



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΣΕΩΝ Z-R ΜΕ ΧΡΗΣΗ RAINSCANNER ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Αθηνά Παππά

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

**Ανάλυση σχέσεων Z-R με χρήση Rainscanner στην περιοχή
της Αττικής**

Αθηνά Παππά

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Μάρτιος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου θα ήθελα να ευχαριστήσω αυτούς που με στήριξαν.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, για την ανάθεση του θέματος, την διαρκή καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ τα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Επιτροπής, κ. Αναστάσιο Στάμου και κ. Κωνσταντίνο Νουτοόπουλο για τις σημαντικές επισημάνσεις και διορθώσεις τους.

Ευχαριστώ ακόμη, τους ερευνητές του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ) κ. Κ. Λαγουβάρδο και κ. Β. Κοτρώνη για την παροχή των δεδομένων των υδρομετεωρολογικών σταθμών του δικτύου ΝΟΑΝΝ.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης να απευθύνω στον υποψήφιο Διδάκτορα Απόλλωνα Μπουρνά, για την καθημερινή ενασχόληση του, τη συμβολή του στην επίλυση των προβλημάτων που εμφανίστηκαν, αλλά και τη βοήθεια στη συγγραφή του συγκεκριμένου τεύχους, το οποίο δεν θα είχε περατωθεί χωρίς την συνεισφορά του.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου για την συνεχή ενθάρρυνση και υποστήριξη που μου παρείχαν. Ξεχωρίζω από τον μακρύ κατάλογο αυτών των ανθρώπων και ευχαριστώ με θέρμη τη φίλη μου Βασιλική που μου στάθηκε ειλικρινά και ανιδιοτελώς.

Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου, Τατιάνα και Χρήστο, για την αμέριστη συμπαράσταση, την υλική και ηθική υποστήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη των σχέσεων ανακλαστικότητας και έντασης βροχής, Z-R, μέσω της σύγκρισής τιμών βροχόπτωσης που μετρήθηκαν από υδρομετεωρολογικούς σταθμούς με τις τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις ενός υδρομετεωρολογικού radar, εφαρμόζοντας μια σειρά από διεθνείς χρησιμοποιούμενες σχέσεις Z-R. Τα δεδομένα που επεξεργάστηκαν αφορούν καταγραφές ενός X-Band τύπου rainscanner, εγκατεστημένο στο εργαστήριο υδατικών πόρων και περιβάλλοντος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) ενώ τα δεδομένα σταθμών παρέχονται από το δίκτυο NOANN του Εθνικού Αστεροσκοπείου, για μια περιοχή που ορίζεται από την εμβέλεια του Rainscanner, η οποία είναι τα 50km από την θέση του radar στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας Αττικής.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων του rainscanner, δηλαδή τον ποιοτικό έλεγχο των δεδομένων και την εξαγωγή των αντίστοιχων χρονοσειρών βροχόπτωσης για κάθε σταθμό από τα κανονικοποιημένα δεδομένα του rainscanner. Το δεύτερο μέρος αφορά την στατιστική σύγκριση των χρονοσειρών βροχόπτωσης που μετρήθηκαν από τους σταθμούς με αυτές που προκύπτουν από τις μετρήσεις του rainscanner για τέσσερις γνωστές σχέσεις Z-R και μίας σχέσης Z-R που υπολογίστηκε μέσω βελτιστοποίησης για κάθε σταθμό. Τέλος, έγινε σύγκριση των στατιστικών δεικτών και με χρονοσειρές rainscanner που προέκυψαν μέσω υπολογισμού της ανακλαστικότητας για μεγαλύτερων διαστάσεων κελιά για κάθε σταθμό.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δείχνουν πως τα δεδομένα rainscanner είναι καλά συσχετισμένα με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών, καθώς η πλειοψηφία των σταθμών έχει συντελεστή συσχέτισης άνω του 0.70. Επιπλέον, οι βιβλιογραφικές σχέσεις εφαρμόζονται ικανοποιητικά στα δεδομένα και αναδεικνύεται η χωρική μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει τις παραμέτρους τους. Τέλος, οι βελτιστοποιημένες σχέσεις καθώς και η διεύρυνση των διαστάσεων των κελιών δεν βελτίωσαν σημαντικά τα αποτελέσματα. Η παραπάνω μελέτη επιβεβαιώνει πως τα δεδομένα του

rainscanner για την πλειοψηφία των Z-R σχέσεων εκτιμούν ικανοποιητικά το πεδίο βροχόπτωσης και τεκμηριώνουν την εύρυθμη λειτουργία του.

Λέξεις κλειδιά: Z-R, υδρομετεωρολογικό ραντάρ, meteorological radar, Z-R analysis, Attica, radar rain gauge assimilation

ABSTRACT

This research work focuses on the investigation of the Z-R relationship impact on radar rainfall estimates, based on the correlation between the radar data and the actual rain gauge measurements in the region of Attica, Greece. The radar reflectivity values are obtained by a newly installed X-Band radar system, Rainscanner, operated by the Laboratory of Hydrology and Water Resources Management of the National Technical University of Athens (NTUA), while the rain gauge measurements are provided by the National Observatory of Athens Automatic Network (NOANN).

The methodology followed in this work is applied into two layers. First, the given datasets are assessed and convert into a compatible for comparison form with the given gauge rainfall measurements. Secondly, a statistical analysis is being made on four well-known Z-R relationships, as well as, a Z-R relationship derived by calibrating the parameter values, in order to provide with the spatial distribution of the optimal Z-R relationship in the area. Finally, a methodology for assessing the pixel size impact of the Rainscanner reflectivity values was also applied.

The results show that the majority of the rain gauge stations, 33, have a correlation index above 0.70, which is acceptable, while 8 stations have a correlation value above 0.90. Concerning the four Z-R relationships used, the well-known Marshall-Palmer relationship $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ is considered as the optimal while a spatial distribution of the Z-R relationships is obvious since stations near the coast and those near the Rainscanner location have the same Z-R relationship. Finally, the Z-R relationship derived by calibrating the a and b parameters impact do not show significant improvements in either case and as such, a well-known Z-R relationship is considered acceptable for the entire area, while the rainscanner pixel size only improve the correlation by a small margin and as a result it is suggested that the loss spatial detail for increased correlation is not advised.

These findings show that the Rainscanner estimates are correctly calibrated, considering radar errors, since there is a good approximation between the estimates and the actual rainfall values.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6
EXECUTIVE SUMMARY	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Εισαγωγή	14
1.2 Αντικείμενο Εργασίας	16
1.3 Διάρθρωση Εργασίας	16
2. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΡΑΝΤΑΡ	18
2.1 Εισαγωγή.....	18
2.2 Η Εξίσωση Ραντάρ.....	21
2.3 Η σχέση Z-R.....	25
2.4 Πηγές σφαλμάτων.....	27
2.4.1 Γενικά περί σφαλμάτων μετεωρολογικού radar.....	27
2.4.2 Κακή ρύθμιση των μονάδων λειτουργίας του radar (calibration)	28
2.4.3 Εξασθένιση του σήματος από την ατμόσφαιρα	29
2.4.4 Ανώμαλη μετάδοση της δέσμης και ήχοι από το ανάγλυφο του εδάφους (groundclutter).....	30
2.4.5 Αύξηση μεγέθους του παλμικού όγκου και του ύψους μέτρησης σε σχέση με την απόσταση.....	30
2.4.6 Μετακίνηση του πεδίου βροχής.....	31
2.4.7 Σφάλματα οφειλόμενα στην χρονική δειγματοληψία των στοιχείων του ραντάρ.....	32
2.4.8 Μεταβλητότητα στη Z-R εκθετική σχέση ανάλογα με την κατανομή των καταιγίδων από επεισόδιο σε επεισόδιο ή ακόμα και στο ίδιο επεισόδιο	32
2.4.9 Μεταβολές στο κατακόρυφο προφίλ ανακλαστικότητας (VPR)	34

2.5	Περιγραφή Σαρωτή Βροχής του ΕΜΠ	35
3.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ	40
3.1	Εισαγωγή	40
3.2	Γεωμορφολογικά και Κλιματικά Χαρακτηριστικά της Περιοχής Μελέτης	40
3.3	Δίκτυο Υδρομετεωρολογικών Σταθμών.....	42
3.4	Δεδομένα Ραντάρ.....	43
3.5	Επεισόδιο Βροχής	44
4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	47
4.1	Επεξεργασία Δεδομένων.....	49
4.2	Καθορισμός κριτηρίων επιλογής Z-R σχέσης.....	55
4.2.1	Συντελεστής συσχέτισης	56
4.2.2	Απόλυτο, μεροληπτικό σφάλμα και συνολικό ύψος βροχής.....	58
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	60
5.1	Υπολογισμός στατιστικών δεικτών και επιλογή σταθμών	60
5.2	Προσδιορισμός σχέσης Z-R ανά σταθμό, μέσω βελτιστοποίησης ..	66
5.3	Σύνθεση κριτηρίων για την εύρεση της βέλτιστης σχέσης Z-R.....	66
5.4	Διαδικασία εκτίμησης βέλτιστης Z-R για μεμονωμένους σταθμούς.....	69
5.4.1	Σταθμός: Πειραιάς.....	70
5.4.2	Σταθμός: Αθήνα.....	72
5.4.3	Σταθμός: Ιπποκράτειος Πολιτεία	74
5.4.4	Σταθμός Υμηττός – Δάφνη	76
5.4.5	Σταθμός Μαλακάσα	78
5.5	Σύγκριση βέλτιστης βιβλιογραφικής σχέσης Z-R και σχέσης που εξήχθη μέσω βελτιστοποίησης	80
5.6	Συγκριτική ανάλυση χωρικού μεγέθους κελιού ανά σταθμό	83

5.7	Αποτελέσματα συγκριτικής μελέτης κελιών μεμονωμένων σταθμών	84
5.7.1	Σταθμός Αμπελόκηποι	84
5.7.2	Σταθμός Μαρούσι	85
5.7.3	Σταθμός Πειραιάς – Παιδαγωγική	87
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	89
6.1	Σύνοψη	89
6.2	Συμπεράσματα	90
6.3	Μελλοντική Έρευνα.....	91
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93

EXECUTIVE SUMMARY

This research work focuses on the investigation of the Z-R relationship impact on radar rainfall estimates, based on the correlation between the radar data and the actual rain gauge measurements in the region of Attica, Greece. Radar rainfall estimates offer increased spatial detail compared to the traditionally used gauge measurements and as such, they are useful to a large number of applications such as weather monitoring, storm tracking and rainfall-runoff modeling. However, increased uncertainty is found with these measurements due to problems that arise with the use of radar systems, such signal loss or noise but mainly by the impact of the Z-R relationship used, which converts the reflectivity values into rainfall intensity. In this study, the radar reflectivity values are obtained by a newly installed X-Band radar system, Rainscanner, operated by the Laboratory of Hydrology and Water Resources Management of the National Technical University of Athens (NTUA), while the rain gauge measurements are provided by the National Observatory of Athens Automatic Network (NOANN), which features a total of 56 rain gauge stations in the prefecture of Attica. As such, the study area of this work is the prefecture of Attica and specifically the area within the Rainscanner system range, which measures 50km from its installation location, while, the rainfall event examined in this work occurred on the 17th December 2018.

The methodology followed in this work is done into two layers. First, a framework is applied in order to assess the given datasets and convert them into a compatible for comparison form, since the Rainscanner reflectivity values pertain to 2min time scale raster datasets of reflectivity values with pixel size 100m whereas the rain gauge measurements pertain to 10min point rainfall measurements. Moreover, a methodology was applied in order to identify the pixel location of the rain gauge stations within the Rainscanner raster datasets and extract the reflectivity time series of these pixel cells. Then, by accumulating the time steps from 2min to 10min, the result of this analysis is a complete time series of reflectivity

values for each rain gauge station at a 10minute time scale, compatible with the given gauge rainfall measurements.

The second part asses the statistical analysis of the Z-R relationships. Specifically, a total of four well-known Z-R relationships were assessed, as well as, a Z-R relationship derived by calibrating the parameter values, in order to provide with the spatial distribution of the optimal Z-R relationship in the area. The criteria based upon which the optimal relationship is being made were the correlation index, the Normalized Mean Absolute Error (NMAE) the Normalized Mean Bias (NMB), as well as, the total rainfall accumulative chart. Finally, a methodology for assessing the pixel size impact of the Rainscanner reflectivity values is applied, since it is known that the Rainscanner measurements are made in high altitude compared to the actual altitude of the gauge stations which result in different amount as well as time step of the measured rainfall. To address this issue, an aggregation of the Rainscanner datasets is being made, into larger pixel cells sized 500m, which would accommodate for the needed time of the water drops measured to fall from the sky.

The results show that among the 42 stations the majority of the stations, 33, have a correlation index above 0.70 which is acceptable, while 8 stations have a correlation value above 0.90. These findings show that the Rainscanner estimates are correctly calibrated, considering radar errors, since there is a good approximation between the estimates and the actual rainfall values. Concerning the four Z-R relationships used, the well-known Marshall-Palmer relationship $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ is considered as the optimal since it is the optimal among most stations. The $Z = 230 \cdot R^{1.4}$ is the optimal for 10 stations while $Z = 431 \cdot R^{1.25}$ and $Z = 140 \cdot R^{1.5}$ are optimal for 7 and 6 stations accordingly. Moreover, what is also significant is the spatial distribution of the above Z-R relationships, since it is evident that the $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ is optimal on the stations near the coast, while the $Z = 230 \cdot R^{1.4}$ is optimal for stations near the Rainscanner location. Finally, the Z-R relationship derived by calibrating the a and b parameters do not show

significant improvements and as such, a well-known Z-R relationship is considered acceptable for the entire area.

Finally, regarding the rainscanner pixel size impact, it is shown that the majority of the stations only improve by a small margin and as a result it is suggested that the loss spatial detail for increased correlation is not advised.

Future research should include applying the followed methodology to a set of rainfall events, with same or different rainfall characteristics, such as stratiform or convective storms and conducting a complete sensitivity analysis on the spatial distribution of the a and b parameters of the Z-R relationship. Moreover, spatial interpolation of the a and b parameters of the Z-R Relationship for the entire study area would should also be performed. Finally, it is deemed that the Rainscanner datasets are well calibrated and as such they are compatible for storm tracking analysis and early warning systems deployment.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η συλλογή δεδομένων κατακρήμνισης είναι σημαντική και αναγκαία, καθώς επιτρέπει τη διεξοδική μελέτη της κίνησης των υδάτων, μπορεί να συμβάλλει στην πρόβλεψη πλημμυρικών επεισοδίων, στον σχεδιασμό έργων για την αποτροπή τους και συνεπώς στη διαχείριση των λεκανών απορροής. Η τρέχουσα πρακτική εξασφάλισης αυτών των υδρολογικών δεδομένων στηρίζεται σε μετρήσεις καταγεγραμμένες από βροχογράφους. Ένας βροχογράφος είναι σε θέση να προσφέρει δεδομένα σημειακής βροχόπτωσης υψηλής ακρίβειας, ωστόσο τα δεδομένα αυτά αναφέρονται και συνεπώς περιορίζονται στη στενή περιοχή του κάθε βροχογράφου, γεγονός που μπορεί να κριθεί μερικώς ακατάλληλο για τη σωστή διαχείριση των λεκανών απορροής. Σε ένα καλά οριοθετημένο δίκτυο βροχογράφων οι μετρήσεις θα μπορούσαν να δώσουν δεδομένα μεγαλύτερης αξιοπιστίας, παρ' όλα αυτά το πρόβλημα προσέγγισης των τιμών βροχόπτωσης που αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες περιοχές, μεταξύ των σταθμών παραμένει, καθώς η χωρική μεταβλητότητα δεν μπορεί να αποτυπωθεί επαρκώς. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι τηλεσκοπικής παρατήρησης και μέτρησης του πεδίου βροχής. Οι κυριότερες είναι οι μετρήσεις radar, και οι μετρήσεις μέσω δορυφόρων.

Ο όρος radar προέρχεται από την σύντμηση των λέξεων Radio Detection and Ranging και η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη δυναμική θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που διατυπώθηκε το 1865 από τον Σκωτσέζο Θεωρητικό Φυσικό James Clerk Maxwell (1831-1879). Στη συνέχεια ο Γερμανός φυσικός Heinrich Hertz (1887-1888) βασιζόμενος στην προηγούμενη θεωρία και μετά τη διεξαγωγή πλήθους πειραμάτων απέδειξε ότι όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ραδιοκύματα) εστιασθούν σε μία δέσμη με τη χρήση κατάλληλων ανακλαστήρων μπορούν να ανακλαστούν όταν προσπέσουν σε σώματα διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς από αυτή του αέρα. Το radar ως ολοκληρωμένο σύστημα πρωτοεμφανίζεται κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου από το πολεμικό ναυτικό των ΗΠΑ για

την κάλυψη πολεμικών αναγκών, με την ανάπτυξη μικρού μήκους κύματος με κατευθυνόμενες κεραιές. Μεταξύ άλλων παρατηρήθηκε πως κατά την διάρκεια βροχής ή χιονόπτωσης οι καταγραφές radar εμφάνιζαν αυξημένο βαθμό θορύβου που ήταν αποτέλεσμα την απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα υδροσταγονίδια. Έτσι μετά τον πόλεμο οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην ανάλυση των δεδομένων αυτών με σκοπό την χρήση της τεχνολογίας radar για τον εντοπισμό καιρικών συστημάτων και μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων (Marshall et al., 1947).

Τα μετεωρολογικά ραντάρ αποτελούν το κατάλληλο εργαλείο περιγραφής της χωρικής και χρονικής μεταβολής του πεδίου της βροχής (Wilson, 1976). Παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την πρόγνωση και εκτίμηση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως χαλαζοπτώσεις, ισχυρές καταιγίδες, ανεμοστρόβιλοι, τυφώνες και ισχυροί άνεμοι. Η εφαρμογή τους επεκτείνεται ειδικότερα στον τομέα της μετεωρολογίας, της υδρομετεωρολογίας, όπου σε συνδυασμό με υδρομετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται εντός της εμβέλειας ανίχνευσης τους είναι σε θέση να παρέχουν το ύψος βροχής και κατά συνέπεια να συντελούν στην πρόβλεψη πιθανών πλημμυρών. Έτσι τέτοια radar συχνά χρησιμοποιούνται στην υπηρεσία της πολιτικής προστασίας για τις εξαγγελίες προειδοποιήσεων ή συμβουλών σχετικά με πιθανά ακραία καιρικά φαινόμενα παρέχοντας την δυνατότητα άμεσης πρόγνωσης (nowcasting), δηλαδή της εποπτικής παρακολούθησης των πραγματικών καιρικών συνθηκών αλλά και τη δυνατότητα βραχυχρόνιων προγνώσεων (short term forecasts).

Μολονότι το radar πλεονεκτεί έναντι των βροχογράφων σε θέματα ακριβέστερης χωρικής κατανομής υστερεί αρκετές φορές στην ακρίβεια των τιμών ανακλαστικότητας, λόγω της εμφάνισης συστηματικών αλλά και τυχαίων σφαλμάτων. Παράγοντες όπως η εξάτμιση των υδροσταγονιδίων, κτίσματα και άλλα φυσικά εμπόδια, όπως η μορφολογία των βουνών εντός της περιοχής εμβέλειας του radar μπορούν να αποτελέσουν πηγές σφαλμάτων για τις παραγόμενες μετρήσεις. Ειδικότερα, επειδή το ανακλώμενο σήμα που μετράται από το radar είναι ανάλογο με το άθροισμα της έκκτης δύναμης των

διαμέτρων των σταγονιδίων βροχής, για δεδομένο ατμοσφαιρικό όγκο είναι εμφανές ότι μικρές μεταβολές στο μέγεθος των υδροσταγονιδίων έχουν δραματική επίδραση στην εκτίμηση ανακλαστικότητας του radar.

Γενικότερα όμως, η εξασφάλιση υδρολογικών δεδομένων υψηλής χωρικής και χρονικής ακρίβειας αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων και ειδικά τα δεδομένα radar ενδείκνυνται για εφαρμογές όπως η ανάλυση κίνησης καταιγίδων, storm tracking, την εφαρμογή μοντέλων βροχής-απορροής για την εκτίμηση του πλημμυρικού πεδίου σε πραγματικό χρόνο και εν γένει σε εφαρμογές που αφορούν την έγκαιρη προειδοποίηση έναντι πλημμυρών, early warning systems.

1.2 Αντικείμενο Εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων rainscanner με σκοπό την εκτίμηση των σχέσεων $Z-R$, που συνδέουν την καταγεγραμμένη ανακλαστικότητα με την ένταση βροχής. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο βροχομετρικού σταθμού για το σύνολο της περιοχής μελέτης και για ένα επεισόδιο βροχής. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε μεθοδολογία σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, σχετικά με την επεξεργασία των δεδομένων radar, καθώς και εφαρμογής $Z-R$ σχέσεων με σκοπό τη σύγκριση των εξαγόμενων χρονοσειρών με τις χρονοσειρές των βροχομετρικών σταθμών και να εξαχθούν σχετικά συμπεράσματα όπως η χωρική κατανομή της βέλτιστης σχέσεις $Z-R$ καθώς και επίπτωση της χωρικής ακρίβειας των δεδομένων radar.

1.3 Διάρθρωση Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής 6 κεφάλαια:

- Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μια εισαγωγή στις μεθόδους καταγραφής βροχής και ιδιαίτερα αυτής του μετεωρολογικού radar. Επιπλέον στο ίδιο κεφάλαιο αναλύεται το αντικείμενο της εργασίας και η διάρθρωσή της.
- Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων radar, αναλύονται οι σχέσεις $Z-R$ και γίνεται εκτενής

αναφορά στα τυχόν σφάλματα και προβλήματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις. Τέλος γίνεται αναφορά στο σύστημα Rainscanner του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου από όπου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα.

- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στην περιοχή μελέτης και στα διαθέσιμα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.
- Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σχετικά με την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων rainscanner και από τους βροχογράφους
- Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων σχετικά με τη σύγκριση των σχέσεων $Z-R$.
- Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

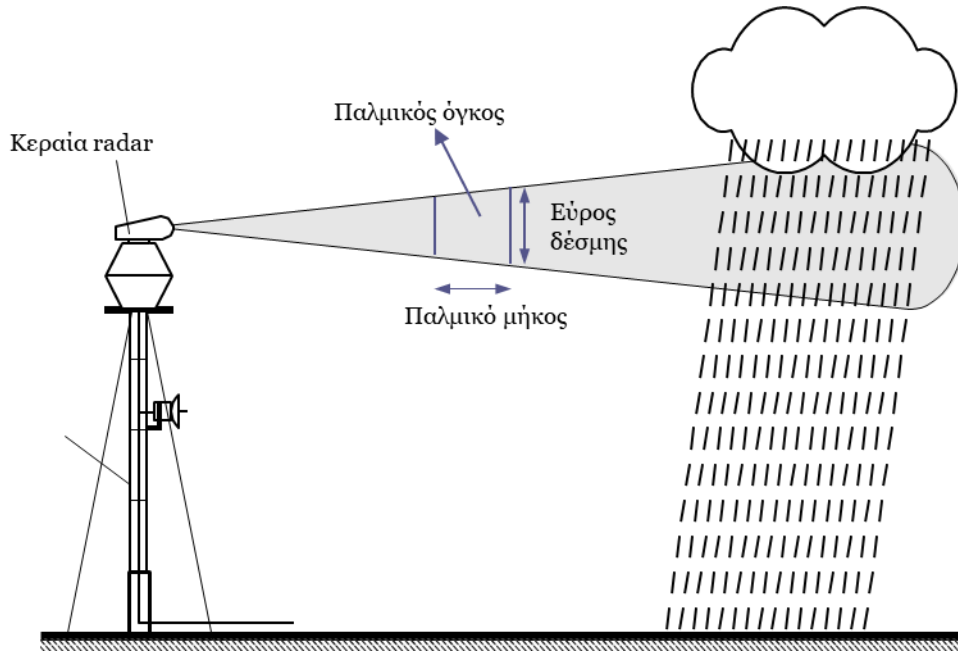
2. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΡΑΝΤΑΡ

2.1 Εισαγωγή

Το radar αποτελεί μία συσκευή ανίχνευσης και παρακολούθησης ακίνητων και κινητών αντικειμένων, η παρατήρηση των οποίων είναι οπτικά αδύνατη, μέσω χρήσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Συγκεκριμένα γίνεται ακριβής υπολογισμός της απόστασης, του ύψους και της διεύθυνσης κίνησης τους μέσω της εκπομπής, τη διάδοσης, σκέδασης και της λήψης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ένα μετεωρολογικό radar έχει ως απώτερο σκοπό την ανίχνευση νεφών και τη μέτρηση της ποσότητας της βροχής, επομένως ο σχεδιασμός του έγινε με γνώμονα την ανεύρεση αντικειμένων που παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλες αυξομειώσεις στο μέγεθος και την αγωγιμότητα τους, υπό ακραίες ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως είναι τα νέφη, οι σταγόνες βροχής, το χιόνι, το χαλάζι κ.ά.

Η ένταση της ακτινοβολίας του radar εξασθενεί κατά τη μετάδοσή της στην ατμόσφαιρα μέσω των φαινομένων της σκέδασης και της απορρόφησης της ακτινοβολίας που προκαλούνται από διάφορους στόχους στην ατμόσφαιρα. Η σκέδαση της ακτινοβολίας οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλων σταγόνων βροχής, χιονιού ή χαλαζιού, τα οποία εκπέμπουν την προσπίπτουσα ενέργεια του radar σε αυτά προς κάθε κατεύθυνση. Από την άλλη η απορρόφηση ενέργειας οφείλεται κατά ένα ποσοστό επίσης σε σταγόνες βροχής, αλλά κατά κύριο λόγο στα ατμοσφαιρικά αέρια και στο έδαφος. Το ποσό της επιστρεφόμενης ενέργειας από τα υδροσταγονίδια εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων (Σάγος, 2004). Αυτοί είναι, πρώτον, οι παράγοντες που αφορούν στο κατασκευαστικό κομμάτι ενός ραντάρ όπως είναι η εμβέλεια, η ισχύς εκπομπής, η απολαβή της κεραίας και το μήκος κύματος λειτουργίας και δεύτερον η ενεργός διατομή του στόχου, το οποίο ορίζεται ως το εμβαδόν της νοητής επιφάνειας των υδροσταγονιδίων, καθώς επίσης και οι διηλεκτρικές ιδιότητες τους, το μέγεθος, η σύνθεση, το σχήμα, η θερμοκρασία, ο αριθμός τους μέσα στον παλμικό όγκο, ο οποίος ορίζεται ως το πακέτο της εκπεμπόμενης ενέργειας, καθορισμένου μήκους, το οποίο ταξιδεύει

παράλληλα με τη δέσμη ακτινοβολίας, αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα και επιστρέφει πάλι πίσω στην κεραία του ραντάρ, Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1 Απλουστευμένη αναπαράσταση του παλμικού όγκου και του εύρους δέσμης ακτινοβολίας του radar

Ο εντοπισμός απομακρυσμένων αντικειμένων, που είναι και ο πρωταρχικός στόχος λειτουργίας ενός radar, επιτυγχάνεται μέσω της εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υπό μορφή δέσμης προς την περιοχή που πρόκειται να ερευνηθεί. Η απόσταση του στόχου υπολογίζεται με τη μέτρηση του ήμισυ του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ εκπομπής του παλμού και επιστροφής του σήματος, δεδομένου ότι είναι γνωστή η ταχύτητα του σήματος, όπως εκφράζεται από την επόμενη σχέση:

$$r = \frac{c \cdot t}{2} \quad \#(2.1)$$

όπου r : απόσταση (km)

c : ταχύτητα φωτός (km/s)

t : χρόνος μεταξύ της αρχής και του τέλους της εκπομπής του παλμού (sec).

Η διεύθυνση του στόχου καθορίζεται από το αζιμούθιο και το ύψος της κεραίας από τη στιγμή που το σήμα επιστρέφει.

Τα μετεωρολογικά ραντάρ, κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το μήκος και την συχνότητα του κύματος που παράγουν βάση του πρότυπου που έχει θεοπιστεί το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) και η ITU (International Telecommunication Union), Πίνακας 2-1.

Πίνακας 2-1 Ζώνες συχνότητας ανά τύπο radar

Τύπος Radar	Εύρος συχνοτήτων (f)	Εύρος μήκος κύματος (λ)
L – Band	1 – 2 GHz	30 – 15 m
S – Band	2 – 4 GHz	15 – 7.5 cm
C – Band	4 – 8 GHz	7.5 – 3.75 cm
X – Band	8 – 12 GHz	3.75 – 2.5 cm
K – Band	18 – 27 GHz	1.67 – 1.11 cm
W – Band	75 – 110 GHz	4 – 2.73 mm

Η πλειοψηφία των μετεωρολογικών ραντάρ λειτουργεί σε μήκη κύματος από 3 έως 10cm. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τρεις τύποι radar, τα S-Band, C-Band και X-Band. Οι διαφορές των παραπάνω τύπων εντοπίζεται στο διαφορετικό μήκος κύματος της δέσμης και εν γένει στην παραγόμενη μέγιστη ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος. Συγκεκριμένα, τα S-Band radar, παράγουν σήμα με δύο έως και τρεις φορές μεγαλύτερη ισχύ από τα C-Band και τα X-Band αντίστοιχα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη εμβέλεια αυτών των συστημάτων, με τα μεν S-Band να λειτουργούν για εμβέλειες των 200km, ενώ αντίστοιχα τα C-Band και X-Band για εμβέλειες συνήθως των 100 km και 50 km αντίστοιχα. Επιπλέον, τα S-Band έχουν το πλεονέκτημα να είναι σε θέση να καταγράφουν το πλήρες αποτύπωμα μιας καταιγίδας με ισχυρή ένταση βροχής, αφού το ισχυρότερο σήμα σε συνδυασμό με το μεγαλύτερο μήκος κύματος διεισδύει περισσότερο κατά μήκος της καταιγίδας σε σχέση με τα C-Band και X-Band radar. Τα μειονεκτήματα των S-Band είναι το πολύ μεγάλο κόστος αγοράς και συντήρησης, καθώς και το μεγαλύτερο μέγεθος τους. Συγκεκριμένα, μια παραβολική κεραία ενός S-Band radar μπορεί να έχει μέχρι και 7m διάμετρο ενώ τα X-Band είναι αρκετά μικρότερα και ευέλικτα, και μπορούν να εγκατασταθούν σε κινητές μονάδες, όπως αυτοκίνητα και αεροπλάνα. Τέλος, σχετικά με τα ποιοτικά

χαρακτηριστικά, τα X-Band είναι αρκετά πιο ευαίσθητα από τα υπόλοιπα και ως αποτέλεσμα έχουν την ικανότητα να παρέχουν δεδομένα σε αρκετά μικρότερη χωρική ανάλυση, η οποία ελαχιστοποιεί και τα σφάλματα που προκαλούνται από την ηχώ της επιφάνειας του εδάφους (groundclutter).

2.2 Η Εξίσωση Ραντάρ

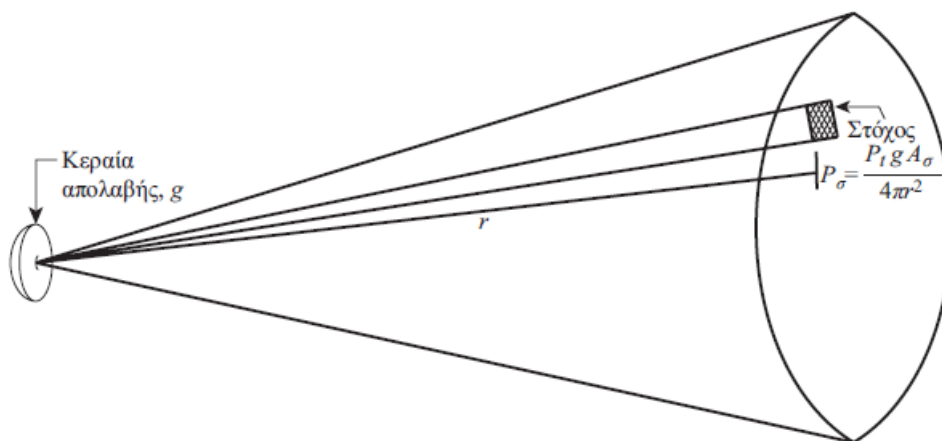
Το ποσό της ισχύος P_{σ} που επιστρέφει από στόχο καθορισμένης απόστασης από τη θέση του ραντάρ δίνεται από το γινόμενο της πυκνότητας της ισχύος στη θέση του στόχου και της επιφάνειας του στόχου A_{σ} , όπως φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2-2 και ορίζεται με τη σχέση:

$$P_{\sigma} = \frac{P_t g A_{\sigma}}{4\pi r^2} \quad \#(2.2)$$

Όπου, P_t : η μεταδιδόμενη ενέργεια,

r : η απόσταση του στόχου από το radar,

g : η απολαβή (gain) της κεραίας, ένας αδιάστατος αριθμός που μετρά τους βαθμούς συγκέντρωσης της ισχύος και δίνεται από το πηλίκο της ισχύος στη μονάδα επιφάνειας στο κέντρο της δέσμης προς την ισότροπη ισχύ στο ίδιο σημείο.



Σχήμα 2-2 Επιστρεφόμενη ισχύς, P_{σ} από στόχο καθορισμένης απόστασης r ,
(Πηγή, Μπαλτάς 2006)

Το ποσό της μεταδιδόμενης ενέργειας που επιστρέφει από τον σημειακό στόχο και αναγνωρίζεται από την κεραία του radar δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$P_r = \frac{P_t g^2 \lambda^2 A_\sigma}{64\pi^3 r^4} \quad \#(2.3)$$

Όπου A_σ : η επιφάνεια του στόχου,

λ : το μήκος κύματος του radar

Λόγω του ότι στην οθόνη του radar δεν εμφανίζεται τελικά η επιφάνεια του στόχου, δηλαδή ο όρος A_σ , ορίζεται μία νέα παράμετρος σ η οποία εκφράζει την ενεργό επιφάνεια της επιστρεφόμενης ενέργειας. Η επιστρεφόμενη επιφάνεια της διατομής εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και το υλικό που συνθέτει τον στόχο, όπως επίσης και από το μήκος κύματος. Όταν τα υδροσταγονίδια είναι μεγάλα συγκριτικά με το μήκος κύματος του radar και εφόσον η θεώρηση τους είναι σφαιρική, η επιφάνεια του στόχου που επιστρέφει ενέργεια είναι ίση με την επιφάνεια κύκλου, επομένως:

$$\sigma = \pi r^2 \quad \#(2.4)$$

Η διάκριση του μεγέθους των υδροσταγονιδίων γίνεται σύμφωνα με τον λόγο D/λ , όπου D η διάμετρος της σφαίρας και λ το μήκος κύματος. Συγκεκριμένα για διάμετρο έως και δέκα φορές το μήκος κύματος, $D/\lambda > 10$, θεωρείται μεγάλη σφαίρα υδροσταγονιδίου ενώ αντίστοιχα για διάμετρο μικρότερη του ενός δέκατου του μήκους κύματος, $D/\lambda < 1/10$, θεωρείται μικρή σφαίρα. Για μικρές σφαίρες υδροσταγονιδίων, η επιφάνεια του στόχου επιστρεφόμενης ισχύος δίνεται από την εξής σχέση:

$$\sigma = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \quad \#(2.5)$$

όπου, $|K|^2$, η παράμετρος που σχετίζεται με το υλικό του στόχου, τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος. Για συνήθεις θερμοκρασίες και υδροσταγονίδια παίρνει την τιμή 0.93, ενώ για παγοκρυστάλλους την τιμή 0.197 (Colier, 1989).

Μαθηματικά η συνολική επιστρεφόμενη ισχύς είναι το άθροισμα των επιμέρους επιστρεφόμενων ισχύων που οφείλονται στις επιμέρους διατομές, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad \#(2.6)$$

Η δέσμη θεωρείται πως ακολουθεί γκαουσιανή κατανομή (Probert-Jones, 1962) και η εξίσωση του radar (2.3) γίνεται:

$$P_r = \frac{P_t g^2 \lambda^2 \Theta \phi h \sum \sigma_i}{1024 \ln(2) \pi^2 r^2} \quad \#(2.7)$$

όπου Θ : η οριζόντια γωνία της δέσμης,

ϕ : η κατακόρυφη γωνία της δέσμης και

h : το παλμικό μήκος (ο όρος $\ln(2)$ αποτελεί διορθωτικό συντελεστή)

Μετά από αντικατάσταση της σχέσης (2.5) στην σχέση (2.7) προκύπτει:

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t g^2 \Theta \phi h |K|^2 \sum D_i^6}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \quad \#(2.8)$$

Λόγω της δυσκολίας εκτίμησης του όρου $\sum \sigma_i$ ορίζεται μία παράμετρος Z , η οποία ονομάζεται συντελεστής ανακλαστικότητας και δίνεται από την σχέση (Anderson and Burt, 1985):

$$Z = \sum D_i^6 \quad \#(2.9)$$

Επομένως πλέον η (2.8) γράφεται ως:

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t g^2 \Theta \phi h |K|^2}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} Z \quad \#(2.10)$$

Η σχέση (2.10) είναι η γενική εξίσωση του radar και εφαρμόζεται σε κάθε radar και στόχο, με τη συνθήκη ότι πληροί τις προϋποθέσεις του Rayleigh. Καθώς αρκετές μεταβλητές της εξίσωσης είναι σταθερές στο radar η εξίσωση μπορεί να δοθεί με την ακόλουθη μορφή (Georgakakos and Krajewski, 1989):

$$P_r = C_1 \frac{|K|^2 Z}{r^2} = C_2 \frac{Z}{r^2} \quad \#(2.11)$$

όπου C_2 : η σταθερά του radar.

Από την προηγούμενη σχέση είναι εμφανές ότι η επιστρεφόμενη ισχύς είναι ανάλογη της ανακλαστικότητας, Z . Καθώς η επιστρεφόμενη ισχύς είναι το μέγεθος που μετράει το radar, το ζητούμενο είναι η ανακλαστικότητα Z και άρα η (2.11) μπορεί να διατυπωθεί και ως εξής:

$$Z = P_r \frac{r^2}{C_2} \quad \#(2.12)$$

Καθώς το μέγεθος των υδροσταγονιδίων κυμαίνεται από 0.2 mm έως και 5 mm και είναι πρακτικώς αδύνατο να μετρηθεί, η ανακλαστικότητα Z των υδροσταγονιδίων μπορεί να υπολογιστεί μέσω της δεδομένης τους κατανομής, προερχόμενη από όλα τα υδροσταγονίδια:

$$Z = \sum_i N_i D_i^6 = \int N(D) D^6 dD = \int_0^\infty k(s) \quad \#(2.13)$$

όπου $N(D)$: η κατανομή των υδροσταγονιδίων,

D : η διάμετρος των υδροσταγονιδίων,

N_i : ο αριθμός των υδροσταγονιδίων με διάμετρο μεταξύ D και $D + dD$ ανά μονάδα όγκου στην ατμόσφαιρα

Η μονάδα μέτρησης της ανακλαστικότητας Z του radar είναι mm^6/m^3 . Το εύρος των τιμών που δύναται να λάβει κυμαίνεται μεταξύ του $0.001 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ για φαινόμενα ομίχλης και ασθενών νεφών έως και $50.000.000 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ για την περίπτωση ισχυρού χαλαζιού. Εξαιτίας λοιπόν του μεγάλου εύρους των τιμών ήταν απαραίτητος ο ορισμός μίας νέας παραμέτρου μέτρησης ανακλαστικότητας για τη διευκόλυνση σε υπολογιστικό επίπεδο:

$$z = 10 \log_{10} \left(\frac{Z}{1 \text{ mm}^6/\text{m}^3} \right) \quad \#(2.14)$$

όπου z : η ανακλαστικότητα σε dBZ και Z σε mm^6/m^3 .

Αυτή η μετατροπή δίνει τιμές του z από -30 dBZ για ασθενή νέφη μέχρι και 75 dBZ για ισχυρό καλάζι (Sioutas and Flokas, 2003).

2.3 Η σχέση Z-R

Η ένταση της βροχής, R , μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την κατανομή των υδροσταγονιδίων σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Krajewski and Georgakakos, 1989).

$$R = \frac{\pi}{6} \int D^3 N(D) w(D) dD \quad \#(2.15)$$

όπου $N(D)$: η κατανομή των υδροσταγονιδίων,

D : η διάμετρος των υδροσταγονιδίων,

$w(D)$: η συνάρτηση που εκφράζει την ταχύτητα των υδροσταγονιδίων.

Η αντίστοιχη έκφραση της μεταβλητής Z δίνεται από την εξίσωση (2.13). Συνεπώς, αποδεικνύεται πως οι δύο μεταβλητές Z και R είναι ανάλογες, αλλά όχι σε γραμμική μορφή, καθώς υπάρχει διαφορά ως προς τον εκθέτη της διαμέτρου των σταγονιδίων. Έχει αποδειχθεί εμπειρικά ότι η σύνδεση των προηγούμενων μεγεθών μπορεί να αποδοθεί ικανοποιητικά μέσω μιας εκθετικής σχέσης της μορφής:

$$Z = \alpha \cdot R^b \quad \#(2.16)$$

Οι τιμές των παραμέτρων α και b δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η κλιματολογία, οι διαφορετικοί τύποι βροχής κ.α. (Kessler, 1966).

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών, απαραίτητη είναι η γνώση της κατανομής των υδροσταγονιδίων κατά την διάρκεια του επεισοδίου βροχής. Αυτό είναι πρακτικά αδύνατο, και ως αποτέλεσμα έχουν αναλυθεί αρκετές εμπειρικές κατανομές που προσαρμόζονται στα δεδομένα. Οι (Marshall and Palmer, 1948) πρότειναν μία εκθετική κατανομή της μορφής:

$$N_d = N_0 e^{-\Lambda D} \quad \#(2.17)$$

Όπου N_d : ο αριθμός των υδροσταγονιδίων ανά μονάδα όγκου για ένα συγκεκριμένο μέγεθος

N_0 : η συγκέντρωση υδροσταγονιδίων στην τάξη μεγέθους 0, δηλαδή όταν η διάμετρος D τείνει στο 0

Λ : η κλίση της καμπύλης $N(D)$ σε (mm^{-1})

D : η διάμετρος των υδροσταγονιδίων σε mm

Ιδιαίτερα, ύστερα από στατιστική επεξεργασία μεγάλου δείγματος δεδομένων κατέληξαν στις τιμές $N_0 = 0.08 cm^{-4}$ και $\Lambda = 41R^{-0.21} cm^{-1}$ και στην γνωστή εμπειρική σχέση Z-R:

$$Z = 200 \cdot R^{1.6} \quad \#(2.18)$$

Η εξαγωγή τέτοιων εμπειρικών σχέσεων Z-R και πως αυτές μεταβάλλονται από καταιγίδα σε καταιγίδα, όσο και κατά την διάρκεια του επεισοδίου βροχής έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία 50 χρόνια (Doniak and Zrníc, 1984; Georgakakos, 1987). Ακριβώς επειδή δεν είναι δυνατό να διατυπωθεί μία καθολική σχέση που να είναι σε θέση να ικανοποιήσει όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα, η διακύμανση των προηγούμενων παραμέτρων a και b είναι αυτή που αντικατοπτρίζει τους διαφορετικούς τύπους κατακρήμνισης και τις διαφορετικές επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του επεισοδίου. Ο Battan (1973) αναφέρει 69 διαφορετικές σχέσεις Z-R που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές και μέχρι σήμερα ο αριθμός αυτός συνεχώς αυξάνεται (Rinehart, 1991).

Μερικές από τις ευρέως γνωστές βιβλιογραφικές διεθνείς σχέσεις που χρησιμοποιούνται αναφέρονται παρακάτω.

Ο Joss, (Joss et al., 1970) αναφέρει τις παρακάτω σχέσεις Z-R,

$Z = 140 \cdot R^{1.5}$	ασθενής βροχή (drizzle)
$Z = 250 \cdot R^{1.5}$	μεγάλη χωρική βροχή (widespread rain)
$Z = 500 \cdot R^{1.5}$	απότομη καταιγίδα (thunderstorm)

Αντίθετα, ο Austin, (Austin, 1987) παραθέτει τις παρακάτω σχέσεις ανάλογα με τον τύπο βροχής.

$$\begin{aligned} Z &= 400 \cdot R^{1.3} && \text{για επεισόδια κατακόρυφης μεταφοράς, convective} \\ Z &= 230 \cdot R^{1.4} && \text{για επεισόδια stratiform, σε συνδυασμό με} \\ &&& \text{κυτταρικές καταιγίδες - cellular} \\ Z &= 100 \cdot R^{1.4} && \text{για καθαρά μη κυτταρικές καταιγίδες - non cellular} \end{aligned}$$

Παρακάτω παρουσιάζονται επιπλέον σχέσεις που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

$$\begin{aligned} Z &= 291 \cdot R^{1.43} && \text{C - Band , (Attmannspacher and Riedl, 1977)} \\ Z &= 200 \cdot R^{1.6} && \text{X - Band , (Attmannspacher and Riedl, 1977)} \\ Z &= 350 \cdot R^{1.6} && \text{μεγάλη χωρική βροχή, (Dutton, 1967)} \\ Z &= 278 \cdot R^{1.48} && \text{Stratiform δείγμα DSD, (Carracciolo et al., 2008)} \\ Z &= 704 \cdot R^{1.29} && \text{Convective δείγμα DSD, (Carracciolo et al., 2008)} \end{aligned}$$

Τέλος, σχετικές ερευνητικές εργασίες στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, και ιδιαίτερα στην περιοχή της Αττικής, έχουν γίνει από τους (Baltas & Mimίκου, 2002), με τη χρήση Distrometer, ένα όργανο μέτρησης της κατανομής των υδροσταγονιδίων με στόχο τον υπολογισμό σχέσεων Z-R. Συγκεκριμένα από δείγμα 14 επεισοδίων βροχής υπολόγισαν την παρακάτω σχέση:

$$Z = 431 \cdot R^{1.25} \quad \text{Για επαγωγικού τύπου επεισόδια}$$

2.4 Πηγές σφαλμάτων

2.4.1 Γενικά περί σφαλμάτων μετεωρολογικού radar

Η μέτρηση της βροχόπτωσης μέσω δεδομένων radar παρουσιάζει εμφανώς αυξημένες δυνατότητες σε σχέση με του βροχογράφους, αλλά τα δεδομένα αυτά συνήθως συνοδεύονται με αυξημένη αβεβαιότητα καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι είτε προκαλούν προβλήματα κατά την μέτρηση των δεδομένων που έχουν ως αποτέλεσμα την λανθασμένη εκτίμηση του πεδίου βροχής. Γενικά υπάρχουν πολλοί ανεξάρτητοι παράγοντες αλλά και συνδυασμός αυτών που είναι σε θέση να διαφοροποιήσουν τα αποτελέσματα

μετρήσεων βροχής μεταξύ αυτών που προέρχονται από το έδαφος (βροχογράφοι) τα οποία αποτελούν την πραγματική μέτρηση βροχής. Αυτές οι αβεβαιότητες παρουσιάζονται εξαιτίας της θέσης, των ηλεκτρονικών τμημάτων του radar, των μηχανισμών περίθλασης, διάθλασης, σκέδασης και μετάδοσης από εμπόδια αλλά και του μέσου διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή τις φυσικές διεργασίες των υδροσταγονιδίων εντός των νεφών – καταιγίδων που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα. Κάποια από αυτά τα σφάλματα δύναται να εξαλειφθούν μέσω της σωστής βαθμονόμησης του συστήματος, ενώ άλλα που προκαλούνται από την μορφή της καταιγίδας θα πρέπει να διορθώνονται σύμφωνα με επίγειες μετρήσεις. Οι βασικότερες πηγές σφαλμάτων εκτίμησης βροχόπτωσης από το radar διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Villarini & Krajewski, 2009):

- Κακή ρύθμιση των μονάδων λειτουργίας του radar (calibration)
- Εξασθένιση του σήματος από την ατμόσφαιρα
- Ανώμαλη μετάδοση της δέσμης και ήχοι από το ανάγλυφο του εδάφους (groundclutter)
- Αύξηση μεγέθους του παλμικού όγκου και του ύψους μέτρησης σε σχέση με την απόσταση
- Μετακίνηση του πεδίου βροχής
- Μεταβλητότητα στη Z-R εκθετική σχέση ανάλογα με την κατανομή των καταιγίδων από επεισόδιο σε επεισόδιο ή ακόμα και στο ίδιο επεισόδιο
- Μεταβολές στο κατακόρυφο προφίλ ανακλαστικότητας (VPR)

2.4.2 Κακή ρύθμιση των μονάδων λειτουργίας του radar (calibration)

Η ακριβής βαθμονόμηση των ηλεκτρονικών τμημάτων ενός radar περιλαμβάνει τεχνικές μετρήσεις ισχύος και ευαισθησίας που συνήθως μπορούν να γίνουν μόνο από τους κατασκευαστές αυτών, καθώς γνωρίζουν την ακριβή διαδικασία. Η σταθερά C στην εξίσωση του radar είναι γνωστή με ακρίβεια 1 dBZ στα 128 km απόσταση, τιμή η οποία αντιστοιχεί για ένα σωστά ρυθμισμένο ραντάρ (Μπαλτάς, 2006). Ωστόσο σε περίπτωση λανθασμένης τιμής C απολήγει σε σταθερό - συστηματικό σφάλμα καθ' όλη τη διάρκεια της σάρωσης της ατμόσφαιρας από το radar και συνεπώς

απαιτείται εκ νέου ρύθμιση του οργάνου. Ερευνητικές εργασίες με πειράματα (Hunter,1996 , Ulbrich and Lee, 1999) στις οποίες έγινε ανάλυση των τιμών ανακλαστικότητας που προέκυψαν από εξεταζόμενα radar συγκρίνοντας τις εκτιμήσεις βροχόπτωσης από το radar και τις αντίστοιχες από το ντιστρόμετρο, έδειξαν διαφορές της τάξεως των 3 – 4.7 dBZ λόγω αστάθειας του radar.

Σύμφωνα με τον Brandes (Brandes, 1975), διαδεδομένη αλλά και αξιόπιστη μέθοδος απαλοιφής του σφάλματος θεωρείται κατά κύριο λόγο η μέθοδος διόρθωσης του μέσω της σύγκρισης των μετρήσεων του radar με αυτές των βροχογράφων.

2.4.3 Εξασθένιση του σήματος από την ατμόσφαιρα

Η εξασθένιση της ισχύος του σήματος είναι επίσης ένα σύνηθες πρόβλημα και οφείλεται κυρίως είτε στα ίδια τα ατμοσφαιρικά αέρια στην περίπτωση της καθαρής ατμόσφαιρας, όπως το άζωτο ή το οξυγόνο είτε στην ίδια την καταιγίδα με την απορρόφηση και τη σκέδαση που προκαλείται από τα υδροσταγονίδια. Επομένως η εξασθένιση του σήματος εξαρτάται από την κατηγορία της βροχής, την ένταση της, την περιοχική κάλυψη αλλά και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του radar. Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του σήματος τόσο πιο έντονη αναμένεται να είναι και η εξασθένιση του. Συνεπώς τέτοιου είδους συστηματικά σφάλματα αναμένονται εντονότερα σε μετεωρολογικά radar τύπου C-Band και X-Band.

Μία ακόμη συχνή αιτία για την εξασθένιση του σήματος είναι και το στερεό περίβλημα της κεραίας (radome) και εξαρτάται από τον ρυθμό βροχόπτωσης, το μήκος κύματος αλλά και από τις συνθήκες της επιφάνειας του περιβλήματος. Σε περιπτώσεις δυνατών καταιγίδων και μεγάλης κάλυψης η εξασθένιση που οφείλεται στο στερεό περίβλημα ξεκινά από τα 2 dB και αυξάνεται με την απόσταση φτάνοντας μέχρι και τα 4 – 5 dB στα 100 km, ακόμα και ύστερα από την εφαρμογή της διόρθωσης εξασθένισης της βροχής (Austin,1987). Επειδή ο κώνος της δέσμης του radar αυξάνεται με την απόσταση από τη θέση του radar, η μέγιστη εξασθένιση συναντάται κοντά στη θέση του radar.

2.4.4 Ανώμαλη μετάδοση της δέσμης και ήχοι από το ανάγλυφο του εδάφους (groundclutter)

Οι μετρήσεις που προέρχονται από το radar μπορούν να παρουσιάσουν σφάλματα που οφείλονται σε ανακλάσεις σημάτων σε μη μετεωρολογικούς στόχους. Η ικανότητα διαχωρισμού αυτών και η απόρριψη τους αποτελεί μία κρίσιμη παράμετρο που καθορίζει εν τέλει τη χρησιμότητα των αποκτηθέντων μετρήσεων. Όταν η δέσμη του radar συναντήσει το έδαφος ή στόχους πάνω στο έδαφος, τότε δυνατοί ήχοι ανακλώνται και επιστρέφονται. Η ανώμαλη αυτή μετάδοση της δέσμης της ακτινοβολίας είναι γνωστή ως groundclutter. Η πλήρης απαλοιφή αυτού του φαινομένου είναι πρακτικώς αδύνατη, ωστόσο η ελαχιστοποίηση τέτοιων σφαλμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της σωστής τοποθέτησης του radar. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος απαλοιφής του groundclutter είναι η αποθήκευση και η μελλοντική βοηθητική χρήση χάρτη του ανάγλυφου, έτσι ώστε να αφαιρείται στη συνέχεια από τις παρατηρήσεις. Η διαδικασία επιτυγχάνεται με σάρωση της περιοχής μελέτης σε καθαρό ουρανό χωρίς την ύπαρξη νεφών. Με αυτόν τον τρόπο στις περιοχές όπου παράγοντες τιμές ανακλαστικότητας, το σήμα συναντά το έδαφος ή άλλα εμπόδια όπως υψηλά κτήρια και ως αποτέλεσμα θα πρέπει να αφαιρούνται από τους υπολογισμούς κατά την μέτρηση ενός καταιγιδόφρου νέφους. Συχνά η εκτροπή της δέσμης του κύματος δεν οφείλεται μόνο στο ανάγλυφο αλλά και σε φαινόμενα διάθλασης, όπου παρατηρείται απόκλιση από την κανονική τροχιά μετάδοσης και συναντάται σε ιδιαίτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και δη κατά την επικράτηση φαινομένων θερμοκρασιακής αναστροφής.

2.4.5 Αύξηση μεγέθους του παλμικού όγκου και του ύψους μέτρησης σε σχέση με την απόσταση

Μία ακόμη βασική αιτία σφαλμάτων στις μετρήσεις του radar και επομένως στις εκτιμήσεις της βροχόπτωσης είναι η αύξηση του μεγέθους του παλμικού όγκου, άρα και του ύψους στόχευσης – μέτρησης σε συνδυασμό με την απόσταση, φαινόμενα που ευθύνονται για την υποεκτίμηση της συγκεντρωμένης βροχόπτωσης σε μακρινές αποστάσεις (Smith et al., 1996). Τα σφάλματα αυτά προέρχονται από τη μεταβολή του γεωμετρικού σχήματος

της δέσμης του κύματος του radar. Καθώς η δέσμη απομακρύνεται από το radar και διαδίδεται στην ατμόσφαιρα, ο κώνος της διαστέλλεται, με αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους του παλμικού όγκου του radar, ενώ μειώνεται παράλληλα και η ένταση του σήματος και επομένως τα δεδομένα της ανακλαστικότητας διαστρεβλώνονται. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο σε περιοχές σάρωσης όπου εμπεριέχονται διαφορετικά είδη υδροσταγονιδίων (π.χ. συνδυασμός χαλαζιού με χιόνι ή σταγόνες βροχής). Ένα ακόμη πρόβλημα που προκύπτει είναι η μείωση της διακριτικής ικανότητας του radar κατά το αζιμούθιο. Καθώς η διάμετρος του παλμικού όγκου αυξάνει με την απόσταση, δύο ή περισσότεροι διάσπαρτοι στόχοι που έχουν μικρή αζιμουθιακή γωνία μεταξύ τους δε μπορούν να διαχωριστούν από το radar και εμφανίζονται ως μία ηχώ. Είναι φανερό ότι σε μεγάλη απόσταση από τη θέση του radar το ύψος μέτρησης είναι πλέον ιδιαίτερα αυξημένο από την επιφάνεια του εδάφους, γεγονός που μειώνει το ποσό της συσχέτισης αυτής με την αντίστοιχη μέτρηση από τον εκάστοτε βροχογράφο.

2.4.6 Μετακίνηση του πεδίου βροχής

Η μετακίνηση του πεδίου βροχής και τα τυχαία σφάλματα που αυτή εισάγει στις εκτιμήσεις της βροχόπτωσης μέσω των σχέσεων Z-R επισημάνθηκαν κατά κύριο λόγο από τον Battan (Battan, 1976). Οι βασικότερες αιτίες εμφάνισης αυτών των σφαλμάτων είναι οι χωροχρονικές μεταβολές της κατακόρυφης κίνησης του αέρα και η κατά συνέπεια δημιουργία τυρβωδών περιοχών γύρω από τις περιοχές των νεφών. Οι διαφοροποιήσεις της κατακόρυφης ταχύτητας των κατακόρυφων ρευμάτων, το πάχος και η γεωγραφική θέση των νεφών, αλλά και το μέγεθος της σταγόνας επηρεάζουν την κατανομή των υδροσταγονιδίων και επομένως τις εκτιμώμενες εκθετικές σχέσεις Z-R. Ο Austin (Austin, 1987) απέδειξε την υποεκτίμηση της ανακλαστικότητας μέχρι και 4 – 5 dBZ λόγω της ύπαρξης καθοδικού ρεύματος συνοδείας ισχυρής βροχής μέσα σε καταιγιδοφόρα νέφη. Ακόμη και η οριζόντια κίνηση ρευμάτων αέρα είναι σε θέση να δημιουργήσει σφάλματα, καθώς μειώνει τη συχνότητα εμφάνισης μικρών υδροσταγονιδίων με αποτέλεσμα την παρουσία χωροχρονικών μεταβολών στην κατανομή τους. Οι Dalezios και Kouwen (Dalezios & Kouwen 1990) παρουσίασαν ένα μοντέλο για την διόρθωση των

οριζόντιων μετατοπίσεων των υδροσταγονιδίων που συμβαίνουν λόγω του ανέμου. Απέδειξαν ότι τέτοιου είδους σφάλματα που σχετίζονται με την μετακίνηση του πεδίου βροχής μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα σε επίπεδο ωριαίων χρονικών κλιμάκων, ενώ για μικρότερες χρονικές κλίμακες οφείλουν να ληφθούν σοβαρά υπόψη.

2.4.7 Σφάλματα οφειλόμενα στην χρονική δειγματοληψία των στοιχείων του ραντάρ

Η χρονική δειγματοληψία των μετρήσεων του radar παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση σφαλμάτων. Τα χρονικά κενά μεταξύ της επαναληπτικής διαδικασίας της ογκομετρικής σάρωσης της ατμόσφαιρας ακόμη και για μικρές διαφορές περιστροφών ανά λεπτό είναι ικανά να παραλείψουν χρονικά στιγμιότυπα του επεισοδίου, ειδικά δε όταν τα χαρακτηριστικά αυτού μεταβάλλονται έντονα σε μικρή χρονική και χωρική κλίμακα, όπως συμβαίνει με τα επαγωγικά τύπου επεισόδια. Επομένως για την ακριβέστερη εκτίμηση της πραγματικής βροχόπτωσης οι μετρήσεις που λαμβάνει το radar οφείλουν να είναι όσο το δυνατόν συχνότερες και στη συνέχεια θα πρέπει να ολοκληρώνονται σε ωριαίες τιμές ανακλαστικότητας. Με βάση τα αποτελέσματα έρευνας (Fabry et al.,1994) που αφορούν την ωριαία αθροιστική βροχόπτωση, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το απόλυτο σφάλμα της μέσης τιμής των λόγων ανάμεσα στις μετρήσεις της βροχής από τους βροχογράφους και των αντιστοίχων εκτιμήσεων από το radar (ή τυπική απόκλιση της μέσης τιμής) φθάνει περίπου το 20% για χρονική δειγματοληψία των στοιχείων κάθε 5 λεπτά και μειώνεται με την αύξηση της χωρικής ανάλυσης.

2.4.8 Μεταβλητότητα στη Z-R εκθετική σχέση ανάλογα με την κατανομή των καταιγίδων από επεισόδιο σε επεισόδιο ή ακόμα και στο ίδιο επεισόδιο

Οι σχέσεις Z-R είναι άμεσα συσχετιζόμενες με την κατανομή του μεγέθους των υδροσταγονιδίων. Λόγω των φυσικών διεργασιών της συνένωσης, της διάσπασης και της εξάτμισης που διαμορφώνουν το μέγεθος των υδροσταγονιδίων, το φάσμα μεγέθους αυτών είναι ιδιαίτερα ευρύ και

παρουσιάζει έντονη χωρική αλλά και χρονική μεταβλητότητα. Γενικότερα η κατανομή των υδροσταγονιδίων εξαρτάται από το είδος, την ηλικία, το υψόμετρο καθώς και από την γεωγραφική θέση που βρίσκονται. Συνήθως όσο πιο μακριά βρίσκονται σε σχέση με την βάση του νέφους, τόσο μεγαλύτερα είναι και σε μέγεθος. Αξίζει ακόμη να επισημανθεί ότι για ιδιαίτερος μικρά υδροσταγονίδια παρότι είναι αριθμητικά περισσότερα συγκριτικά με αυτά μεγαλύτερης διαμέτρου, η ανακλαστικότητα είναι σχεδόν αμελητέα, εφόσον για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας η διάμετρος υψώνεται στην έκτη δύναμη. Σε κάθε κατανομή μεγέθους σταγονιδίων που μετριέται σε διάφορους τύπους βροχοπτώσεων αναφέρεται και μία χαρακτηριστική Z-R σχέση (Jones, 1955, Imai, 1960, Fujiwara, 1965, Joss et al., 1970, Jatila και Puhakka, 1973a). Με την αύξηση της έντασης της βροχής έχει παρατηρηθεί ότι η παράμετρος a της σχέσης Z-R αυξάνεται, ενώ ο εκθέτης b μειώνεται. Ακόμη έχει παρατηρηθεί (Martner, 1975, Carbone & Nelson, 1978) υψηλές τιμές της παραμέτρου a και χαμηλές τιμές του εκθέτη b στην αρχή και κατά την διάρκεια της ανάπτυξης της καταιγίδας ενώ παρατηρήθηκαν χαμηλές τιμές της παραμέτρου a σε συνδυασμό με υψηλούς εκθέτες b στη φάση εξασθένισης της. Ωστόσο ακόμη και για πανομοιότυπα επεισόδια βροχής και μάλιστα ίδιας περιοχής κάλυψης η διακύμανση των παραμέτρων της σχέσης Z-R είναι μεγάλη, γεγονός που καθιστά την εξίσωση ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μεταβολές και συνεπώς δύσκολη την εκλογή της καταλληλότερης. Σύμφωνα με τον Twomey (Twomey, 1953) το μεγάλο εύρος της κατανομής του μεγέθους των σταγονιδίων ακόμα και σε περιπτώσεις μικρών χρονικών διαστημάτων (5 – 10 min) καθώς και η ανομοιότητα των εξισώσεων Z-R που αντλούνται από την βιβλιογραφία, τον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι εκτιμήσεις βροχοπτώσεων μέσω αυτών των σχέσεων μπορούν στην καλύτερη περίπτωση απλώς να προσεγγίσουν την πραγματική βροχόπτωση, με ενδεχόμενο μάλιστα συντελεστή σφάλματος μέχρι και $\pm 100\%$. Αντιθέτως, σύμφωνα με τον Austin (Austin, 1987), η εκτίμηση της βροχόπτωσης μέσω του μετεωρολογικού radar δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων. Ενώ σύμφωνα με τον Jones (Jones, 1966) για την εξάλειψη πιθανών σφαλμάτων που εμπίπτουν σε αυτή την

κατηγορία η εκλογή της σχέσης Z-R, οφείλει να γίνεται ανάλογα με τον τύπο επεισοδίου. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι οι μελέτες δεν έχουν ακόμη καταλήξει στην καταλληλότερη μέθοδο εξάλειψης τέτοιων σφαλμάτων και συνεπώς στην ορθότερη προσέγγιση της σχέσης Z-R.

2.4.9 Μεταβολές στο κατακόρυφο προφίλ ανακλαστικότητας (VPR)

Οι μεγάλες μεταβολές κατά την κατακόρυφη διάσταση – προφίλ των ανακλαστικότητων σε διαφορετικά είδη καταιγίδων ή ακόμη και στην ίδια είναι μία επιπρόσθετη πηγή σφαλμάτων. Κατά κύριο λόγο οφείλεται σε ατμοσφαιρικές διεργασίες κατά την ανάπτυξη των επεισοδίων βροχής, όπως η εξάτμιση, η κίνηση του αέρα αλλά και η αλλαγή φάσεων από νερό σε πάγο. Μελετώντας τα κατακόρυφα προφίλ ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται είναι η λαμπρή ζώνη, ένα στρώμα δηλαδή υψηλών τιμών ανακλαστικότητας και συμβαίνει κατά την μετατροπή του χιονιού σε βροχή. Το φαινόμενο της λαμπρής ζώνης μπορεί να πενταπλασιάσει ή μέχρι και να δεκαπλασιάσει την εκτίμηση της βροχής σε περιπτώσεις επεισοδίων κυκλωνικού τύπου (Smith, 1986). Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε (Fabry & Zawadski, 1995), χρησιμοποιώντας την κατακόρυφη κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας του ανέμου και ένα ραντάρ του οποίου η δέσμη ακτινοβολίας κατευθύνονταν κατακόρυφα προς τα πάνω, κατέληξε στο γεγονός ότι ο λόγος ανάμεσα στη μέγιστη ανακλαστικότητα από τη λαμπρή ζώνη και την ανακλαστικότητα λόγω βροχόπτωσης παρέμενε σταθερός και ίσος με 8 dBZ για εντάσεις βροχής έως 0,5 mm/hr και αυξάνονταν σε συνδυασμό με την αύξηση του ρυθμού βροχόπτωσης. Μια διαδεδομένη βιβλιογραφικά μέθοδος διόρθωσης τέτοιου είδους σφαλμάτων επιτυγχάνεται μέσω του λόγου ανακλαστικότητας συγκεκριμένου ύψους προς την αντίστοιχη ανακλαστικότητα που παρατηρήθηκε στο έδαφος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τον συνδυασμό δεδομένων radar και δεδομένων από βροχογράφους. Μία ακόμη μέθοδος αποτροπής τέτοιων σφαλμάτων είναι μέσω της εξαγωγής αλγορίθμων αντίστροφης ανάλυσης για τον εντοπισμό της λαμπρής ζώνης (Kirstetter et al., 2010).

2.5 Περιγραφή Σαρωτή Βροχής του ΕΜΠ

Στο εργαστήριο υδατικών πόρων του ΕΜΠ είναι τοποθετημένο ένα σύστημα σαρωτή βροχής (Rainscanner) υπό την μορφή μόνιμης εγκατάστασης, Σχήμα 2-3. Πρόκειται για ένα radar, τύπου X-Band με εμβέλεια τα 50km και διακριτική χωρική ικανότητα εμβαδού 100m x 100m, το οποίο έχει την δυνατότητα να καταγράφει δίλεπτες παρατηρήσεις ανακλαστικότητας στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-3: Η κεραία του εγκατεστημένου Rainscanner στο κτήριο του εργαστηρίου υδρολογίας της σχολής Πολιτικών Μηχανικών



Σχήμα 2-4: Θέση και εμβέλεια Rainscanner του ΕΜΠ

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Rainscanner παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-2, και αποτελούν συνήθεις τιμές radar τύπου X-Band. Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζονται οι παράμετροι που αφορούν την μετατροπή του σήματος radar σε τιμές ανακλαστικότητας βάσει της εξίσωσης (2.10).

Πίνακας 2-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Rainscanner

Τεχνικό Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μέγιστη Ισχύς	25 kW
Συχνότητα	9410 (\pm 30 MHz)
Ρυθμός περιστροφής	12 rpm
Ακρίβεια αζιμούθιου	\pm 0.5°
Εμβέλεια μέτρησης	50 km
Χωρική ακρίβεια μέτρησης	100 m
Ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα	-100 dBm
Δυναμικό εύρος	70 dB
Θόρυβος	6 dB

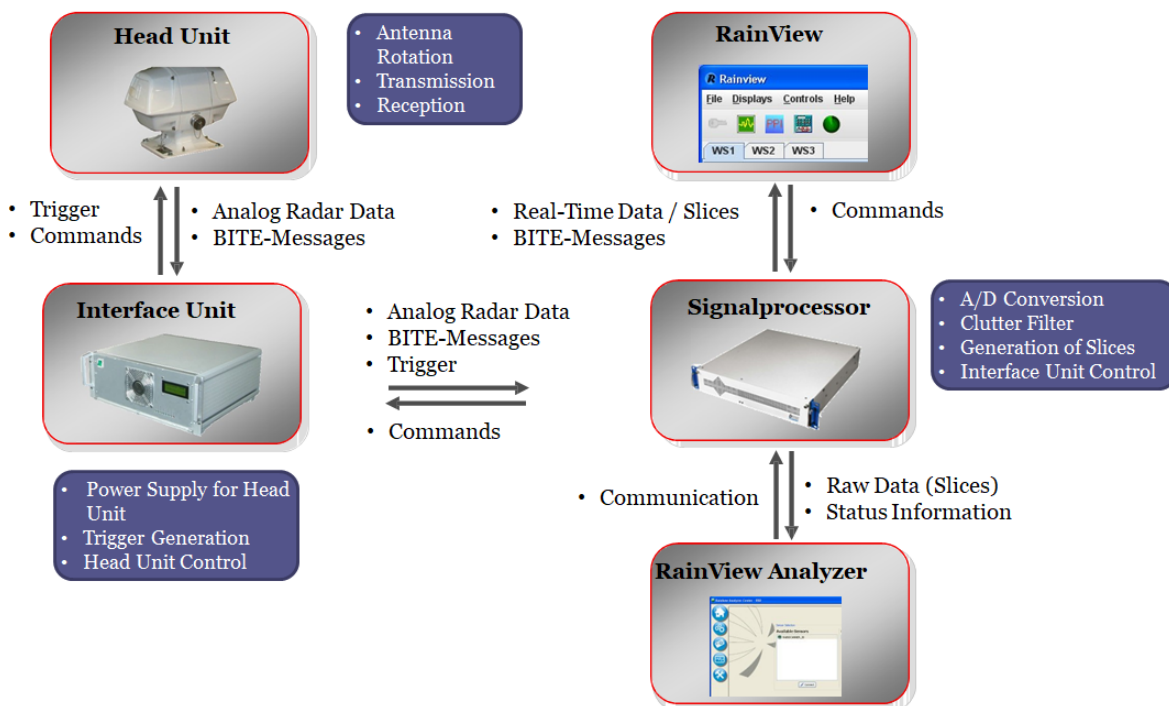
Πίνακας 2-3: Παράμετροι του Rainscanner

Παράμετρος	Τιμή
PRF	833 Hz
Μήκος κύματος	3.2 cm
Παλμικό μήκος , h	1200-500 ns
Σταθερά radar για παλμικό μήκος 500ns	80.69
Σταθερά radar για παλμικό μήκος 1000ns	79.23
Σταθερά radar για παλμικό μήκος 1200ns	76.89
Απολαβή κεραίας, g (gain)	37.5 db
Ρύθμιση κατακόρυφης γωνίας	2°
Πλάτος οριζόντιας γωνίας δέσμης, Θ	2°
Πλάτος κατακόρυφης γωνίας δέσμης, φ	2.5°

Οι τιμές των παραμέτρων ορίζονται ύστερα από λεπτομερή ανάλυση της θέσης εγκατάστασης του Rainscanner (φ , λ : 37.97904, 23.77369, ΕΓΣΑ '87). δηλαδή ως προς την γεωγραφική θέση και το υψόμετρο σε σχέση με γειτονικά εμπόδια. Σκοπός είναι η αποφυγή ορεινών όγκων και άλλων εμποδίων μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της κατακόρυφης γωνίας εκπομπής σήματος και του ρυθμού εκπομπής παλμών (Pulse repetition frequency – PRF).

Το σύστημα του rainscanner αποτελείται από τις παρακάτω κύριες μονάδες, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2-5:

- Την Κεραία με τον αντίστοιχο ραδιοθόλο, (antenna / radiodome)
- Τη μονάδα κεφαλής αισθητήρα (Head Unit),
- Το σύστημα εκπομπής, (Transmitter)
- Τη μονάδα θύρας σύνδεσης, (Interface unit)
- Τη μονάδα επεξεργασίας σημάτων, (Signal Processor)
- Τον υπολογιστή με εγκατεστημένο το κατάλληλο λογισμικό ρύθμισης και επεξεργασίας των παραγόμενων δεδομένων (RainView).



Σχήμα 2-5 Υποσυστήματα Rainscanner,

(Πηγή, με τροποποιήσεις, Selex Systems Integration GmbH Training Manual, 2015)

Η μονάδα κεφαλής αισθητήρα (Head Unit) περιλαμβάνει, τον πομπό, τον δέκτη (MIC), τον μηχανισμό κίνησης κεραίας, τη θύρα σύνδεσης (IB), τον διακόπτη μηχανισμού κίνησης κεραίας και τον αισθητήρα γωνίας. Η μονάδα θύρας σύνδεσης (interface unit), είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της κεφαλής αισθητήρα παρέχοντας την κατάλληλη τροφοδοσία σε ρεύμα καθώς και τις αντίστοιχες εντολές έναρξης/λήξης εκπομπής των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Η μονάδα θύρας ελέγχεται από τον επεξεργαστή σημάτων (signal processor) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων, την μετατροπή τους από αναλογικά σήματα σε ψηφιακά, την επεξεργασία και την εκτέλεση εντολών που ορίζονται από το λογισμικό επεξεργασίας του υπολογιστή. Τέλος μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή και του κατάλληλου εγκατεστημένου λογισμικού, RainView, προσφέρεται ένα γραφικό περιβάλλον για την έναρξη/λήξη καθώς και ρύθμιση του συστήματος, ενώ μέσω του λογισμικού RainView Analyzer, δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων, των δίλεπτων τιμών ανακλαστικότητας. Επιπλέον, δύναται η επεξεργασία και αποθήκευση και παραγόμενων δεδομένων, όπως είναι οι διορθωμένες τιμές ανακλαστικότητας

μέσω εφαρμογής φίλτρων εξάλειψης σφαλμάτων που προέρχονται από το έδαφος (groundclutter filter), η ένταση βροχής, το ύψος βροχής ανά ορισμένο χρονικό βήμα κ.α. Τέλος δίνεται η δυνατότητα εμφάνισης των παραπάνω δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real-time), μέσω του προγράμματος RainScout.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής περιγραφή της περιοχής μελέτης, δηλαδή της Αττικής. Ειδικότερα παρατίθενται πληροφορίες και δεδομένα σχετικά με την διοικητική διάρθρωση και χωροταξία της περιοχής της Αττικής, τα γεωμορφολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της, αλλά και μία σειρά ειδικότερων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες. Επιπλέον γίνεται αναφορά στα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν από τους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς, όσο και από το rainscanner.

3.2 Γεωμορφολογικά και Κλιματικά Χαρακτηριστικά της Περιοχής Μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η περιοχή μελέτης, που καθορίζεται από την εμβέλεια σάρωσης του rainscanner (ακτίνα 50km). Στην περιοχή εμπεριέχεται το μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας Αττικής καταλαμβάνοντας το μέγιστο από το ηπειρωτικό τμήμα της καθώς και τα νησιά της Αίγινας και της Σαλαμίνας καθώς και ένα μικρό τμήμα της Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδος, τμήμα Νομού Βοιωτίας, Σχήμα 3-1.

Το μεγαλύτερο τμήμα της Αττικής παρουσιάζει πεδινό έως ημιορεινό ανάγλυφο. Ειδικότερα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-1 το ανάγλυφο του εδάφους στην μεγαλύτερη έκταση του είναι πεδινό, περιλαμβάνοντας ωστόσο ασυνεχείς μεταξύ τους εξάρσεις γης επιπέδου λόφου, όπως τα Τουρκοβούνια, του Φιλοπάππου, ο Λυκαβηττός και η Ακρόπολη. Αυτοί οι λόφοι αναπτύσσονται, με προσανατολισμό από τα βορειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά και το υψόμετρο μειώνεται καθώς προχωράμε προς τα νοτιοδυτικά. Η περιοχή του Λεκανοπεδίου Αττικής περιβάλλεται από τέσσερις ορεινούς όγκους. Στα ανατολικά βρίσκεται ο Υμηττός, στα βόρεια ο ορεινός σχηματισμός της Πεντέλης και η Πάρνηθα, και στα δυτικά το Όρος Αιγάλεω και αρκετές λοφοσειρές ή μεμονωμένοι λόφοι (Σχήμα 3-1). Τέλος, στα νότια η περιοχή βρέχεται από το Σαρωνικό Κόλπο.

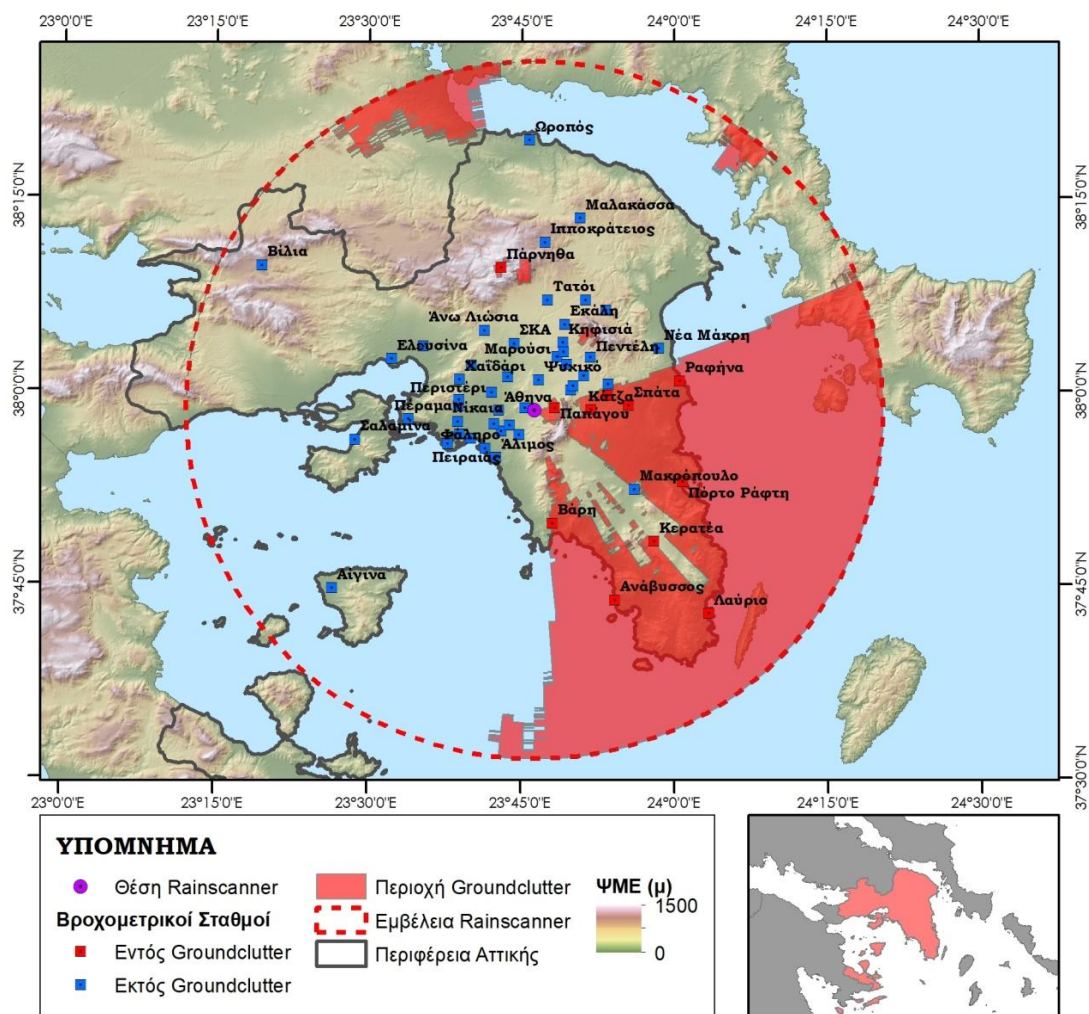
Τα τελευταία 117 έτη έχουν σημειωθεί πάνω από 25 σοβαρά πλημμυρικά επεισόδια (Maroukian et al., 2005) με τα περισσότερα Ακόμη η έντονη και άναρχη αστική ανάπτυξη καθώς και ο κακός σχεδιασμός και συντήρηση των αποστραγγιστικών δικτύων συμβάλλουν καθοριστικά στην ενίσχυση τέτοιων επεισοδίων.

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως Μεσογειακό. Από δεδομένα που συλλέχθηκαν, η μέση βροχόπτωση για χρονοσειρά δεδομένων 114 ετών (1899 – 2012) κυμαίνεται περίπου στα 400mm. Η περίοδος των βροχοπτώσεων ξεκινά από τον Οκτώβριο και τελειώνει τον Μάιο. Σύμφωνα με χρονοσειρά δεδομένων 116 ετών (1897 – 2012), η μέση ετήσια θερμοκρασία φτάνει τους 18.3 βαθμούς. Ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση μέγιστη θερμοκρασία 33 βαθμούς, ενώ ο ψυχρότερος ο Ιανουάριος με μέση ελάχιστη θερμοκρασία 6.5 βαθμούς.

3.3 Δίκτυο Υδρομετεωρολογικών Σταθμών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς του δικτύου NOANN, του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Lagouvardos et al., 2017). Το δίκτυο συνεχώς ανανεώνεται με την πρόσθεση νέων σταθμών ενώ τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν 10λεπτες καταγραφές βροχόπτωσης για ένα σύνολο 53 υδρομετεωρολογικών σταθμών εντός της περιοχής μελέτης. Λαμβάνοντας όμως υπόψη την περιοχική groundclutter του rainscanner, δηλαδή της περιοχής όπου υπάρχει ανυπαρξία δεδομένων rainscanner λόγω του εδάφους, από τους προαναφερθέντες 53 σταθμούς τελικώς επιλέγονται συνολικά 42 σταθμοί, Σχήμα 3-2.

Τα βροχομετρικά δεδομένα για κάθε υδρομετεωρολογικό σταθμό δίνονται σε μορφή αρχείου κειμένου με την ημερομηνία, την ώρα της καταγραφής και το αντίστοιχο καταγεγραμμένο ύψος βροχής σε mm. Οι καταγραφές, όπως έχει αναφερθεί, γίνονται με χρονικό βήμα δεκάλεπτου (10 min).



Σχήμα 3-2: Απόρριψη βροχομετρικών σταθμών λόγω groundclutter

3.4 Δεδομένα Ραντάρ

Τα δεδομένα rainscanner αφορούν τιμές ανακλαστικότητας, σε μονάδες dBz σε, κανονικοποιημένη μορφή, τύπου raster, με μέγεθος κελιού 100μ. Η περίοδος μίας περιστροφής του radar διαρκεί 2 min, επομένως τα δεδομένα αναφέρονται σε μέσους όρους ανακλαστικότητας ανά δίλεπτο χρονικό βήμα. Κάθε δίλεπτη παρατήρηση αποθηκεύεται στην μνήμη του υπολογιστή ως ένας πίνακας 1000 x 1000 διαστάσεων με κάθε κελί να έχει χωρικές διαστάσεις 100m x 100m. Το αρχείο που αποθηκεύεται περιλαμβάνει επιπλέον την γεωχωρική πληροφορία του πίνακα, δηλαδή τα στοιχεία που ορίζουν το σύστημα συντεταγμένων του Rainscanner. Τα δεδομένα αυτά, αναφέρονται σε Αζιμουθιακή ισοπέχουσα προβολή (Azimuthal Equidistant), με κέντρο την θέση του radar του ΕΜΠ (φ,λ: 37.97904,23.77369). Για την κατάλληλη

επεξεργασία των συγκεκριμένων προβολών χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος μετασχηματισμός των συντεταγμένων στο σύστημα προβολής ΕΓΣΑ '87, το οποίο χρησιμοποιείται και για την παραγωγή των σχετικών χαρτών – εικόνων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

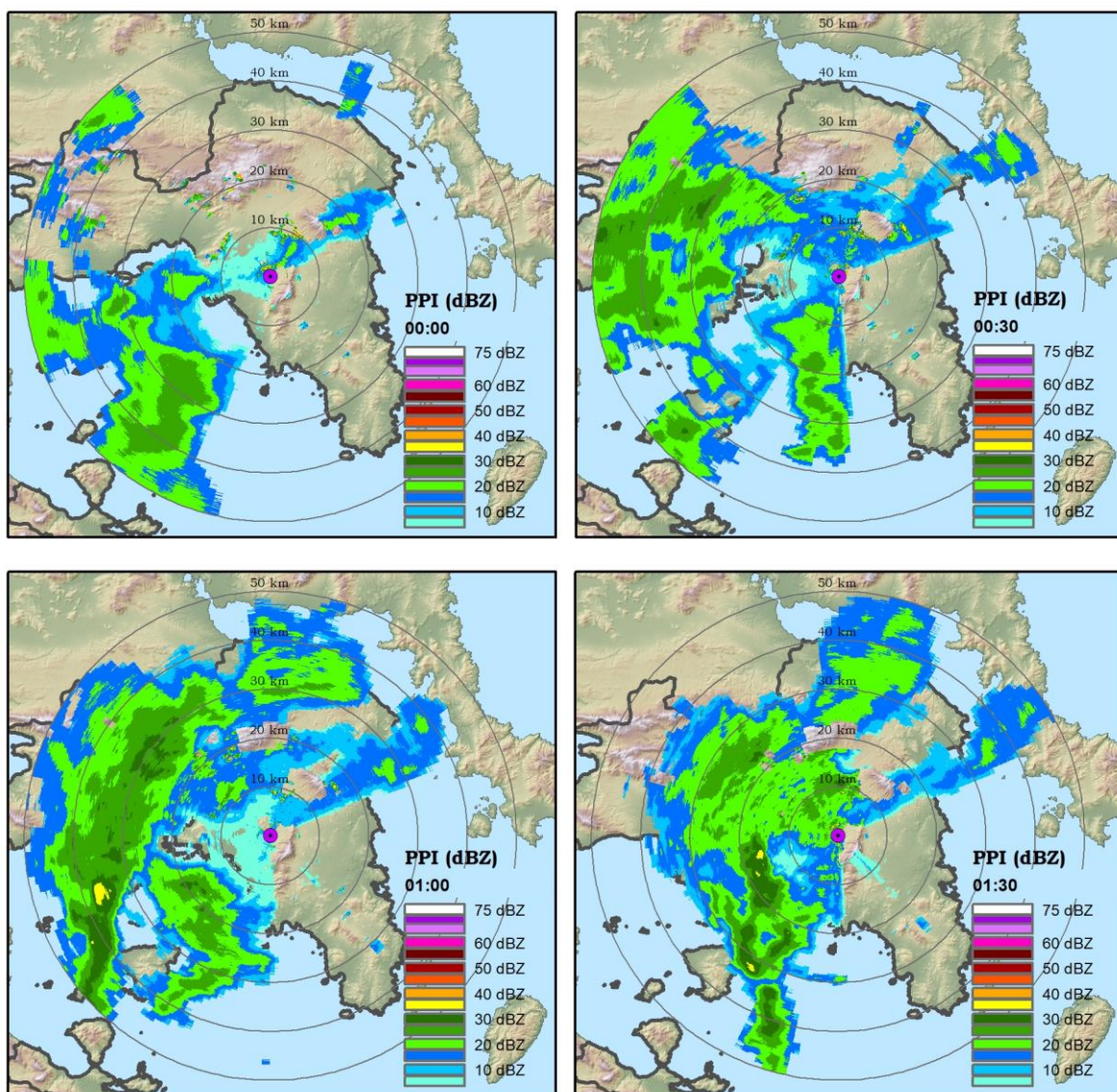
3.5 Επεισόδιο Βροχής

Το επεισόδιο βροχόπτωσης που επιλέχθηκε προς μελέτη για την συγκεκριμένη εργασία έλαβε χώρα στις 18/12/2018 το οποίο διήρκησε από τις 00:00 μέχρι και τις 04:30 λαμβάνοντας υπ' όψιν την μετακίνηση της καταιγίδας από περιοχή σε περιοχή στα πλαίσια της περιοχής της Αττικής. Στον Πίνακα 3-1, παρατίθενται τα συνολικά ύψη βροχόπτωσης που καταγράφηκαν για το επιλεγμένο επεισόδιο, για κάθε σταθμό από αυτούς που τελικώς επιλέχθηκαν.

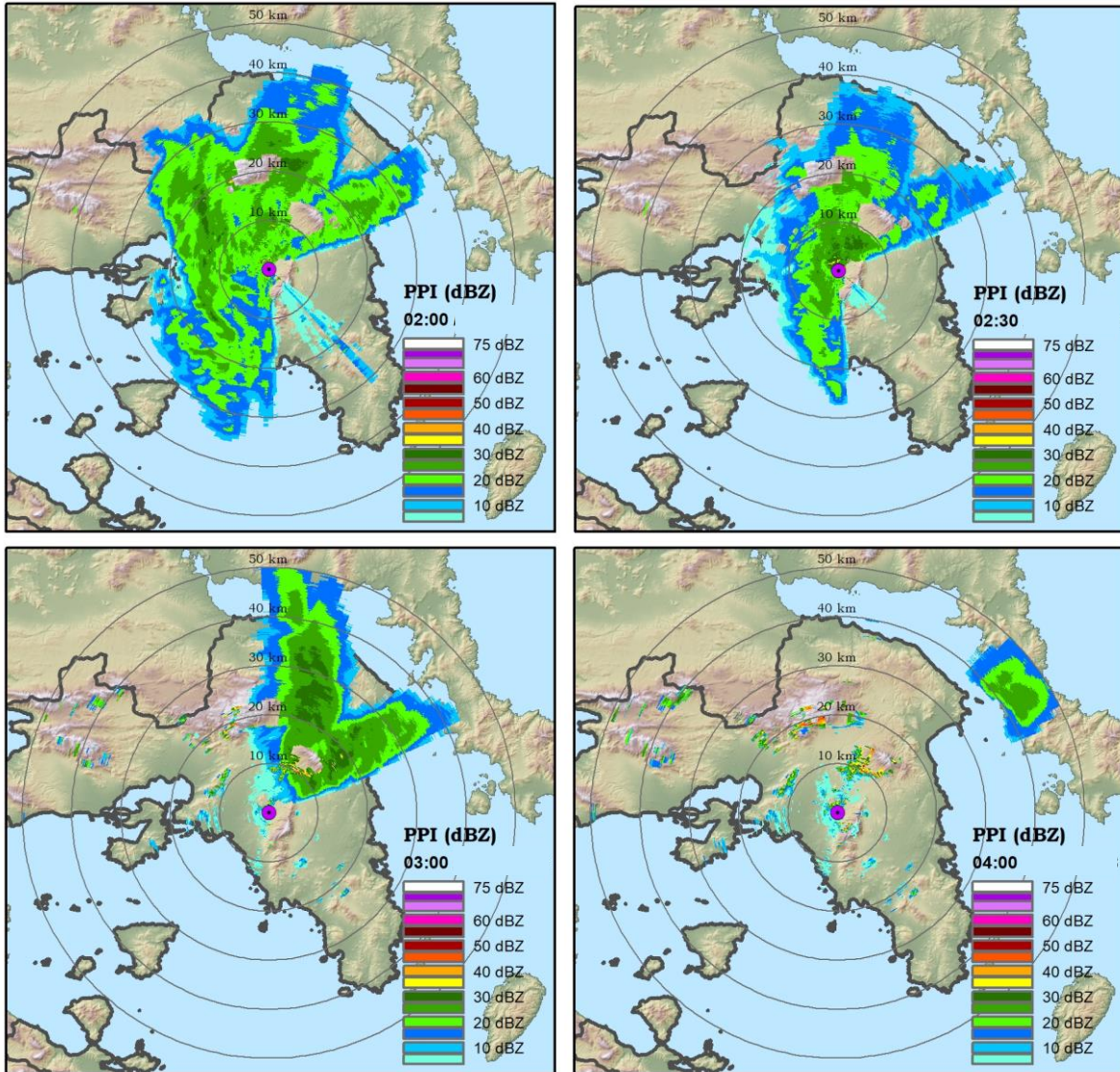
Πίνακας 3-1: Συνολικά ύψη βροχής επεισοδίου σταθμών

Σταθμός	Συνολικό ύψος βροχής επεισοδίου (mm)	Σταθμός	Συνολικό ύψος βροχής επεισοδίου (mm)
Αίγινα	18,6	Κορυδαλλός	8,6
Αμπελόκηποι	11,0	Αγία Παρασκευή	13,8
Ανάβυσσος	19,2	Άλιμος	11,6
Άνω Λιόσια	14,0	Πέραμα	10,8
Αθήνα	11,2	Πειρούπολη	9,0
Διονυσος	13,0	Βριλήσσια	12,6
Εκάλη	13,6	Κηφισιά	9,6
Φάληρο	10,4	Ελευσίνα	11,2
Ιπποκράτειος Πολιτεία	17,0	Νίκαια	9,0
Μαρκόπουλο	13,0	Σαλαμίνα	8,6
Μαρούσι	13,0	Σκα	10,2
Νέα Σμύρνη	10,8	Υμηττός - Δάφνη	10,0
Νέος Κόσμος	9,6	Χαροκόπειο	11,2
Πατήσια	11,2	Πειραιάς - Παιδαγωγική	8,6
Πεντέλη	12,8	Παλλήνη - CGS	9,6
Περιστέρη	12,0	Χαϊδάρη	11,8
Ψυχικό	11,6	Πειραιάς	7,6
Βίλια	13,6	Κερατέα	15,8
Αрсάκειο - Δροσιά	13,6	Μαλακάσα	13,8
Αθήνα Μαρίνα (Φλοίσβου)	9,6	Άνω Κορυδαλλός	8,3
Τατόϊ	9,8	Ντελακρούα - Αττική	12,4
Ασπρόπυργος	9,6		

Το συγκεκριμένο επεισόδιο επιλέχθηκε από μία σειρά κριτηρίων που αφορούν κυρίως την πλήρη καταγραφή του επεισοδίου αφενός και αφετέρου το συνολικό ύψος βροχής και την κάλυψη που είχε το επεισόδιο ως προς το εύρος σάρωσης του rainscanner, απορρίπτοντας καταγεγραμμένα επεισόδια μεμονωμένων φαινομένων – τοπικών καταιγίδων. Για το συγκεκριμένο επεισόδιο που επιλέχθηκε, οι τιμές της ανακλαστικότητας (στιγμιαίες δίλεπτες καταγραφές) που καταγράφηκαν, για διάφορα χρονικά στάδια εξέλιξης του επεισοδίου παρουσιάζονται ενδεικτικά στο Σχήμα 3-3. Από τα παρακάτω σχήματα είναι εμφανής η κίνηση της καταιγίδας με διεύθυνση από τα δυτικά προς τα βορειο-ανατολικά της περιοχής μελέτης, γεγονός που επαληθεύεται και από τις καταγραφές στους βροχογράφους.



Σχήμα 3-3: Απεικόνιση δίλεπτων καταγεγραμμένων ανακλαστικότητων

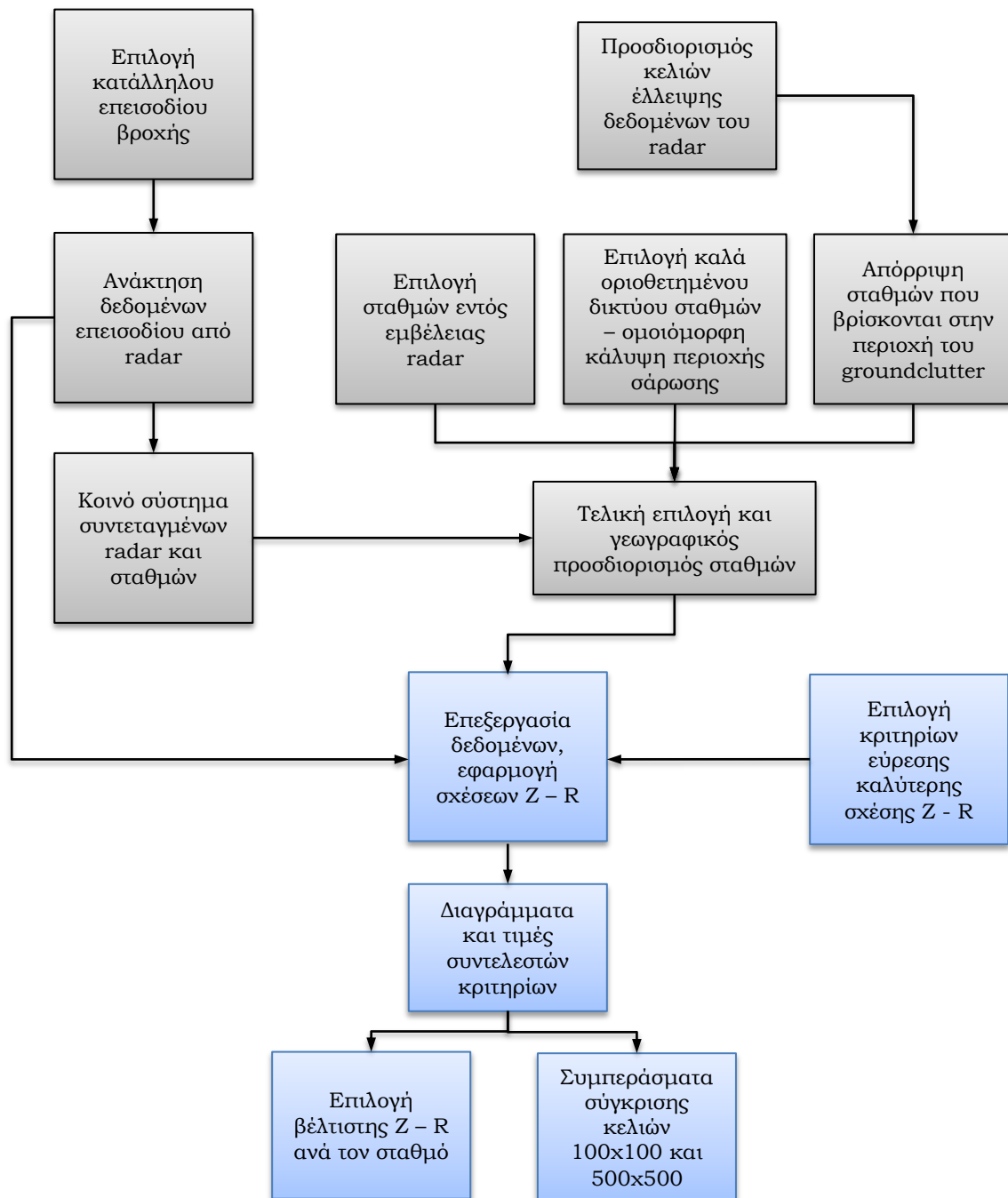


Σχήμα 3-3 (συνέχεια): Απεικόνιση δίλεπτων καταγεγραμμένων ανακλαστικότητων

Από τα παραπάνω σχήματα είναι εμφανή επίσης και τα σημεία όπου υπάρχει ανυπαρξία δεδομένων rainscanner λόγω ανάγλυφου. Αυτά τα σημεία επικεντρώνονται στους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας και της Πεντέλης καθώς και το νοτιο-ανατολικό τμήματα της περιοχής μελέτης, περιοχή που εμποδίζεται λόγω της θέσης του Υμηττού σε συνάρτηση με την θέση του rainscanner.

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα η μεθοδολογία χωρίζεται σε δύο μέρη όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής, Σχήμα 4-1. Το πρώτο αφορά την επεξεργασία και προετοιμασία των δεδομένων και φαίνεται με γκρι χρώμα.



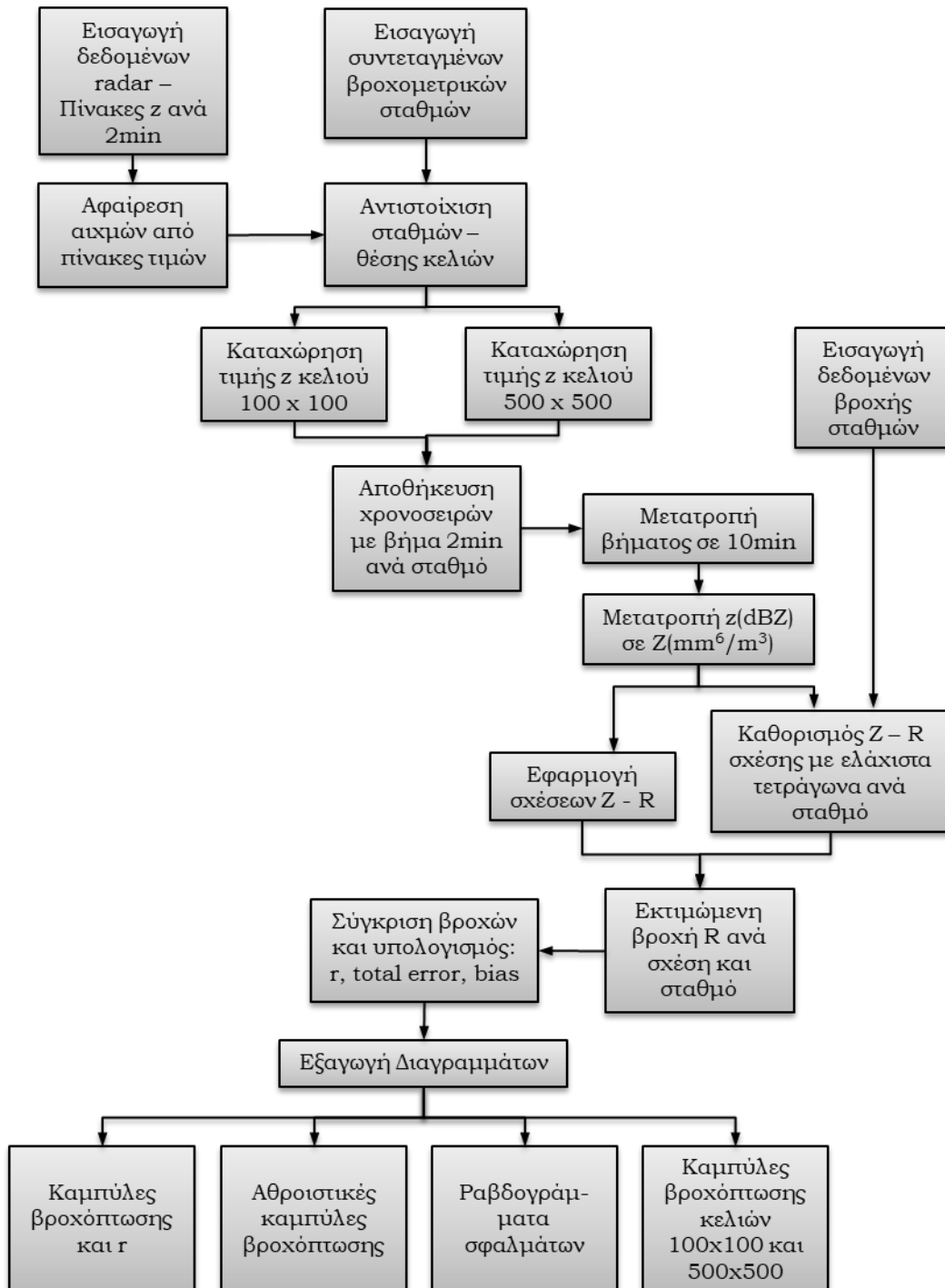
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.

Το δεύτερο φαίνεται με μπλε χρώμα, και αφορά την σύγκριση των χρονοσειρών βροχής που υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του rainscanner με αυτά από τους επίγειους βροχομετρικούς σταθμούς σύμφωνα με την θέσπιση συγκεκριμένων κριτηρίων.

Η παραπάνω διαδικασία προγραμματίστηκε σε περιβάλλον Matlab, που επιτρέπει την εκτέλεση των παραπάνω διαδικασιών για κάθε σετ δεδομένων rainscanner και βροχόγραφων, για διαφορετικά επεισόδια βροχής. Αρχικά γίνεται η επιλογή των σταθμών που θα μελετηθούν, με γνώμονα τρία κριτήρια, την εμβέλεια του rainscanner, την θέση των διαθέσιμων επίγειων βροχομετρικών σταθμών, με στόχο την ομοιόμορφη κάλυψη περιοχής σάρωσης, και τέλος την περιοχή groundclutter του rainscanner. Σχετικά με το επεισόδιο βροχής που πρόκειται να μελετηθεί, αρχικά ανακτώνται τα δεδομένα του, δηλαδή οι πίνακες ανακλαστικότητας που αναφέρονται σε χρονικό βήμα δίλεπτου για όλη τη χρονική διάρκεια του επεισοδίου, και ελέγχεται η χρονική συνέπεια των δεδομένων αυτών. Το επόμενο βήμα είναι η γεωχωρική συνέπεια των δεδομένων, δηλαδή, μετασχηματίζονται τα δεδομένα του Rainscanner στο σύστημα αναφοράς των σταθμών, ώστε να είναι δυνατή ύστερα η εύρεση του κελιού στο οποίο βρίσκονται οι κάθε σταθμοί. Αφού εντοπιστεί το κελί στο κানাβο ανακλαστικότητας στο οποίο ανήκει χωρικά ο κάθε σταθμός, εξάγονται οι αντίστοιχες δίλεπτες χρονοσειρές ανακλαστικότητας με σκοπό την αναγωγή τους σε 10λεπτές καταγραφές και εφαρμογής γνωστών Z-R σχέσεων ώστε να γίνει ο κατάλληλος μετασχηματισμός σε τιμές έντασης βροχής και αντίστοιχα μετατροπή σε ύψος βροχής 10λέπτου ώστε να συγκριθούν με τα δεδομένα των σταθμών. Συγχρόνως προσδιορίζονται τα κριτήρια που θεωρήθηκαν ως τα καταλληλότερα για την εύρεση της βέλτιστης Z-R σχέσης και υπολογίζονται διάφοροι στατιστικοί δείκτες. Τελικά εξάγονται τα σχετικά διαγράμματα και πίνακες σχετικά με το υπολογισθέν ύψος βροχής και αθροιστικής βροχόπτωσης (όπως παρατίθενται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων) που συντελούν επιπλέον κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης σχέσης Z-R σε επίπεδο σταθμού. Παρακάτω αναλύονται πιο αναλυτικά τα δύο μέρη.

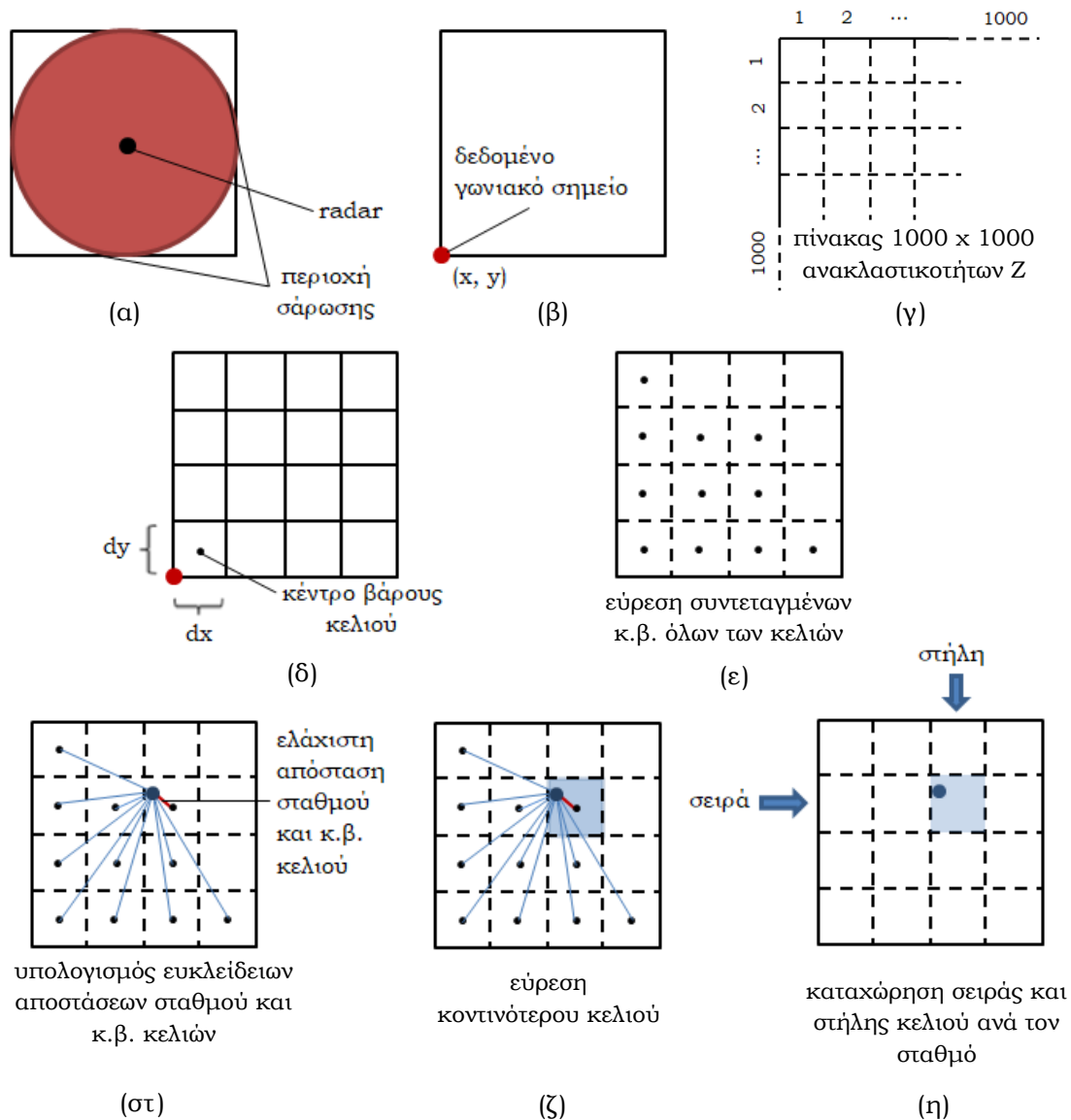
4.1 Επεξεργασία Δεδομένων

Το πρώτο μέρος της μεθοδολογίας αφορά την επεξεργασία των δεδομένων. Στο επόμενο διάγραμμα ροής (Σχήμα 4-2) απεικονίζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της MATLAB για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4-2: Διάγραμμα Ροής κώδικα επεξεργασίας δεδομένων

Αρχικά εισάγονται τα δεδομένα ανακλαστικότητας σε μονάδες dBZ (λογαριθμική παράμετρος z), με τη μορφή τετραγωνικών πινάκων μεγέθους 1000×1000 . Κάθε τέτοιος πίνακας αντιστοιχεί σε μία περιστροφή – σάρωση του radar, που ολοκληρώνεται κάθε 2 min. Από κάθε τέτοιο πίνακα, για όλο το επεισόδιο βροχής που μελετάται, εντοπίζονται και απαλείφονται οι ακραίες τιμές – αιχμές, που πιθανότατα οφείλονται σε τυχαία σφάλματα ή σε στόχευση της δέσμης του radar σε μη μετεωρολογικούς στόχους (π.χ. υψηλά κτίρια, ελικόπτερα κ.ά.). Παράλληλα εισάγονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες των επιλεγμένων σταθμών, εντός της εμβέλειας σάρωσης του radar. Μέσω δεδομένων που δίνονται από το radar σχετικά με την γεωγραφική τοποθέτηση του πλαισίου σάρωσης και άρα τον γεωγραφικό προσδιορισμό κάθε κελιού, όπως εξηγείται διαγραμματικά στο Σχήμα 4-3, εντοπίζονται και αντιστοιχούνται τα κελιά του πίνακα εντός των οποίων βρίσκονται οι σταθμοί. Συγκεκριμένα, η ακτίνα κάλυψης του Rainscanner φτάνει τα 50 km, επομένως η περιοχή κάλυψης από πλευράς δεδομένων ανακλαστικότητας είναι μία κυκλική επιφάνεια διαμέτρου 100 km. Για να μπορούν τα δεδομένα ανακλαστικότητας που συλλέγονται από το radar να μελετηθούν από τον χρήστη δίνονται σε μορφή τετραγωνικού πίνακα, ο οποίος μπορεί να νοηθεί ως εγγεγραμμένο τετράγωνο πλευράς 100 km, στην κυκλική επιφάνεια σάρωσης του radar, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-3α. Ο συγκεκριμένος πίνακας έχει διαστάσεις 1000×1000 , Σχήμα 4-3γ καθώς η ακρίβεια μεγέθους κελιού του radar είναι $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Από τα αρχεία δεδομένων που δίνονται από το ίδιο το radar, γνωστοποιούνται οι συντεταγμένες της νοτιοανατολικής γωνίας του εγγεγραμμένου τετραγώνου, Σχήμα 4-3β. Δεδομένου αυτού του σημείου και των αποστάσεων dx και dy κάθε κελιού, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας μορφώνεται αφενός το πλέγμα του πίνακα και αφετέρου προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους κάθε κελιού, Σχήμα 4-3δ,ε. Εφόσον ολοκληρωθεί η προηγούμενη διαδικασία, επόμενος στόχος είναι ο εντοπισμός του κελιού εντός του οποίου βρίσκεται κάθε βροχομετρικός σταθμός, που μελετάται. Για τον σκοπό αυτό, υπολογίζονται όλες οι ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ του σταθμού και των κέντρων βάρους κελιών και εντοπίζεται η ελάχιστη απόσταση.

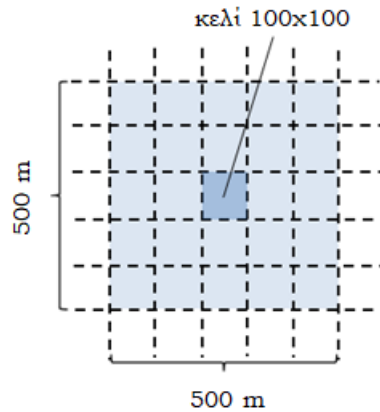


Σχήμα 4-3: Διαδικασία εντοπισμού κελιών με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών στα δεδομένα radar

Το κελί για το οποίο υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση είναι και το κελί εντός του οποίου βρίσκεται ο σταθμός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3στ και Σχήμα 4-3ζ. Τέλος καταχωρείται η σειρά και η στήλη του συγκεκριμένου κελιού για κάθε σταθμό, Σχήμα 4-3η, έτσι ώστε να γίνεται αυτόματα η επιλογή του συγκεκριμένου κελιού για τον εκάστοτε σταθμό, για όλες τις χρονικές στιγμές των δεδομένων ανακλαστικότητας.

Στο στάδιο αυτό υπολογίζεται εκτός από την καταχώρηση και την επεξεργασία των τιμών ανακλαστικότητας ενός κελιού διαστάσεων 100 x 100 ανά σταθμό,

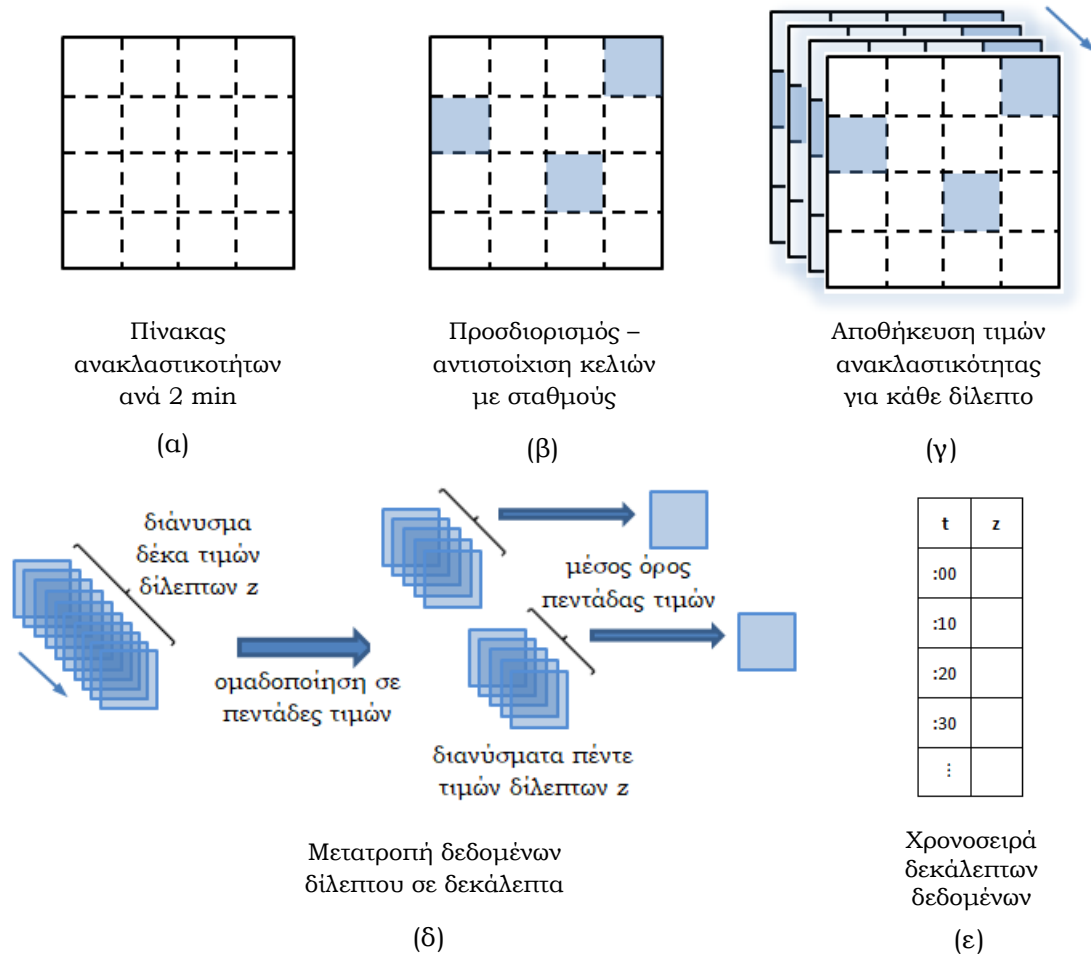
μελετήθηκε και η επιλογή διευρυμένων κελιών μεγέθους 500m x 500m. Ως αποτέλεσμα μελετάται και η επίπτωση της χωρικής ακρίβειας του κελιού στην εκτίμηση των σχέσεων Z-R. Για την διεύρυνση του κελιού λαμβάνονται οι τιμές των κελιών περιμετρικά αυτού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4, και εξάγεται ο μέσος όρος των τιμών τους.



Σχήμα 4-4: Αλλαγή χωρικής ανάλυσης

Έτσι για κάθε σταθμό προκύπτουν δύο χρονοσειρές ανακλαστικότητας Z, μία για κελιά με διαστάσεις 100m x 100m και μία με 500m x 500m, με χρονικό βήμα τα δύο λεπτά. Η επόμενη επεξεργασία αφορά τον μετασχηματισμό των παραπάνω σε χρονοσειρές δεκάλεπτου χρονικού βήματος, Σχήμα 4-7.

Συγκεκριμένα, για κάθε δίλεπτο, υπάρχει ένας πίνακας με τιμές ανακλαστικότητας 1000 x 1000, για όλη την περιοχή σάρωσης, Σχήμα 4-5α. Αφού προσδιοριστούν τα κελιά που εμπεριέχουν σταθμούς και αντιστοιχηθούν με αυτούς, Σχήμα 4-5β, εξάγονται από κάθε πίνακα (δίλεπτου) οι τιμές ανακλαστικότητας κάθε σταθμού και αποθηκεύονται, Σχήμα 4-5γ, καταλήγοντας σε χρονοσειρές ανακλαστικότητας δίλεπτου χρονικού βήματος για κάθε σταθμό. Σε κάθε τέτοιο διάλυσμα χρονοσειράς οι τιμές ομαδοποιούνται ανά πεντάδες (5 x 2 min = 10min) και εξάγεται ο μέσος όρος αυτών με αποτέλεσμα να προκύπτει μια νέα χρονοσειρά ανακλαστικότητας δεκάλεπτου βήματος Σχήμα 4-5δ,ε.



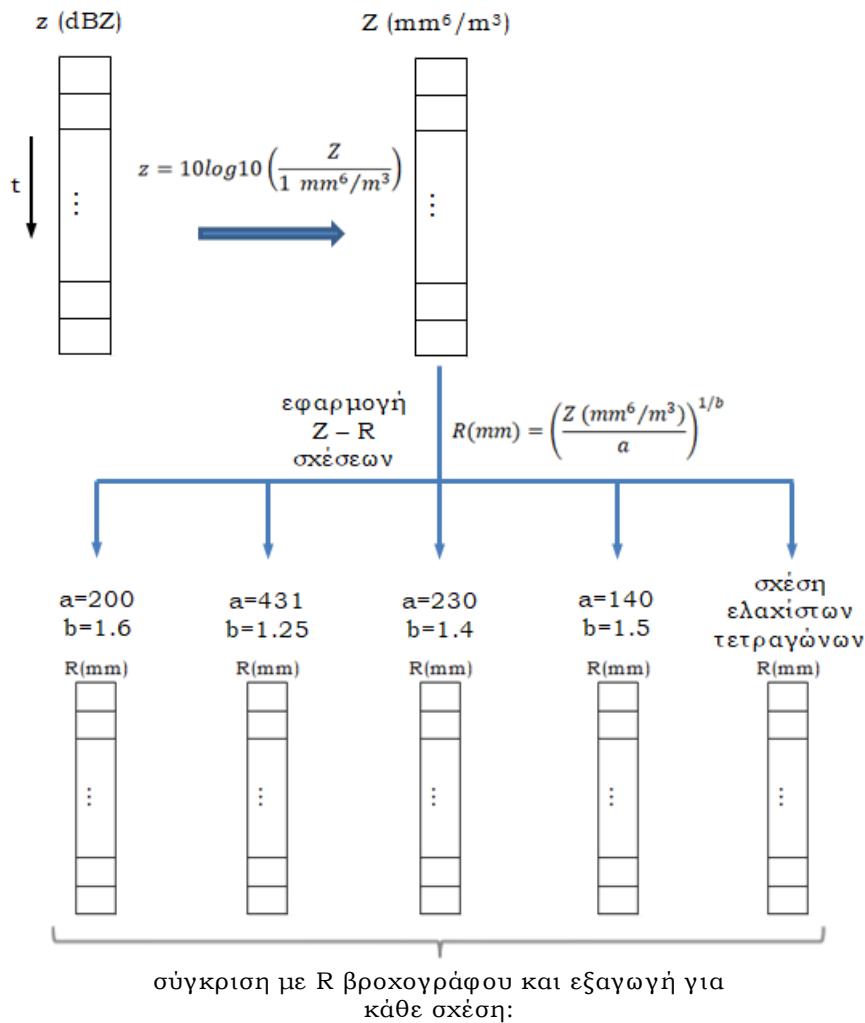
Σχήμα 4-5: Διαδικασία εξαγωγής χρονοσειρών υδρομετρικών σταθμών από τα δεδομένα ραντάρ

Πλέον τα δεδομένα ανακλαστικότητας ανά σταθμό είναι έτοιμα ώστε να μετασχηματιστούν σε ένταση βροχής μέσω εφαρμογής μιας σχέσης Z-R και να συγκριθούν με τα αντίστοιχα δεδομένα το βροχομετρικών σταθμών.

Τέλος, πριν την εφαρμογή κριτηρίων σύγκρισης των βιβλιογραφικών Z-R σχέσεων, υπολογίζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της εκθετικής σχέσης, a και b , για κάθε σταθμό, μέσω εφαρμογής της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, με περιορισμούς. Έτσι προσδιορίζεται ακόμα μία σχέση, ανά σταθμό, που προσαρμόζεται καλύτερα στα πραγματικά δεδομένα βροχόπτωσης με σκοπό την σύγκριση των επιδόσεων των κριτηρίων με αυτά που προκύπτουν από τις βιβλιογραφικές σχέσεις.

Τέλος, για κάθε χρονοσειρά, σε επίπεδο σταθμού, υπολογίζεται για κάθε Z-R σχέση, ο συντελεστής συσχέτισης, το ποσοστιαίο απόλυτο και μεροληπτικό σφάλμα ανά χρονική στιγμή, το μεροληπτικό σφάλμα για την συνολική

βροχοπτώση και παράγονται και τα σχετικά διαγράμματα, βροχοπτώσης και αθροιστικής βροχοπτώσης με σκοπό για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και καλύτερη εφαρμογή των κριτηρίων σύγκρισης, Σχήμα 4-6:



- συντελεστή συσχέτισης (r)
- απόλυτο σφάλμα (total error)
- μεροληπτικό σφάλμα (bias)

Σχήμα 4-7: Μεθοδολογία Σύγκρισης σχέσεων Z-R

Για την εφαρμογή της σχέσης Z - R απαιτείται προηγουμένως η μετατροπή των χρονοσειρών ανακλαστικότητας κάθε σταθμού, από μονάδες dBZ σε $\text{mm}^6\text{/m}^3$ μέσω της σχέσης:

$$z = 10 \log_{10} \left(\frac{Z}{1 \text{ mm}^6\text{/m}^3} \right)$$

Μετά την παραπάνω μετατροπή, τα διανύσματα των ανακλαστικοτήτων μπορούν πλέον να εισαχθούν στις σχέσεις Z – R:

$$Z = \alpha \cdot R^b \Rightarrow R = \left(\frac{Z}{\alpha}\right)^{1/b}$$

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται 4 διαφορετικές σχέσεις Z-R, όπως αντλήθηκαν από την βιβλιογραφία και αναφέρονται παρακάτω:

$$Z = 200 \cdot R^{1.6}$$

$$Z = 431 \cdot R^{1.25}$$

$$Z = 230 \cdot R^{1.4}$$

$$Z = 140 \cdot R^{1.5}$$

4.2 Καθορισμός κριτηρίων επιλογής Z–R σχέσης

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων από radar και βροχογράφους και την εφαρμογή των σχέσεων Z – R, η εκτιμώμενη βροχόπτωση από την κάθε σχέση πρέπει να συγκριθεί με την πραγματική που κατέγραψαν οι βροχογράφοι. Μέσω αυτής της σύγκρισης θα καθοριστεί και η κατάλληλη Z-R σχέση που προσεγγίζει καλύτερα τη πραγματική βροχόπτωση ανά σταθμό. Επειδή η φύση της σχέσης Z–R αλλά και των φαινομένων κατακρήμνισης δεν μπορούν να εξεταστούν μονοδιάστατα και άρα να συσχετιστούν μονοσήμαντα, πρέπει να επιλεχθεί μία σειρά κριτηρίων και να καθοριστεί η βαρύτητα – προτεραιότητα αυτών, για την τελική επιλογή της βέλτιστης σχέσης Z–R, ανά σταθμό. Έτσι επιλέχθηκαν ένα σύνολο από στατιστικές παραμέτρους, που είναι σε θέση να δώσουν μια σφαιρική εικόνα σχετικά με την ποιότητα των εκτιμήσεων βροχόπτωσης απ’ το radar. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν μέσα από την αναζήτηση σε σχετική βιβλιογραφία είναι:

- Ο συντελεστής συσχέτισης r,
- Το απόλυτο σφάλμα (Normalized Mean Absolute Error – NMAE) ανά χρονικό βήμα
- Το μεροληπτικό σφάλμα (Normalized Mean Bias - NMB) ανά χρονικό βήμα
- Το μεροληπτικό σφάλμα για το συνολικό ύψος βροχής του επεισοδίου

4.2.1 Συντελεστής συσχέτισης

Ο βαθμός της γραμμικής συσχέτισης δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y με διασπορά σ_x^2 και σ_y^2 αντίστοιχα και συνδιασπορά:

$$\sigma_{xy} = Cov(X, Y) = E(X, Y) - E(X)E(Y)$$

μετριέται με τον συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient) ρ που ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ρ , όπως και η συνδιασπορά σ_{xy} , εκφράζει το βαθμό και τον τρόπο που οι μεταβλητές συσχετίζονται, δηλαδή πως μία τυχαία μεταβλητή μεταβάλλεται ως προς την άλλη. Η σ_{xy} παίρνει τιμές που εξαρτώνται από το πεδίο τιμών των X και Y ενώ ο συντελεστής ρ παίρνει τιμές στο διάστημα $[-1, 1]$. Οι χαρακτηριστικές τιμές του ρ ερμηνεύονται ως εξής:

- $\rho = 1$, τέλεια θετική συσχέτιση μεταξύ των X και Y
- $\rho = 0$, δεν υπάρχει καμία (γραμμική) συσχέτιση μεταξύ των X και Y
- $\rho = -1$, τέλεια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των X και Y

Όταν ο συντελεστής συσχέτισης είναι κοντά στο -1 ή στο 1 η γραμμική συσχέτιση των δύο τυχαίων μεταβλητών είναι ισχυρή, ενώ όταν πλησιάζει στο 0 οι τυχαίες μεταβλητές είναι πρακτικά ασυσχέτιστες.

Όπως προκύπτει και από τον ίδιο τον ορισμό του συντελεστή συσχέτισης ρ , μέσα από την προηγούμενη εξίσωση, δεν εξαρτάται από τη μονάδα μέτρησης των X και Y και είναι συμμετρικός ως προς τις X και Y . Στην περίπτωση παρατηρήσεων δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y , κατά ζεύγη $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, η εκτίμηση της συσχέτισης τους μπορεί να γίνει ποιοτικά από το διάγραμμα διασποράς (scatter diagram), που αποτελεί την απεικόνιση των σημείων (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$, σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Ωστόσο για την γρηγορότερη εκτίμηση της συσχέτισης δύο μεγεθών και ειδικότερα σε περιπτώσεις μεγάλου όγκου δεδομένων και αριθμού συσχετίσεων είναι προτιμότερο να εξετάζεται ως δείκτης με αριθμητική υπόσταση. Η σημειακή εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης ρ του πληθυσμού από ένα δείγμα n ζευγών παρατηρήσεων των X και Y γίνεται με την αντικατάσταση της

συνδιασποράς s_{xy} και των διασπορών s_x^2 και s_y^2 , από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις από το δείγμα, στην προηγούμενη σχέση του συντελεστή συσχέτισης ρ :

$$\hat{\rho} \equiv r = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y}$$

Οι αμερόληπτες εκτιμήτριες s_{xy} , s_x^2 και s_y^2 δίνονται ως:

$$s_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \right)$$

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει η έκφραση του συντελεστή συσχέτισης ρ

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2)}}$$

Συγκεκριμένα στην περίπτωση της παρούσας εργασίας για τη σύγκριση των πραγματικών βροχοπτώσεων που καταγράφηκαν από τους βροχογράφους και των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων, όπως αυτές προέκυψαν από τα δεδομένα ανακλαστικότητας του radar και των βροχοπτώσεων (δύο τυχαίες μεταβλητές κατ' αναλογία X και Y) υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης τους. Έτσι προκύπτουν για κάθε σταθμό 5 συνολικά συντελεστές συσχέτισης που ο καθένας αντιστοιχεί στις 5 διαφορετικές σχέσεις $Z - R$ που εφαρμόζονται. Μετά από αναζήτηση στη βιβλιογραφία, σχετικά με το επιτρεπτό όριο του συντελεστή συσχέτισης, για να είναι αποδεκτή μία σχέση $Z - R$ (και () αναφέρεται κατά κύριο λόγο ως συντηρητικό κάτω όριο η τιμή 0.7, (Brandes,1999, Wong, 2006). Για την οπτικοποίηση της απόκρισης του συγκεκριμένου δείκτη - κριτηρίου διαμορφώνονται συγκεντρωτικοί πίνακες όλων των συντελεστών συσχέτισης και εξάγονται διαγράμματα διασποράς (scatter diagrams) των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων και των πραγματικών, όπως παρατίθενται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

4.2.2 Απόλυτο, μεροληπτικό σφάλμα και συνολικό ύψος βροχής

Μετά από σχετικές έρευνες σχετικά με την αξιολόγηση σχέσεων $Z - R$, (Parathanasiou 2007, Santos 2011, Kryza 2014, Tanelli 2003) προτείνεται η εύρεση και η μετ' έπειτα ερμηνεία των ποσοστιαίων απόλυτων (Normalized Mean Absolute Error – NMAE) και μεροληπτικών σφαλμάτων (Normalized Mean Bias - NMB), όπως επίσης και η σύγκριση των συνολικών υψών βροχοπτώσεων που καταγράφηκαν από τους βροχογράφους και των εκτιμώμενων για όλο το επεισόδιο από το radar.

Το κανονικοποιημένο απόλυτο σφάλμα παίρνει τιμές στο διάστημα $[-100\%, +\infty\%)$ και υπολογίζεται μέσω της επόμενης σχέσης:

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} \cdot 100\%$$

όπου R_i : το ύψος της εκτιμώμενης βροχής από το radar, ανά χρονικό βήμα i .

G_i : το ύψος βροχής που κατέγραψε ο βροχογράφος για την ίδια χρονική στιγμή i

Η συγκεκριμένη στατιστική παράμετρος εκφράζει τη σχετική – μέση απόκλιση μεταξύ των εντάσεων βροχής που εξήχθησαν από το radar και αυτές των βροχογράφων. Επιπρόσθετα υπολογίζεται και το απόλυτο σφάλμα, που λόγω των αθροισμάτων των απολύτων διαφορών, είναι σε θέση να εκφράσει το ποσοστό της διαφοροποίησης των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων από τις πραγματικές, ενώ παίρνει τιμές στο διάστημα $[0\%, +\infty\%)$

$$NMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |R_i - G_i|}{\sum_{i=1}^n G_i} \cdot 100\%$$

Τα προηγούμενα κριτήρια καταδεικνύουν με διαφορετικό τρόπο το καθένα, την απόδοση του μοντέλου της κάθε σχέσης $Z - R$ σε επίπεδο χρονικής κλίμακας. Ωστόσο σε περιπτώσεις χρονικών υστερήσεων τα προηγούμενα σφάλματα αυξάνονται. Οι χρονικές υστερήσεις των μετρήσεων radar έναντι αυτών των βροχογράφων είναι πολλές περιπτώσεις αναμενόμενες, καθώς οφείλονται στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί για την μετακίνηση των

υδροσταγονιδίων από τα υψηλά επίπεδα της ατμόσφαιρας όπου στοχεύει το rainscanner έως το έδαφος. Η απόσταση αυτή είναι ανάλογη της οριζόντιας απόστασης του στόχου από το rainscanner. Επομένως το τελευταίο κριτήριο που τίθεται για την ορθότερη επιλογή της σχέσης Z-R και την παράβλεψη της χρονικής υστέρησης είναι η σύγκριση του συνολικού ύψους βροχής για όλο το επεισόδιο καθώς και της ανάλυσης του αθροιστικού διαγράμματος βροχόπτωσης. Για την οπτικοποίηση των προηγούμενων κριτηρίων εκτός από πίνακες σφαλμάτων και συνολικών υψών βροχής δημιουργήθηκαν διαγράμματα (bar charts) για τα σφάλματα κάθε σχέσης, αλλά και διαγράμματα αθροιστικών καμπυλών κάθε σχέσης.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

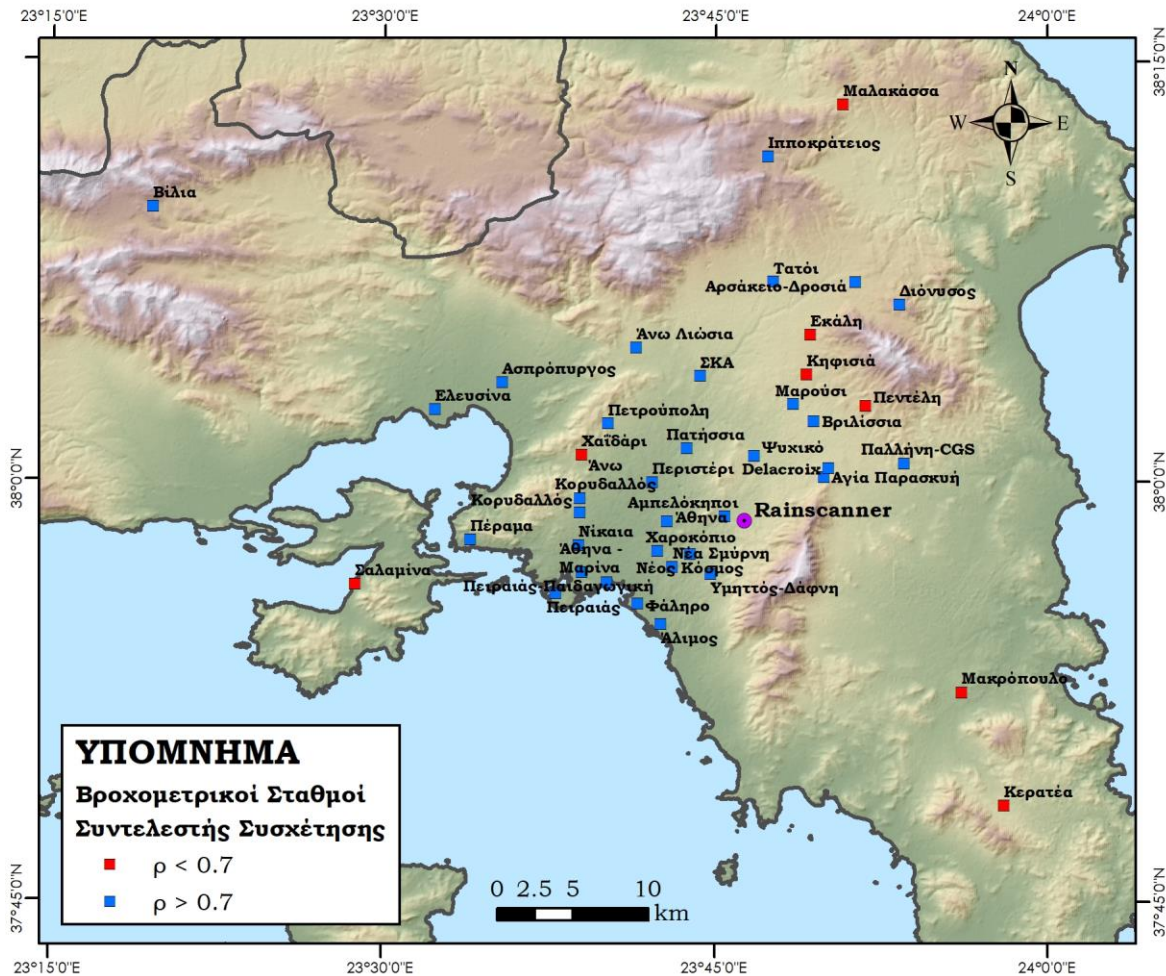
5.1 Υπολογισμός στατιστικών δεικτών και επιλογή σταθμών

Συνολικά αντλήθηκαν δεδομένα για το εξεταζόμενο επεισόδιο βροχής από 42 σταθμούς βροχόπτωσης, όπως αυτοί επιλέχθηκαν μετά τα κριτήρια που τέθηκαν σχετικά με την χωρική κάλυψη, την ομοιόμορφη κατανομή αυτών εντός της εμβέλειας του rainscanner και την απόρριψη εκείνων που βρέθηκαν εντός της περιοχής του groundclutter του rainscanner. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων και υπολογίστηκαν οι στατιστικοί δείκτες για κάθε σταθμό ανά Z-R σχέση.

Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης r , Πίνακας 5-1. Η συγκεκριμένη στατιστική παράμετρος αποτελεί το πρώτο κριτήριο για την αξιολόγηση και την επιλογή των σταθμών που θα μελετηθούν στην συνέχεια καθώς σταθμοί που δεν παρουσιάζουν καλή συσχέτιση είναι πιθανόν να οφείλονται σε συστηματικά ή τυχαία σφάλματα τόσο των δεδομένων rainscanner όσο και των βροχομετρικών σταθμών. Από τους 42 σταθμούς, υπολογίζεται συντελεστή συσχέτισης άνω του αποδεκτού ορίου, ($r \geq 0.7$), σε 33 απ' αυτούς ενώ οι υπόλοιποι 9 με τιμές αρκετά μικρές απορρίπτονται και σηματοδοτούνται με κόκκινο χρώμα, όπως φαίνεται στον Πίνακας 5-1. Επιπλέον η γεωγραφική κατανομή των σταθμών ως προς τον συντελεστή συσχέτισης απεικονίζεται στο Σχήμα 5-1. Φαίνεται πως σταθμοί οι οποίοι συνορεύουν με ορεινούς όγκους και κυρίως περιοχές πλησίον της περιοχής groundclutter του rainscanner παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα και άρα το φαινόμενο αυτό οφείλεται καθαρά σε θόρυβο των δεδομένων rainscanner στις περιοχές αυτές. Εν γένει η πλειοψηφία των σταθμών παρουσιάζει σχετικά υψηλούς συντελεστές συσχέτισης. Συγκεκριμένα από τους 33 σταθμούς, 9 έχουν συντελεστή συσχέτισης άνω του 0.9 ενώ ανά Z-R σχέση σε επίπεδο σταθμού, δεν φαίνεται κάποια ιδιαίτερη διαφοροποίηση. Γι' αυτό τον λόγο εισάγονται τα επόμενα κριτήρια που αφορούν τους δείκτες των σφαλμάτων.

Πίνακας 5-1: Συντελεστές συσχέτισης για κάθε σταθμό και σχέση Z-R

Σταθμός	a=200 b=1.6	a=431 b=1.25	a=230 b=1.4	a=140 b=1.5
Αίγινα	0.27	0.23	0.25	0.26
Αμπελόκηποι	0.80	0.80	0.80	0.80
Άνω Λιόσια	0.88	0.86	0.87	0.88
Αθήνα	0.90	0.90	0.90	0.90
Διόνυσος	0.71	0.66	0.69	0.70
Εκάλη	-0.22	-0.21	-0.21	-0.22
Φάληρο	0.84	0.85	0.85	0.84
Ιπποκράτειος	0.89	0.88	0.89	0.89
Μαρκόπουλο	-0.05	-0.06	-0.05	-0.05
Μαρούσι	0.76	0.79	0.78	0.77
Νέα Σμύρνη	0.74	0.69	0.71	0.73
Νέος Κόσμος	0.88	0.88	0.88	0.88
Πατήσια	0.71	0.70	0.71	0.71
Πεντέλη	-0.43	-0.42	-0.42	-0.42
Περιστέρι	0.95	0.94	0.94	0.95
Ψυχικό	0.95	0.94	0.94	0.95
Βίλια	0.71	0.71	0.71	0.71
Αρσάκειο - Δροσιά	0.79	0.73	0.76	0.78
Αθήνα - Μαρίνα	0.79	0.78	0.78	0.79
Τατόι	0.77	0.75	0.76	0.77
Ασπρόπυργος	0.89	0.89	0.89	0.89
Κορυδαλλός	0.71	0.68	0.70	0.71
Αγία Παρασκευή	0.94	0.93	0.93	0.94
Άλιμος	0.81	0.81	0.81	0.81
Πέραμα	0.80	0.77	0.79	0.80
Πειρούπολη	0.82	0.81	0.82	0.82
Βριλήσσια	0.95	0.94	0.94	0.95
Κηφισιά	0.24	0.20	0.22	0.23
Ελευσίνα	0.80	0.77	0.78	0.79
Νίκαια	0.71	0.68	0.70	0.71
Σαλαμίνα	0.63	0.59	0.61	0.62
Σκα	0.89	0.87	0.88	0.89
Υμητός - Δάφνη	0.87	0.83	0.85	0.86
Χαροκόπειο	0.89	0.88	0.88	0.89
Πειραιάς - Παιδαγωγική	0.91	0.89	0.90	0.91
Παλλήνη - CGS	0.84	0.84	0.84	0.84
Χαϊδάρι	0.57	0.62	0.60	0.58
Πειραιάς	0.93	0.94	0.94	0.93
Κερατέα	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
Μαλακάσα	0.56	0.47	0.51	0.53
Άνω Κορυδαλλός	0.88	0.87	0.88	0.88
Ντελακρούα - Αττική	0.90	0.89	0.90	0.90



Σχήμα 5-1: Γεωγραφική κατανομή σταθμών και διάκριση τους σύμφωνα με τον συντελεστή συσχέτισης τους

Για τους εναπομείναντες 33 σταθμούς προσδιορίζονται τα μεροληπτικά και τα απόλυτα σφάλματα ανά χρονικό βήμα εξέλιξης του επεισοδίου σε ποσοστιαία μορφή και αποτελούν τα επόμενα κριτήρια για την επιλογή της βέλτιστης βιβλιογραφικής σχέσης Z-R, ανά σταθμό (Πίνακας 5-2).

Το απόλυτο σφάλμα είναι σε θέση να δείξει τη διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών εκτιμώμενης και πραγματικής βροχόπτωσης, ενώ το μεροληπτικό σφάλμα προσθέτει την πληροφορία της υπερεκτίμησης ή της υποεκτίμησης του ύψους βροχής. Κατά κύριο λόγο παρατηρούνται ποσοστά σφαλμάτων στα αποδεκτά όρια εκτίμησης, εκτός από τον σταθμό των Αμπελοκήπων, ο οποίος παρουσιάζει αρκετά υψηλά ποσοστά τόσο μεροληπτικών όσο και απολύτων σφαλμάτων.

Πίνακας 5-2: Ποσοστιαία απόλυτα και μεροληπτικά σφάλματα ανά χρονικό βήμα, για κάθε σταθμό και σχέση Z-R

Σταθμός	a=200 b=1.6		a=431 b=1.25		a=230 b=1.4		a=140 b=1.5	
	NMB(%)	NMAE(%)	NMB(%)	NMAE(%)	NMB(%)	NMAE(%)	NMB(%)	NMAE(%)
Αμπελόκηποι	312	312	161	162	304	304	442	442
Άνω Λιόσια	-50	52	-76	76	-57	57	-38	43
Αθήνα	8	39	-41	49	-2	36	37	50
Διόνυσος	-37	60	-66	69	-43	61	-20	62
Φάληρο	0	56	-47	59	-10	52	26	67
Ιπποκράτειος	-1	33	-42	46	-7	32	28	46
Μαρούσι	87	108	7	68	73	100	140	149
Νέα Σμύρνη	9	61	-40	65	-1	60	38	77
Νέος Κόσμος	30	54	-29	46	17	50	64	76
Πατήσια	6	78	-40	62	-3	75	35	103
Περιστερί	-4	26	-47	52	-12	27	22	39
Ψυχικό	36	48	-19	31	29	45	76	85
Βίλια	-67	73	-84	84	-72	75	-59	69
Αρσάκειο - Δροσιά	-8	49	-49	62	-15	51	18	49
Αθήνα - Μαρίνα	-4	52	-50	59	-15	51	20	62
Τατόι	37	71	-21	52	27	64	76	100
Ασπρόπυργος	16	45	-35	41	7	41	48	68
Κορυδαλλός	7	76	-48	76	-9	76	31	77
Αγία Παρασκευή	-4	27	-49	53	-15	29	20	36
Αλιμος	-1	54	-47	56	-11	51	25	66
Πέραμα	-38	58	-67	71	-45	59	-22	59
Πετρούπολη	79	97	-1	63	63	86	127	137
Βριλήσσια	31	39	-25	30	22	34	68	69
Ελευσίνα	5	59	-40	56	-2	60	35	69
Νίκαια	2	65	-46	62	-9	64	28	77
Σκα	17	47	-36	46	6	44	48	68
Υμηττός - Δάφνη	53	72	-9	49	45	71	98	103
Χαροκόπειο	-15	44	-56	63	-25	47	6	44
Πειραιάς - Παιδαγωγική	2	39	-45	47	-8	39	29	47
Παλλήνη - CGS	-83	85	-95	95	-89	90	-81	83
Πειραιάς	10	43	-38	49	1	39	41	62
Άνω Κορυδαλλός	43	65	-28	52	24	56	77	83
Ντελακρούα - Αττική	14	35	-39	49	2	33	43	54

Τα ποσοστά των μεροληπτικών σφαλμάτων, όλων των σταθμών εκτός των Αμπελοκήπων (outlier), στο σύνολο των σχέσεων, κυμαίνονται από -95% μέχρι και 140%, ενώ των απολύτων από 6% έως 149%. Τα υψηλά ποσοστά που μεμονωμένα παρατηρούνται οφείλουν να ερμηνευτούν με γνώμονα το εύρος των τιμών αλλά και την μεθοδολογία υπολογισμού τους (ανά χρονικό βήμα). Έτσι λόγω του ότι το ύψος βροχής που καταμετρήθηκε σε χρονικό εύρος ενός δεκάλεπτου μπορεί να κυμανθεί σε μικρά εύρη τιμών, της τάξεως του 1 -2 mm, η διαφοροποίηση της εκτιμώμενης βροχής για μισό χιλιοστό βροχής, μπορεί απευθείας για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή να αποδώσει ποσοστό σφάλματος 50%, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί υψηλό βεβιασμένα. Ακόμη ακριβώς λόγω του ότι τα συγκεκριμένα σφάλματα υπολογίζονται ανά χρονικό βήμα, το σύνηθες σφάλμα, που παρατηρείται στα μετεωρολογικά radar, της χρονικής υστέρησης (μετατόπιση των καμπυλών εκτιμώμενων βροχοπτώσεων, έναντι της πραγματικής) είναι σε θέση να αυξήσει σημαντικά τα ποσοστά των συγκεκριμένων σφαλμάτων. Γι' αυτό τον λόγο εισάγεται το τελευταίο κριτήριο μέσω του στατιστικού δείκτη του μεροληπτικού σφάλματος για το σύνολο του επεισοδίου. Τα ποσοστιαία μεροληπτικά σφάλματα για το σύνολο του επεισοδίου για τους 33 σταθμούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3.

Συγκρίνοντας τους πίνακες των μεροληπτικών σφαλμάτων που προέκυψαν ανά χρονικό βήμα και για την συνολική βροχόπτωση (Πίνακας 5-2 και Πίνακας 5-3), παρατηρείται αύξηση του μεροληπτικού σφάλματος στην περίπτωση του υπολογισμού του ανά χρονικό βήμα, για την πλειοψηφία των σταθμών, όπως και αναμενόταν. Η σύγκριση γίνεται κυρίως με έμφαση στις σχέσεις που δίνουν χαμηλά σφάλματα, καθώς είναι αυτές που αναμένεται να κριθούν τελικώς οι βέλτιστες. Σχετικά αξιολογες διαφορές παρατηρούνται στους σταθμούς του Ασπρόπυργου, της Πετρούπολης, της Νίκαιας και του Άνω Κορυδαλλού. Ωστόσο λόγω των 4 σχέσεων Z-R και της αυξομείωσης των σφαλμάτων που παρουσιάζει η καθεμία, μια πληρέστερη εικόνα αναμένεται να δοθεί μέσω των διαγραμμάτων των αθροιστικών καμπυλών.

Πίνακας 5-3: Ποσοστιαία μεροληπτικά σφάλματα συνολικής βροχόπτωσης ανά σταθμό και σχέση Z-R

Σταθμός	NMB(%) συνολικής βροχόπτωσης			
	a=200 b=1.6	a=431 b=1.25	a=230 b=1.4	a=140 b=1.5
Αμπελόκηποι	312	161	304	442
Ανω Λιόσια	-36	-69	-45	-21
Αθήνα	10	-39	0	39
Διόνυσος	-25	-60	-33	-6
Φάληρο	-5	-50	-15	20
Ιπποκράτειος	53	-10	44	97
Μαρούσι	121	26	105	183
Νέα Σμύρνη	7	-41	-3	36
Νέος Κόσμος	13	-38	2	43
Πατήσια	7	-39	-1	37
Περιστέρι	5	-42	-4	34
Ψυχικό	44	-14	36	86
Βίλια	-59	-80	-65	-49
Αρσάκειο – Δροσιά	14	-36	5	45
Αθήνα – Μαρίνα	-16	-56	-26	5
Τατόι	22	-30	13	57
Ασπρόπυργος	1	-43	-7	29
Κορυδαλλός	-17	-59	-29	3
Αγία Παρασκευή	20	-36	7	51
Άλιμος	5	-44	-6	32
Πέραμα	-40	-68	-46	-24
Πειρούπολη	46	-19	33	86
Βριλήσσια	50	-14	39	92
Ελευσίνα	7	-39	0	37
Νίκαια	-16	-56	-26	5
Σκα	9	-41	-2	38
Υμητός – Δάφνη	40	-17	32	80
Χαροκόπειο	-14	-55	-24	8
Πειραιάς – Παιδαγωγική	-20	-57	-28	1
Παλλήνη – CGS	-85	-95	-90	-84
Πειραιάς	-24	-57	-30	-3
Ανω Κορυδαλλός	8	-45	-6	34
Ντελακρούα – Αττική	28	-32	15	61

5.2 Προσδιορισμός σχέσης Z-R ανά σταθμό, μέσω βελτιστοποίησης

Πέραν της μελέτης που διενεργείται μεταξύ των βιβλιογραφικών σχέσεων Z-R που επιλέχθηκαν προσδιορίστηκε μία ακόμη σχέση Z-R μέσω βελτιστοποίησης των τιμών των παραμέτρων a και b , χρησιμοποιώντας την μεθόδο των ελαχίστων τετραγώνων ανά σταθμό. Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν για τους 33 σταθμούς παρατίθενται στον Πίνακας 5-4. Η βελτιστοποίηση δείχνει πως υπάρχει μεγάλο εύρος των τιμών των παραμέτρων και ως αποτέλεσμα δεν ενδείκνυται για μεμονωμένη χρήση.

Πίνακας 5-4: Σχέσεις Z-R μέσω ελαχίστων τετραγώνων ανά σταθμό

Σταθμός	Προσαρμοσμένη σχέση Z-R		Σταθμός	Προσαρμοσμένη σχέση Z-R	
	a	b		a	B
Αμπελόκηποι	500	1.23	Κορυδαλλός	229	2
Άνω Λιόσια	100	1.68	Αγία Παρασκευή	180	1.67
Αθήνα	225	1.56	Άλιμος	195	1.5
Διόνυσος	146	2.0	Πέραμα	100	2.0
Φάληρο	214	1.31	Πετρούπολη	446	1.47
Ιπποκράτειος	187	1.93	Βριλήσσια	301	1.56
Μαρούσι	435	1.04	Ελευσίνα	239	2.0
Νέα Σμύρνη	296	2.0	Νίκαια	212	2.0
Νέος Κόσμος	302	1.43	Σκα	258	1.79
Πατήσια	475	2.0	Υμητός - Δάφνη	428	2.0
Περιστέρι	179	1.53	Χαροκόπειο	161	1.63
Ψυχικό	323	1.71	Πειραιάς - Παιδαγωγική	222	2.0
Βίλια	100	1.0	Παλλήνη - CGS	100	2.0
Αρσάκειο - Δροσιά	202	2.0	Πειραιάς	264	1.31
Αθήνα - Μαρίνα	190	1.71	Άνω Κορυδαλλός	270	1.37
Τατόι	371	1.95	Ντελακρούα - Αττική	236	1.73
Ασπρόπυργος	282	1.62			

5.3 Σύνθεση κριτηρίων για την εύρεση της βέλτιστης σχέσης Z-R

Μετά τον υπολογισμό των απαραίτητων στατιστικών δεικτών για κάθε σταθμό, σειρά έχει η παραγωγή διαγραμμάτων για την καλύτερη οπτικοποίηση των

αποτελεσμάτων. Οι αριθμητικές τιμές των στατιστικών παραμέτρων και η γενικότερη εικόνα που αποδίδεται για κάθε σταθμό μέσω των διαγραμμάτων είναι αυτή που θα καθορίσει εν τέλει την βέλτιστη σχέση για κάθε σταθμό.

Η επιλογή της βέλτιστης σχέσης Z-R, ανά σταθμό αποτελεί μία κριτική διαδικασία σύνθεσης και αποκωδικοποίησης των πολλαπλών πληροφοριών που δίνονται μέσα από τους στατιστικούς δείκτες που τέθηκαν και των διαγραμμάτων που παράχθηκαν και δεν αποτελεί μία αλγοριθμική διαδικασία, αλλά εξαρτάται από τη βαρύτητα που ο μελετητής δίνει σε κάθε κριτήριο.

Αρχικά μέσω της εκτίμησης του συντελεστή συσχέτισης και από την εικόνα που δίνει η καμπύλη των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων συγκριτικά με αυτή του βροχογράφου σκιαγραφείται μία πρώτη προτίμηση κάποιων σχέσεων. Ωστόσο ακριβώς επειδή, όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής συσχέτισης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών σχέσεων για κάθε σταθμό δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στους επόμενους δείκτες των σφαλμάτων και της εικόνας που παρουσιάζει το διάγραμμα των αθροιστικών καμπυλών. Το διάγραμμα των αθροιστικών βροχοπτώσεων και τα ραβδογράμματα (bar charts) των σφαλμάτων συνεκτιμώνται και τελικώς καθορίζεται η βέλτιστη σχέση. Τα δύο τελευταία διαγράμματα στη συντριπτική πλειοψηφία των σταθμών, φαίνεται να αποδίδουν παρόμοια αποτελέσματα σχετικά με την καλύτερη Z-R σχέση. Η αθροιστική καμπύλη που προσεγγίζει καλύτερα αυτή του βροχογράφου είναι συνηθέστερα αυτή με τα χαμηλότερα σφάλματα. Μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας οι βέλτιστες βιβλιογραφικές σχέσεις που προέκυψαν για τους εξεταζόμενους σταθμούς αναγράφονται στον επόμενο Πίνακα 5-5.

Συνολικά για 10 σταθμούς φαίνεται να ανταποκρίνεται καλύτερα η 1^η σχέση ($a=200$ $b=1.6$), για άλλους 10 η 3^η ($a=230$ $b=1.4$), ενώ σε 7 προτιμήθηκε η 2^η σχέση με $a=431$ και $b=1.25$ και για τους υπόλοιπους 6 επιλέχθηκε η 4^η σχέση με παραμέτρους $a=140$ και $b=1.5$.

Η σύγκριση έγινε μεταξύ των βιβλιογραφικών σχέσεων που επιλέχθηκαν ύστερα από αναζήτηση σε σχετικές επιστημονικές μελέτες και δημοσιεύσεις

και δεν συμπεριλάμβανε την αντιπαράθεση αυτών με την σχέση Z-R που βρέθηκε για κάθε σταθμό μετά την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

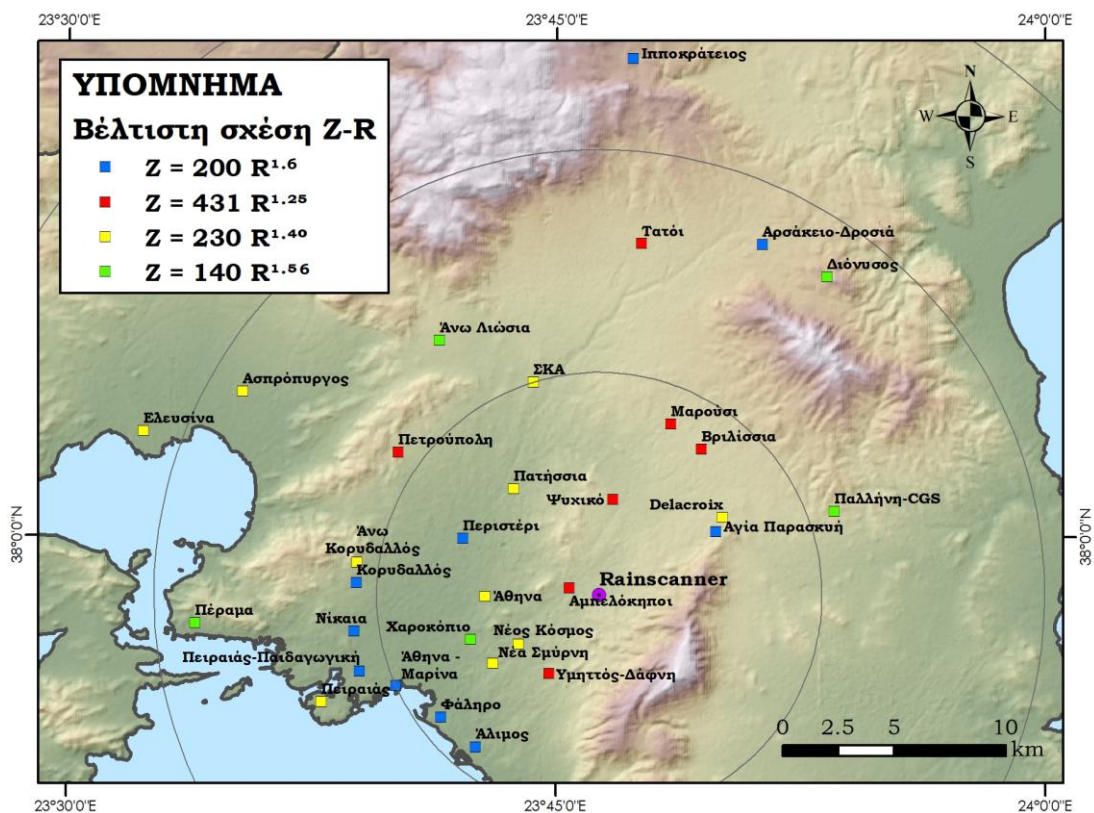
Πίνακας 5-5: Βέλτιστη σχέση Z-R ανά σταθμό

Α/Α	Σταθμός	Σχέση $Z=aR^b$			
		a=200 b=1.6	a=431 b=1.25	a=230 b=1.4	a=140 b=1.5
1	Αμπελόκηποι		•		
2	Άνω Λιόσια				•
3	Αθήνα			•	
4	Διόνυσος				•
5	Φάληρο	•			
6	Ιπποκράτειος	•			
7	Μαρούσι		•		
8	Νέα Σμύρνη			•	
9	Νέος Κόσμος			•	
10	Πατήσια			•	
11	Περιστέρι	•			
12	Ψυχικό		•		
13	Βίλια				•
14	Αρσάκειο - Δροσιά	•			
15	Αθήνα - Μαρίνα	•			
16	Τατόι		•		
17	Ασπρόπυργος			•	
18	Κορυδαλλός	•			
19	Αγία Παρασκευή	•			
20	Άλιμος	•			
21	Πέραμα				•
22	Πετρούπολη		•		
23	Βριλήσσια		•		
24	Ελευσίνα			•	
25	Νίκαια	•			
26	Σκα			•	
27	Υμηττός - Δάφνη		•		
28	Χαροκόπειο				•
29	Πειραιάς - Παιδαγωγική	•			
30	Παλλήνη - CGS				•
31	Πειραιάς			•	
32	Άνω Κορυδαλλός			•	
33	Ντελακρουά - Αττική			•	
ΣΥΝΟΛΟ		10	7	10	6

Ακριβώς λόγω της φύσης της συγκεκριμένης μεθόδου στις περισσότερες των περιπτώσεων, ο συντελεστής r και τα εξαγόμενα σφάλματα ήταν βελτιωμένα

συγκριτικά με τους αντίστοιχους δείκτες – κριτήρια που προέκυψαν από τις υπόλοιπες σχέσεις. Επομένως η σύγκριση μόνο μέσω του κριτηρίου των συντελεστών συσχέτισης δεν θα έδινε διακριτά αποτελέσματα για τις υπόλοιπες βιβλιογραφικές σχέσεις, αφού για τους περισσότερους σταθμούς θα υπερερούσε αυτή των ελαχίστων τετραγώνων.

Στο Σχήμα 5-2 αποτυπώνεται η χωρική κατανομή των βέλτιστων σχέσεων Z-R, που επιλέχθηκαν. Η χωρική μεταβλητότητα που παρουσιάζει η σχέση είναι εμφανής. Σταθμοί πλησίον της ακτογραμμής φαίνεται να ανταποκρίνονται καλύτερα με την εφαρμογή της σχέσης $Z = 200 \cdot R^{1.6}$, ενώ για την περίπτωση σταθμών σε σχετικά μικρή απόσταση από το rainscanner η βέλτιστη σχέση φέρεται να είναι η $Z = 230 \cdot R^{1.4}$.



Σχήμα 5-2: Γεωγραφική απεικόνιση βέλτιστων σχέσεων Z-R ανά σταθμό

5.4 Διαδικασία εκτίμησης βέλτιστης Z-R για μεμονωμένους σταθμούς

Στη συνέχεια παρατίθενται 5 ενδεικτικοί σταθμοί με τα διαγράμματα που παράχθηκαν μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της MATLAB, τα οποία και σχολιάζονται για την καλύτερη και πιο στοχευμένη περιγραφή της

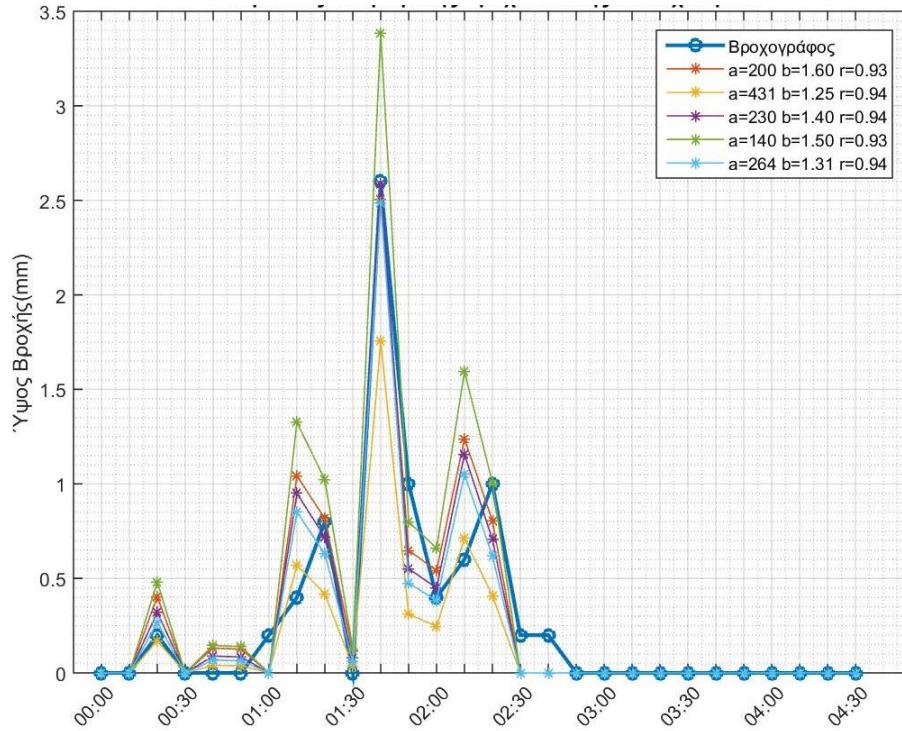
διαδικασίας επιλογής της καλύτερης βιβλιογραφικής σχέσης Z-R. Η επιλογή των σταθμών που παρουσιάζονται έγινε με στόχο την εξέταση διαφορετικών χωρίων της περιοχής μελέτης, την ανάδειξη σταθμών με διαφορετικές βέλτιστες σχέσεις Z-R και την παρουσίαση κλιμακωτά προσαρμοζόμενων σταθμών (καλή - μέτρια και απορριπτέα προσαρμογή εκτιμώμενων βροχοπτώσεων με των πραγματικών). Τελικώς επιλέγονται οι σταθμοί του Πειραιά, της Αθήνας, της Ιπποκράτειους Πολιτείας, του Υμητιού - Δάφνης και του απορριπτέου σταθμού της Μαλακάσας, λόγω κριτηρίου συντελεστή συσχέτισης.

5.4.1 Σταθμός: Πειραιάς

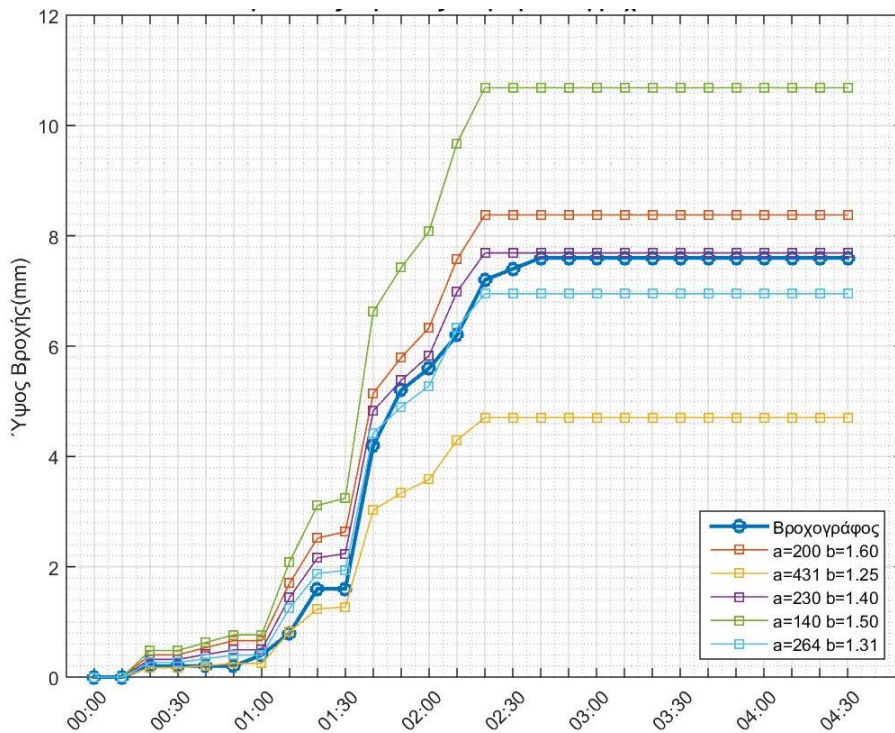
Από το παρακάτω διάγραμμα, Σχήμα 5-3 είναι εμφανές ότι όλες οι σχέσεις Z-R ανταποκρίνονται σχεδόν σε άριστο βαθμό, όπως άλλωστε φαίνεται και από τους βαθμούς συσχέτισης που προκύπτουν και εμφανίζονται στο υπόμνημα. Οι υψηλές τιμές των συντελεστών συσχέτισης φανερώνουν την ιδιαίτερα καλή συσχέτιση μεταξύ των εκτιμώμενων υψών βροχόπτωσης και των καταγεγραμμένων από τον βροχογράφο του Πειραιά. Ωστόσο οι διαφορές μεταξύ των συντελεστών r ανά σχέση Z-R είναι πολύ μικρές και επομένως δεν μπορούν να αποτελέσουν μοναδικό κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης σχέσης.

Από το διάγραμμα των αθροιστικών καμπυλών βροχόπτωσης, Σχήμα 5-4, γίνεται φανερό ότι οι σχέσεις που πλησιάζουν περισσότερο την καμπύλη του βροχογράφου είναι η 1^η ($a=200$ $b=1.6$), η 3^η ($a=230$ $b=1.4$) Το ραβδόγραμμα των απόλυτων και μεροληπτικών σφαλμάτων (Σχήμα 5-5) τεκμηριώνει τις ακριβώς προηγούμενες παρατηρήσεις.

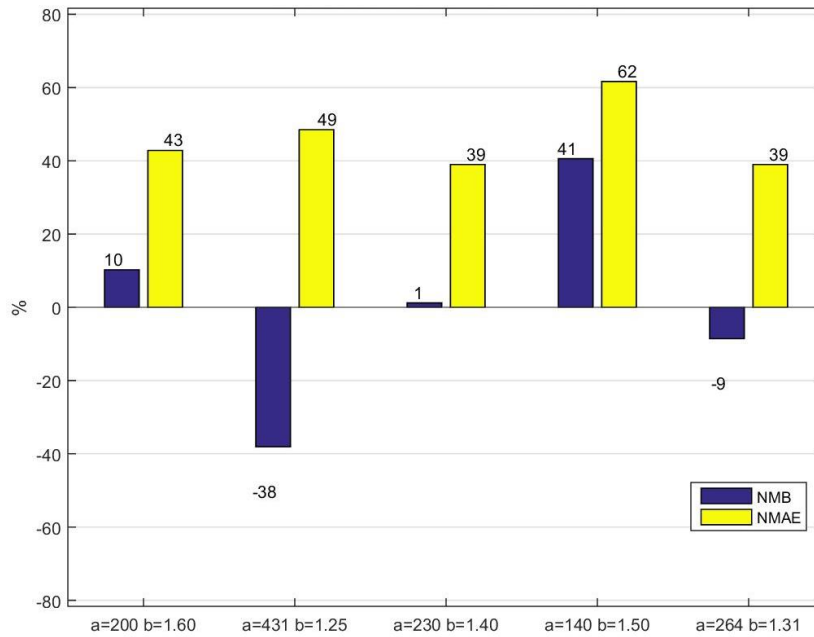
Το απόλυτο σφάλμα για την τρίτη σχέση είναι ίδιο με αυτή που προκύπτει από την βελτιστοποίηση με τιμή το 39% ενώ το μεροληπτικό είναι χαμηλότερο στην τρίτη. Η τέταρτη σχέση έχει τα υψηλότερα απόλυτα και μεροληπτικά σφάλματα συγκριτικά με τις άλλες. Συνεπώς η βέλτιστη σχέση για τον σταθμό του Πειραιά είναι η $Z = 230R^{1.4}$, η οποία συμβαδίζει με τις τιμές που προκύπτουν από την βελτιστοποιημένη σχέση $Z = 264R^{1.31}$.



Σχήμα 5-3: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχοπτώσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Πειραιάς)



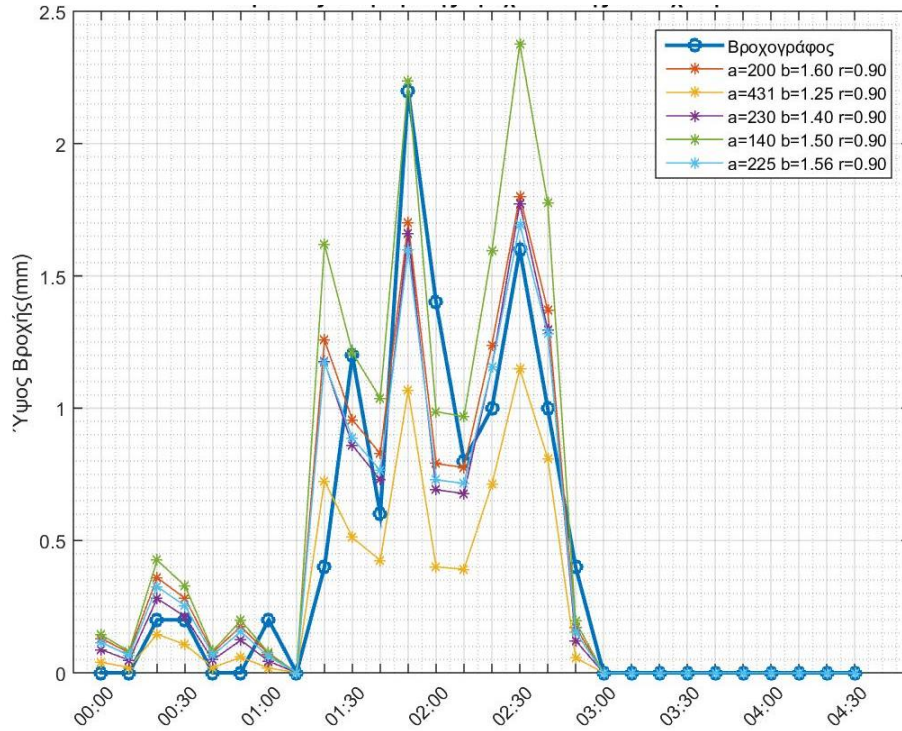
Σχήμα 5-4: Αθροιστικές καμπύλες εκτιμώμενης βροχοπτώσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Πειραιάς)



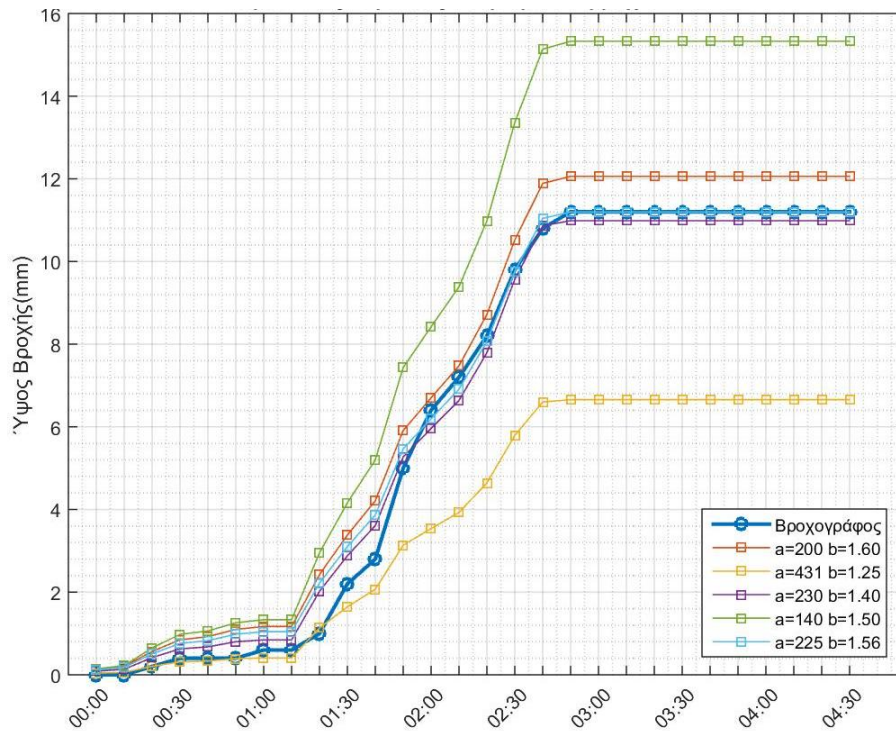
Σχήμα 5-5: Ραβδόγραμμα μεροληπτικών και απολύτων σφαλμάτων ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Πειραιάς)

5.4.2 Σταθμός: Αθήνα

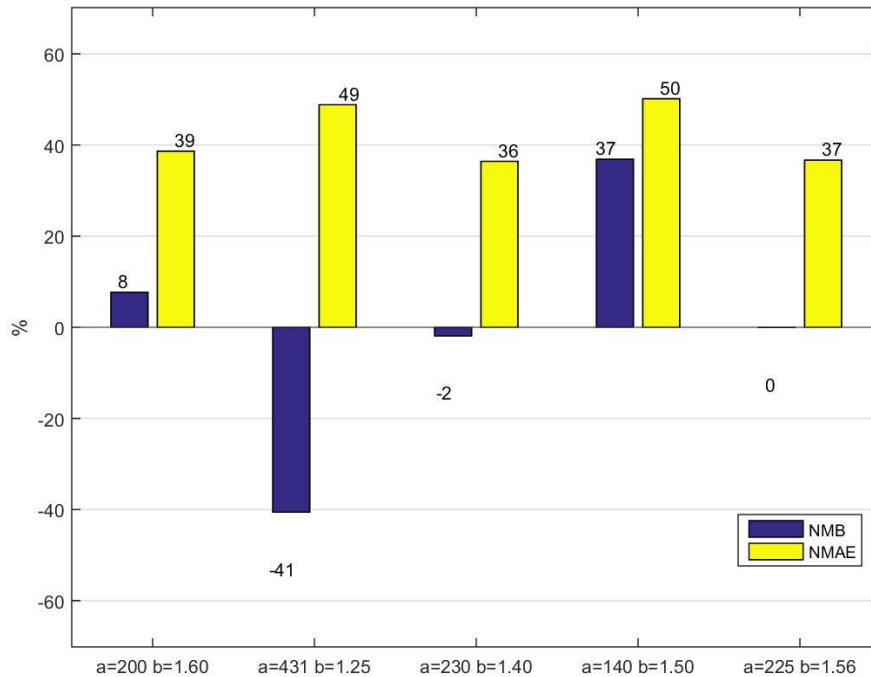
Η τάση των καμπυλών βροχοπτώσης όλων των σχέσεων Z-R, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5-6, αποδεικνύει για την περίπτωση του σταθμού Αθήνας, την καλή συσχέτιση μεταξύ των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων και των αντίστοιχων καταγεγραμμένων από τον βροχογράφο της Αθήνας και δικαιολογούν τον υψηλό συντελεστή συσχέτισης $r = 0.90$. Παρ' όλα αυτά αν και ο συντελεστής επιβεβαιώνει την καλή συσχέτιση των δεδομένων δεν μπορεί να αποδώσει την βέλτιστη σχέση. Από το διάγραμμα των αθροιστικών καμπυλών βροχοπτώσης είναι εμφανές ότι οι σχέσεις που προσεγγίζουν καλύτερα τις τιμές των πραγματικών υψών βροχής είναι η 3^η ($a=230$ $b=1.4$) με τιμές παραμέτρου αρκετά κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ($a=225$ $b=1.56$). Τέλος το διάγραμμα με τα σφάλματα NMB και NMAE για κάθε σχέση Z-R, σε συνδυασμό με τις προηγούμενες παρατηρήσεις καταδεικνύει πως η 3^η σχέση είναι η βέλτιστη για τον σταθμό αυτό.



Σχήμα 5-6: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Αθήνα)



Σχήμα 5-7: Αθροιστικές καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Αθήνα)

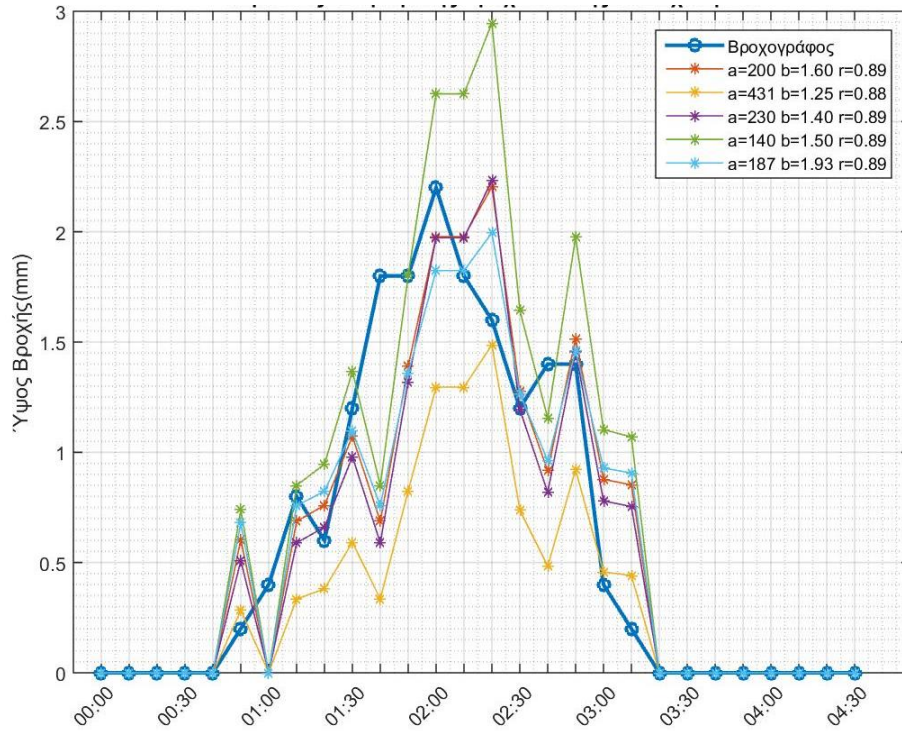


Σχήμα 5-8: Ραβδόγραμμα μεροληπτικών και απολύτων σφαλμάτων ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Αθήνα)

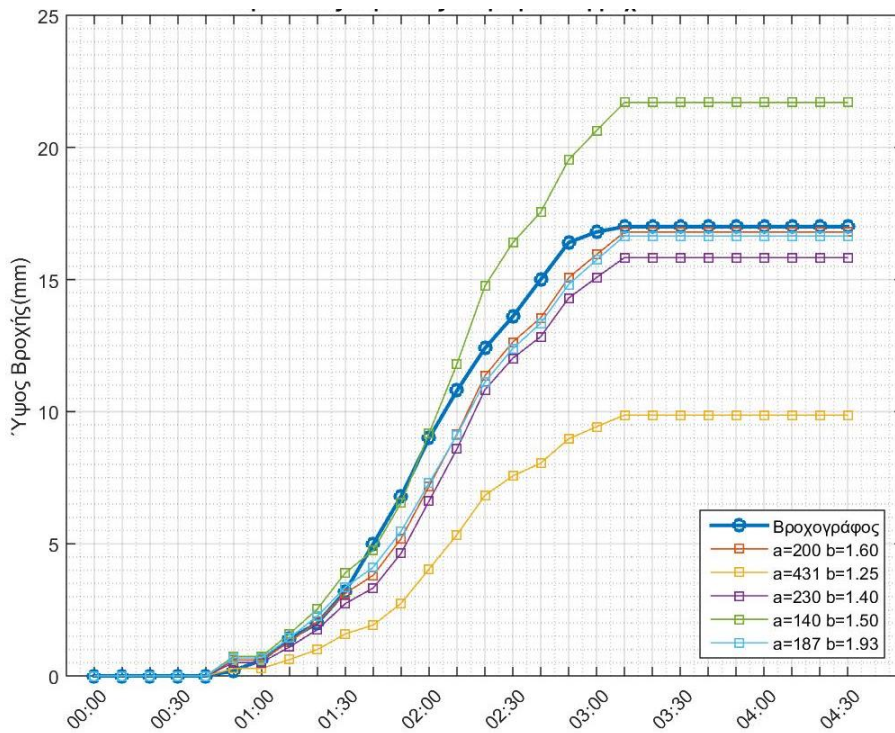
5.4.3 Σταθμός: Ιπποκράτειος Πολιτεία

Από το διάγραμμα των καμπυλών εκτιμώμενων υψών βροχής για κάθε Z-R σχέση, οι συντελεστές συσχέτισης r παίρνουν τιμές 0.88 και 0.89 και δείχνουν την καλή προσαρμογή των εξαγόμενων αποτελεσμάτων συγκριτικά με τις καταγεγραμμένες από τον βροχογράφο της Ιπποκράτειου Πολιτείας. Ωστόσο από την γενικότερη εικόνα των καμπυλών η 2^η (a=431 b=1.25) και η 4^η (a=140 b=1.5) σχέση προσεγγίζουν λιγότερο ικανοποιητικά τις τιμές του βροχογράφου.

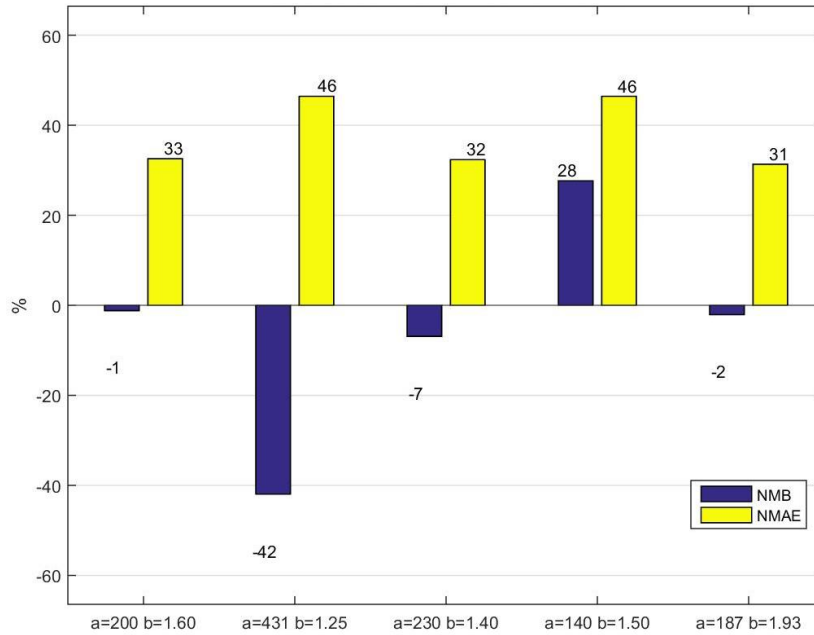
Η προηγούμενη παρατήρηση γίνεται εντονότερη από το διάγραμμα των αθροιστικών καμπυλών. Οι καμπύλες που πλησιάζουν περισσότερο αυτή του βροχογράφου είναι αυτές που αντιστοιχούν στην 1^η (a=200 b=1.6) και στην 3^η (a=230 b=1.4) σχέση, ενώ συγκρίνοντας τα σφάλματα που προσδιορίστηκαν για κάθε σχέση η βέλτιστη από τις βιβλιογραφικές σχέσεις Z-R είναι η 1^η (a=200 b=1.6), εφόσον συγκρινόμενη με την 3^η (a=230 b=1.4) παρ' ότι το ποσοστό του απόλυτου σφάλματος της τελευταίας είναι μικρότερο (κατά 1%), το ποσοστό του μεροληπτικού σφάλματος είναι αισθητά μικρότερο στην περίπτωση της σχέσης $Z = 200R^{1.6}$.



Σχήμα 5-9: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Ιπποκράτειος Πολιτεία)



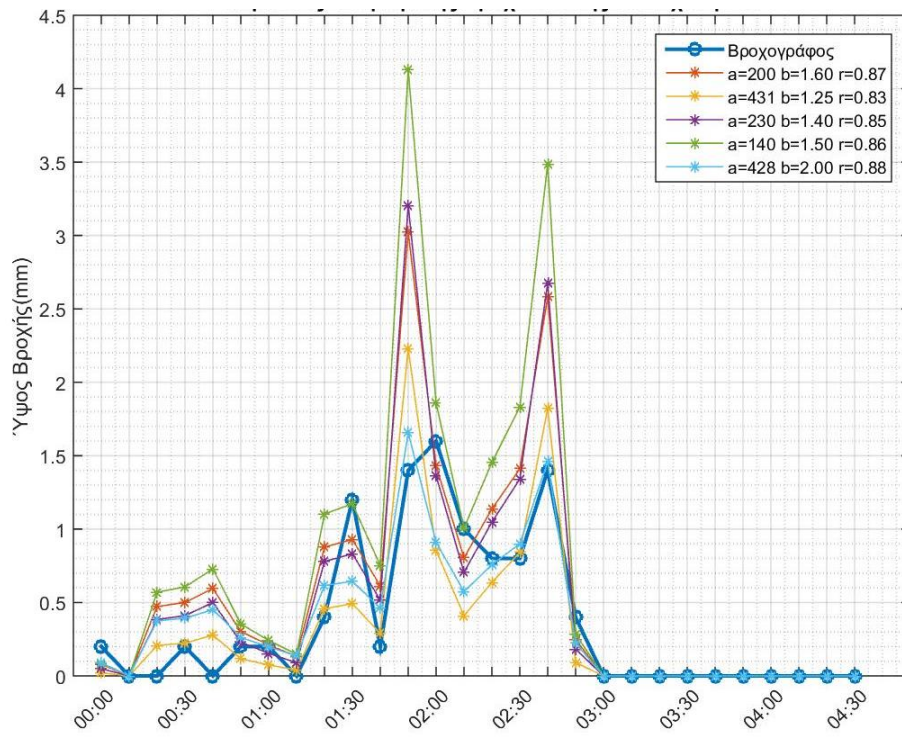
Σχήμα 5-10: Αθροιστικές καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Ιπποκράτειος Πολιτεία)



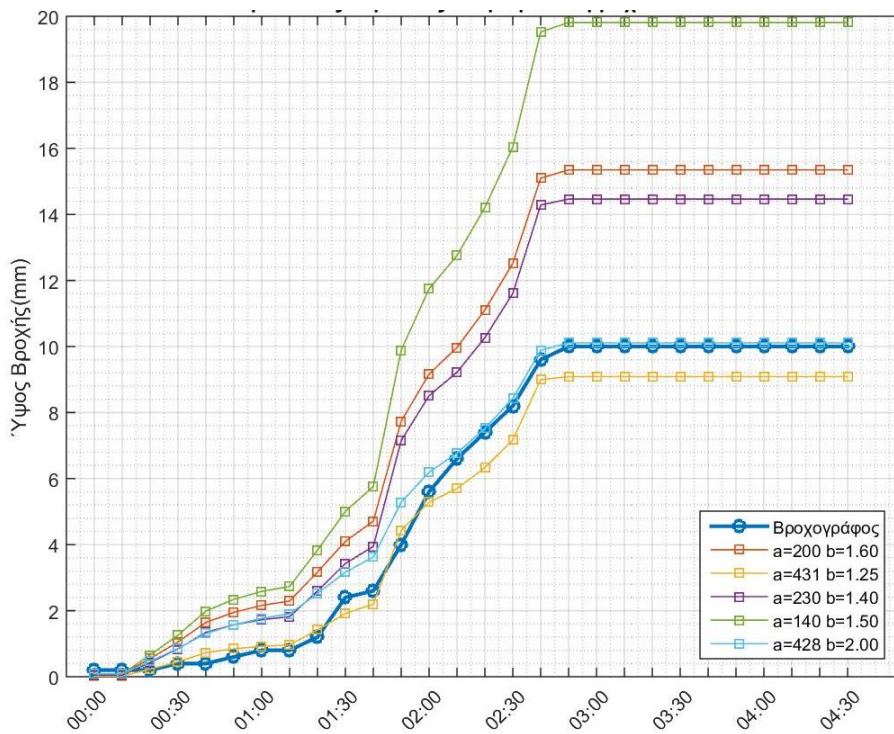
Σχήμα 5-11: Ραβδόγραμμα μεροληπτικών και απολύτων σφαλμάτων ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Ιπποκράτειος Πολιτεία)

5.4.4 Σταθμός Υμηττός – Δάφνη

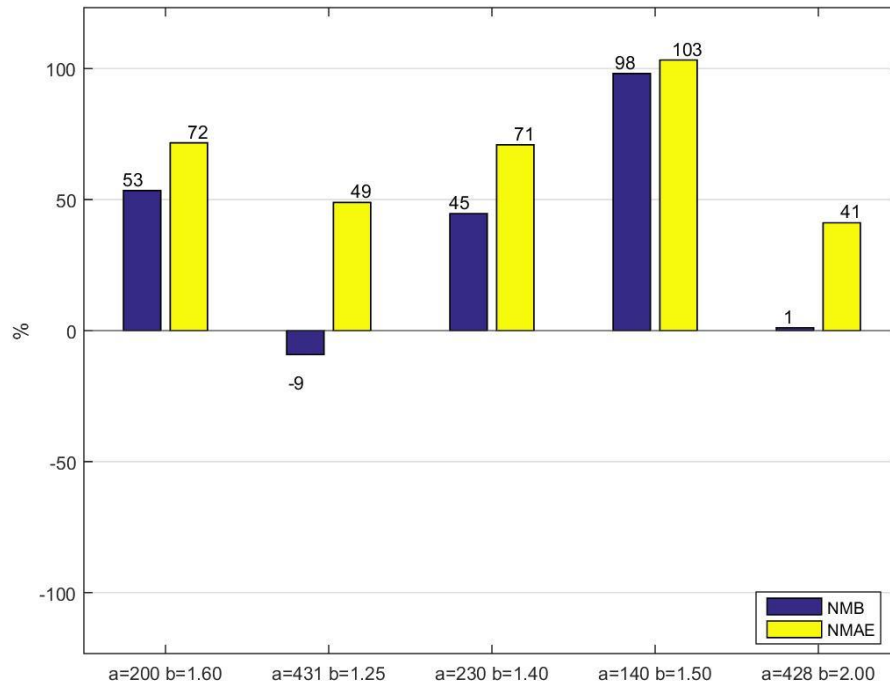
Οι υψηλοί συντελεστές συσχέτισης που προσδιορίζονται για τις σχέσεις Z-R καταδεικνύουν την τάση τους να πλησιάζουν ικανοποιητικά τα δεδομένα του βροχογράφου Υμηττού – Δάφνης. Παρ' ότι ο χαμηλότερος συντελεστής συσχέτισης ($r = 0.83$) ανήκει στην 2^η σχέση (a=431 b=1.25) από το διάγραμμα των καμπυλών εκτιμώμενων βροχοπτώσεων, φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τα πραγματικά δεδομένα, συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Η ασυμφωνία αυτή οπτικής και αριθμητικής συσχέτισης εξηγείται εάν ληφθεί υπ' όψιν μια ελαφριά χρονική υστέρηση μεταξύ των δεδομένων από το radar και της κατακρήμνισης που καταγράφεται από τον βροχογράφο. Έτσι παρ' ότι παρατηρούνται δύο αιχμές από τα δεδομένα ανακλαστικότητας του radar για το επεισόδιο, τις χρονικές στιγμές 01:50 και 02:40, η πρώτη αιχμή φαίνεται να καταγράφεται από τον βροχογράφο στις 02:00. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τη σύγκριση των τιμών σε επίπεδο χρονικής καταγραφής. Παρ' ότι η 1^η, η 3^η και η 4^η καμπύλη παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ των συγκεκριμένων αιχμών από τις αντίστοιχες του βροχογράφου, οι χαμηλές τιμές δείχνουν να συμβαδίζουν με αυτές του βροχογράφου με μια σχετική ωστόσο χρονική μετατόπιση.



Σχήμα 5-12: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Υμηττός -Δάφνη)



Σχήμα 5-13: Αθροιστικές καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Υμηττός -Δάφνη)

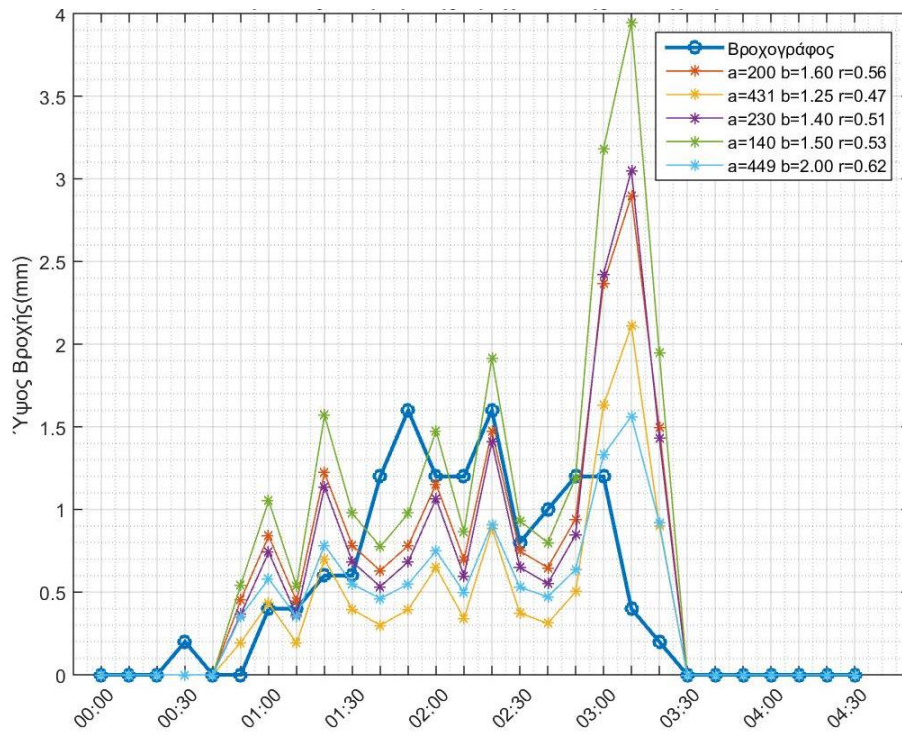


Σχήμα 5-14: Ραβδόγραμμα μεροληπτικών και απολύτων σφαλμάτων ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Υμηττός – Δάφνη)

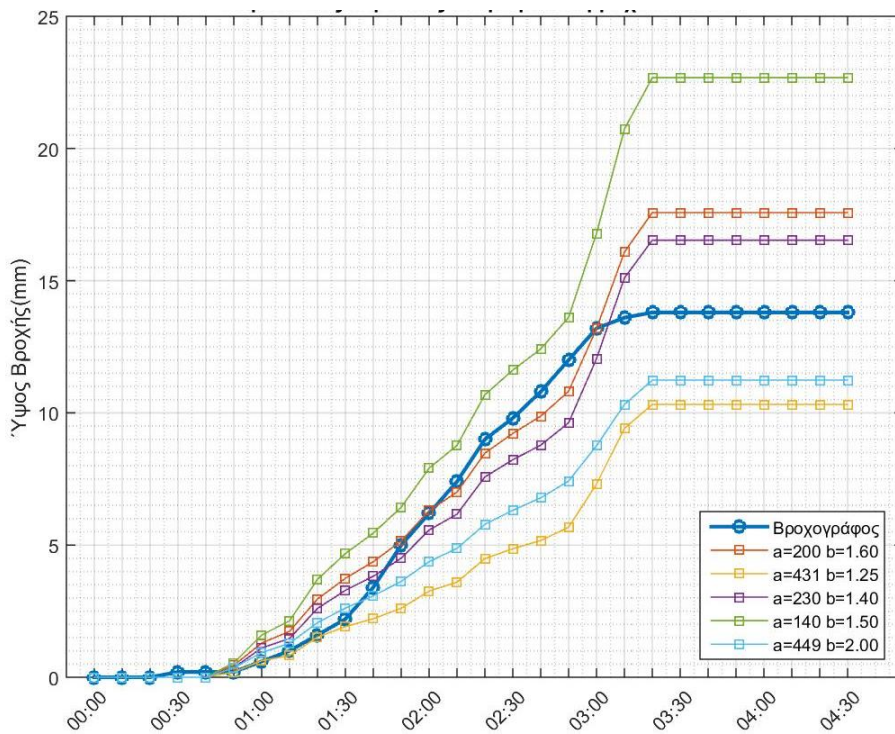
Καθώς οι χαμηλές τιμές είναι περισσότερες των τιμών με υψηλά ύψη βροχής, προκύπτει πως οι σχέσεις αυτές έχουν καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με αυτή της 2^{ης} σχέσης (a=431 b=1.25), όπου υπάρχει καλύτερη συσχέτιση στις υψηλές τιμές. Από το διάγραμμα των αθροιστικών καμπυλών και από το διάγραμμα των σφαλμάτων όμως είναι εμφανές πως η 2^η σχέση ανταποκρίνεται καλύτερα από τις άλλες σχέσεις. Επιπλέον οι τιμές των παραμέτρων σε σχέση με την βελτιστοποιημένη σχέση, αν και είναι κοντά ως προς την παράμετρο a, η παράμετρος b έχει εμφανή απόκλιση.

5.4.5 Σταθμός Μαλακάσα

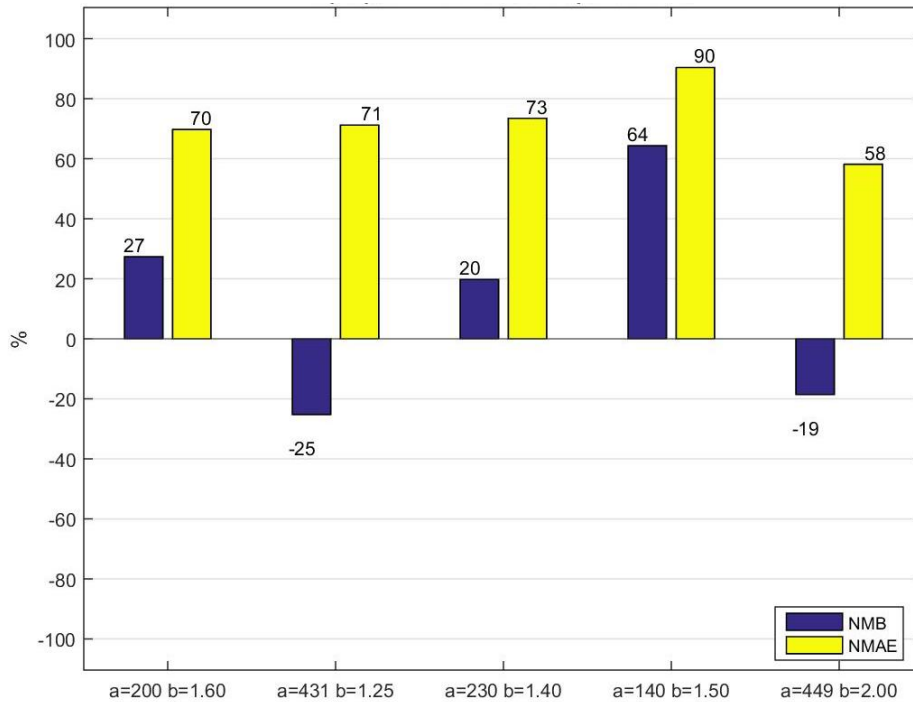
Από το διάγραμμα των καμπυλών εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R και από τους συντελεστές συσχέτισης r κάθε σχέσης γίνεται φανερό η σχετικά κακή απόκριση των σχέσεων εκτίμησης βροχόπτωσης συγκριτικά με τις τιμές του βροχογράφου της Μαλακάσας. Το γεγονός αυτό πιθανόν οφείλεται σε σφάλματα χρονικής υστέρησης αλλά και τον συνδυασμό τους με τυχαία σφάλματα (αιχμή χρονικής στιγμής 03:10) ή σε σφάλματα εξασθένησης του σήματος, καθώς το χωρικό κελί της Μαλακάσας είναι αρκετά απομακρυσμένο από το radar.



Σχήμα 5-15: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Μαλακάσα)



Σχήμα 5-16: Αθροιστικές καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Μαλακάσα)



Σχήμα 5-17: Ραβδόγραμμα μεροληπτικών και απολύτων σφαλμάτων ανά σχέση Z-R (Σταθμός: Μαλακάσα)

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις υποδεικνύουν σφάλματα που κάνουν έντονη την διαφοροποίηση των τιμών όταν αυτές εξετάζονται μεμονωμένα ανά χρονικό βήμα. Σε μια πιο συνολική εικόνα ολόκληρου του επεισοδίου βροχής, όπως αυτή δίνεται από το διάγραμμα των αθροιστικών καμπυλών, οι συνολικές εκτιμώμενες βροχοπτώσεις δεν διαφέρουν στον βαθμό που θα αναμενόταν μετά την κακή προσαρμογή των καμπυλών του Σχήμα 5-17. Η 1^η (a=200 b=1.6) η 3^η σχέση (a=230 b=1.4) και αυτή των ελαχίστων τετραγώνων πλησιάζουν περισσότερο την καμπύλη των αθροιστικών καταγεγραμμένων τιμών βροχοπτώσεως από τον βροχογράφο της Μαλακάσας.

5.5 Σύγκριση βέλτιστης βιβλιογραφικής σχέσης Z-R και σχέσης που εξήχθη μέσω βελτιστοποίησης

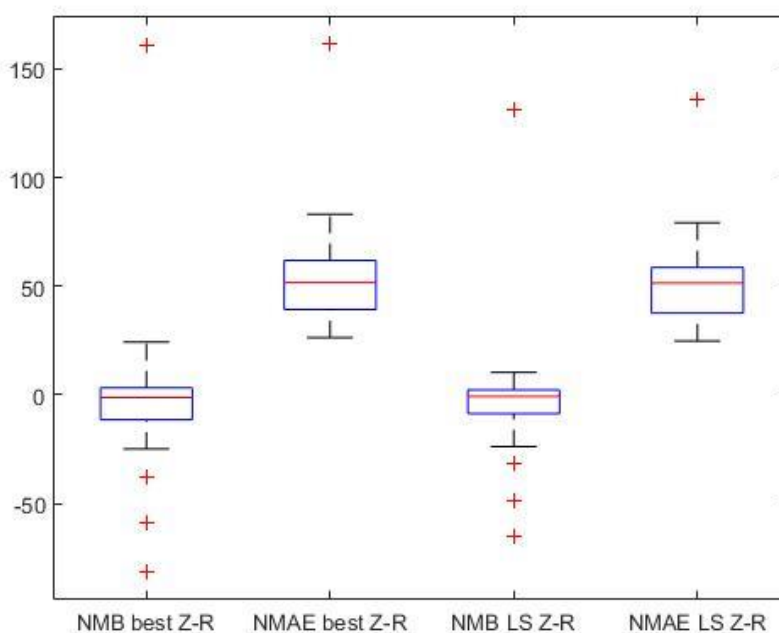
Όπως φάνηκε και από τις παραμέτρους που προσδιορίστηκαν μέσω της μεθόδου βελτιστοποίησης στον Πίνακα 5-4, οι τιμές των a και b κυμαίνονται στις περισσότερες περιπτώσεις αρκετά κοντά στις τιμές των παραμέτρων της βέλτιστης βιβλιογραφικής σχέσης. Στον Πίνακα 5-6 συγκρίνονται μέσω των στατιστικών δεικτών που μελετήθηκαν, οι βέλτιστες βιβλιογραφικές σχέσεις που επιλέχθηκαν και αυτές των ελαχίστων τετραγώνων.

Πίνακας 5-6: Σύγκριση στατιστικών δεικτών βέλτιστης βιβλιογραφικής σχέσης Z-R και ελαχίστων τετραγώνων

Σταθμός	Συντελεστής συσχέτισης		NMB (%) ανά 10min		NMAE (%) ανά 10min		NMB (%) συνολικά του επεισοδίου	
	βιβλ/κ η	ελαχ. τετρ.	βιβλ/κ η	ελαχ. τετρ.	βιβλ/κ η	ελαχ. τετρ.	βιβλ/κ η	ελαχ. τετρ.
Αμπελόκηποι	0.8	0.8	161	132	162	136	19	132
Άνω Λιόσια	0.88	0.88	-38	-22	43	36	19	-1
Αθήνα	0.9	0.9	-2	0	36	37	-1	2
Διόνυσος	0.7	0.75	-20	-24	62	56	10	-10
Φάληρο	0.84	0.85	0	-6	56	51	10	-11
Ιπποκράτειος	0.89	0.89	-1	-2	33	31	4	51
Μαρούσι	0.79	0.79	7	0	68	62	10	18
Νέα Σμύρνη	0.71	0.76	-1	-10	60	54	12	-12
Νέος Κόσμος	0.88	0.88	17	-3	50	43	15	-15
Πατήσια	0.71	0.71	-3	-32	75	59	29	-31
Περιστέρι	0.95	0.95	-4	4	26	28	-6	13
Ψυχικό	0.94	0.95	-19	1	31	25	22	7
Βίλια	0.71	0.72	-59	-49	69	65	7	-36
Αρσάκειο - Δροσιά	0.79	0.82	-8	-9	49	46	5	12
Αθήνα - Μαρίνα	0.79	0.79	-4	0	52	53	-1	-12
Τατόι	0.75	0.78	-21	-3	52	55	-6	-14
Ασπρόπυργος	0.89	0.89	7	-6	41	38	9	-18
Κορυδαλλός	0.71	0.73	7	10	76	79	-4	-14
Αγία Παρασκευή	0.94	0.94	-4	2	27	28	-1	28
Άλιμος	0.81	0.81	-1	0	54	55	-1	6
Πέραμα	0.8	0.81	-22	-11	59	59	1	-13
Πειρούπολη	0.81	0.82	-1	4	63	65	-3	-15
Βριλήσσια	0.94	0.95	-25	1	30	25	20	16
Ελευσίνα	0.78	0.81	-2	-7	60	55	8	-5
Νίκαια	0.71	0.73	2	5	65	66	0	-14
Σκα	0.88	0.89	6	2	44	42	5	-5
Υμητός - Δάφνη	0.83	0.88	-9	1	49	41	19	-8
Χαροκόπειο	0.89	0.89	6	-3	44	43	1	-1
Πειραιάς - Παιδαγωγική	0.91	0.92	2	-1	39	38	3	-22
Παλλήνη - CGS	0.84	0.84	-81	-65	83	69	21	-69
Πειραιάς	0.94	0.94	1	-9	39	39	0	-37
Άνω Κορυδαλλός	0.88	0.88	24	10	56	52	8	-17
Ντελακρούα - Αττική	0.9	0.91	2	4	33	36	-7	18

Όπως παρατηρείται και από τις τιμές των δεικτών, οι διαφοροποιήσεις είναι σχετικά μικρές, σε μία πρώτη γενική εικόνα. Σχετικά αξιόλογες διαφορές παρατηρούνται στις αριθμητικές τιμές των μεροληπτικών συνολικών σφαλμάτων για όλο το επεισόδιο βροχοπτώσης. Αξιοσημείωτες διαφορές υπέρ της προσαρμογής της σχέσης των ελαχίστων τετραγώνων έναντι της βέλτιστης βιβλιογραφικής εντοπίζονται στον σταθμό του Διόνυσου και στο Τατόι, όπως επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα και στον Πίνακα 5-6.

Για την καλύτερη απεικόνιση της διαφοροποίησης των σφαλμάτων μεταξύ των σχέσεων παρατίθεται το επόμενο διάγραμμα (box plot) (Σχήμα 5-18). Πιο συγκεκριμένα συγκρίνεται η γενικότερη εικόνα που παρουσιάζουν τα ποσοστιαία μεροληπτικά και απόλυτα σφάλματα για τη βέλτιστη βιβλιογραφική σχέση Z-R (NMB & NMAE best Z-R) και τα αντίστοιχα σφάλματα για την σχέση των ελαχίστων τετραγώνων (NMB & NMAE Least Squares Z-R) Το box plot είναι ένας απλός τρόπος παρουσίασης των κυριότερων χαρακτηριστικών μιας κατανομής για δείγμα πολλών δεδομένων. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα από τη σύγκριση των κατανομών των αντιστοιχών σφαλμάτων, μέσω του εύρους των τιμών τους, της διαμέσου και των outliers οι δύο σχέσεις παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά.



Σχήμα 5-18: Θηκόγραμμα σφαλμάτων βέλτιστης βιβλιογραφικής σχέσης Z-R και ελαχίστων τετραγώνων

5.6 Συγκριτική ανάλυση χωρικού μεγέθους κελιού ανά σταθμό

Πέρα από τη συγκριτική μελέτη των σχέσεων Z-R ανά σταθμό και την επιλογή της καταλληλότερης, στην παρούσα εργασία διερευνάται και η επίδραση του χωρικού μεγέθους του κελιού. Τα αποτελέσματα προέκυψαν ύστερα από την εξέταση των τιμών ανακλαστικότητας κελιών 100m x 100m και μεγαλύτερων μεγέθους 500m x 500m.

Για όλους τους σταθμούς που μελετήθηκαν και πληρούσαν το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης (33 σταθμοί) εφαρμόστηκε η μεθοδολογία για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων διευρυμένου κελιού και προσδιορίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης για τα δύο χωρικά μεγέθη των κελιών που μελετήθηκαν, της εκάστοτε σχέσης Z-R που κρίθηκε ως η καταλληλότερη για κάθε σταθμό. Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5-7.

Πίνακας 5-7: Συντελεστές συσχέτισης ανά σταθμό και ανά μέγεθος κελιού

Σταθμός	Μέγεθος κελιού (m)		Σταθμός	Μέγεθος κελιού (m)	
	100x100	500x500		100x100	500x500
Αμπελόκηποι	0.80	0.85	Κορυδαλλός	0.71	0.71
Άνω Λιόσια	0.88	0.88	Αγία Παρασκευή	0.94	0.94
Αθήνα	0.90	0.92	Άλιμος	0.81	0.83
Διόνυσος	0.70	0.69	Πέραμα	0.80	0.78
Φάληρο	0.84	0.83	Πετρούπολη	0.81	0.82
Ιπποκράτειος	0.89	0.88	Βριλήσσια	0.94	0.94
Μαρούσι	0.79	0.84	Ελευσίνα	0.78	0.79
Νέα Σμύρνη	0.71	0.73	Νίκαια	0.71	0.70
Νέος Κόσμος	0.88	0.89	Σκα	0.88	0.87
Πατήσια	0.71	0.71	Υμηττός - Δάφνη	0.83	0.84
Περιστέρι	0.95	0.94	Χαροκόπειο	0.89	0.89
Ψυχικό	0.94	0.94	Πειραιάς - Παιδαγωγική	0.91	0.89
Βίλια	0.71	0.65	Παλλήνη - CGS	0.84	0.82
Αρσάκειο - Δροσιά	0.79	0.79	Πειραιάς	0.94	0.92
Αθήνα - Μαρίνα	0.79	0.79	Άνω Κορυδαλλός	0.88	0.86
Τατόι	0.75	0.78	Ντελακρούα - Αττική	0.90	0.90
Ασπρόπυργος	0.89	0.92			

Συνολικά από τους 33 σταθμούς του πίνακα οι 22 εμφάνισαν καλύτερο ή ίδιο συντελεστή συσχέτισης, ενώ σε 11 σταθμούς ο συντελεστής συσχέτισης του διευρυμένου κελιού μειώθηκε συγκριτικά με τον συντελεστή κελιού μεγέθους 100 x 100.

5.7 Αποτελέσματα συγκριτικής μελέτης κελιών μεμονωμένων σταθμών

Στη συνέχεια παρατίθενται 3 ενδεικτικοί σταθμοί και τα διαγράμματα που παρήχθησαν μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της MATLAB. Στα εν λόγω διαγράμματα απεικονίζονται οι καμπύλες των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων για τη βέλτιστη σχέση που επιλέχθηκε, για την περίπτωση μελέτης κελιού 100m x 100m και διευρυμένου 500m x 500m, όπως επίσης και η καμπύλη της καταγεγραμμένης από τον σταθμό βροχόπτωσης. Ο σχολιασμός και η σύγκριση τους γίνεται σε συνδυασμό με τις τιμές των στατιστικών δεικτών που υπολογίστηκαν για την εν τέλει αποτίμηση των αποτελεσμάτων της μελέτης χωρικής ακρίβειας του rainscanner.

Συγκεκριμένα επιλέγεται η παρουσίαση των σταθμών των Αμπελοκήπων, του Αμαρουσίου και του Πειραιά – Παιδαγωγικής. Η επιλογή των συγκεκριμένων σταθμών έγινε με στόχο την εξέταση σταθμών διαφορετικών περιοχών και την ανάδειξη τριών διαφορετικών περιπτώσεων αποτελεσμάτων (βελτίωση, ίδια απόκριση ή μείωση ακρίβειας εκτιμώμενων βροχοπτώσεων λόγω διευρυμένου κελιού).

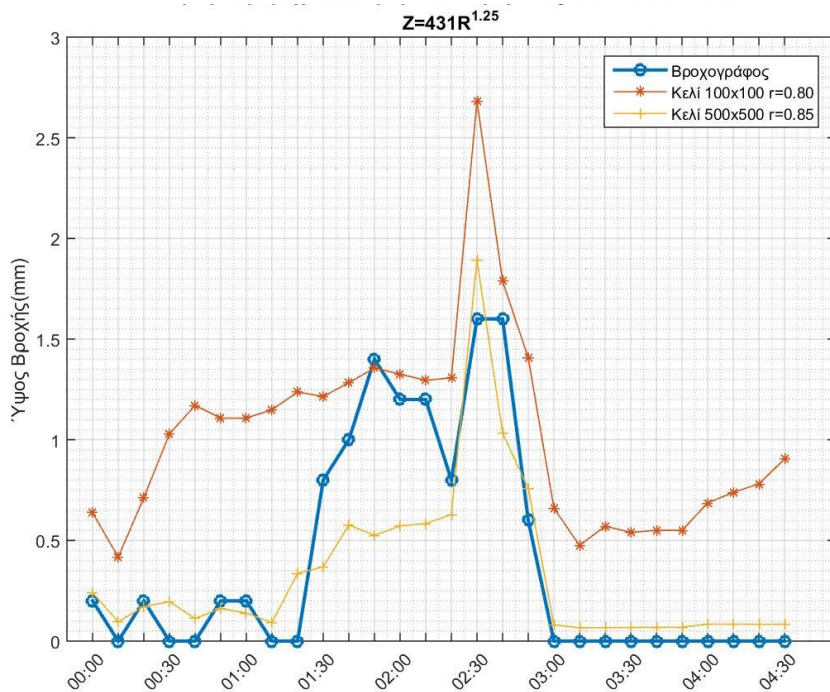
5.7.1 Σταθμός Αμπελόκηποι

Για τον σταθμό των Αμπελοκήπων η μέθοδος της διεύρυνσης μεγέθους του χωρικού κελιού έδωσε αξιοσημείωτα αποτελέσματα βελτίωσης της εκτίμησης των τιμών της βροχόπτωσης. Όπως είχε παρατηρηθεί και από τον σχολιασμό των σφαλμάτων στα προηγούμενα υποκεφάλαια, ο σταθμός των Αμπελοκήπων, εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστιαία σφάλματα, από τους επιλεχθέντες. Η προσαρμογή της καμπύλης που αντιστοιχεί στις τιμές κελιών μεγέθους 500 x 500 είναι σαφώς διορθωμένη συγκριτικά με αυτή που αντιστοιχεί σε μέγεθος κελιού 100 x 100. Αυτό είναι εμφανές τόσο από την εικόνα των καμπυλών, όσο και από τις τιμές των συντελεστών συσχέτισης,

όπου η τιμή του r για κελί μεγέθους 500 x 500 ανέρχεται σε 0.85 έναντι της τιμής 0.80 για κελί μεγέθους 100 x 100.

Πίνακας 5-8: Ποσοστιαία μεροληπτικά και απόλυτα σφάλματα για διαφορετικά μεγέθη κελιού (Σταθμός: Αμπελόκηποι)

Κελί 100x100		Κελί 500x500	
NMB(%)	NMAE(%)	NMB(%)	NMAE(%)
161	162	-16	54



Σχήμα 5-19: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχοπτώσης για την βέλτιστη σχέση Z-R, για διαφορετικά μεγέθη κελιών (Σταθμός: Αμπελόκηποι)

Η διόρθωση των τιμών είναι περισσότερο έντονη μέσα από τα ποσοστά σφαλμάτων του Πίνακας 5-8, όπου η μείωση των ποσοστών τόσο του απόλυτου όσο και του μεροληπτικού σφάλματος είναι αξιοσημείωτη ύστερα από την ενσωμάτωση των τιμών των γύρω χωρικών κελιών σε ένα (500 x 500) από το αρχικό (100 x 100).

5.7.2 Σταθμός Μαρούσι

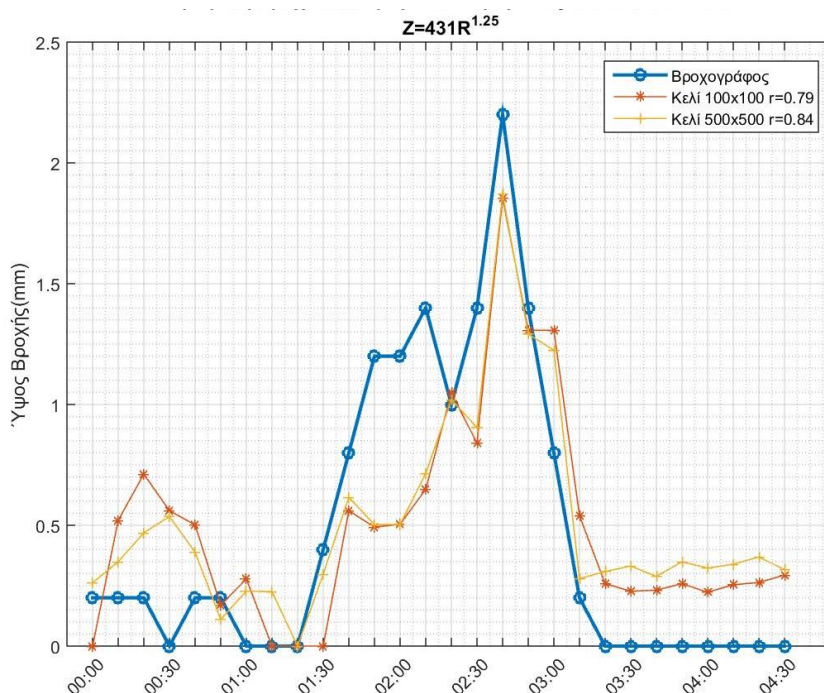
Το διάγραμμα των εκτιμώμενων βροχοπτώσεων που προέκυψαν για κελιά διαφορετικού χωρικού μεγέθους καταδεικνύει και πάλι ότι οι τιμές που

υπολογίστηκαν ύπερα από την θεώρηση του διευρυμένου κελιού 500 x 500, προσαρμόζονται καλύτερα στις αντίστοιχες που κατέγραψε ο βροχογράφος του Αμαρουσίου. Συγκεκριμένα ο συντελεστής συσχέτισης για κελί 500 x 500 είναι 0.84, ενώ για το αρχικό κελί μεγέθους 100 x 100 κυμαίνεται χαμηλότερα του 0.79.

Ωστόσο η διαφοροποίηση των τιμών που προκύπτουν για κάθε μέγεθος κελιού είναι λιγότερο αισθητή από τον πίνακα των σφαλμάτων (Πίνακας 5-9). Μάλιστα το ποσοστό του μεροληπτικού σφάλματος για κελί 500 x 500 είναι ελαφρώς υψηλότερο σε σχέση με το σφάλμα που αντιστοιχεί στις τιμές κελιού μεγέθους 100 x 100. Ενώ το ποσοστό του απόλυτου σφάλματος είναι χαμηλότερο στην περίπτωση του διευρυμένου κελιού.

Πίνακας 5-9: Ποσοστιαία μεροληπτικά και απόλυτα σφάλματα για διαφορετικά μεγέθη κελιού (Σταθμός: Μαρούσι)

Κελί 100x100		Κελί 500x500	
NMB(%)	NMAE(%)	NMB(%)	NMAE(%)
7	68	11	63

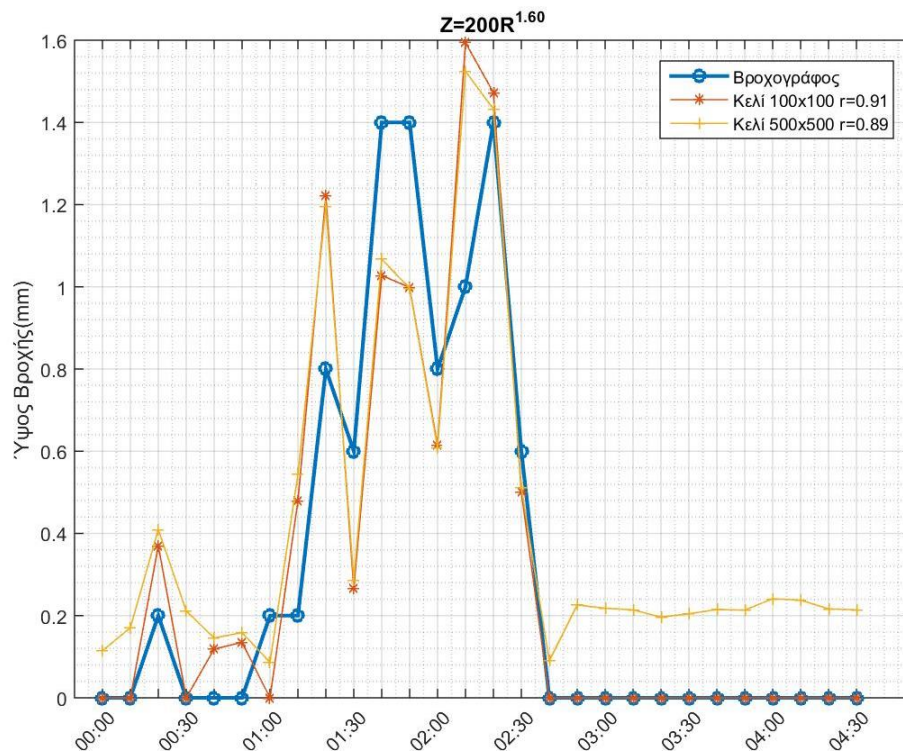


Σχήμα 5-20: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχόπτωσης για την βέλτιστη σχέση Z-R, για διαφορετικά μεγέθη κελιών (Σταθμός: Μαρούσι)

5.7.3 Σταθμός Πειραιάς – Παιδαγωγική

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά την διαφοροποίηση του μεγέθους του κελιού μελέτης δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις βελτιωμένα συγκριτικά με τις τιμές που αποδίδονται σε κελί μικρότερου μεγέθους. Μία από αυτές τις περιπτώσεις είναι και ο σταθμός του Πειραιά – Παιδαγωγικής, όπου ο συντελεστής συσχέτισης για τις τιμές του κελιού 500 x 500 είναι ελαφρώς χαμηλότερος ($r = 0.89$) σε σχέση με τον συντελεστή συσχέτισης για κελί 100 x 100 ($r = 0.91$). Μάλιστα ιδιαίτερη διαφοροποίηση των τιμών παρατηρείται για το χρονικό διάστημα μεταξύ 02:30 και 04:30, όπου για κελί 100 x 100 οι εκτιμώμενες βροχοπτώσεις είναι μηδενικές, ενώ για κελί 500 x 500 υπολογίζονται ύψη βροχής κοντά στα 0.2 mm, καθ' όλη την προαναφερθείσα χρονική διάρκεια.

Η ίδια εικόνα δίνεται και από το διάγραμμα των σφαλμάτων, όπου τόσο τα ποσοστά των απολύτων όσο και αυτά των μεροληπτικών σφαλμάτων είναι κατά πολύ χαμηλότερα στην περίπτωση του κελιού μεγέθους 100 x 100.



Σχήμα 5-21: Καμπύλες εκτιμώμενης βροχοπτώσεως για την βέλτιστη σχέση Z-R, για διαφορετικά μεγέθη κελιών (Σταθμός: Πειραιάς - Παιδαγωγική)

Πίνακας 5-10: Ποσοστιαία μεροληπτικά και απόλυτα σφάλματα για διαφορετικά μεγέθη κελιού (Σταθμός: Πειραιάς - Παιδαγωγική)

Κελί 100x100		Κελί 500x500	
NMB(%)	NMAE(%)	NMB(%)	NMAE(%)
2	39	39	73

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση της βροχόπτωσης μέσω καταγεγραμμένων ανακλαστικότητας από το rainscanner, με την χρήση σχέσεων Z-R, για ένα επιλεγμένο επεισόδιο βροχής στην περιφέρεια Αττικής.

Η επιλογή των σταθμών μελέτης έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις ενός χωρικά ομοιόμορφα κατανεμημένου δικτύου εντός της εμβέλειας σάρωσης του rainscanner ενώ η επιλογή του επεισοδίου βροχής σύμφωνα με την διαθεσιμότητα, την ποιότητα των δεδομένων καταγραφής και την χρονική διάρκεια επεισοδίου.

Για την ανάλυση και την επεξεργασία των απαιτούμενων πρωτογενών δεδομένων που λήφθηκαν από το rainscanner και από τους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς, αναπτύχθηκε κώδικας σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Μέσω της εκτέλεσης του συγκεκριμένου λογισμικού και με τη χρήση μεθόδου βελτιστοποίησης προσδιορίστηκε μια σχέση Z-R για κάθε σταθμό. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση και ακόμη 4 διεθνώς γνωστών βιβλιογραφικά σχέσεων εκτιμήθηκε η βροχόπτωση για κάθε σταθμό και συγκρίθηκε με την καταγεγραμμένη των αντιστοίχων βροχογράφων.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με την επιλογή, τον υπολογισμό και την αντιπαράθεση στατιστικών δεικτών όπως ο συντελεστής συσχέτισης, το μεροληπτικό και το απόλυτο σφάλμα ανά χρονικό βήμα όπως επίσης και το απόλυτο σφάλμα για όλο το επεισόδιο βροχής. Οι παραπάνω δείκτες αποτέλεσαν τα κριτήρια για την εύρεση της βέλτιστης σχέσης Z – R ανά σταθμό.

Επιπλέον μελετήθηκε η χωρική ακρίβεια των μετρήσεων του rainscanner, εφόσον επανεκτιμήθηκαν οι τιμές ανακλαστικότητας για διευρυμένο μέγεθος κελιού (500m x 500m) συγκριτικά με το αρχικό (100m x 100m) και προσδιορίστηκαν οι στατιστικοί τους δείκτες.

Από τον ικανοποιητικό βαθμό εκτίμησης βροχής μέσω των σχέσεων Z-R, για την πλειοψηφία των σταθμών αλλά και από την μικρή διαφοροποίηση των

εκτιμώμενων τιμών μετά την χωρική ανάλυση μεγέθους κελιού, που παρατηρούνται, συμπεραίνεται η εύρυθμη λειτουργία του rainscanner.

6.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συντάχθηκε κώδικας σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, για την εκτίμηση του πεδίου βροχής μέσω της επεξεργασίας και της ανάλυσης πρωτογενών δεδομένων καταγεγραμμένων ανακλαστικοτήτων από το rainscanner και υψών βροχής από επιλεγμένους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς. Τα κύρια συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας μπορούν να επικεντρωθούν στα εξής:

1. Επιλέχθηκαν και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν 4 γνωστές βιβλιογραφικές σχέσεις Z-R και υπολογίστηκαν ανά σταθμό και για κάθε σχέση οι στατιστικοί δείκτες: συντελεστής συσχέτισης r , ποσοστιαίο μεροληπτικό σφάλμα (bias), ανά χρονικό βήμα αλλά και στο σύνολο του επεισοδίου, και ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα ανά χρονικό βήμα. Από τους 42 σταθμούς οι 33 βρίσκονται εντός των αποδεκτών τιμών συντελεστή r , δηλαδή άνω του 0.7. Ειδικότερα για 8 σταθμούς ο συντελεστής συσχέτισης υπερβαίνει την τιμή του 0.9. Η συνολικά ικανοποιητική εικόνα των στατιστικών δεικτών αποδεικνύει την εύρυθμη λειτουργία του rainscanner.
2. Μέσω των συγκεκριμένων στατιστικών δεικτών συγκρίθηκαν οι βιβλιογραφικές σχέσεις $Z - R$. Συγκεκριμένα μεταξύ των βιβλιογραφικών σχέσεων για 10 σταθμούς επιλέχθηκε ως βέλτιστη η σχέση, $Z = 200 \cdot R^{1.6}$, για άλλους 10 η σχέση, $Z = 230 \cdot R^{1.4}$, για 7 σταθμούς η σχέση, $Z = 431 \cdot R^{1.25}$, και για τους εναπομείναντες 6 σταθμούς η σχέση, $Z = 140 \cdot R^{1.5}$. Η χωρική κατανομή των βέλτιστων σχέσεων (Σχήμα 5-2) ανά σταθμό αποδεικνύει τη χωρική μεταβλητότητα της φύσης των σχέσεων Z-R. Για σταθμούς πλησιέστερα της ακτογραμμής η $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ αναδεικνύεται καταλληλότερη ενώ για σταθμούς σε μικρή ακτίνα από το rainscanner επιλέγεται η $Z = 230 \cdot R^{1.4}$.

3. Προσδιορίστηκε για κάθε σταθμό με τη χρήση μεθόδου βελτιστοποίησης, μία νέα σχέση Z-R, για την οποία υπολογίστηκαν οι απαιτούμενοι στατιστικοί δείκτες για την σύγκριση της εν συνεχεία με την βέλτιστη βιβλιογραφική σχέση που εξήχθη προηγουμένως. Οι νέες σχέσεις για την πλειοψηφία των σταθμών φέρονται να εκτιμούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα ύψη βροχής, ωστόσο το πλεονέκτημα τους έναντι των βιβλιογραφικών θεωρήθηκε σχετικά μικρό, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι βιβλιογραφικές σχέσεις Z-R, μπορούν από μόνες τους να εκτιμήσουν σε υψηλό βαθμό ακρίβειας την βροχόπτωση.
4. Επιπλέον μελετήθηκε η επιρροή της χωρικής ακρίβειας στην εκτίμηση της βροχόπτωσης μέσω των Z-R σχέσεων. Έτσι εκτός από τη μελέτη σε επίπεδο κελιού μεγέθους 100m x 100m έγινε επανεκτίμηση των τιμών για κελί διαστάσεων 500 m x 500m (aggregation). Υπολογίστηκαν και στη συνέχεια συγκρίθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης, τα απόλυτα και τα μεροληπτικά σφάλματα για κάθε περίπτωση κελιού. Συνολικά από τους 33 σταθμούς οι 22 παρουσιάζουν ίδιο ή ελαφρώς βελτιωμένο συντελεστή συσχέτισης για κελί μεγέθους 500 x 500, ενώ στους υπόλοιπους 11 οι εκτιμώμενες τιμές βροχόπτωσης αποκλίνουν από αυτές των βροχογράφων, ελαφρώς περισσότερο για το διευρυμένο κελί. Ανάλογη είναι και η εικόνα των σφαλμάτων. Οι συνολικά μικρές διαφορές των στατιστικών δεικτών πιστοποιούν την ορθότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων του radar σε χωρικό επίπεδο.

6.3 Μελλοντική Έρευνα

Βάσει των προηγούμενων συμπερασμάτων, τα παρακάτω μπορούν να αποτελέσουν θέματα μελλοντικών εργασιών:

1. Ανάλυση της ευαισθησίας των παραμέτρων a και b των σχέσεων Z-R. Ήδη μέσω της συγκεκριμένης εργασίας διαπιστώνεται η χωρική μεταβλητότητα της βέλτιστης σχέσης για το ίδιο επεισόδιο βροχής. Η ποσοτικοποίηση και η αξιολόγηση της διαφοροποίησης των παραμέτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο σε χωρικό επίπεδο, όσο και σε χρονικό αλλά και σε μεταβλητό τύπο επεισοδίων βροχόπτωσης

(convective – stratiform). Για μία τέτοιου είδους ανάλυση απαιτείται η καταγραφή επαρκούς πλήθους επεισοδίων με ποικιλομορφία χαρακτηριστικών.

2. Χωρική παρεμβολή για την εκτίμηση των σχέσεων Z-R σε όλο το εύρος σάρωσης του rainscanner μέσω της μεθόδου Kriging. Στην παρούσα εργασία η εύρεση της βέλτιστης σχέσης Z-R διερευνάται σημειακά, για τα χωρικά κελιά στα οποία ανήκουν οι βροχομετρικοί σταθμοί. Μέσω των μεθόδων χωρικής παρεμβολής μπορεί να προσδιοριστεί η περιοχή – τα χωρικά κελιά γύρω από το σημείο του σταθμού, στα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια σχέση Z-R για την εκτίμηση της βροχόπτωσης.
3. Πρόβλεψη του πλημμυρικού κινδύνου και εντοπισμός των περιοχών που πλήττονται εντός της εμβέλειας σάρωσης του radar. Μία τέτοια μελέτη μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον συνδυασμό ενός χάρτη αντιστοίχισης Z-R ανά περιοχή και ενός υδρολογικού μοντέλου, παρέχοντας έτσι πληροφορίες έγκαιρης προειδοποίησης πλημμυρών σε πραγματικό χρόνο (early warning systems).
4. Ιχνηλάτιση καταιγίδας και τα χαρακτηριστικά μετακίνησης της (storm tracking). Για τη συγκεκριμένη έρευνα απαιτείται η ανάλυση πλήθους καταγεγραμμένων επεισοδίων βροχόπτωσης από το rainscanner για κοινή περιοχή μελέτης. Στη συγκεκριμένη εργασία και μέσω των διαγραμμάτων καμπυλών βροχοπτώσεων για τους σταθμούς της Αττικής, είναι εμφανής η χρονική εξέλιξη και η μετατόπιση του φαινομένου από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Η επεξεργασία των κλιματικών δεδομένων της περιοχής μελέτης σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία αυτής μπορούν να σκιαγραφήσουν την σαφή κατεύθυνση μετακίνησης των καταιγίδων και να προσδιορίσουν τις περιοχές όπου το φαινόμενο συνηθέστερα εντείνεται.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson, M. G., & Burt, T. P. (Eds.). (1985). Hydrological forecasting (Vol. 372). Chichester: Wiley.
- Austin, P. M. (1987). Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Monthly Weather Review*, 115(5), 1053-1070.
- Attmannspacher, W. und J. Riedl, 1977: Gleichzeitige Flächenniederschlagsmessungen mit einem X-und einem C-Band Radargerät. *Kleinheubacher Berichte*, Bd, 20, 371-378.
- Baltas, E. A., & Mimikou, M. A. (2002). The use of the Joss-type disdrometer for the derivation of ZR relationships. In *Proceedings of ERAD* (Vol. 291, No.
- Battan, L. J. (1976). Vertical air motions and the ZR relation. *Journal of Applied Meteorology*, 15(10), 1120-1121.
- Brandes, E. A. (1975). Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. *Journal of Applied Meteorology*, 14(7), 1339-1345.
- Brandes, E. A., & Sirmans, D. (1976). Convective rainfall estimation by radar: experimental results and proposed operational analysis technique. In *Preprints, Conference on Hydro-Meteorology* (pp. 54-59).
- Brandes, E. A., Vivekanandan, J., & Wilson, J. W. (1999). A comparison of radar reflectivity estimates of rainfall from collocated radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(9), 1264-1272.
- Caracciolo, Clelia, Federico Porcu, and Franco Prodi. "Precipitation classification at mid-latitudes in terms of drop size distribution parameters." (2008).
- Carbone, R. E., & Nelson, L. D. (1978). The evolution of raindrop spectra in warm-based convective storms as observed and numerically modeled. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(12), 2302-2314.
- Collier, C. G. (1989). *Applications of weather radar systems*. Wiley.
- Collier, C.G., (1984). *Radar Meteorology in United Kingdom*, Reprint Volume, 22nd Conference on radar Meteorology, Zurich, Switzerland, American Meteorological Society, Boston, (pp. 1-8).

- Dalezios, N. R., Kouwen, N., & Linardis, P. C. (1990). Modelling and navigating space-time drift of digitized radar rainfall patterns. *International Journal of Remote Sensing*, 11(6), 1055-1064.
- Doviak, R. J., & Sirmans, D. (1973). Doppler radar with polarization diversity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30(4), 737-738.
- Dutton, E. J. (1967). Estimation of radio ray attenuation in convective rainfalls. *Journal of Applied Meteorology*, 6(4), 662-668.
- Fabry, F., Bellon, A., Duncan, M. R., & Austin, G. L. (1994). High resolution rainfall measurements by radar for very small basins: the sampling problem reexamined. *Journal of Hydrology*, 161(1-4), 415-428.
- Fabry, F., & Zawadzki, I. (1995). Long-term radar observations of the melting layer of precipitation and their interpretation. *Journal of the atmospheric sciences*, 52(7), 838-851.
- Georgakakos, K. P. (1987). Real-time flash flood prediction. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 92(D8), 9615-9629.
- Georgakakos, K. P., Viswesvaran, C., & Krajewski, W. F. (1989). Sensitivity analysis of the short-term forecasts of an integrated hydrometeorological forecast system. Department of Civil and Environmental Engineering and Iowa Institute of Hydraulic Research, the University of Iowa.
- Gournelos, T., & Maroukian, H. (1990). Geomorphological observations concerning the evolution of the Basin of Athens. *Geologica balcanica*, 20(6), 15-24.
- Hunter, S. M. (1996). WSR-88D radar rainfall estimation: Capabilities, limitations and potential improvements. *Natl. Wea. Dig*, 20(4), 26-38.
- Imai, I. (1960). Raindrop-size distribution and ZR relationships. In Proc. Eighth Weather Radar Conf., San Francisco, Amer. Meteor. Soc. (pp. 211-218).
- Jatila, E., & Puhakka, T. (1972). Experiments on the measurement of areal rainfall by radar. *Geophysica*, 12, 103-125.
- Jones, D. M. A. (3). cm and 10 cm wavelength radiation backscatter from rain. In Proc. Fifth Weather Radar Conf (pp. 281-285).

- Joss, J., & Waldvogel, A. (1970, January). A Method To Improve Accuracy Of Radar-Measured Amounts Of Precipitation. In *Bulletin Of The American Meteorological Society* (Vol. 51, No. 8, P. 776). 45 Beacon St, Boston, Ma 02108-3693: Amer Meteorological Soc.
- Kessler, E. (1966). Computer program for calculating average lengths of weather radar echoes and pattern bandedness. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 23(5), 569-574.
- Kirstetter, P. E., Andrieu, H., Delrieu, G., & Boudevillain, B. (2010). Identification of vertical profiles of reflectivity for correction of volumetric radar data using rainfall classification. *Journal of applied meteorology and climatology*, 49(10), 2167-2180.
- Kryza, M., Szymanowski, M., Migala, K., & Pietras, M. (2010). Spatial information on total solar radiation: Application and evaluation of the r. sun model for the Wedel Jarlsberg Land, Svalbard. *Polish Polar Research*, 31(1), 17-32.
- Lagouvardos K., Kotroni V., Bezes A., Koletsis I., Kopania T., Lykoudis S., Mazarakis N., Papagiannaki K., Vougioukas S., The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database, Athens, 2017.
- Maroukian V, Sermegas E, Gaki-Papanastassiou J, Karymbalis E (2005) The role of morphometric parameters and human interference in floods at the lower reaches of Kifisos River delta (Attica). In: *Proceedings of the 7th Panhellenic congress on hydrogeology*, vol I, pp 289–299
- Martner, B. E. (1975): Final report on the University of Wyoming's participation in NSSL Project Storm Intercept, 1975 (data analysis). Department of Atmospheric Science University of Wyoming, Laramie, Wyo., 14 pp.
- Marshall, J. S., Langille, R. C., & Palmer, W. M. K. (1947). Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology*, 4(6), 186-192.
- Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of meteorology*, 5(4), 165-166.

- Marshall, J. S., Hitschfeld, W., & Gunn, K. L. S. (1955). Advances in radar weather. In *Advances in geophysics* (Vol. 2, pp. 1-56). Elsevier.
- McDaniel, W. R. (1991). *Military Hydrology: Report 18, State-of-the-Art Review and Annotated Bibliography of Radar-Rain Gage Relations and Short-Term Weather Forecasting*. EAST TEXAS STATE UNIV COMMERCE.
- Papathanasiou, C., Safiolea, E., Kalogiros, Y., & Mimikou, M. (2007). Comparative analysis of rain gauge and radar precipitation estimates in the Attiki area. In *Proc. 10th International Conference on Environmental Science and Technology*, 5-7 September, Kos, Greece.
- Rinehart, R. E. (1991). Spurious velocities in Doppler radar data caused by a moving antenna feedhorn. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 8(6), 733-745.
- Probert - Jones, J. R. (1962). The radar equation in meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88(378), 485-495.
- Santos, C. A. C. D., Silva, B. B. D., Rao, T. V. R., Satyamurty, P., & Manzi, A. O. (2011). Downward longwave radiation estimates for clear-sky conditions over northeast Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(3), 443-450.
- Selex Systems Integration GmbH, Gematronik Weather Radar Systems, (2011). *Operating Manual - Rainscanner Radar System, Training Manual*, Raiffeisenstraße 10, 41470 Neuss, Germany.
- Selex Systems Integration GmbH, Gematronik Weather Radar Systems, (2015). *Training Manual*, Raiffeisenstraße 10, 41470 Neuss, Germany.
- Selex Systems Integration GmbH, Gematronik Weather Radar Systems, (2015). *Instruction Manual – RainView Analyzer – User Guide*, Release 5.40.0 (2014-05-21), Raiffeisenstraße 10, 41470 Neuss, Germany.
- Sioutas, M. V., & Flocas, H. A. (2003). Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. *Theoretical and Applied Climatology*, 75(3-4), 189-202.

- Smith, J. A., Seo, D. J., Baeck, M. L., & Hudlow, M. D. (1996). An intercomparison study of NEXRAD precipitation estimates. *Water Resources Research*, 32(7), 2035-2045.
- Tanelli, S., Im, E., Durden, S. L., & Facheris, L. (2003). Analyses of spaceborne doppler radar system performance on measuring vertical rainfall velocity.
- Twomey, S. (1953). On the measurement of precipitation intensity by radar. *Journal of Meteorology*, 10(1), 66-67.
- Uijlenhoet, R., Smith, J. A., & Steiner, M. (2003). The microphysical structure of extreme precipitation as inferred from ground-based raindrop spectra. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(10), 1220-1238.
- Ulbrich, C. W., & Lee, L. G. (1999). Rainfall measurement error by WSR-88D radars due to variations in Z-R law parameters and the radar constant. *Journal of Atmospheric and oceanic Technology*, 16(8), 1017-1024.
- Villarini, G., & Krajewski, W. F. (2009). Empirically based modelling of radar-rainfall uncertainties for a C-band radar at different time-scales. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 135(643), 1424-1438.
- Wilson, J. W. (1976). Radar-rain gage precipitation measurements—a summary. In *Proceedings of First National Conference on Hydrometeorology*, Fort Worth, TX (pp. 72-75).
- Wilson, J. W., & Brandes, E. A. (1979). Radar measurement of rainfall—A summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(9), 1048-1060.
- Wong, M. C., Wong, W. K., & Lai, E. S. (2006, October). From SWIRLS to RAPIDS: Nowcast applications development in Hong Kong. In *PWS Workshop on Warnings of Real-Time Hazards by Using Nowcasting Technology*, Sydney, Australia, 9-13 October 2006.

Μπαλτάς, Ε.Α., Εφαρμοσμένη Μετεωρολογία, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2006.

Σάγος, Γ. Α. και Ν. Γ. Μαλαχίας, Αρχές ραντάρ και ηλεκτρονικού πολέμου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Β' Έκδοση, 376 σελίδες, Αθήνα, 2004