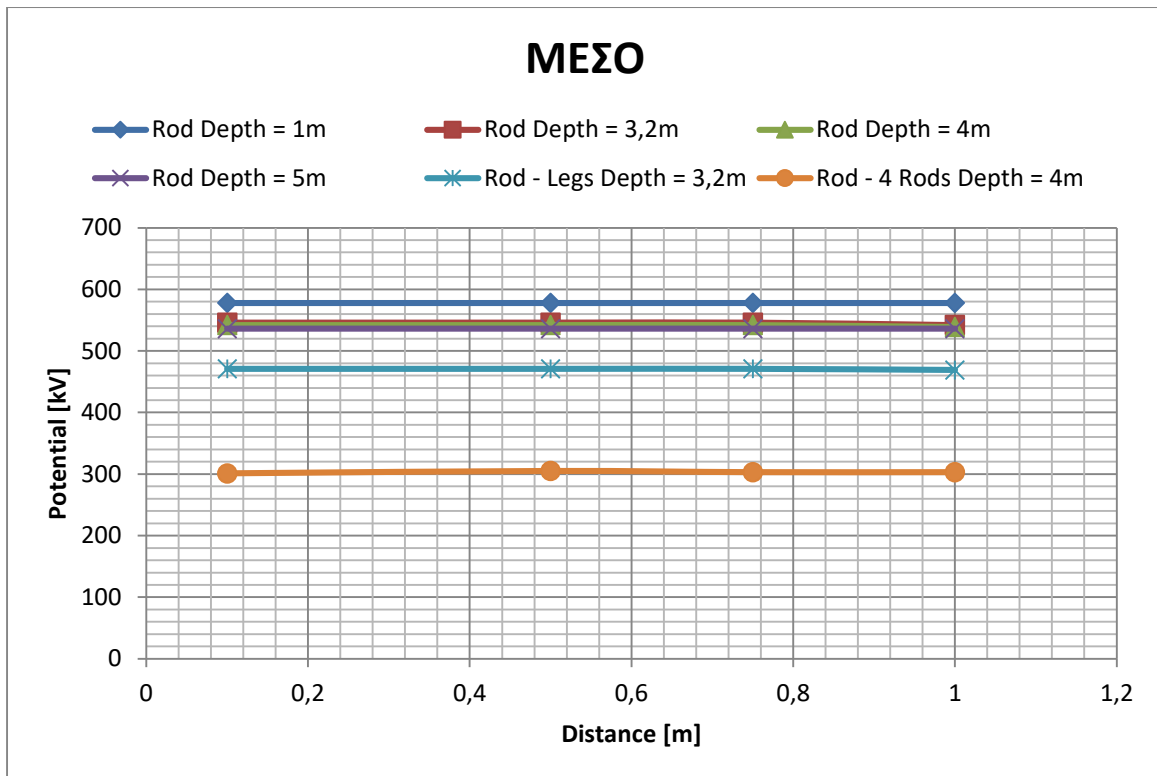
Σε αυτήν την περίπτωση εξετάζεται το κατά πόσο επηρεάζεται το αναπτυσσόμενο δυναμικό από το βάθος στο οποίο φτάνει μέσα στο έδαφος το κάθετο ηλεκτρόδιο, που συνδέεται στο κάτω μέρος του αλεξικέραυνου. Οι διατάξεις που προσομοιώθηκαν περιγράφονται στην §5.3.4. Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε το έδαφος 1000-100-3 (δηλαδή διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση του πάνω στρώματος ίση με 1000Ωm και βάθος 3m και ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος ίση με 100Ωm και βάθος απεριόριστο).

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τα βάθη, στα οποία έφτανε το κάθετο ηλεκτρόδιο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, 1m, 3,2m, 4m και 5m (σχήμα 5-13). Επίσης, όπως αναφέρεται και στην §5.3.4, προσομοιώθηκε η διάταξη με όλα τα πόδια της βάσης στήριξης των φ/β πλαισίων και το κάθετο ηλεκτρόδιο σε βάθος 3,2m (σχήμα 5-14) και τέλος η διάταξη με 4 επιπλέον κάθετα ηλεκτρόδια στις τέσσερις γωνίες της περιμετρικής γείωσης και το κάθετο ηλεκτρόδιο, που συνδέεται στο κάτω μέρος του αλεξικέραυνου, σε βάθος 4m (σχήμα 5-15). Το κεραυνικό ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε είχε και πάλι χρόνο μετώπου 10μs, χρόνο ημίσεως εύρους 350μs, πλάτος 50kA και διάρκεια 1200μs. Το σημείο πτώσης του κεραυνικού πλήγματος ήταν και σε αυτές τις περιπτώσεις το αλεξικέραυνο.

Τα αποτελέσματα για το αναπτυσσόμενο δυναμικό λήφθηκαν κατά τα γνωστά (βλέπε §7.1) στα profile 1,2,3.

Τα αποτελέσματα για το αναπτυσσόμενο δυναμικό, που υπολογίστηκαν στο profile 1, φαίνονται στο σχήμα 7-18.

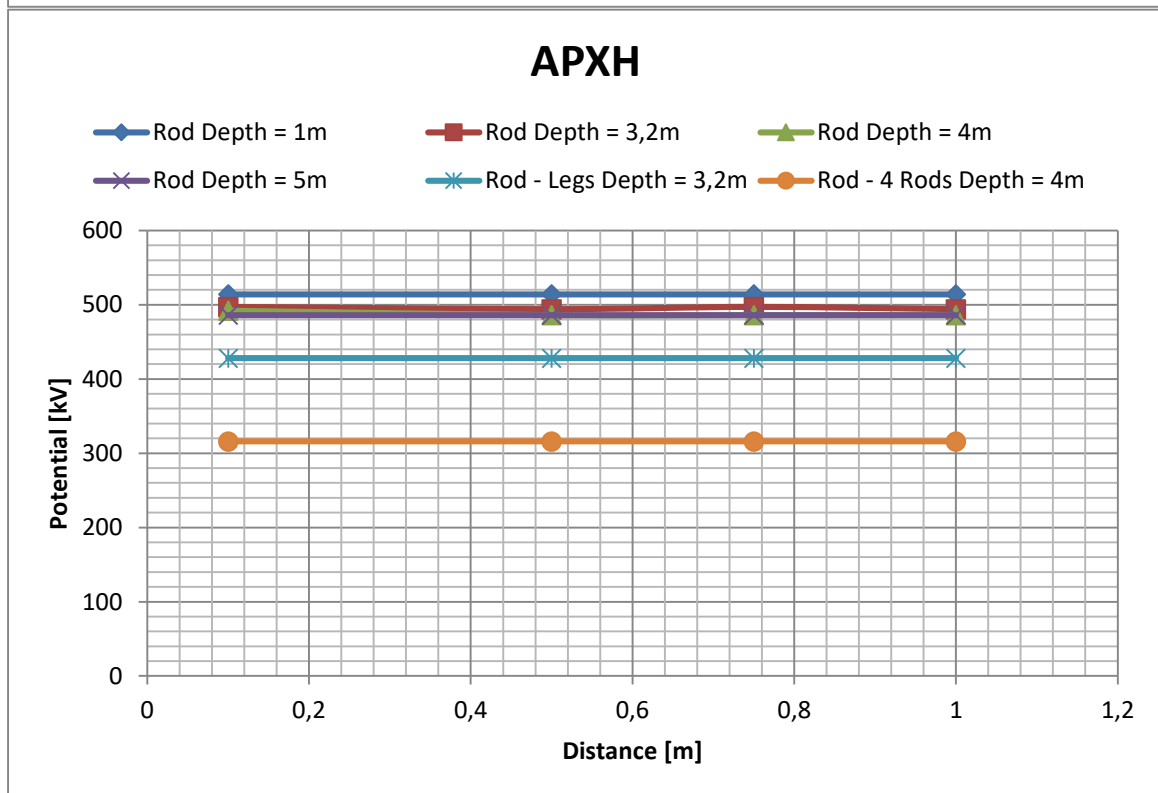
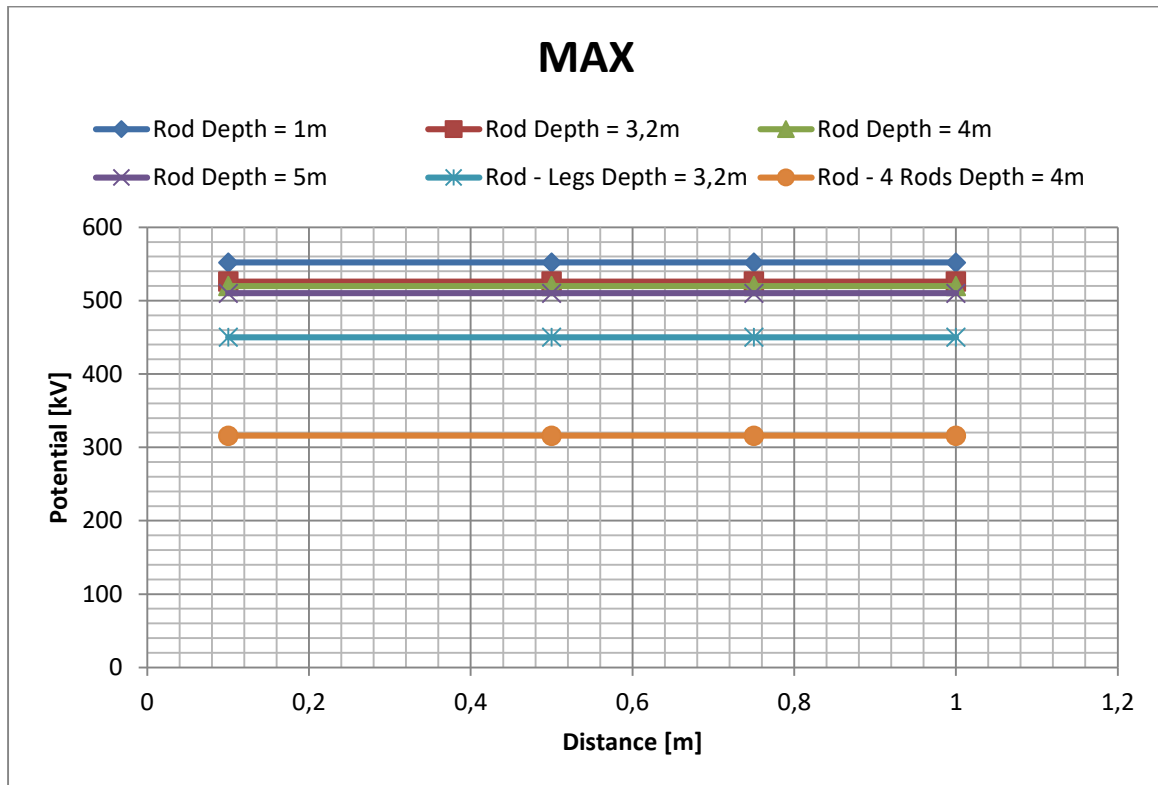


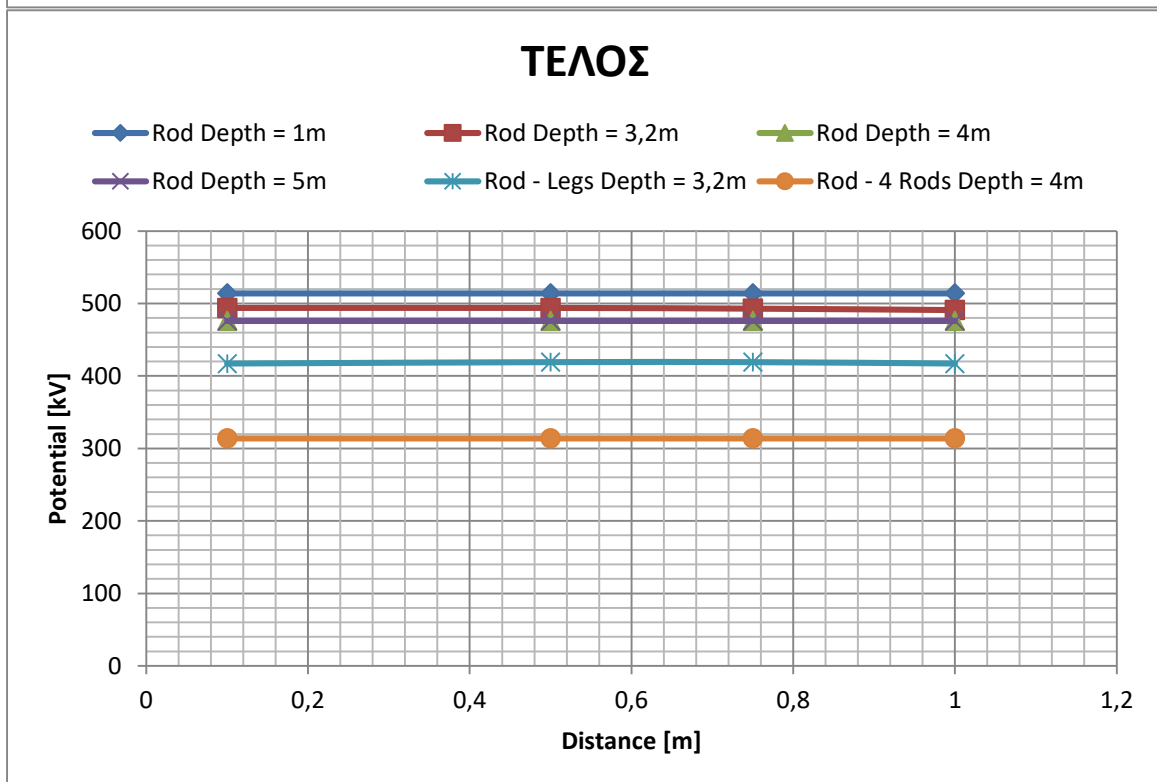
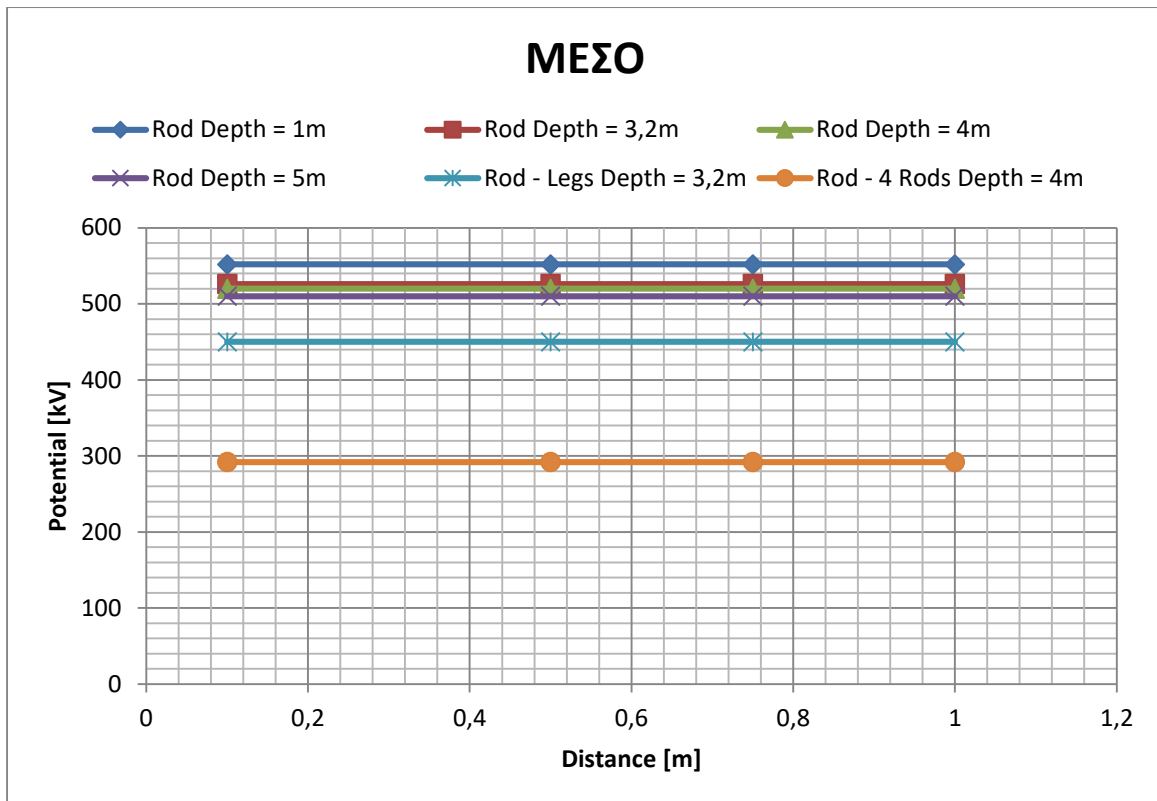


**Σχήμα 7-18** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και του βάθους στο οποίο φτάνει το κάθετο ηλεκτρόδιο, τα πόδια της βάσης και τα 4 πρόσθετα ηλεκτρόδια, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).



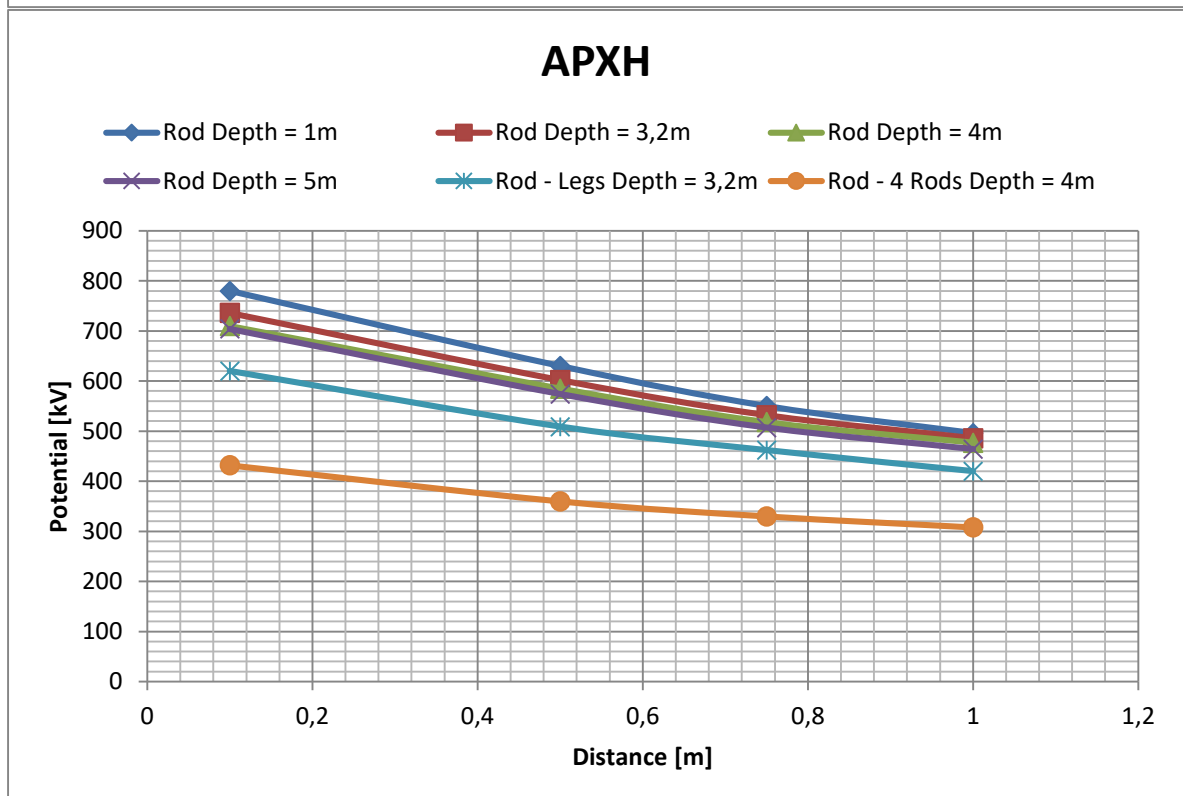
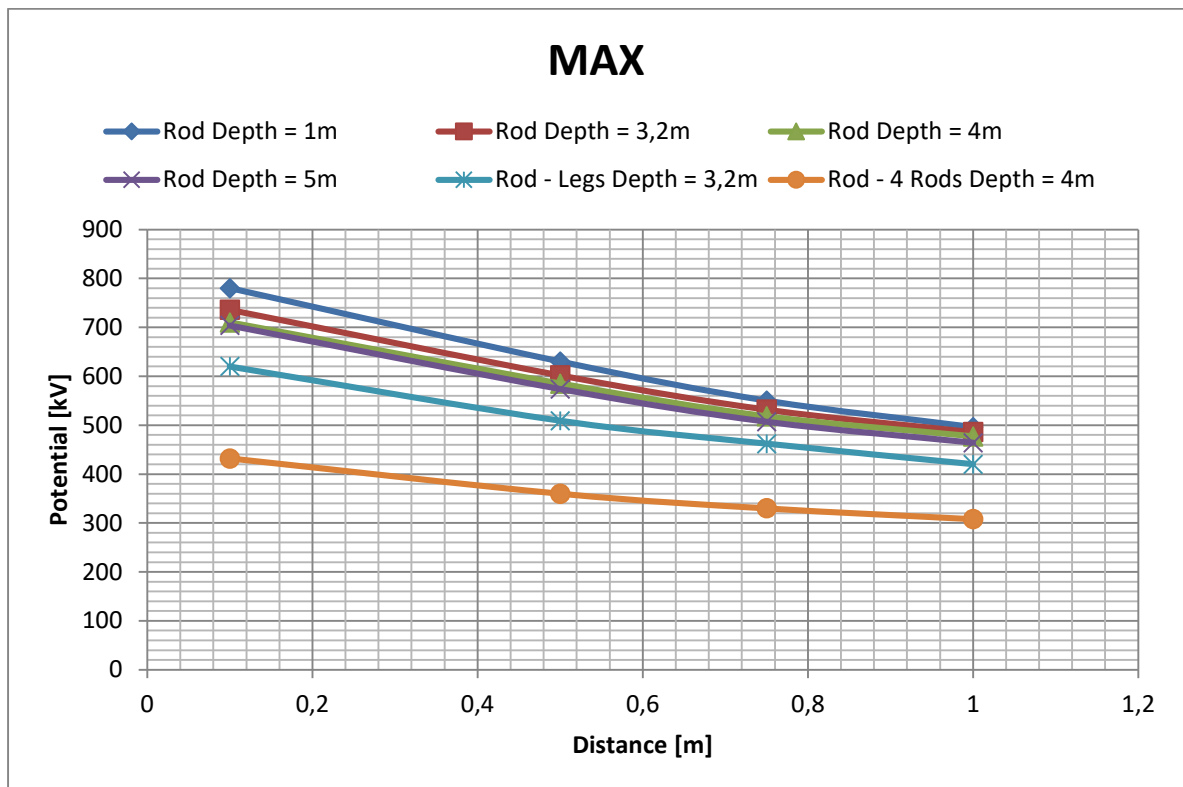
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το αναπτυσσόμενο δυναμικό, που υπολογίστηκαν στο profile 2, φαίνονται στο σχήμα 7-19.

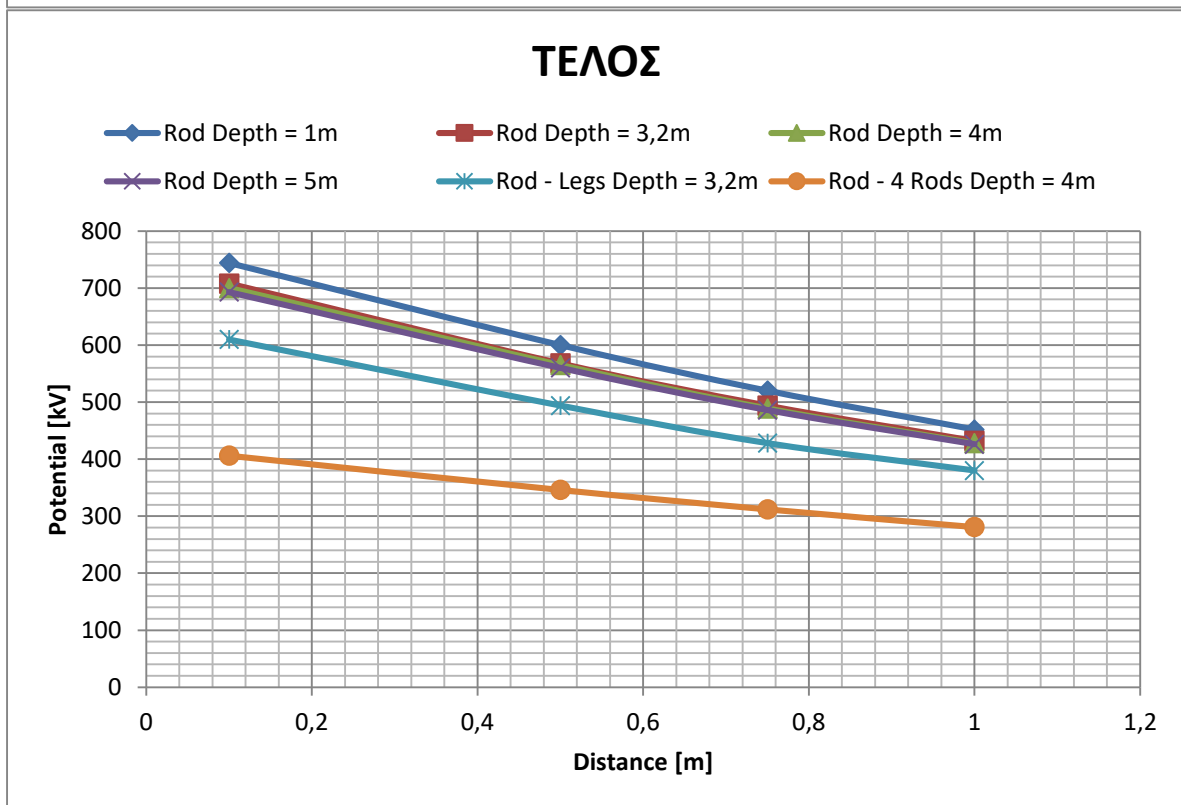
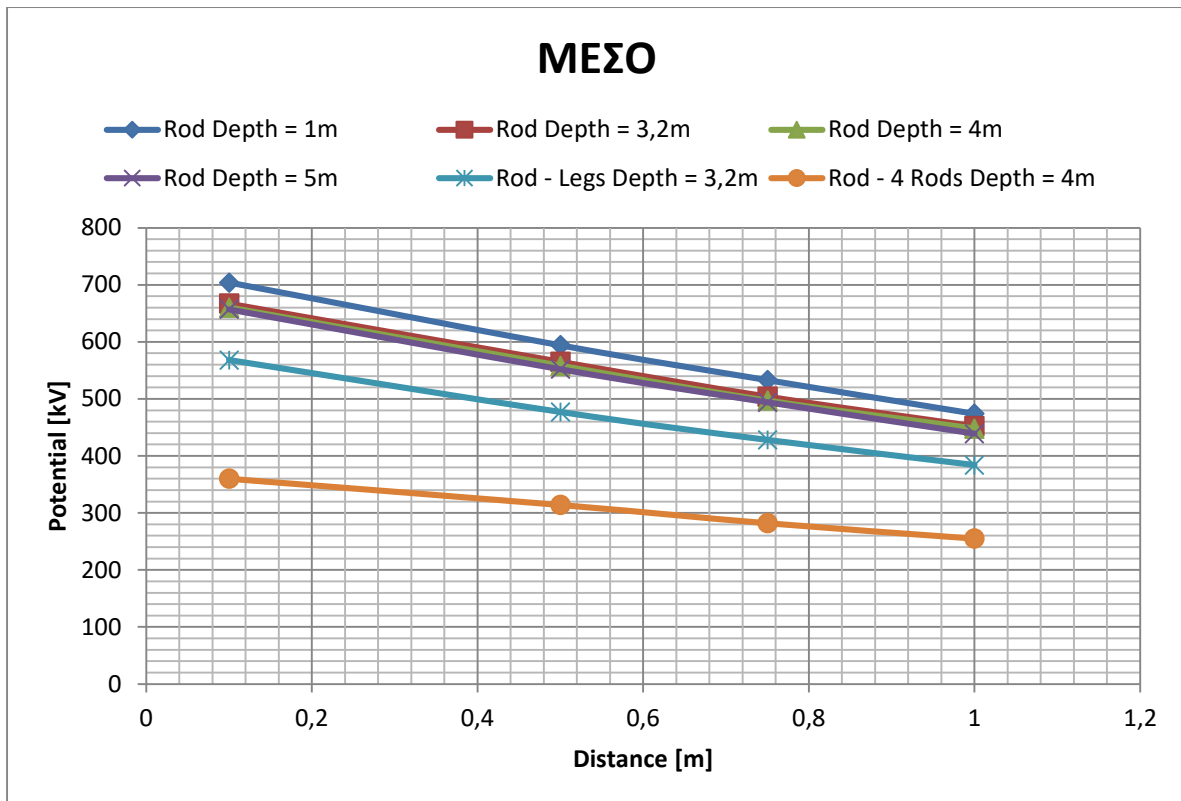




**Σχήμα 7-19** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και του βάθους στο οποίο φτάνει το κάθετο ηλεκτρόδιο, τα πόδια της βάσης και τα 4 πρόσθετα ηλεκτρόδια, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Στο σχήμα 7-20 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, που υπολογίστηκαν στο profile 3.





**Σχήμα 7-20** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και του βάθους στο οποίο φτάνει το κάθετο ηλεκτρόδιο, τα πόδια της βάσης και τα 4 πρόσθετα ηλεκτρόδια, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Σημειώνεται εδώ ότι, στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε βάθος, στο οποίο φτάνει το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το αλεξικέραυνο, μέχρι 5m, διότι, όπως φαίνεται και από τα γραφήματα των σχημάτων 7-18, 7-19, 7-20 η περαιτέρω αύξηση του δε θα είχε καμιά βελτίωση στα αποτελέσματα.

Από τα σχήματα 7-18, 7-19, 7-20 φαίνεται ότι, η αύξηση του βάθους στο οποίο φτάνει το κάθετο ηλεκτρόδιο κάτω από το έδαφος επιφέρει μικρή μείωση στο αναπτυσσόμενο δυναμικό σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στη φ/β διάταξη. Παρόλα αυτά, το κόστος για να επεκταθεί το κάθετο ηλεκτρόδιο λίγο πιο βαθιά στο έδαφος είναι πολύ μικρό σε σχέση με το αποτέλεσμα που προσφέρει.

Επίσης παρατηρείται ότι, στην περίπτωση που επεκτάθηκαν σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στο έδαφος όλα τα πόδια της βάσης στήριξης των φ/β πλαισίων, καθώς και το κάθετο ηλεκτρόδιο, δεν υπήρξε τόσο σημαντική μείωση του αναπτυσσόμενου δυναμικού και αν ληφθεί υπόψιν και το πολύ μεγάλο κόστος αυτής της τροποποίησης (πρακτικά αδύνατη η μετατροπή της βάσης στήριξης, διότι πωλείται με συγκεκριμένες διαστάσεις), συμπεραίνεται ότι αυτή η λύση είναι ασύμφορη.

Αντίθετα, όπως φαίνεται και στα σχήματα 7-18, 7-19, 7-20, όταν προστέθηκαν τα επιπλέον 4 ηλεκτρόδια στις τέσσερις γωνίες της περιμετρικής γείωσης και επεκτάθηκε λίγο και το βάθος στο οποίο φτάνει το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το αλεξικέραυνο, τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν πολύ (61% με 95% βελτίωση σε σχέση με τα αποτελέσματα που είχαμε όταν ήταν σε βάθος 1m το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται με το αλεξικέραυνο). Επίσης, λαμβάνοντας υπόψιν πως το κόστος αυτής της τροποποίησης δεν είναι τόσο μεγάλο για τα αποτελέσματα που προσφέρει, συμπεραίνεται πως είναι μια πραγματοποιήσιμη και συμφέρουσα λύση.

## **7.5 Επίδραση της αντικατάστασης του υλικού του βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου από μονωτικό σε αγώγιμο**

### **7.5.1 Αναπτυσσόμενο δυναμικό**

Σε αυτήν την περίπτωση έγιναν ξανά όλες οι προσομοιώσεις που περιγράφονται στην §5.3.1 με τη μόνη διαφορά ότι, τώρα ο βραχίονας που στήριζε την ακίδα σύλληψης (αλεξικέραυνο), αντικαταστάθηκε από μονωτή (fiberglass) σε αγώγο (χάλυβας).

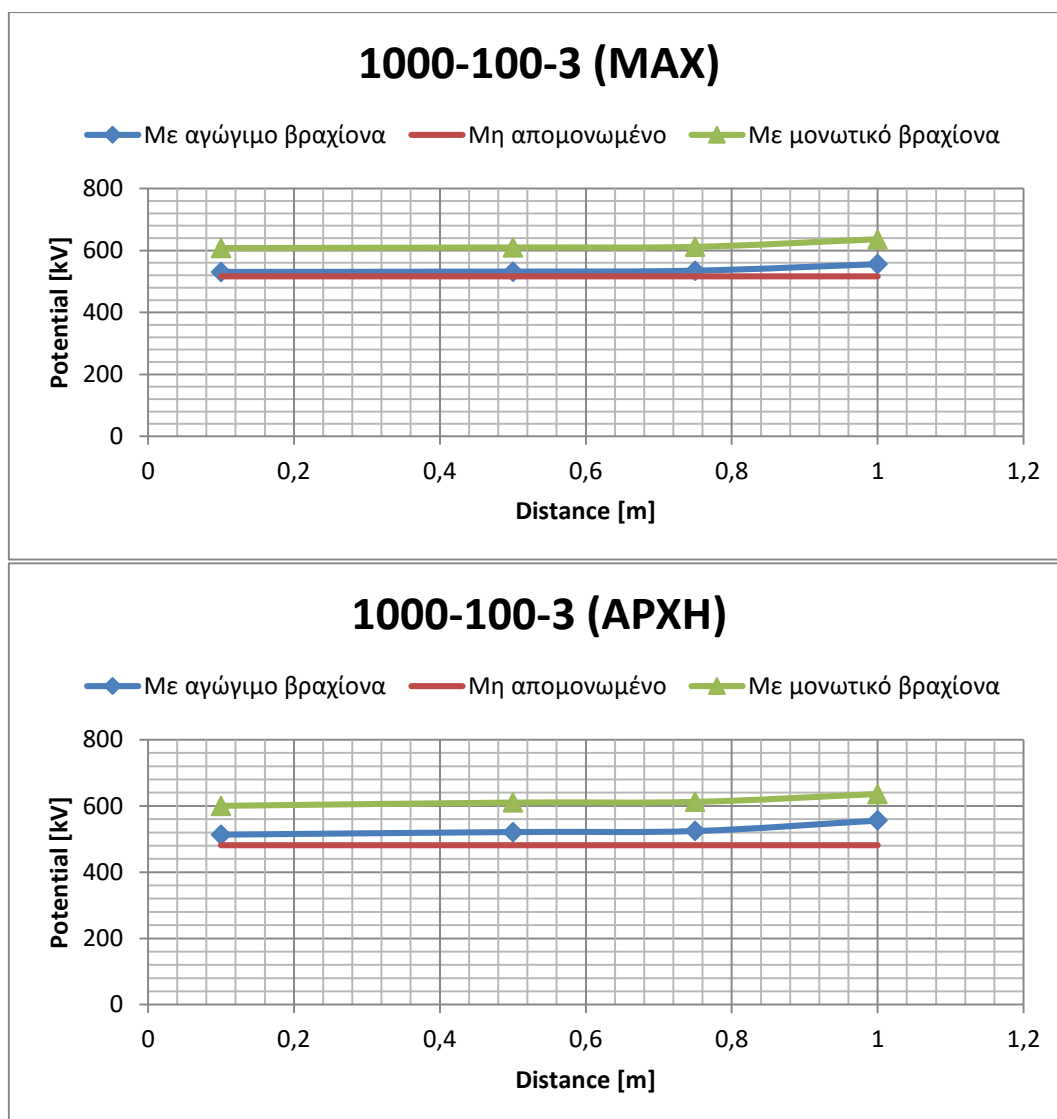
Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, όσον αφορά τη γεωμετρία τους, ήταν ίδιες με αυτές που περιγράφονται στην §5.3.1. Επίσης, οι παράμετροι που μεταβάλλονταν είναι οι ίδιες με αυτές της §5.3.1 και φαίνονται στον πίνακα 5-2. Το κεραυνικό ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε είχε και πάλι χρόνο μετώπου 10μs, χρόνο ημίσειας εύρους 350μs, πλάτος 50kA και διάρκεια 1200μs. Το σημείο πτώσης του κεραυνικού πλήγματος ήταν και σε αυτές τις περιπτώσεις το αλεξικέραυνο.

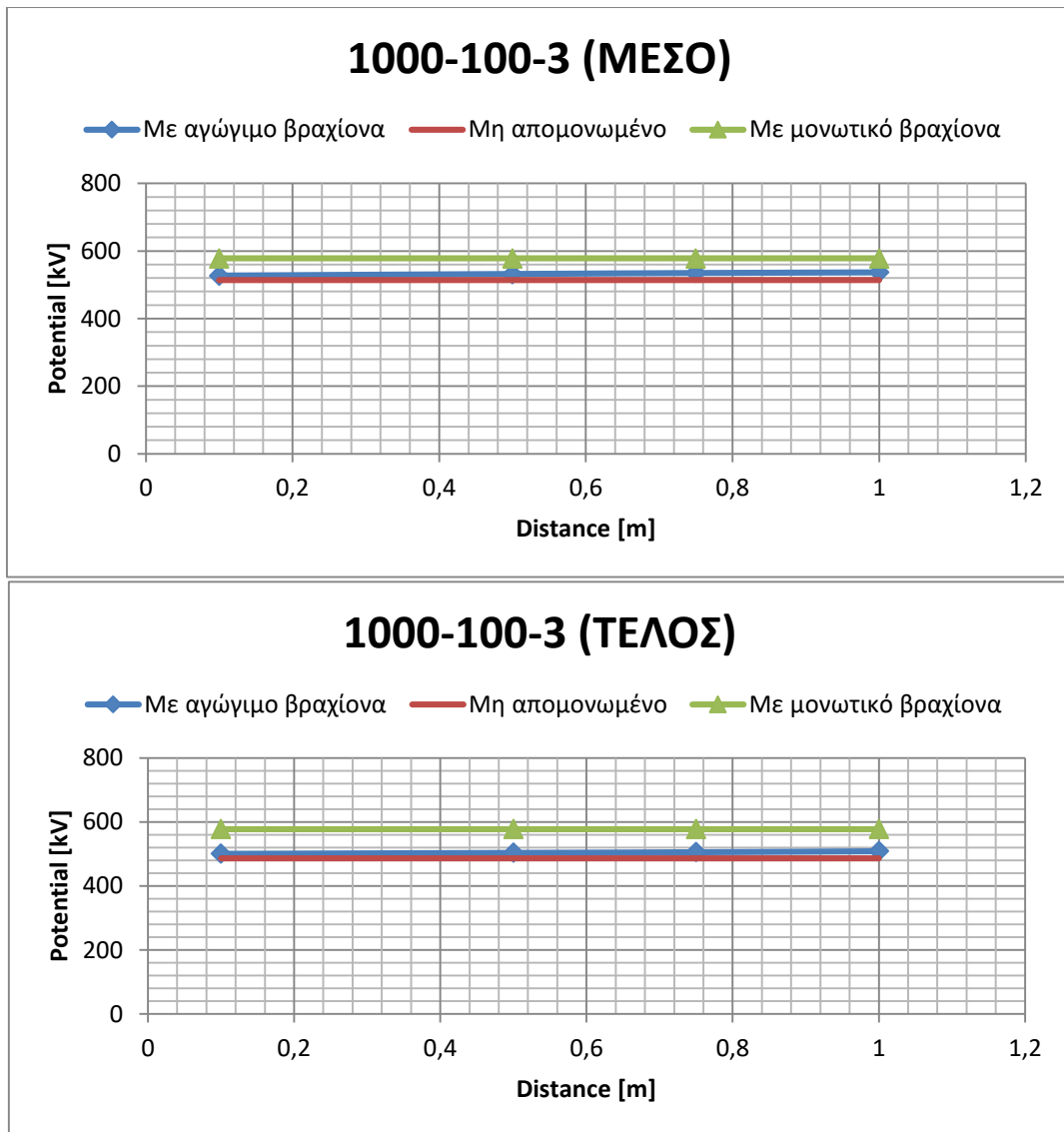
Επίσης, προσομοιώθηκαν οι ίδιες διατάξεις και περιπτώσεις για μη απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (σχήμα 5-10), έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Από αυτές τις προσομοιώσεις λήφθηκαν αποτελέσματα για το αναπτυσσόμενο δυναμικό και για τις τάσεις επαφής κατά τα γνωστά στα profile 1, 2, 3 (βλέπε §7.1). Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις της §5.3.1, για απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) με αγωγίμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα.

### Έδαφος 1000-100-3

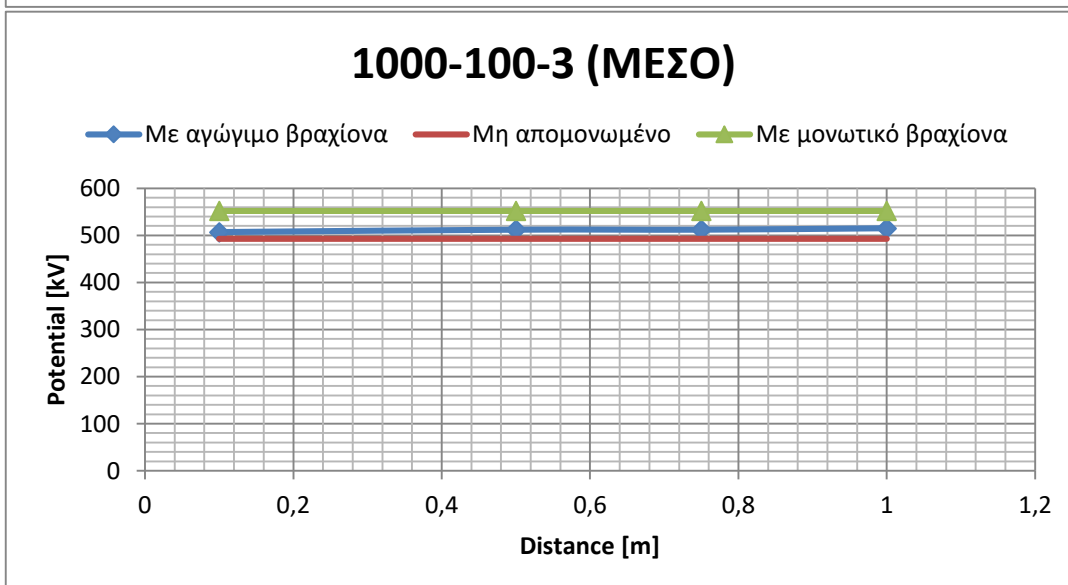
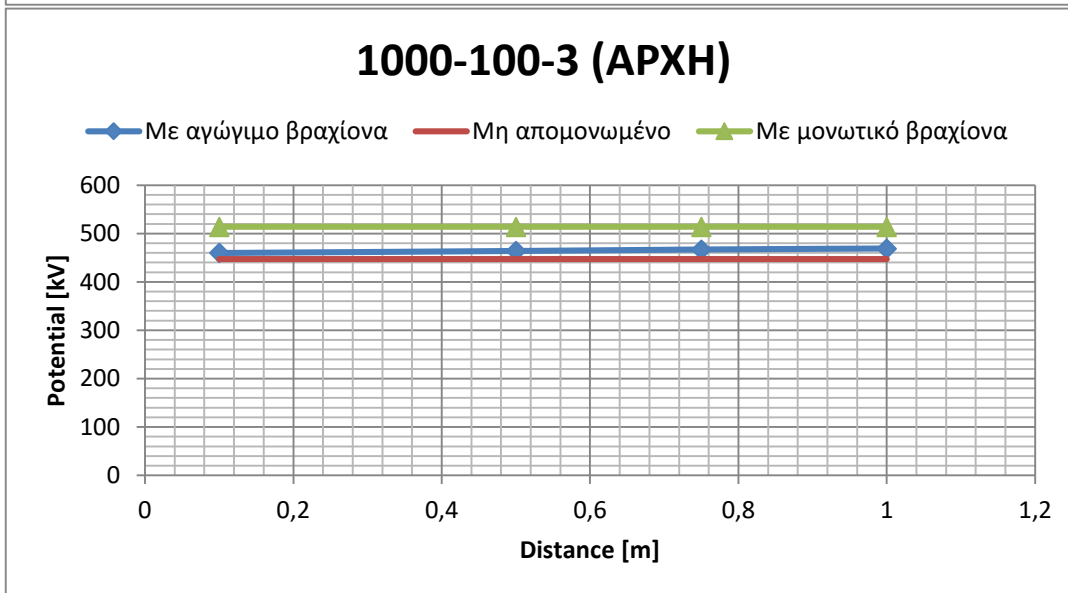
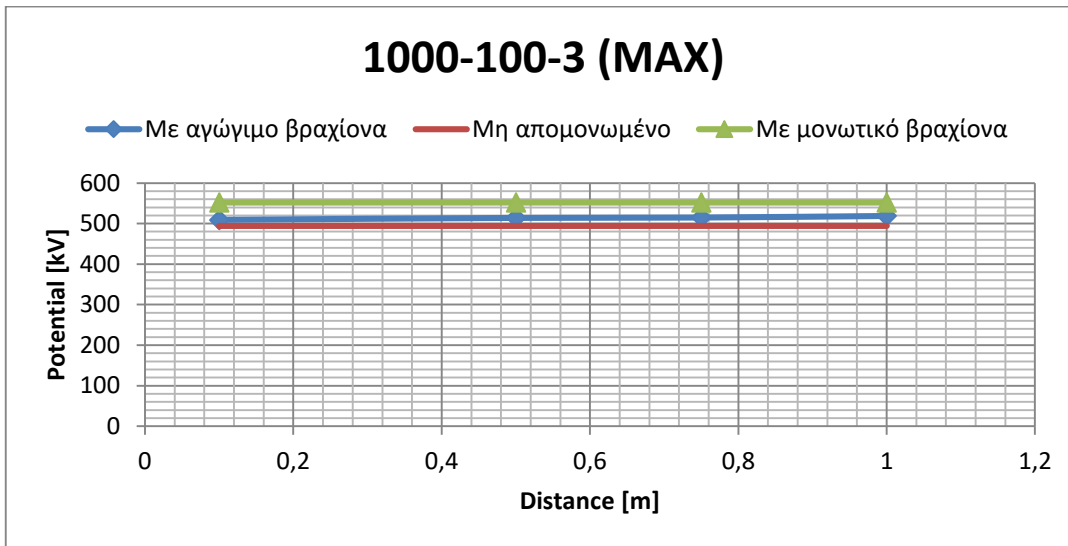
Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για το αναπτυσσόμενο δυναμικό, στο profile 1, για το έδαφος 1000-100-3 φαίνονται στο σχήμα 7-21.



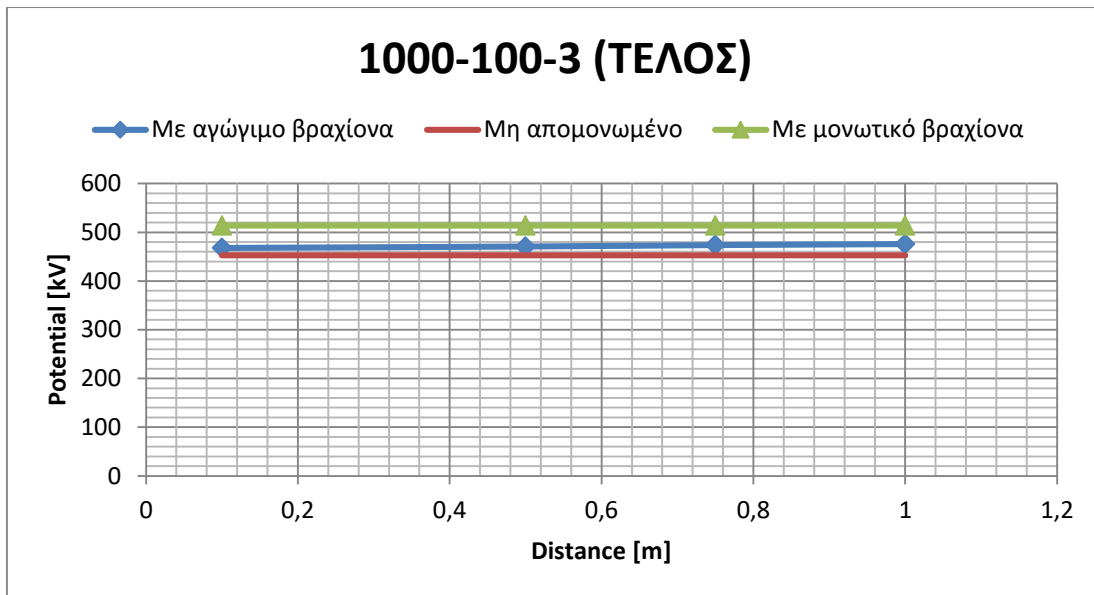


**Σχήμα 7-21** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το αναπτυσσόμενο δυναμικό, που υπολογίστηκαν στο profile 2, φαίνονται στο σχήμα 7-22.

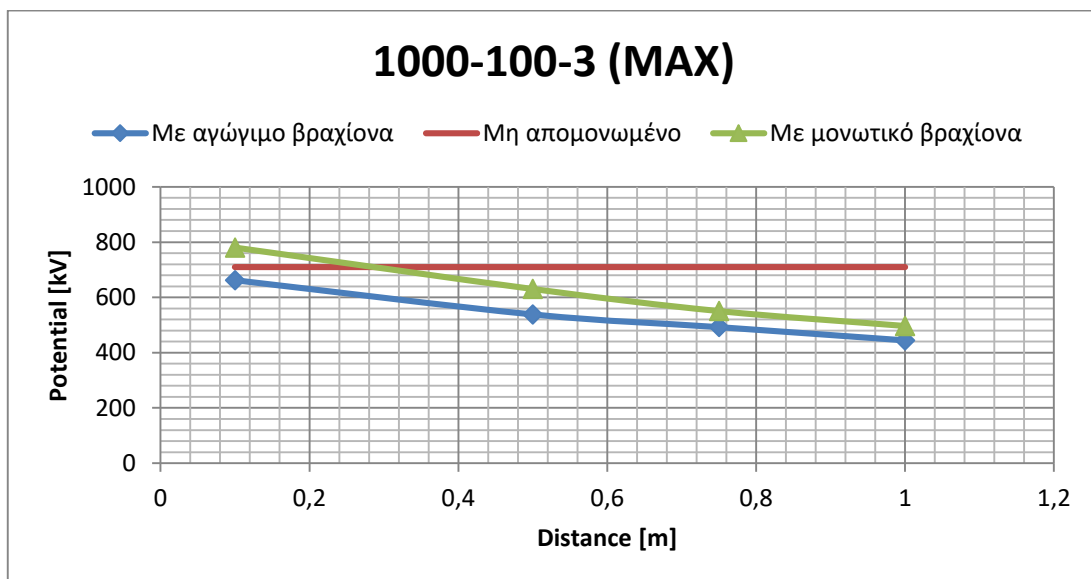


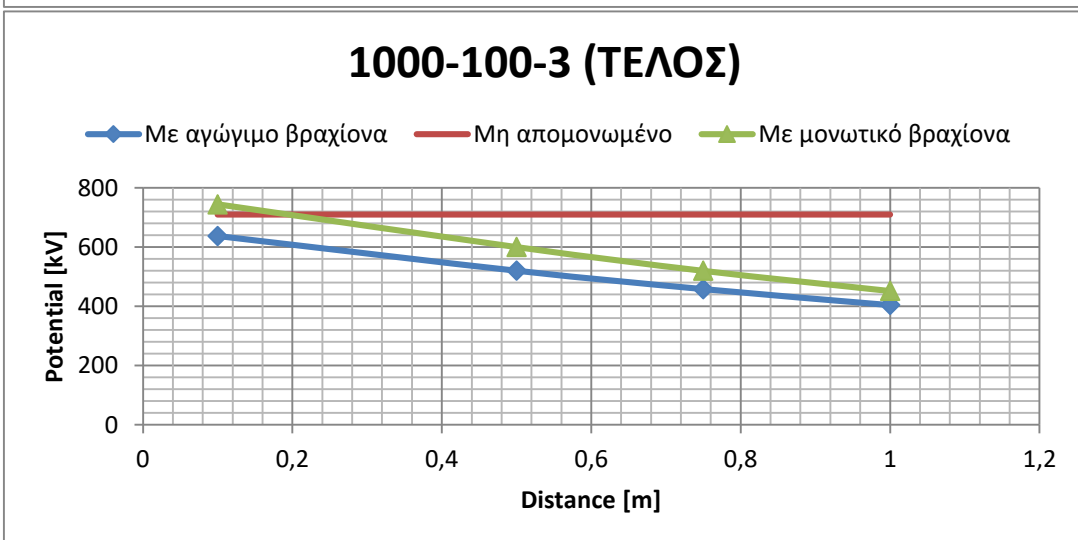
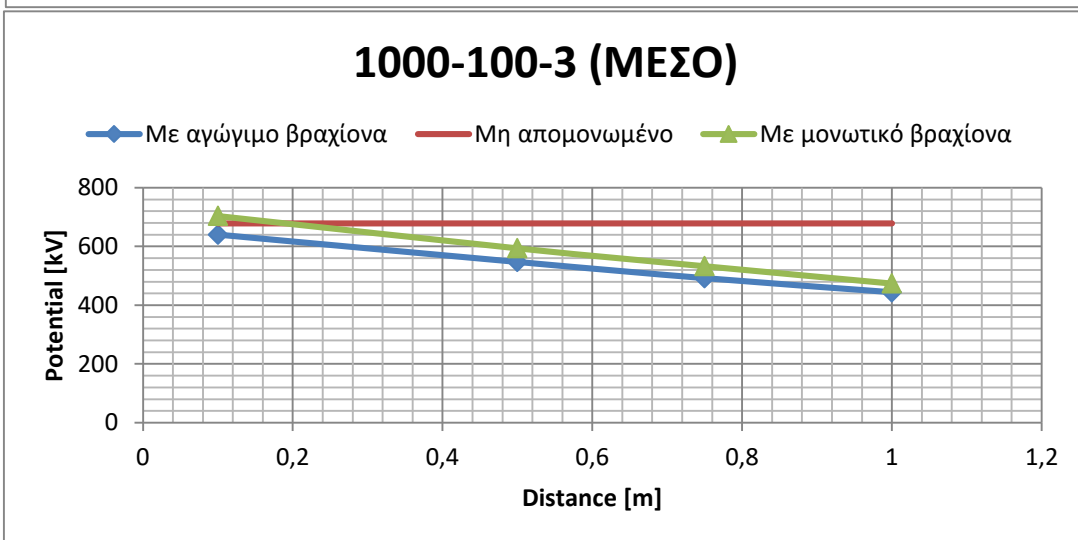
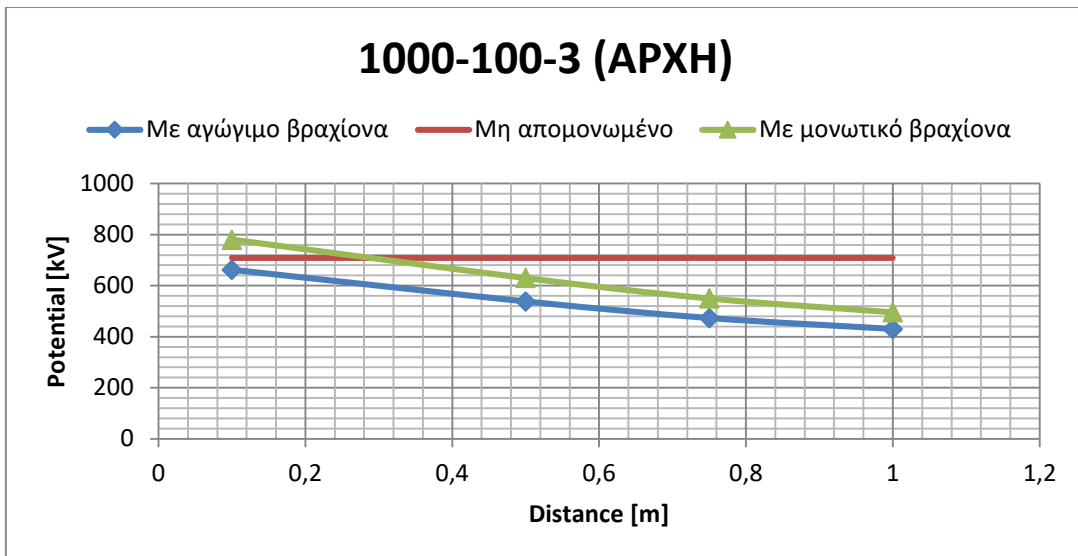




**Σχήμα 7-22** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Στο σχήμα 7-23 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που λήφθηκαν στο profile 3.





**Σχήμα 7-23** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Αυτό που παρατηρείται στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 7-21 (profile 1) είναι ότι τα χειρότερα αποτελέσματα προκύπτουν για το απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, ενώ το απομονωμένο ΣΑΠ με αγωγίμο βραχίονα έχει σχεδόν ίδια αποτελέσματα με το μη απομονωμένο.

Στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 7-22 (profile 2) παρατηρούνται ελαφρώς χαμηλότερα δυναμικά από ότι αυτά του σχήματος 7-21 (profile 1). Αυτό συμβαίνει διότι το profile 2 είναι στο κάτω μέρος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, μακριά από το σημείο πτώσης του κεραυνού. Ακόμη, παρατηρούμε ότι και εδώ τη χειρότερη συμπεριφορά την έχει το απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, ενώ τα άλλα δύο και πάλι παρουσιάζουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα.

Τέλος, στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 7-23 (profile 3) φαίνεται ότι το απομονωμένο ΣΑΠ με αγωγίμο βραχίονα στήριξης παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Το απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα παρουσιάζει τα χειρότερα αποτελέσματα μέχρι το αλεξικέραυνο να τοποθετηθεί περίπου στα 0,3m από τη φωτοβολταϊκή διάταξη, ενώ για απόσταση αλεξικέραυνου από τη διάταξη μεγαλύτερη των 0,3m τα χειρότερα αποτελέσματα προκύπτουν για το μη απομονωμένο ΣΑΠ.

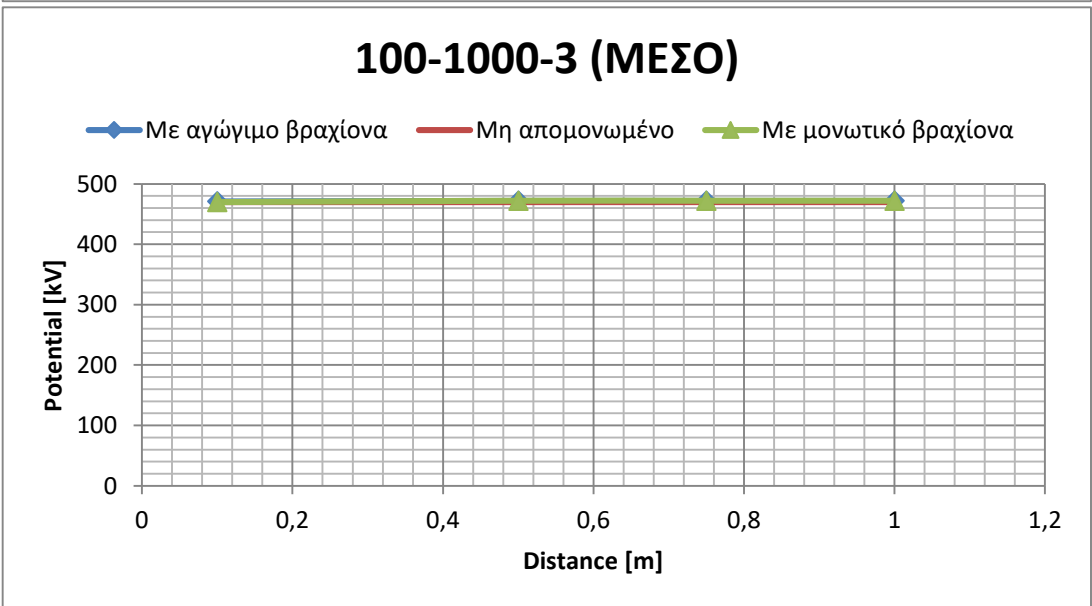
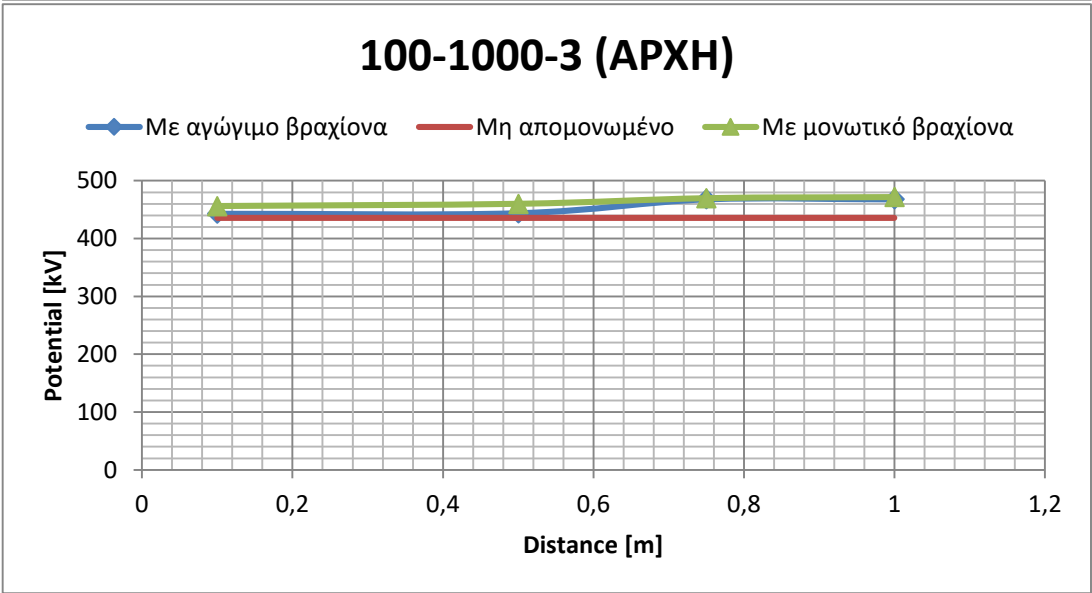
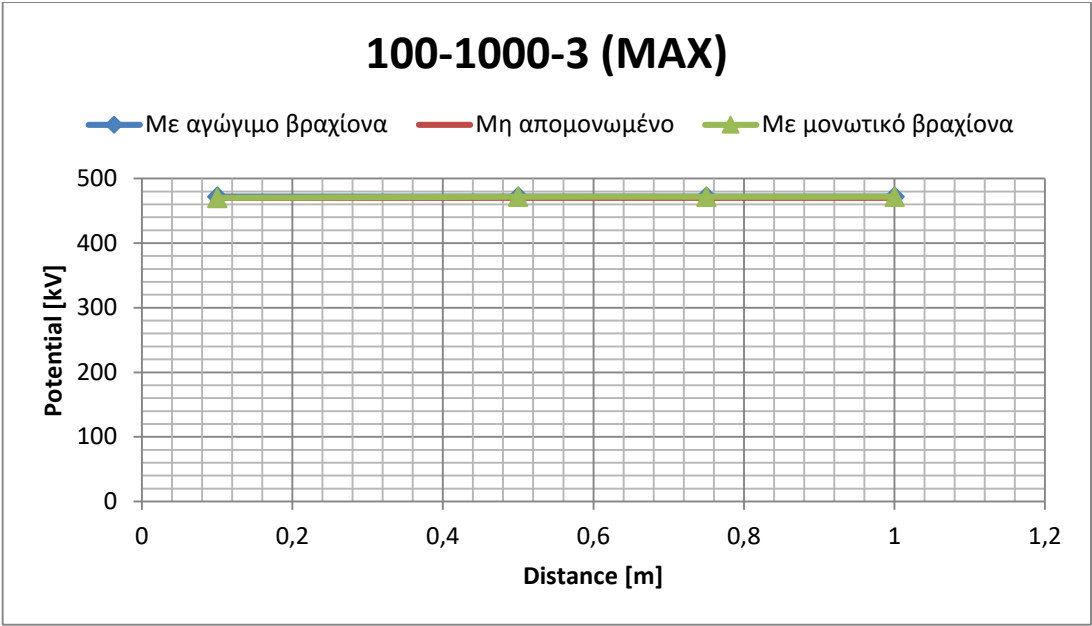
### **Έδαφος 1000-100-2**

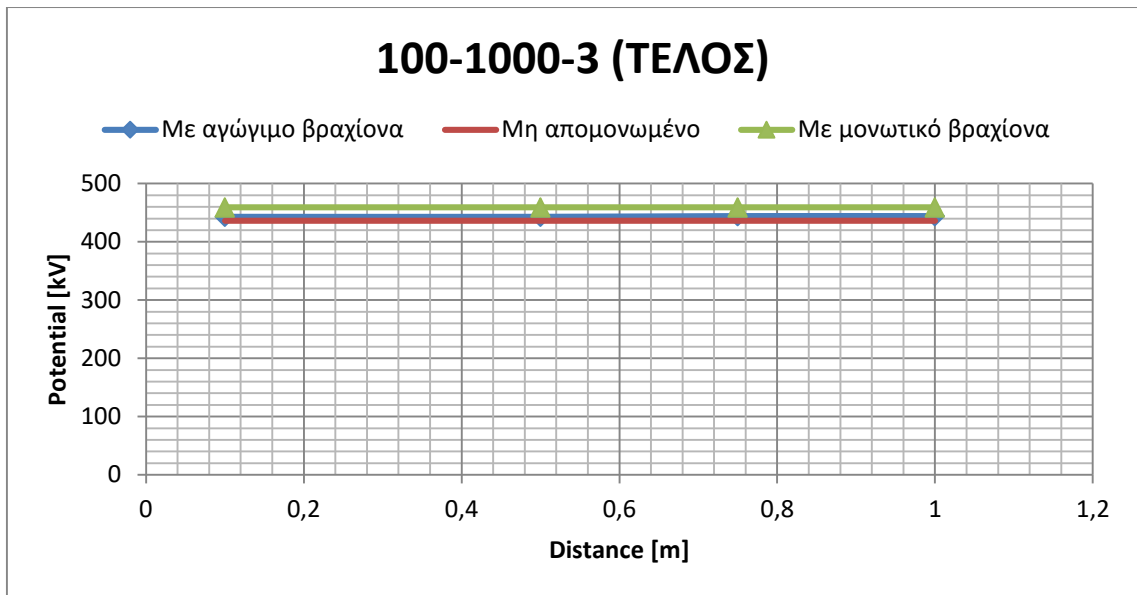
Για το διστρωματικό έδαφος 1000-100-2 (δηλαδή έδαφος με ειδική αντίσταση πάνω στρώματος ίση με 1000Ωm και βάθος 2m και ειδική αντίσταση κάτω στρώματος ίση με 100Ωm και βάθος απεριόριστο), εκτελέστηκαν οι ίδιες προσομοιώσεις με παραπάνω και παρατηρήθηκε ότι όλες οι γραφικές παραστάσεις, για όλα τα profiles είναι ίδιες με τις αντίστοιχες του εδάφους 1000-100-3, καθώς επίσης και όλες οι καμπύλες έχουν το ίδιο σχήμα. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι τώρα όλα τα δυναμικά έχουν κάπως μικρότερες τιμές από ότι στην περίπτωση του εδάφους 1000-100-3. Αυτή η μείωση των δυναμικών, στην περίπτωση του εδάφους 1000-100-2, οφείλεται στο ότι το πιο μονωτικό έδαφος με ειδική αντίσταση 1000Ωm εκτείνεται σε μικρότερο βάθος σε σχέση με αυτό του εδάφους 1000-100-3. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για το έδαφος 1000-100-2 επισυνάπτονται στο Παράρτημα Γ.

### **Έδαφος 100-1000-3**

Για το έδαφος 100-1000-3 (δηλαδή διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση πάνω στρώματος ίση με 100Ωm και βάθος 3m και κάτω στρώματος 1000Ωm και βάθος απεριόριστο) έγιναν οι ίδιες προσομοιώσεις με τα εδάφη 1000-100-3 και 1000-100-2 και λήφθηκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

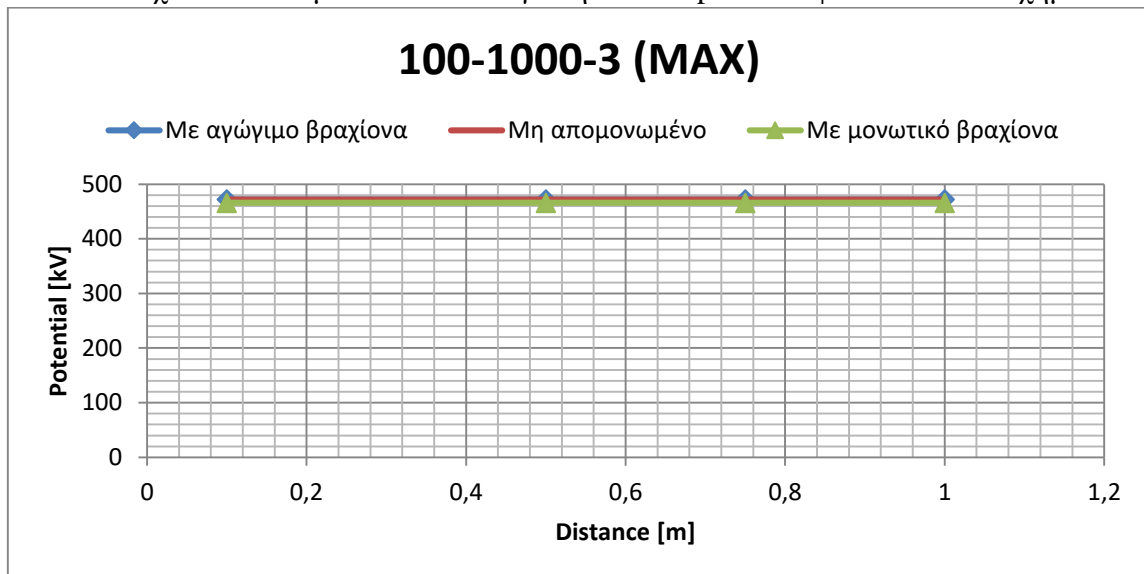
Στο σχήμα 7-24 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, που υπολογίστηκαν στο profile 1.

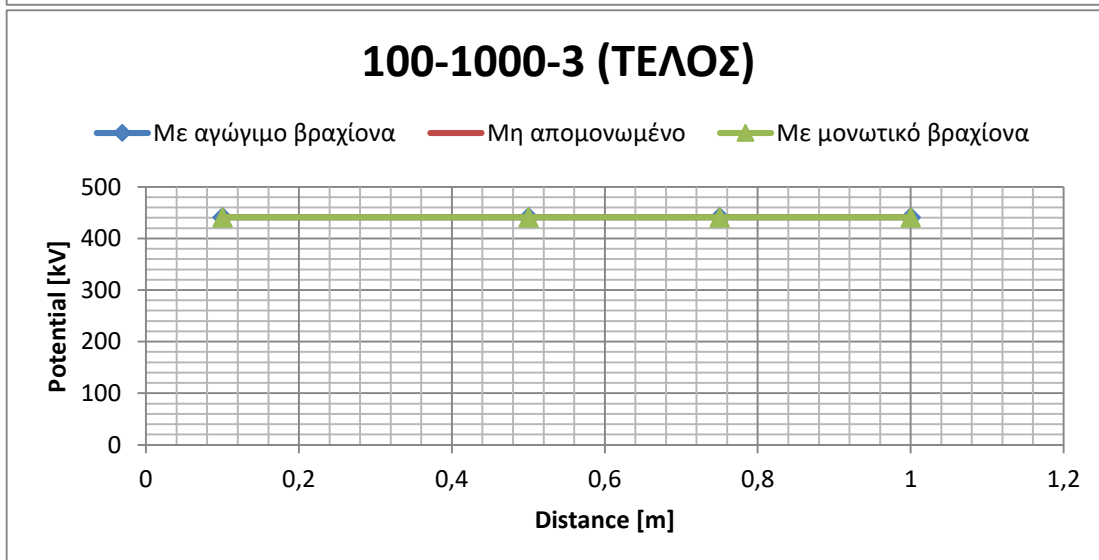
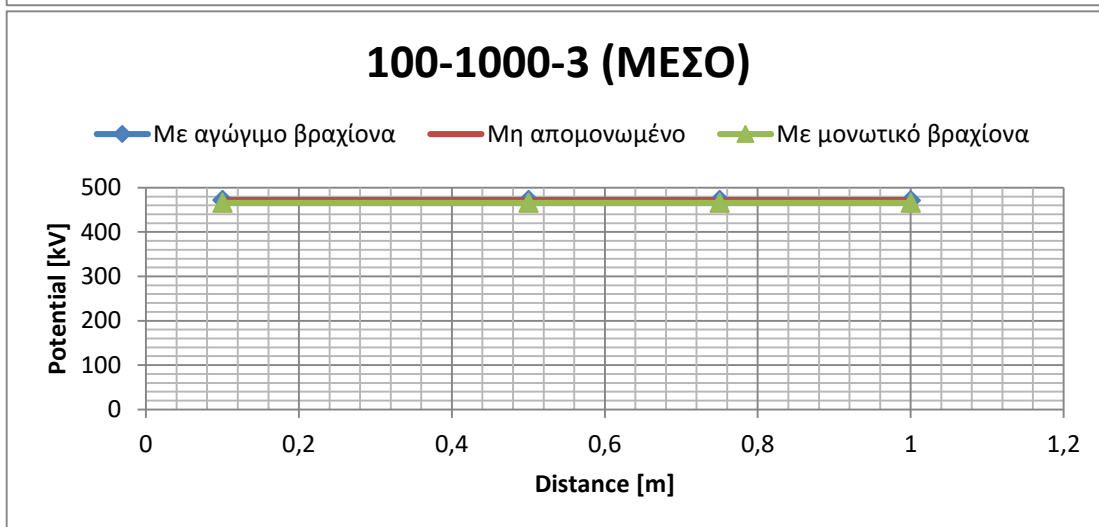
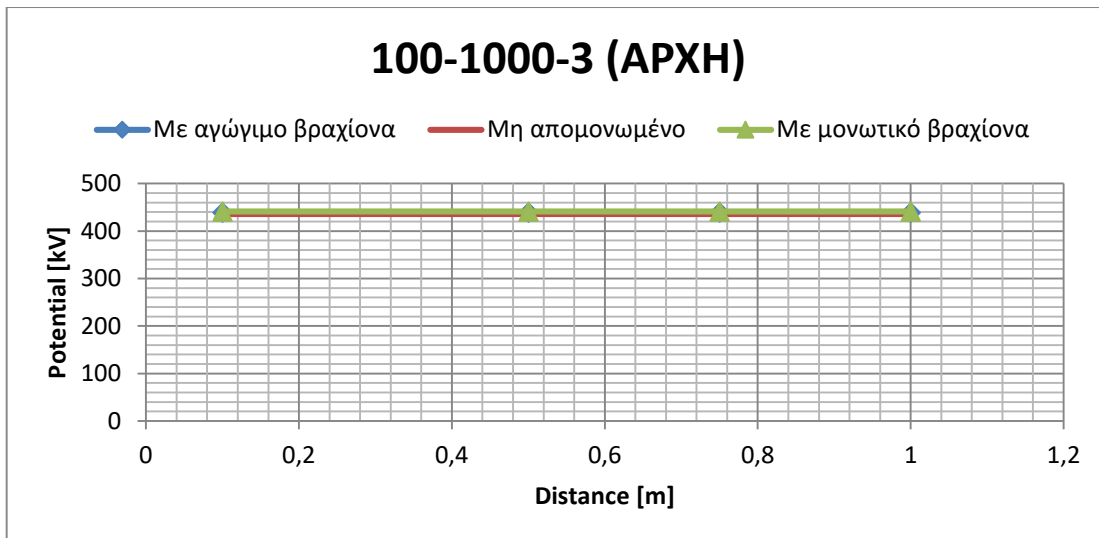




**Σχήμα 7-24** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

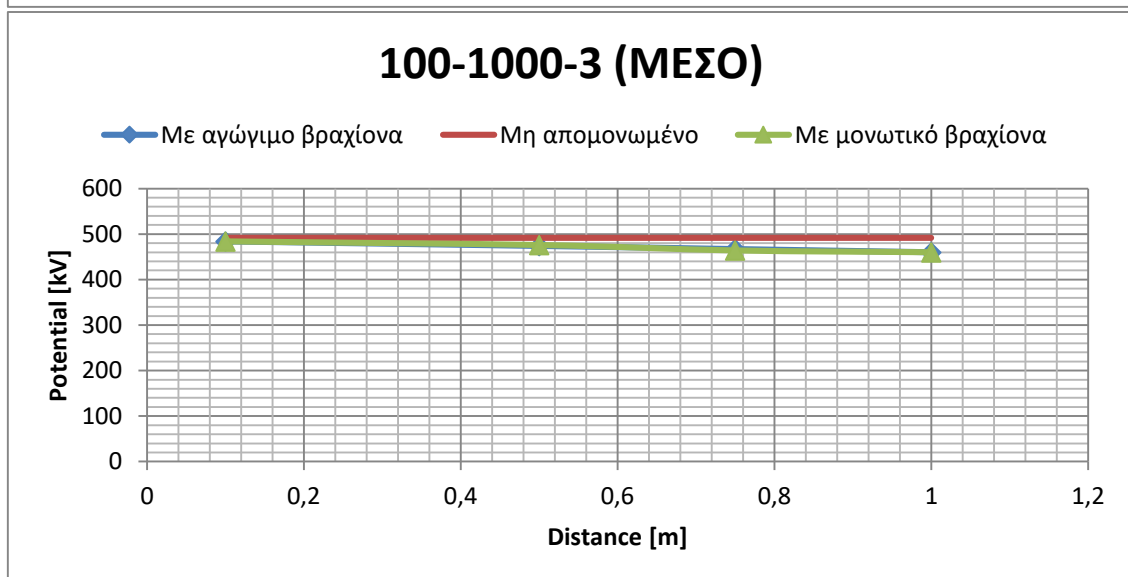
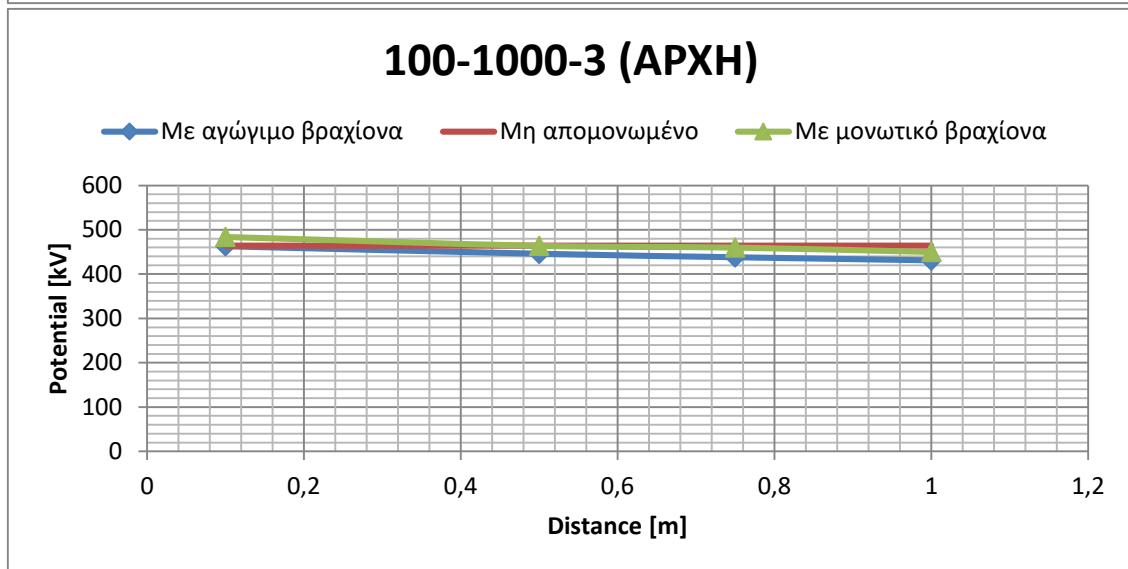
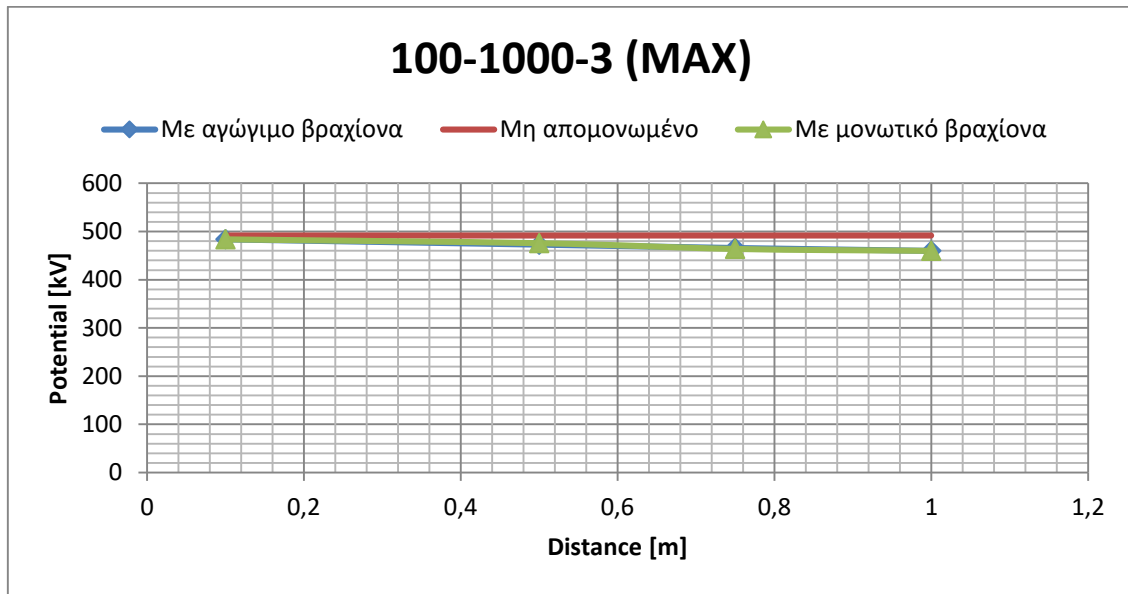
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν στο profile 2 φαίνονται στο σχήμα 7-25.

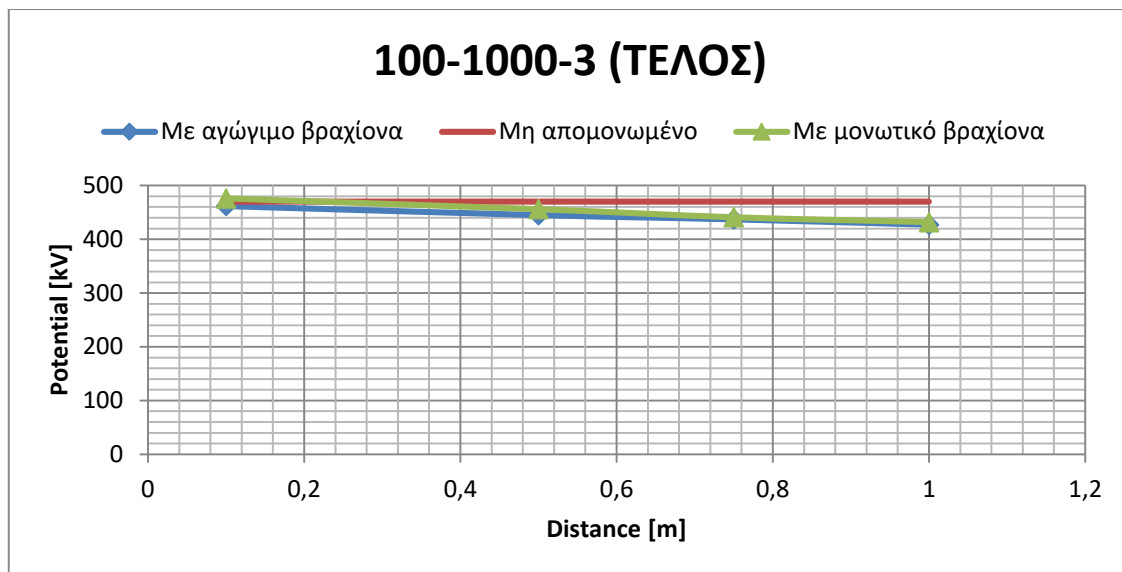




**Σχήμα 7-25** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Στο σχήμα 7-26 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το profile 3.





**Σχήμα 7-26** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέρανου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

Αυτό που παρατηρούμε στα σχήματα 7-24, 7-25, 7-26 (δηλαδή profile 1, profile 2, profile 3 αντίστοιχα) είναι ότι σε όλες τις γραφικές παραστάσεις το αναπτυσσόμενο δυναμικό είναι περίπου ίσο και για τα τρία συστήματα αντικεραυνικής προστασίας.

### Έδαφος 100-1000-2

Για το έδαφος 100-1000-2 (δηλαδή διστρωματικό έδαφος με ειδική αντίσταση πάνω στρώματος ίση με  $100\Omega\text{m}$  και βάθος 2m και ειδική αντίσταση κάτω στρώματος  $1000\Omega\text{m}$  και βάθος απεριόριστο) εκτελέστηκαν οι αντίστοιχες προσομοιώσεις με τα εδάφη 1000-100-3, 1000-100-2 και 100-1000-3, με τις ίδιες φωτοβολταϊκές διατάξεις και παρατηρήθηκε ότι όλες οι γραφικές παραστάσεις, για όλα τα profiles είναι ίδιες με τις αντίστοιχες του εδάφους 100-1000-3, καθώς επίσης και όλες οι καμπύλες έχουν το ίδιο σχήμα. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι τώρα όλα τα δυναμικά έχουν κάπως μεγαλύτερες τιμές από ότι στην περίπτωση του εδάφους 100-1000-3. Αυτή η αύξηση των δυναμικών, στην περίπτωση του εδάφους 100-1000-2, οφείλεται στο ότι το στρώμα του εδάφους με τη μικρή ειδική αντίσταση  $100\Omega\text{m}$  εκτείνεται σε μικρότερο βάθος σε σχέση με αυτό του εδάφους 100-1000-3. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για το έδαφος 100-1000-2 φαίνονται στο Παράρτημα Δ.

Επίσης, εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι, για την περίπτωση στην οποία ο μονωτικός βραχίονας στήριξης του αλεξικέρανου αντικαταστάθηκε με αγώγιμο, εκτελέστηκαν και όλες οι προσομοιώσεις με τις διατάξεις που αναφέρονται στις §5.3.3 και §5.3.4. Οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων έχουν ίδιο σχήμα και μορφή με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με το μονωτικό βραχίονα στήριξης. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι οι γραφικές παραστάσεις με τον αγώγιμο βραχίονα στήριξης είναι μετατοπισμένες προς τα κάτω, δηλαδή τα δυναμικά είναι



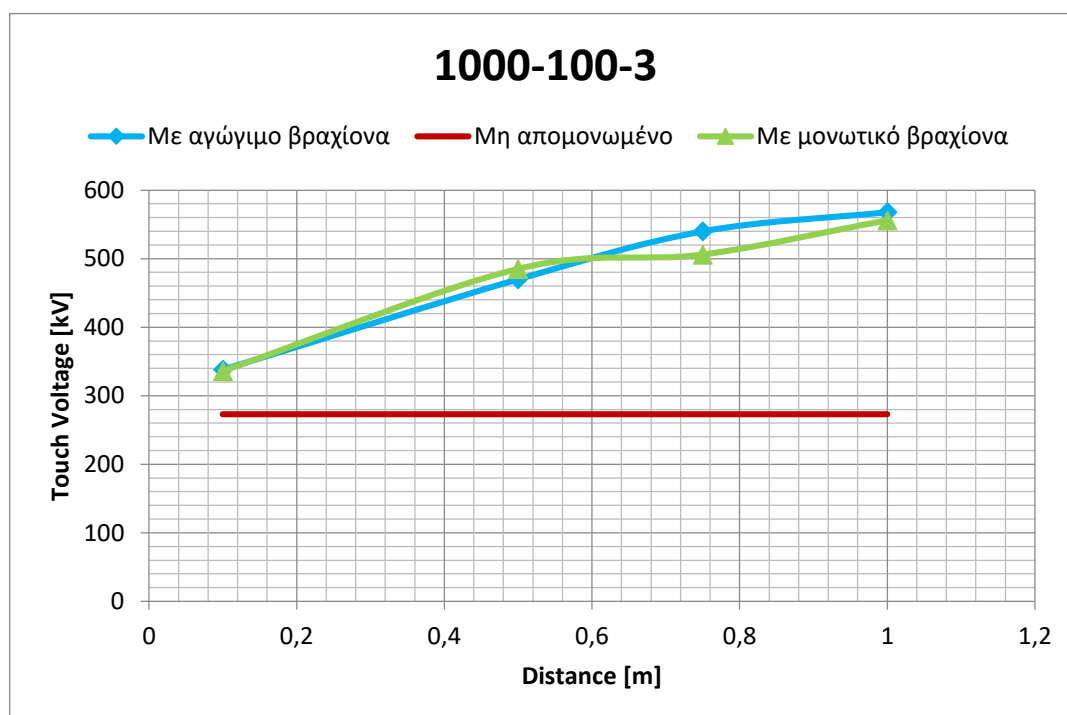
μικρότερα από αυτά των γραφικών παραστάσεων με το μονωτικό βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου.

## 7.5.2 Τάσεις επαφής

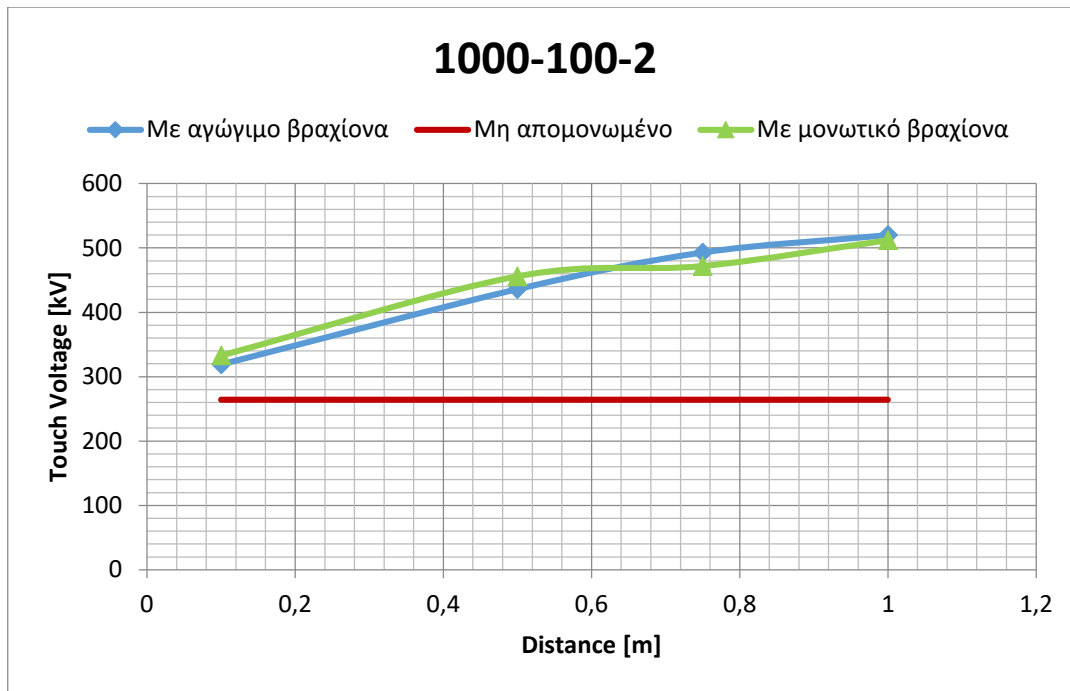
Μια επιπλέον σύγκριση που έγινε μεταξύ των τριών συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας (απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα στήριξης, μη απομονωμένο ΣΑΠ και απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου) ήταν αυτή που αφορά τις δημιουργούμενες τάσεις επαφής.

Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις με τις διατάξεις που αναφέρονται στην §5.3.1, για όλα τα εξεταζόμενα εδάφη (1000-100-3, 1000-100-2, 100-1000-3, 100-1000-2). Τα αποτελέσματα, αυτή τη φορά, τα πήραμε μόνο από το profile 3, καθώς αυτό ήταν το μόνο που απείχε κάθε φορά 1m από το αλεξικέραυνο. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE std 80-2000 οι τάσεις επαφής υπολογίζονται ή μετρώνται σε απόσταση 1m από τον κοντινότερο αγωγό. Επίσης, τα αποτελέσματα λήφθηκαν για το σημείο του profile 3 το οποίο ήταν πιο κοντά στο αλεξικέραυνο, δηλαδή για το σημείο 11 του profile 3.

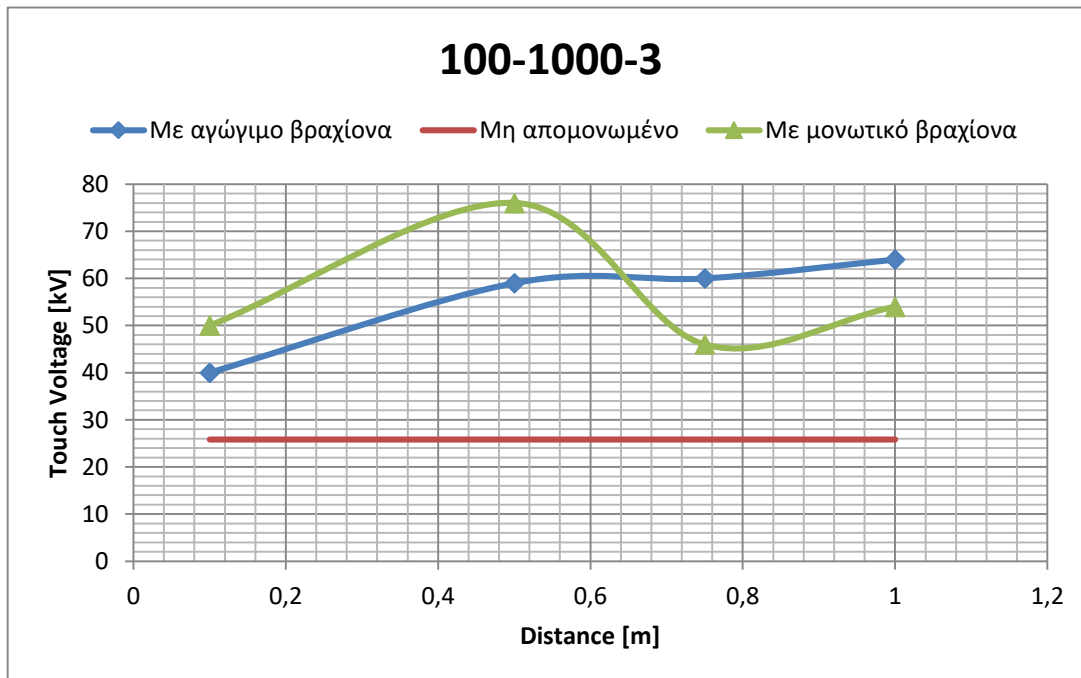
Τα αποτελέσματα για τις τάσεις επαφής για τα διστρωματικά εδάφη 1000-100-3, 1000-100-2, 100-1000-3, 100-1000-2 φαίνονται αντίστοιχα στα σχήματα 7-27, 7-28, 7-29, 7-30.



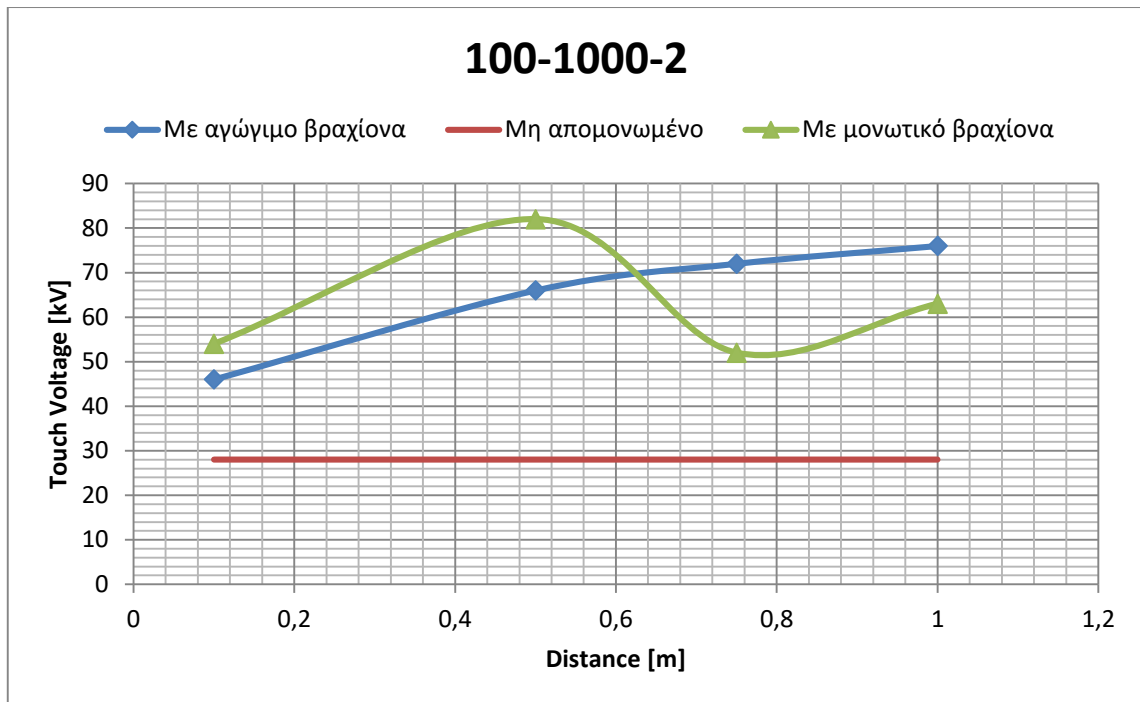
**Σχήμα 7-27** Τάσεις επαφής για το έδαφος 1000-100-3, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις απομονωμένου ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου, μη απομονωμένου ΣΑΠ και απομονωμένου ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα



**Σχήμα 7-28** Τάσεις επαφής για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσεως της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις απομονωμένου ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου, μη απομονωμένου ΣΑΠ και απομονωμένου ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα



**Σχήμα 7-29** Τάσεις επαφής για το έδαφος 100-1000-3, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσεως της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις απομονωμένου ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου, μη απομονωμένου ΣΑΠ και απομονωμένου ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα



**Σχήμα 7-30** Τάσεις επαφής για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 3, για το πλησιέστερο σημείο στο αλεξικέραυνο, συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη και σύγκριση των τάσεων επαφής για τις περιπτώσεις απομονωμένου ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου, μη απομονωμένου ΣΑΠ και απομονωμένου ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα

Στα σχήματα 7-27, 7-28, 7-29, 7-30 παρατηρείται ότι, στην περίπτωση των τάσεων επαφής, τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν για το μη απομονωμένο ΣΑΠ. Οι τάσεις επαφής των άλλων δύο ΣΑΠ είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους.



## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η κεραυνική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Για το σκοπό αυτό εκτελέστηκαν προσομοιώσεις, με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου CDEGS της εταιρείας SES, σε φ/β εγκατάσταση μεταβάλλοντας τις εξής παραμέτρους:

- Την απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φωτοβολταϊκή διάταξη
- Τη δομή του εδάφους.
- Την ύπαρξη ή όχι της περιμετρικής γείωσης, καθώς επίσης και την ανάγκη ταφής της περιμετρικής γείωσης εντός του εδάφους.
- Το μήκος του κάθετου ηλεκτροδίου, το οποίο συνδέεται στο κάτω άκρο του αλεξικέραυνου και βρίσκεται μέσα στο έδαφος, καθώς και κάποιες τροποποιήσεις στο σύστημα γείωσης της αρχικής διάταξης.
- Το υλικό κατασκευής του βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου (βραχίονας που συνδέει το αλεξικέραυνο με τη βάση στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων).

### Απόσταση του αλεξικέραυνου και δομή του εδάφους

Εξετάστηκαν τέσσερις δομές διστρωματικού εδάφους με τις εξής παραμέτρους:

Εδάφη	$\rho_1$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$\rho_2$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$h_1$ [m]
A	100	1000	2
B	100	1000	3
Γ	1000	100	2
Δ	1000	100	3

Παρατηρήθηκε ότι, στα εδάφη Γ και Δ (ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος 1000 $\Omega\text{m}$ ), το δυναμικό μειωνόταν καθώς αυξανόταν η απόσταση του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη, ενώ στα εδάφη A και B (ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος 100 $\Omega\text{m}$ ) το δυναμικό ήταν ανεξάρτητο της απόστασης του αλεξικέραυνου από τη φ/β διάταξη. Τα παραπάνω διαπιστώθηκαν υπολογίζοντας το δυναμικό σε σταθερή απόσταση 1m από το αλεξικέραυνο.

Επομένως, συνιστάται να γίνεται μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στον τόπο που πρόκειται να εγκατασταθεί ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, ώστε να γίνει κατάλληλη χωροθέτηση των ακίδων σύλληψης και μελέτη του συστήματος γείωσης.

### Ύπαρξη ή όχι περιμετρικής γείωσης και ανάγκη ταφής αυτής

Σε όλα τα εξεταζόμενα εδάφη παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της περιμετρικής γείωσης στα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς πλησίον του σημείου έγχυσης του κεραυνικού πλήγματος το δυναμικό και οι τάσεις επαφής υπολογίστηκαν εξαιρετικά αυξημένες κατά την απουσία περιμετρικής γείωσης. Επομένως, επιβεβαιώνεται η αναγκαιότητα εγκατάστασης περιμετρικής γείωσης σε φ/β πάρκα.

Επιπλέον, εξετάστηκε η περίπτωση στην οποία η περιμετρική γείωση ήταν θαμμένη στο έδαφος σε σχέση με την περίπτωση που ήταν απλά τοποθετημένη στην επιφάνεια του εδάφους. Παρατηρήθηκε βελτίωση των εμφανιζόμενων δυναμικών όταν η περιμετρική γείωση είναι θαμμένη στο έδαφος, ιδίως στα εδάφη 1000Ωm (πάνω στρώμα) – 100Ωm (κάτω στρώμα). Ακόμη, όσον αφορά τις τάσεις επαφής η θαμμένη περιμετρική γείωση εμφανίζει σε όλα τα εδάφη καλύτερη συμπεριφορά. Οπότε, συνιστάται η εγκατάσταση της περιμετρικής γείωσης να γίνεται εντός του εδάφους.

### **Μήκος του συνδεδεμένου με την ακίδα σύλληψης κάθετου ηλεκτροδίου και τροποποιήσεις στο σύστημα γείωσης**

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για διστρωματικό έδαφος των εξής παραμέτρων:

- Ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος 1000Ωm
- Βάθος πρώτου στρώματος 3m
- Ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος 100Ωm
- Βάθος δεύτερου στρώματος απεριόριστο

Παρατηρήθηκε ότι, επιμηκύνοντας το κάθετο ηλεκτρόδιο, που συνδεόταν στο κάτω άκρο του αλεξικέραννου, προέκυψαν μικρότερα δυναμικά, ενώ η βελτίωση φθίνει όταν το βάθος του ξεπερνάει τα 4m.

Όταν αυξήθηκε το βάθος της βάσης στήριξης προέκυψαν σαφώς καλύτερα αποτελέσματα αλλά όχι σε βαθμό να αντισταθμιστεί το κόστος της αλλαγής αυτής.

Τέλος, εξετάζοντας συνδυαστικά την επιμήκυνση του κάθετου ηλεκτροδίου και την τοποθέτηση 4 επιπλέον κάθετων ηλεκτροδίων στις γωνίες της περιμετρικής γείωσης, παρατηρήθηκε μείωση των τιμών του δυναμικού σε σχέση με την αρχική διάταξη της τάξης του 60% με 95%.

Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι σε μια φ/β εγκατάσταση, όπου το κάτω στρώμα έχει τιμές ειδικής αντίστασης μικρότερες από το επάνω, καλό θα είναι το κάθετο ηλεκτρόδιο που συνδέεται στο κάτω άκρο του αλεξικέραννου να φτάνει σε κάποιο ικανό βάθος (ώστε να εισέλθει στο στρώμα με την χαμηλή ειδική αντίσταση) και για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα να τοποθετούνται περισσότερα (π.χ. 4 επιπλέον κατακόρυφα ) ηλεκτρόδια στις γωνίες της περιμετρικής γείωσης, τα οποία να φτάνουν κι αυτά σε κάποιο ικανό βάθος (ώστε να εισέλθουν στο στρώμα με την χαμηλή ειδική αντίσταση) μέσα στο έδαφος, για να επιτευχθεί η μείωση τόσο της αντίστασης προσγείωσης όσο και των αναπτυσσόμενων δυναμικών.

### **Υλικό κατασκευής του βραχίονα στήριξης του αλεξικέραννου**

Σε αυτήν την περίπτωση προσομοιώθηκαν και συγκρίθηκαν το απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) με μονωτικό βραχίονα στήριξης του αλεξικέραννου, το απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα στήριξης και το μη απομονωμένο ΣΑΠ.

Για εδάφη με ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος  $1000\Omega\text{m}$  και ειδική αντίσταση δεύτερου στρώματος  $100\Omega\text{m}$  παρατηρήθηκε πως, όταν τα αποτελέσματα λαμβάνονταν σε σταθερή απόσταση από τη φ/β διάταξη, υψηλότερες τιμές δυναμικού είχε το απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου, ενώ το απομονωμένο ΣΑΠ με αγωγίμο βραχίονα και το μη απομονωμένο ΣΑΠ εμφάνιζαν παρόμοια συμπεριφορά, με ελαφρώς καλύτερη αυτή του μη απομονωμένου ΣΑΠ. Επιπλέον, σε σταθερή απόσταση  $1\text{m}$  από το αλεξικέραυνο, για το απομονωμένο ΣΑΠ με αγωγίμο βραχίονα προέκυψαν χαμηλότερες τιμές δυναμικού.

Στα εδάφη με ειδική αντίσταση πρώτου στρώματος  $100\Omega\text{m}$  παρατηρήθηκε ότι, τα τρία ΣΑΠ είχαν παρόμοια αποτελέσματα.

Όσον αφορά τις τάσεις επαφής, την καλύτερη συμπεριφορά είχε το μη απομονωμένο σύστημα, ενώ τα άλλα δύο είχαν παρόμοια συμπεριφορά.

### **ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ**

Αρχικά, προτείνεται, σαν επέκταση της παρούσας εργασίας, να γίνουν επιπλέον προσομοιώσεις με περισσότερα κεραυνικά ρεύματα για τα απομονωμένα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Επιπλέον, καλό θα ήταν να μελετηθούν περισσότερες δομές εδαφών για την περίπτωση που δοκιμάστηκε να επεκταθεί το κάθετο ηλεκτρόδιο, που συνδέεται με το κάτω άκρο του αλεξικέραυνου, σε μεγαλύτερο βάθος στο έδαφος. Επίσης, άλλη μια ενδιαφέρουσα πρόταση για περαιτέρω μελέτη είναι να εξεταστεί η συμπεριφορά της φ/β εγκατάστασης σε συνθήκες ηλιοφάνειας. Τέλος, προτείνεται η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς του απομονωμένου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας με αγωγίμο βραχίονα στήριξης του αλεξικέραυνου για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του.





## Βιβλιογραφία

- [1] Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη, 'Μελέτη κεραυνικών πληγμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα', Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2015
- [2] Τιτσινίδου Μαρία, 'Σχεδιασμός και μελέτη φωτοβολταϊκών συστημάτων', Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ., 2010
- [3] Δώδα Σοφία, 'Εξομοίωση φωτοβολταϊκού συστήματος διασυνδεδεμένου στο δίκτυο χαμηλής τάσης', Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2010
- [4] Ράπτη Πολίνα Αναστασία, 'Μελέτη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος', Διπλωματική Εργασία, Σύρος, 2014
- [5] Παπακωνσταντίνου Χ. Κωνσταντίνος, 'Μελέτη διαστασιολόγησης και ενσωμάτωσης στο δίκτυο φωτοβολταϊκών – αποθηκευτικών συστημάτων υπό το θεσμό της ιδιοκατανάλωσης', Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2015
- [6] Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, 'Φωτοβολταϊκά συστήματα από τη θεωρία στην πράξη', Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2013
- [7] ΚΑΠΕ, Οδηγίες για την εγκατάσταση φ/β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις, 2009
- [8] Λιανός Γ. Ιωάννης, 'Διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 500 kWp με χρήση trackers', Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2012
- [9] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 'Φωτοβολταϊκά – Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός', 2011
- [10] Αναστάσιος Δεληγιάννης, 'Υπολογισμός υπερτάσεων λόγω κεραυνών σε συνδέσεις εναέριων γραμμών – υπογείων καλωδίων', Διπλωματική Εργασία, Πάτρα
- [11] Hewitt G. Paul, 'Οι έννοιες της Φυσικής', Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 2005
- [12] Φασουλιώτης Χ. Γεώργιος, 'Μελέτη γείωσης σε υποσταθμό υψηλής τάσης', Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2014
- [13] Παπαδημητρίου Γ. Κωνσταντίνος, 'Καταγραφή – Επεξεργασία πληγμάτων κεραυνών στο δίκτυο υψηλής τάσης της Κύπρου στο διάστημα 2000 - 2010', Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2013
- [14] Ιωάννης Α. Σταθόπουλος, 'Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989
- [15] Ζήρα Γαβριήλ, 'Μελέτη σφαλμάτων από κεραυνούς σε δίκτυα μέσης τάσης', Διπλωματική Εργασία, Πάτρα
- [16] Ανδρέας Δημητρίου, Χαράλαμπος Α. Χαραλάμπους, 'Τεχνικό εγχειρίδιο αντικεραυνικής προστασίας & προστασίας από υπερτάσεις για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις υπαίθριου χώρου', Πανεπιστήμιο Κύπρου
- [17] Παύλος Ν. Νικολαΐδης, 'Αντικεραυνική προστασία φωτοβολταϊκών συστημάτων', Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2012

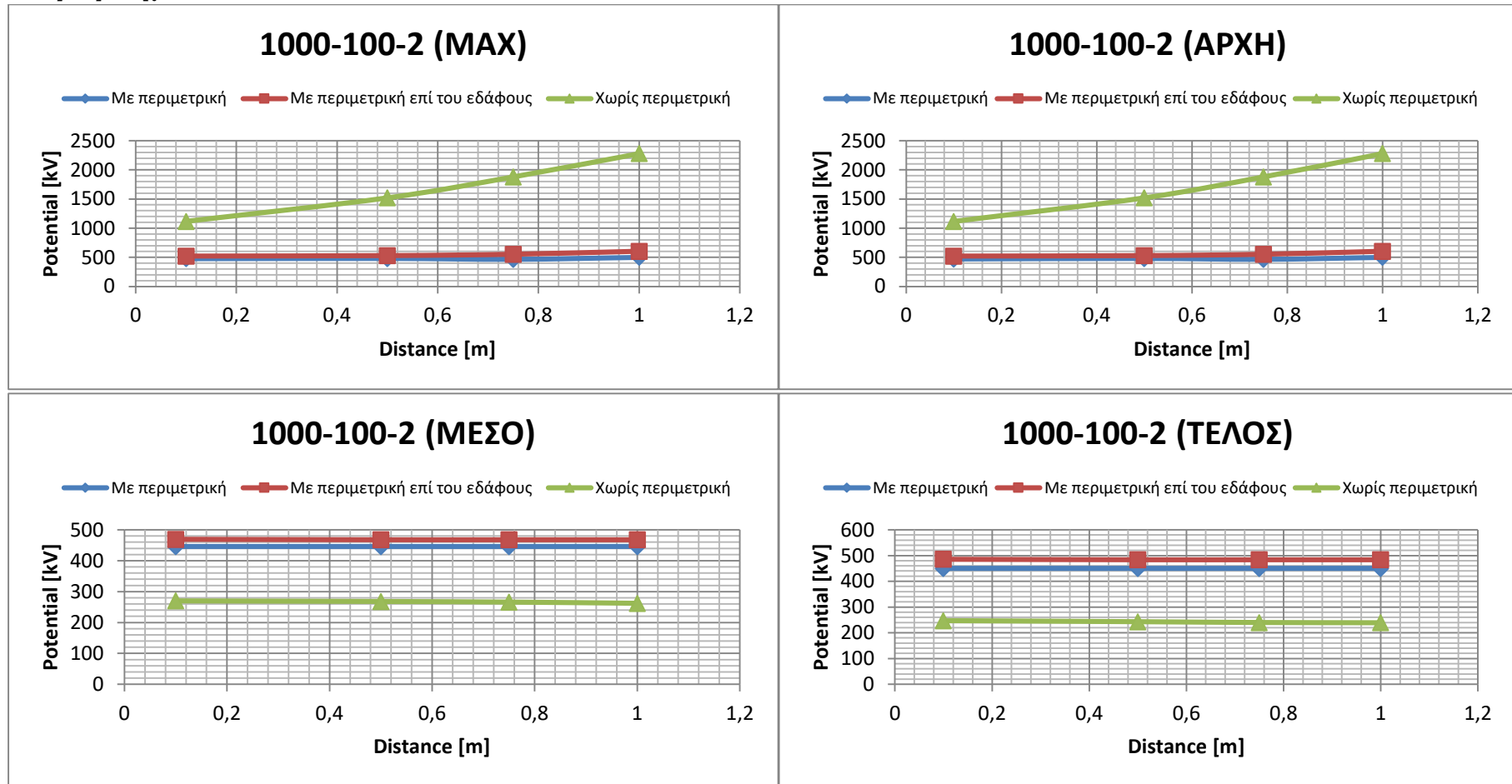
- [18] Παντελής Ν. Μικρόπουλος, ‘Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας’, Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Α.Π.Θ., 2006
- [19] ΕΛΟΤ 1197, ‘Προστασία από κεραυνούς’, 2002
- [20] Χαράλαμπος Παπαδάκης, ‘Μετρήσεις αντιστάσεων γείωσης σε πειραματικές εγκαταστάσεις’, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα
- [21] Σωτήριος Πογιατζής, ‘Υπερτάσεις σε φωτοβολταϊκά συστήματα που επάγονται από κεραυνούς’, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα
- [22] Τόκας Δημήτριος, ‘Μελέτη διατάξεων γείωσης με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων’, Διπλωματική Εργασία, Κοζάνη, 2012
- [23] Δήμητρα Π. Βάρλα, ‘Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης’, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2004
- [24] Καρακίτσιος Ιωάννης, ‘Επίδραση βελτιωτικών υλικών εδάφους στη χρονική μεταβολή της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων’, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2011
- [25] Άρτεμης Πουντουρέλη, ‘Μελέτη μη συμβατικών γειώσεων’, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2014
- [26] Ιωάννης Φ. Γκόνοσ, ‘Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης’, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., 2002
- [27] IEEE Std 81-1983, ‘IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system’, 11 March 1983
- [28] I.F. Gonos, I. Stathopoulos, ‘Estimation of Multi -Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms’, IEEE Power Engineering Society – 2004 General Meeting, Denver, USA, June 6-10, 2004
- [29] I.F. Gonos, V.T. Kontargyri, I.A. Stathopoulos, ‘Determination of Two Layer Earth Structure Parameters’, XVII International Conference on Electromagnetic Disturbances EMD, Bialystok, Poland, September 2007
- [30] C.A. Christodoulou, V.T. Kontargyri, K. Damianaki, A.C. Kyritsis, I.F. Gonos, N.P. Papanikolaou, ‘Lightning performance study for photovoltaic systems’, The 19<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015
- [31] Nikolaos Kokkinos, Nicholas Christofides, Charalambos Charalambous, ‘Lightning Protection Practice for Large-Extended Photovoltaic Installations’, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012
- [32] Z. Benesova, R. Haller, J. Birkl, P. Zahlmann, ‘Overvoltages in Photovoltaic Systems Induced by Lightning Strikes’, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012
- [33] Giovanni Luca Amicucci, Fabio Fiamingo, ‘Lightning Risk to Photovoltaic Power Generating Systems’, Prevention Today, Vol. 5, no. 1/2, 51-65, 2009
- [34] [www.hiwtc.com](http://www.hiwtc.com)
- [35] [www.solimpeks.com](http://www.solimpeks.com)
- [36] [www.kanoda.com](http://www.kanoda.com)
- [37] [www.renewableenergymagazine.com](http://www.renewableenergymagazine.com)
- [38] [www.elemko.gr](http://www.elemko.gr)

[39] [www.sanlev.gr](http://www.sanlev.gr)

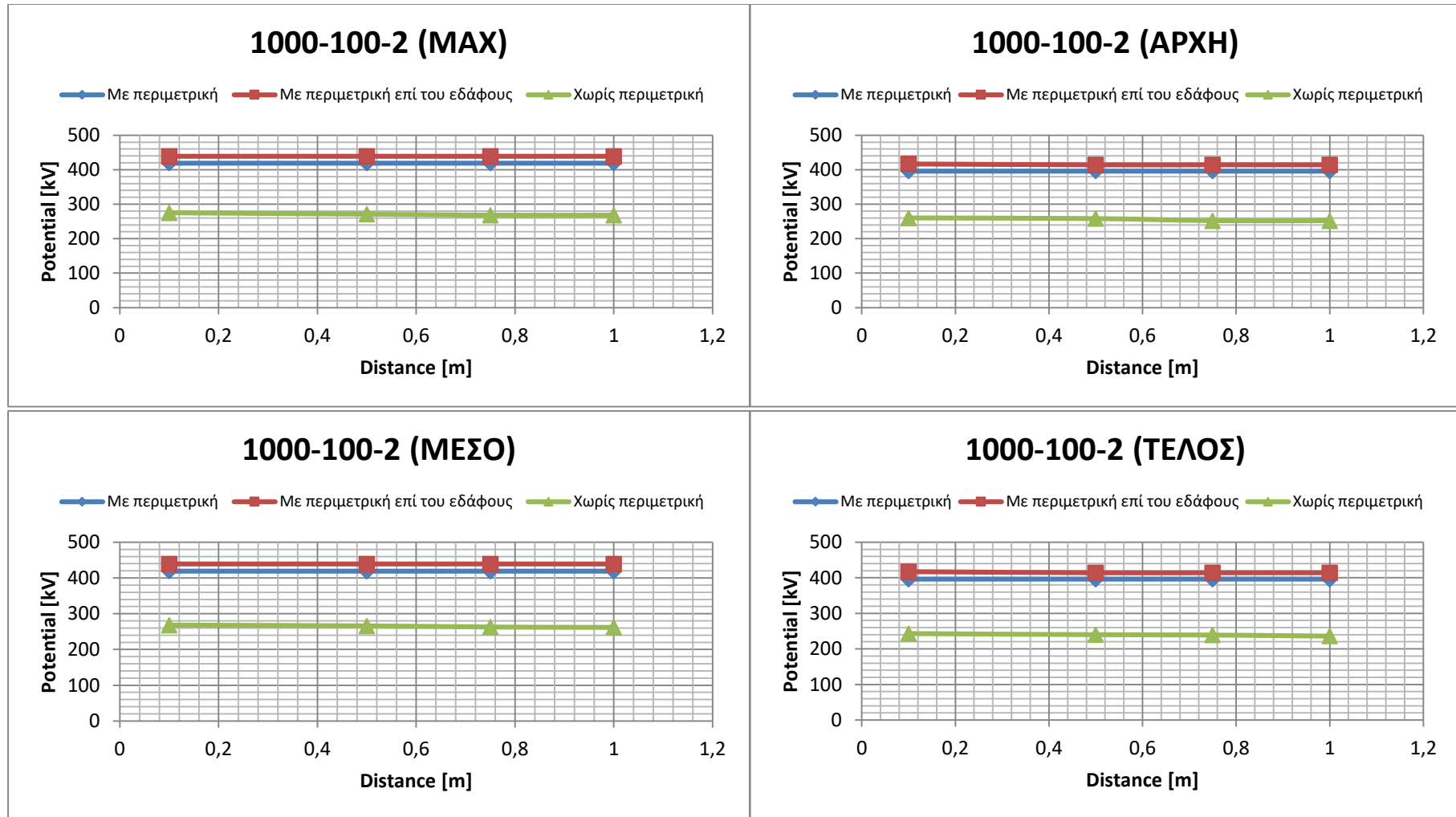
[40] [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)



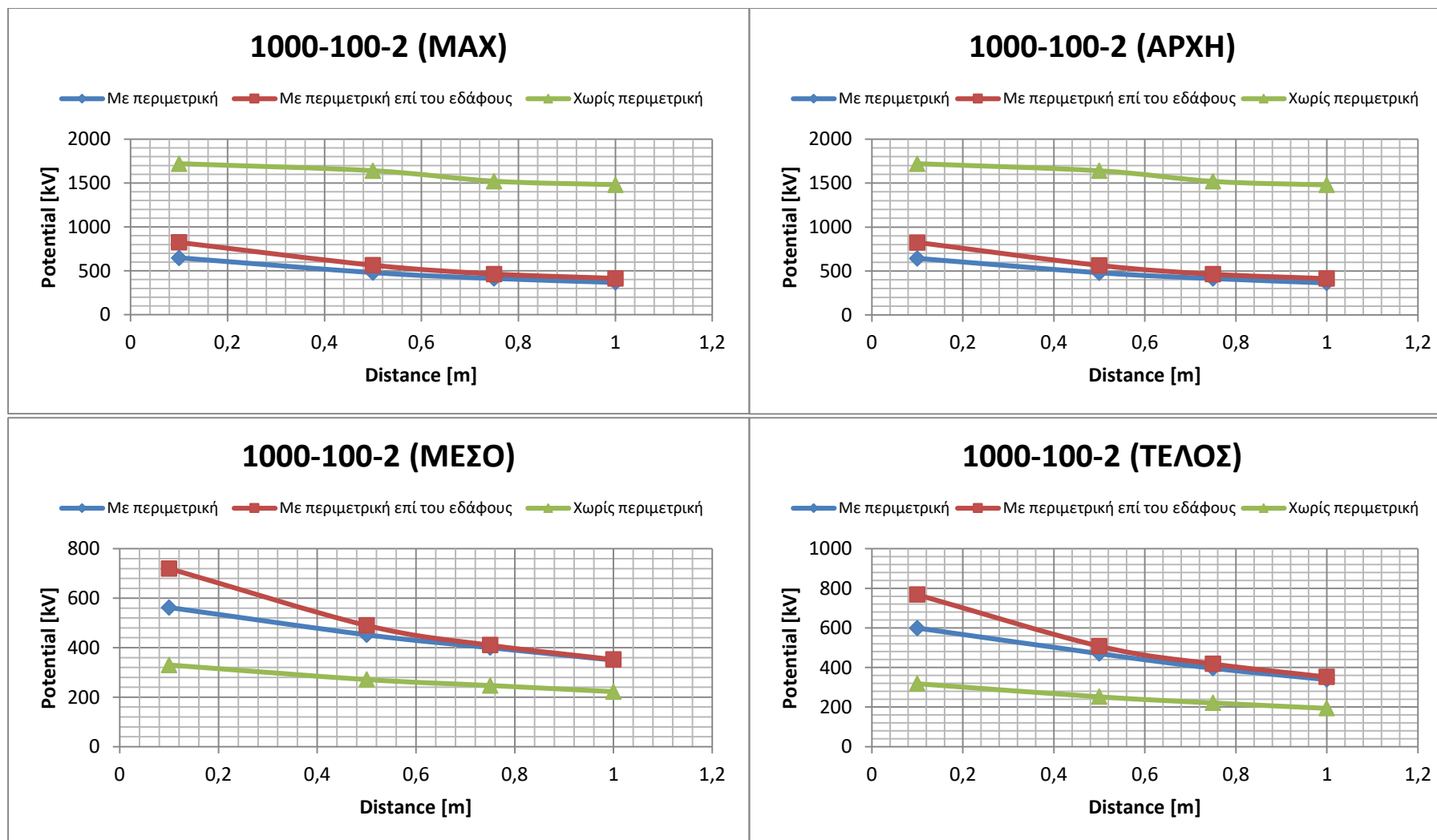
## Παράρτημα Α



**Σχήμα Α-1** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).



**Σχήμα Α-2** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

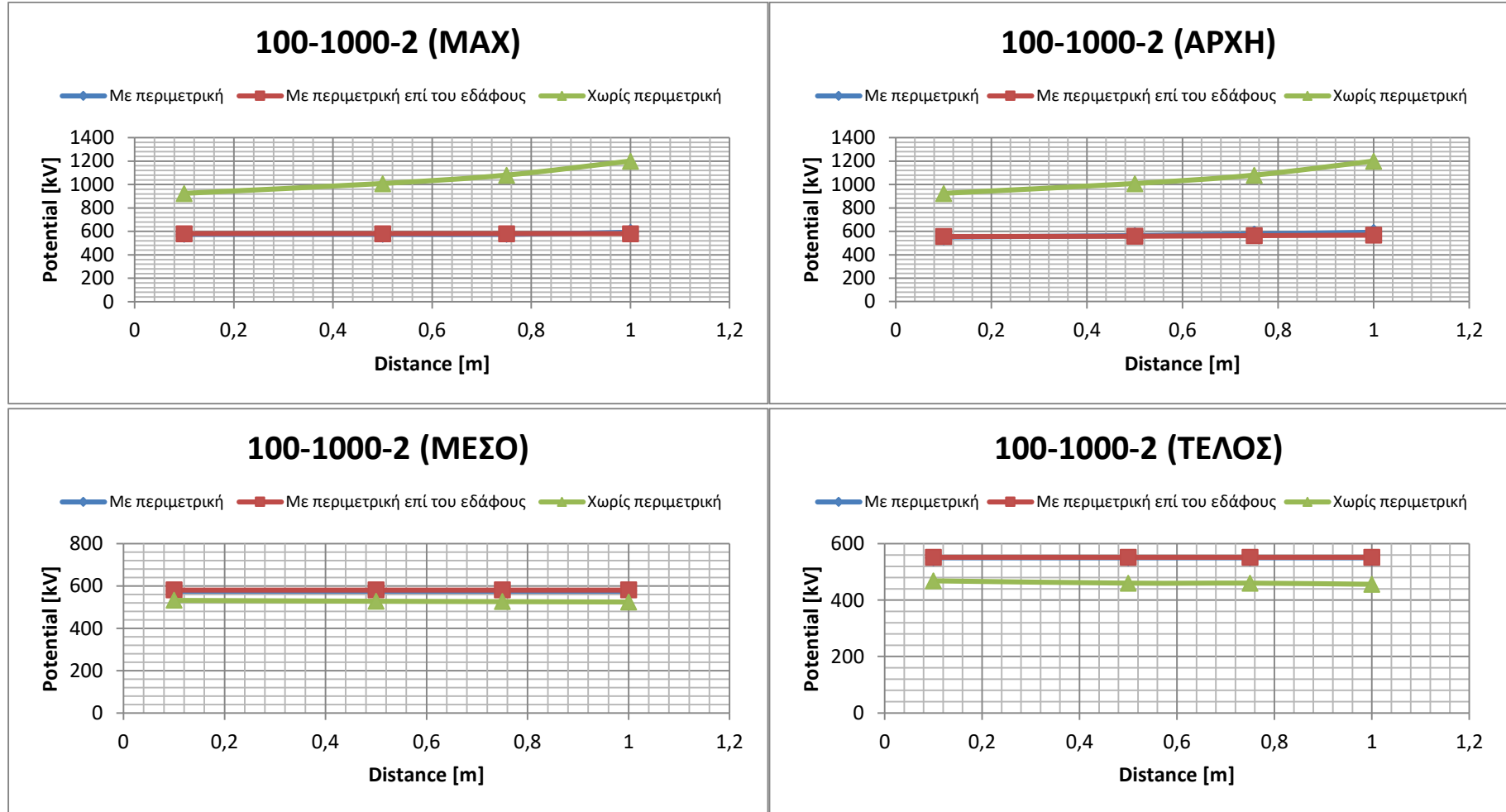


**Σχήμα Α-3** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

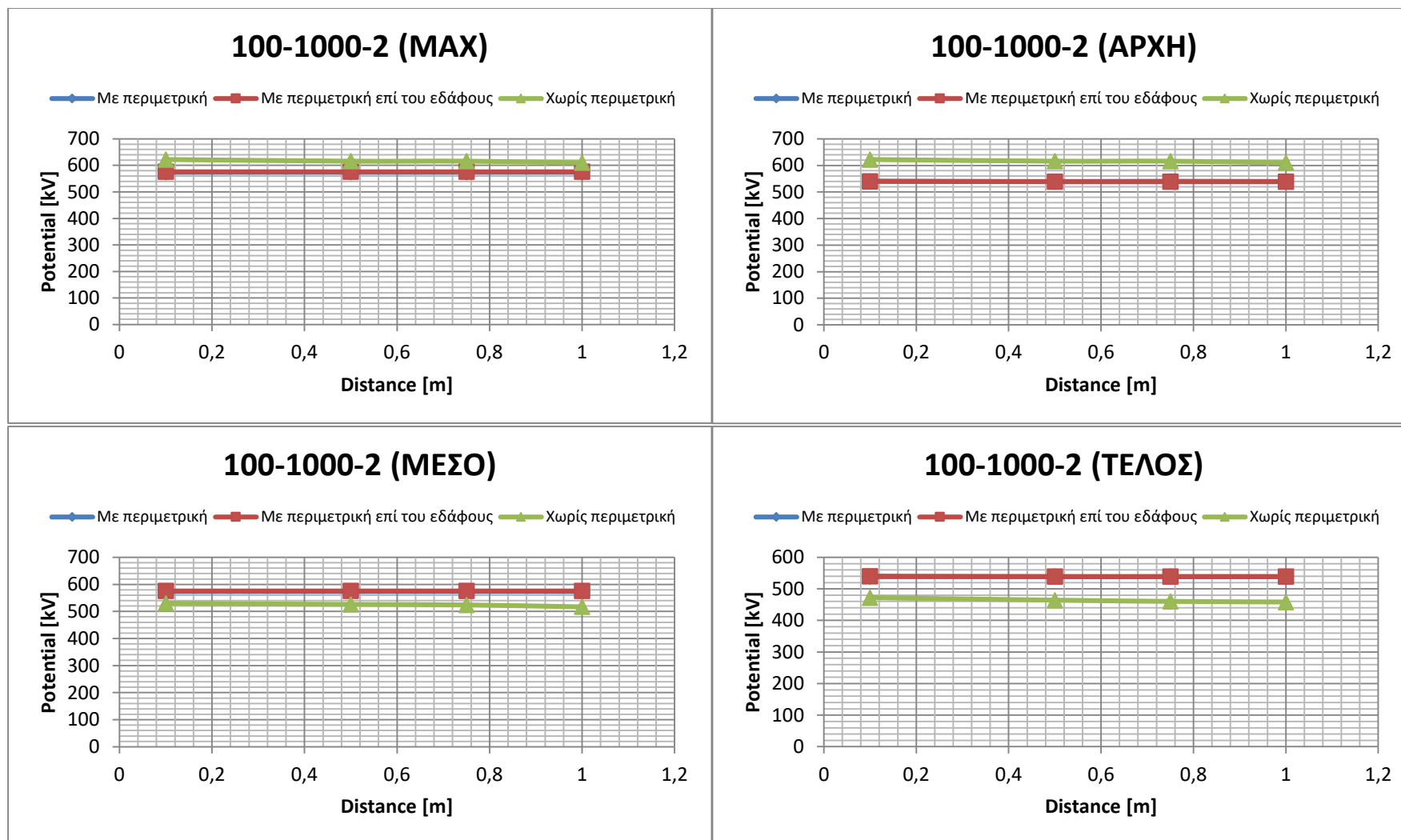




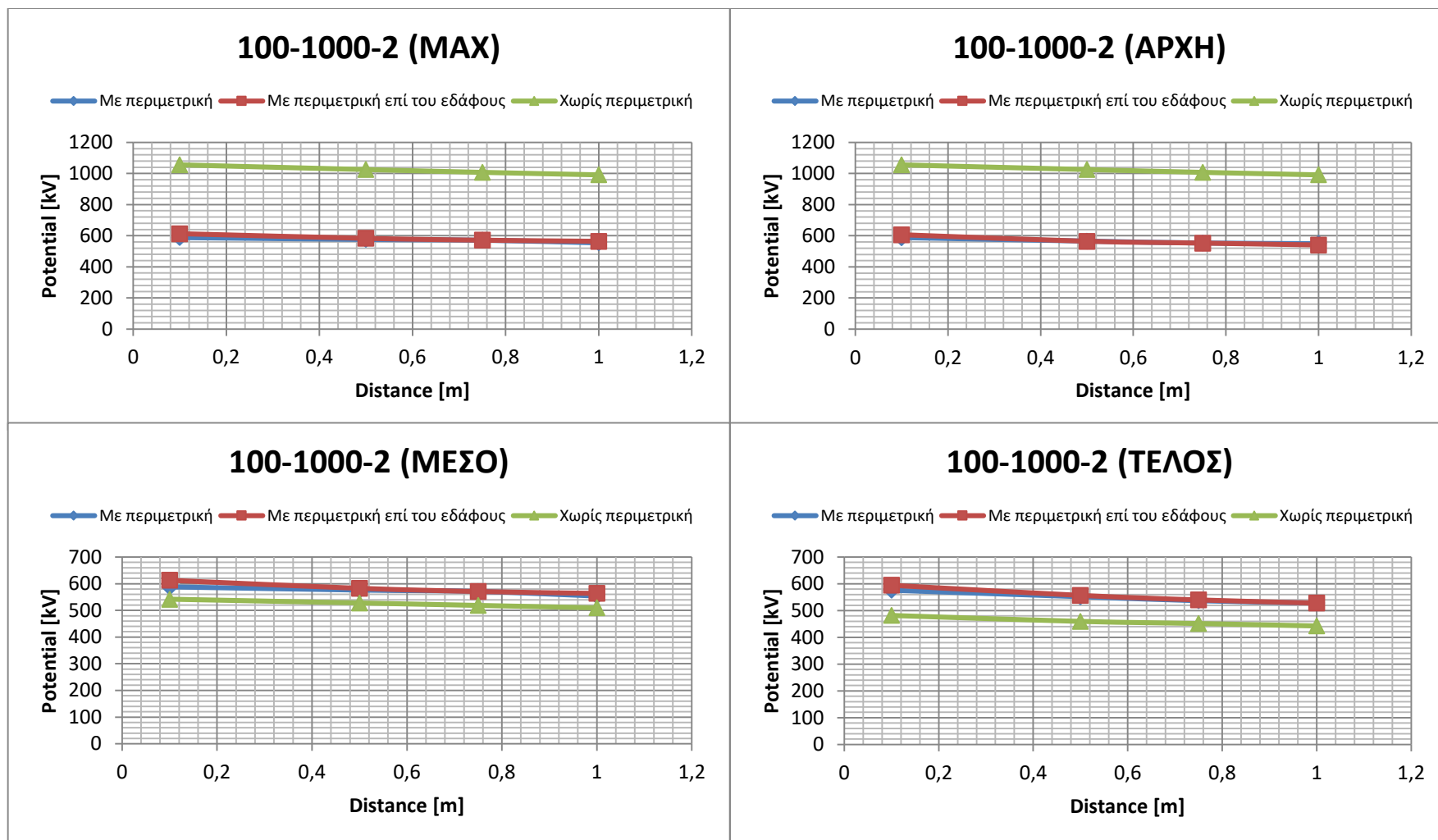
## Παράρτημα Β



**Σχήμα Β-1** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).



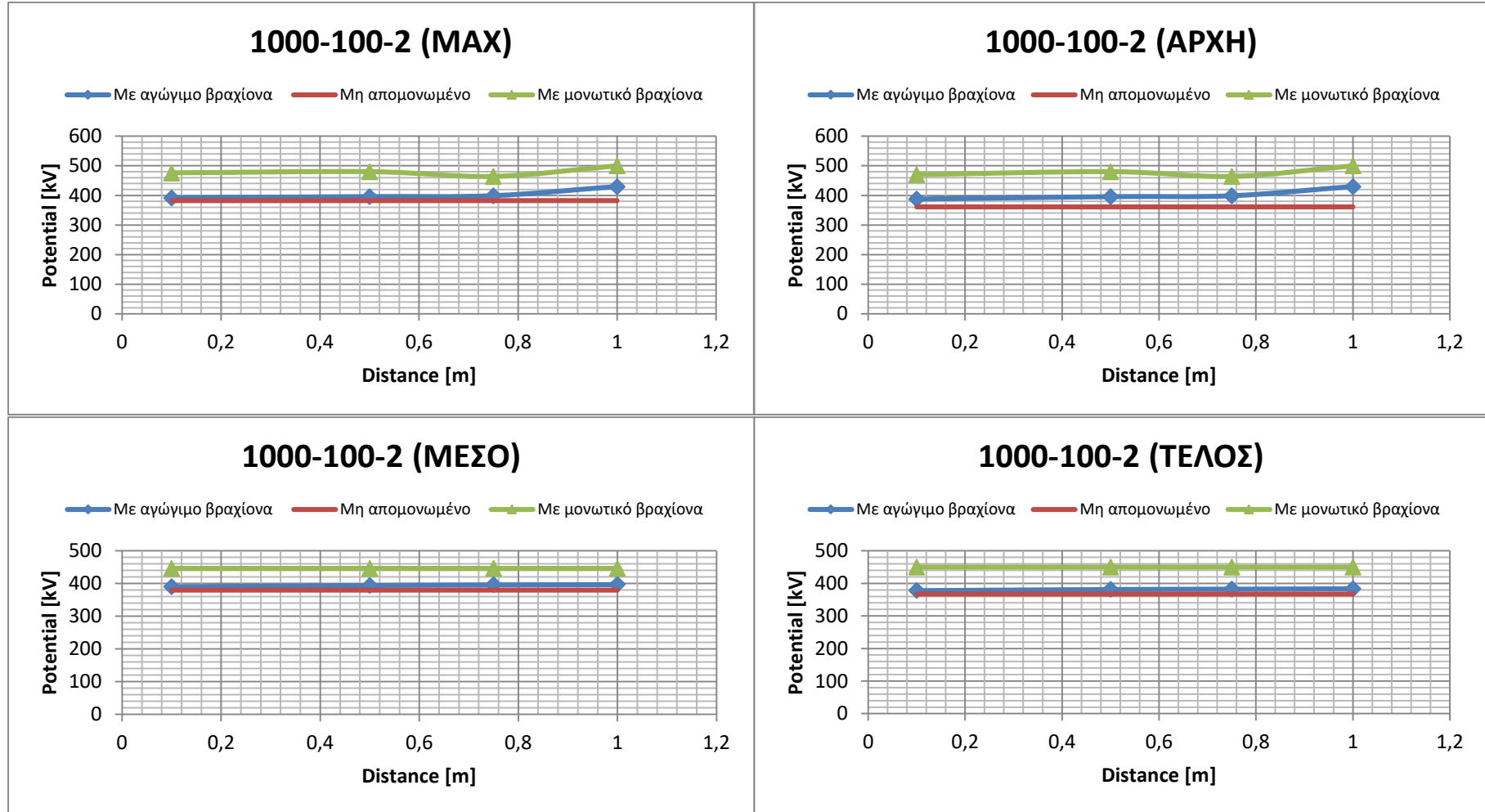
**Σχήμα Β-2** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (MEΣO) και στο τέλος της (TEΛOΣ).



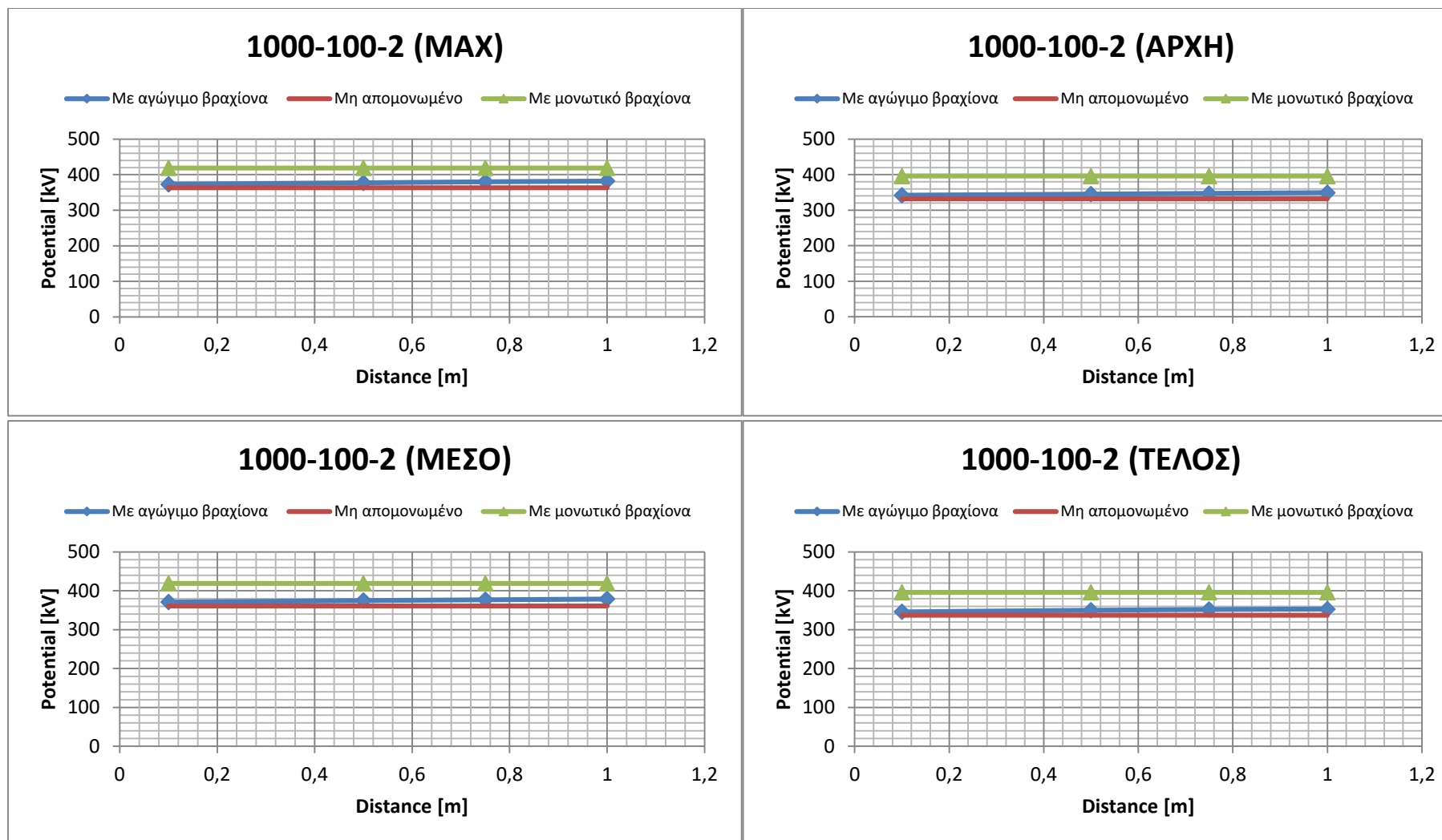
**Σχήμα Β-3** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέρανου και της ύπαρξης ή μη περιμετρικής γείωσης, για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).



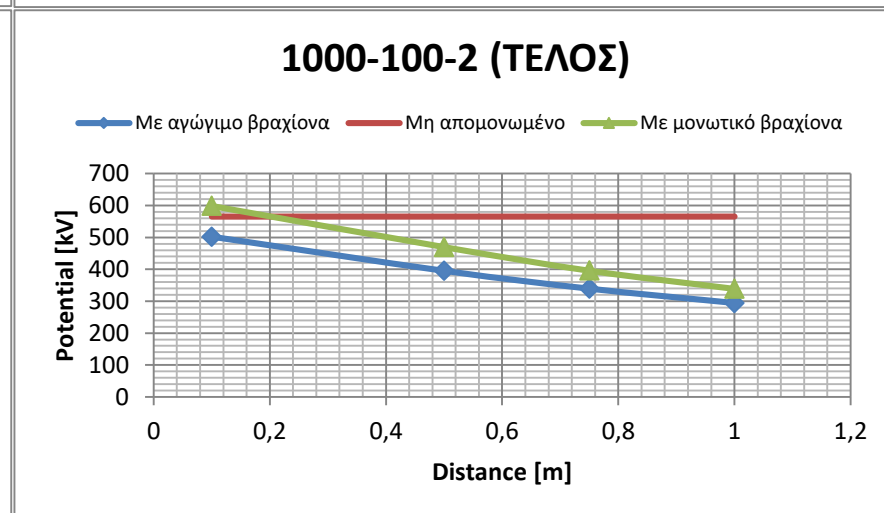
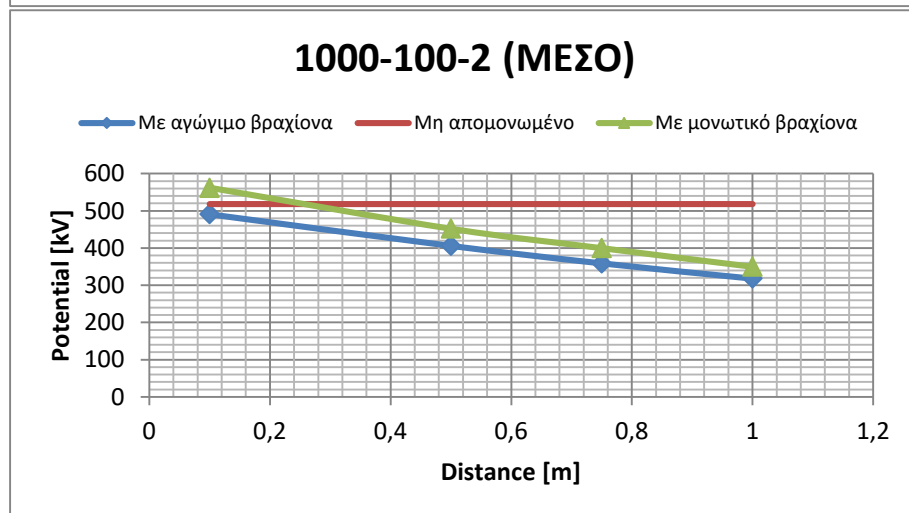
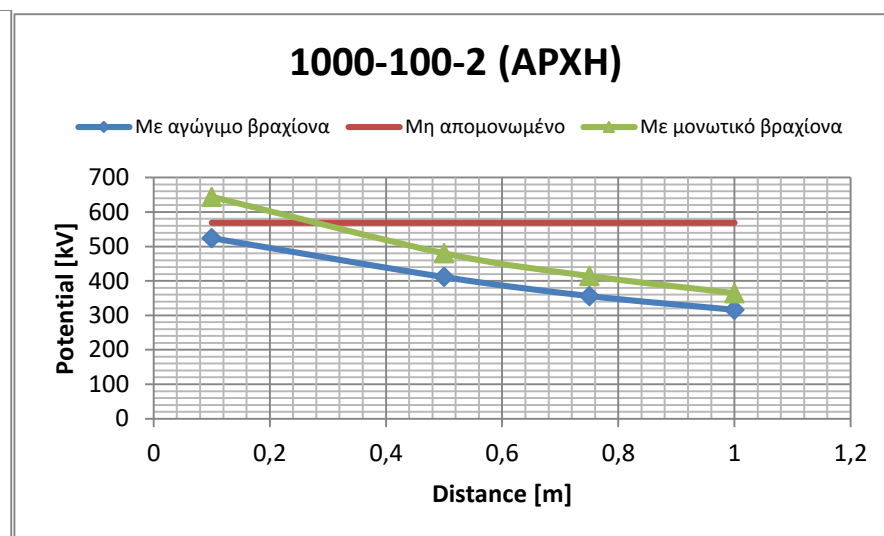
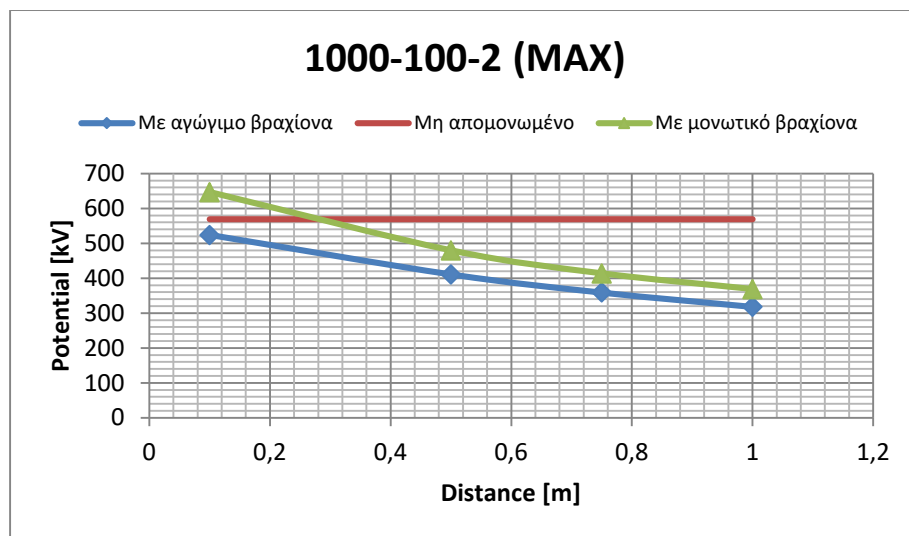
## Παράρτημα Γ



**Σχήμα Γ-1** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).



**Σχήμα Γ-2** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

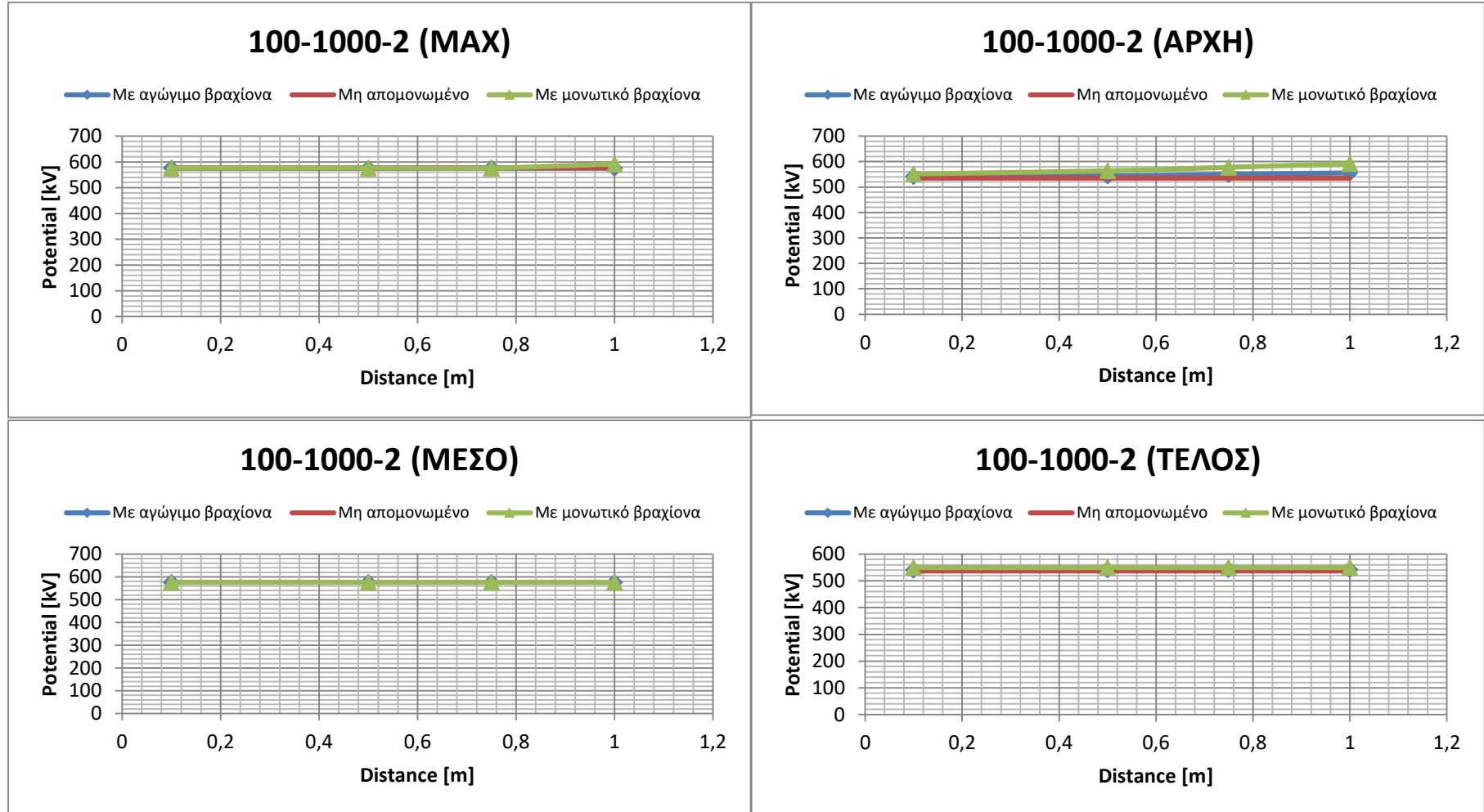


**Σχήμα Γ-3** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 1000-100-2, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).

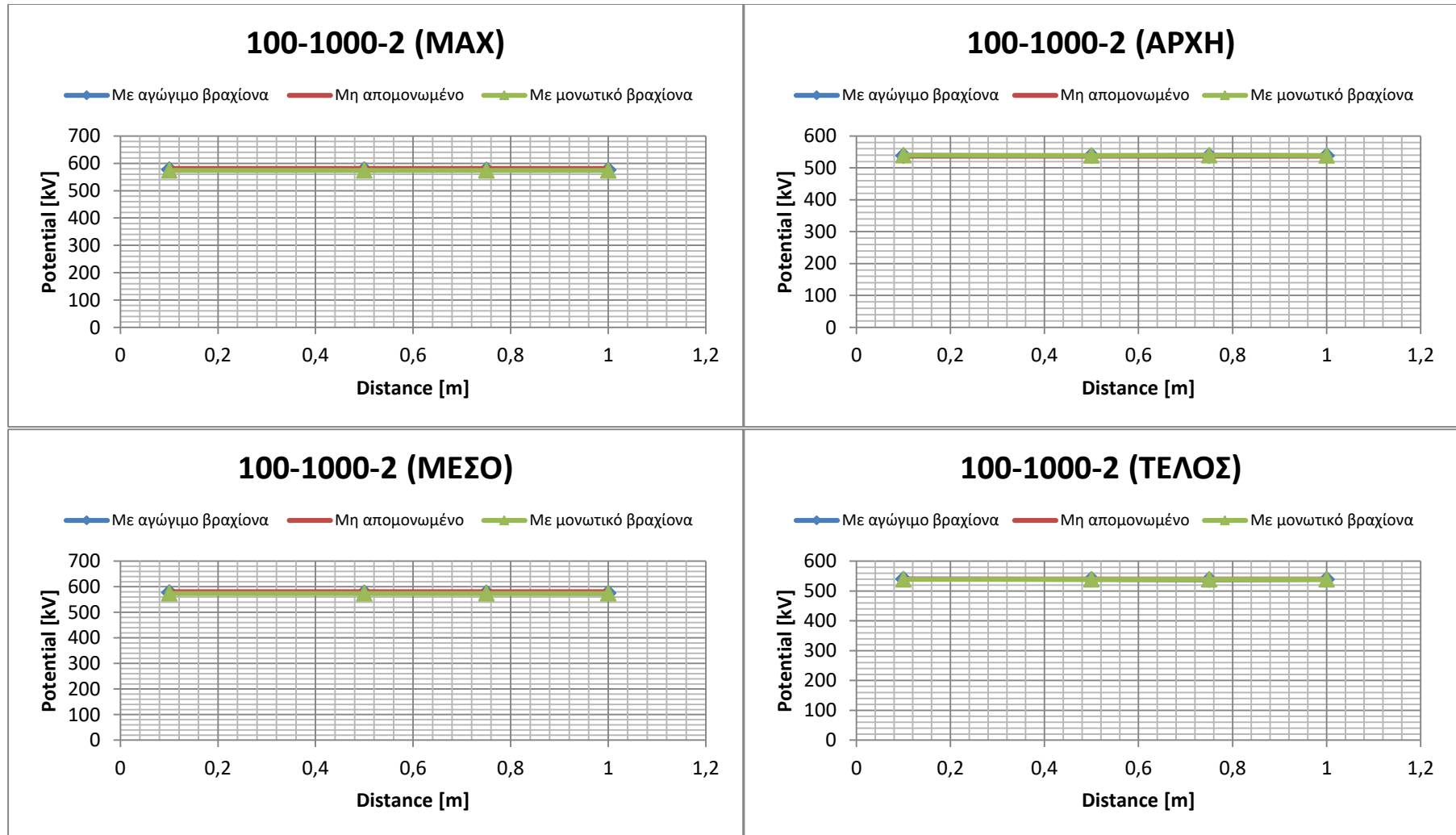




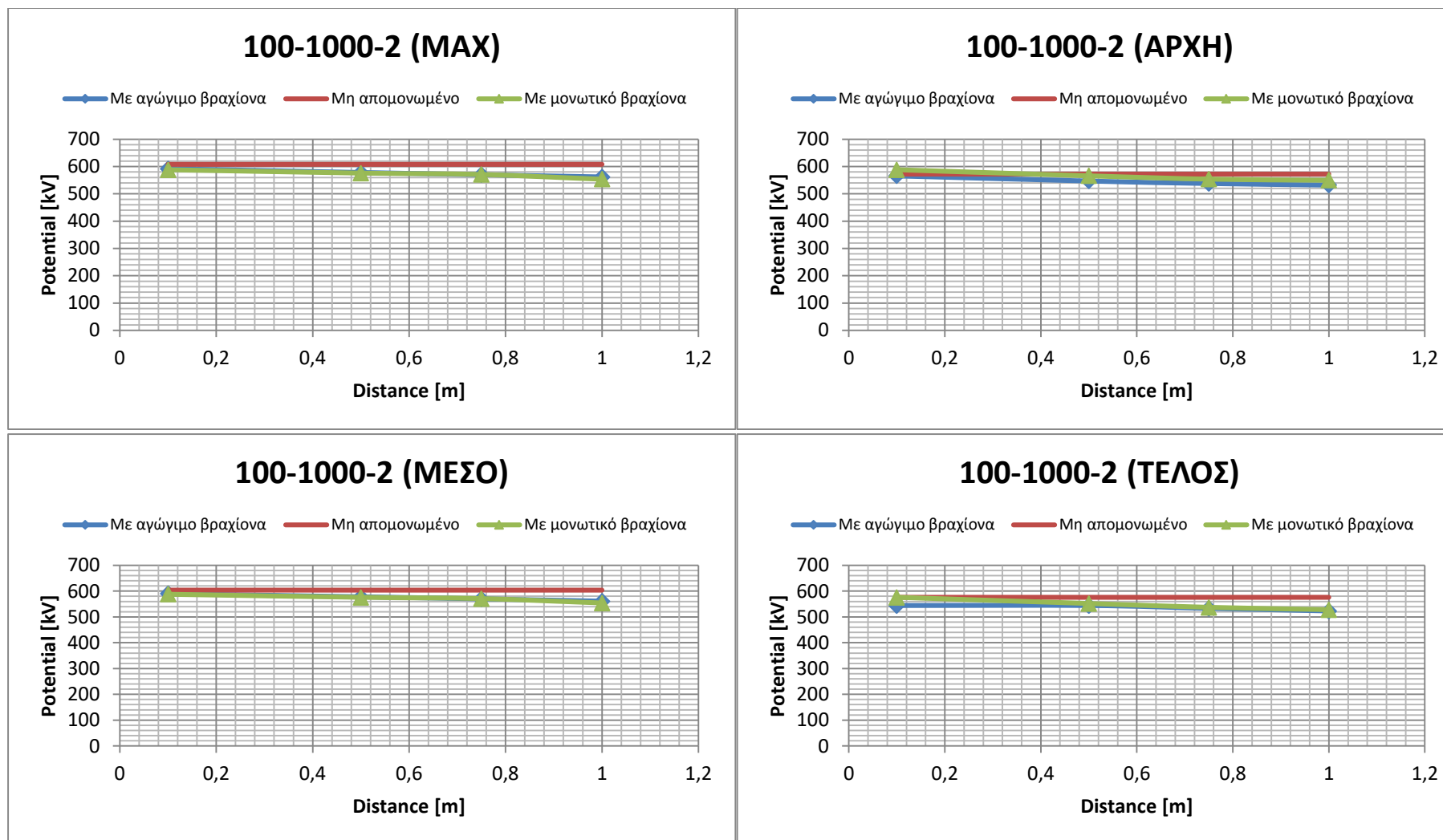
## Παράρτημα Δ



**Σχήμα Δ-1** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 1. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 1 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (ΑΡΧΗ), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).



**Σχήμα Δ-2** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέρανου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 2. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 2 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (ΜΕΣΟ) και στο τέλος της (ΤΕΛΟΣ).



**Σχήμα Δ-3** Δυναμικό συναρτήσει της απόστασης του αλεξικέραυνου για απομονωμένο ΣΑΠ με αγώγιμο βραχίονα, για μη απομονωμένο ΣΑΠ και για απομονωμένο ΣΑΠ με μονωτικό βραχίονα, για το έδαφος 100-1000-2, στο profile 3. Μέγιστη τιμή δυναμικού στο profile 3 (MAX), μέγιστο δυναμικό που αναπτύσσεται στην αρχή της διάταξης (APXH), στη μέση (MESO) και στο τέλος της (TELOS).