

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΕΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΡΟΧΗΣ – ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΕ ΜΗΝΙΑΙΑ ΒΑΣΗ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του φοιτητή

ΧΟΧΛΙΔΑΚΗ ΧΡΟΝΗ - ΓΙΑΝΝΗ

A.M: 2008050057

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Κ. Τσάνης

Χανιά, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014

Περίληψη

Τα υδρολογικά μοντέλα προσομοιώνουν τη συμπεριφορά και απόκριση μιας υδρολογικής λεκάνης αλλά και τη σχέση βροχής - απορροής μέσω μαθηματικών μετασχηματισμών. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ), που αρχικά αναπτύχθηκαν για να προσομοιώσουν τη λειτουργία του ανθρωπίνου εγκεφάλου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υδρολογική προσομοίωση της σχέσης βροχής απορροής ως ένα είδος μοντέλου «μαύρου κουτιού». Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει ότι τα ΤΝΔ έχουν μεγάλες δυνατότητες και προτιμούνται κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να παρέχουν αποτελέσματα σε περιοχές όπου υπάρχει αδυναμία λήψης συστηματικών μετρήσεων. Στην παρούσα εργασία, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός ήδη βαθμονομημένου υδρολογικού μοντέλου (Sacramento) με αυτά μιας ομάδας Νευρωνικών Δικτύων μεταβλητής αρχιτεκτονικής και μνήμης. Μεταξύ των υπό εξέταση Νευρωνικών Δικτύων επιλέγεται σε κάθε περίπτωση το βέλτιστο με βάση τα κριτήρια RMSE και R^2 σε σχέση με την υπολογιζόμενη και την παρατηρημένη παροχή. Τα μοντέλα έχουν εφαρμοστεί στο νησί της Κρήτης χρησιμοποιώντας δεδομένα βροχής, εξάτμισης και απορροής από 15 λεκάνες απορροής για την περίοδο 1977-97. Τα αποτελέσματα των Νευρωνικών Δικτύων είναι για την πλειονότητα των λεκανών αρκετά ικανοποιητικά, γεγονός που ενισχύει ακόμα περισσότερο την χρησιμότητα των Νευρωνικών Δικτύων στην υδρολογία. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα του μοντέλου Sacramento, γίνεται φανερό ότι η ποιότητα προσομοίωσης που δίνουν τα Νευρωνικά Δίκτυα είναι ανώτερη (μέσος όρος R^2 0,92 για το ΤΝΔ έναντι 0,8 για το Sacramento). Μελλοντικά θα εξετασθούν περεταίρω οι παράμετροι που καθορίζουν τη λειτουργία του ΤΝΔ, νέες παράμετροι εκπαίδευσης που σχετίζονται με τη φυσική της υδρολογικής λεκάνης, καθώς και η βελτίωση του αλγορίθμου επιλογής του βέλτιστου ΤΝΔ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του προσωπικού στο εργαστήριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής και ιδιαιτέρως του Ιωάννη Δαλιακόπουλου.

Χρωστάω επίσης ένα ευχαριστώ στους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν σε όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων, στους φίλους μου Λορέντζο Γλυνό και Όλγα Μεσσίνη για τη βοήθεια τους στην μορφοποίηση του κειμένου καθώς και στους φίλους των φοιτητικών μου χρόνων και ιδιαιτέρως στον Χρήστο Λύτρα, Γρηγόρη Παπαθανασίου, Γρηγόρη Γκουντάνη, στην Έρη Ξάνθη και Δέσποινα Ρεμπατσιού που έκαναν αυτά τα χρόνια αξέχαστα.

1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

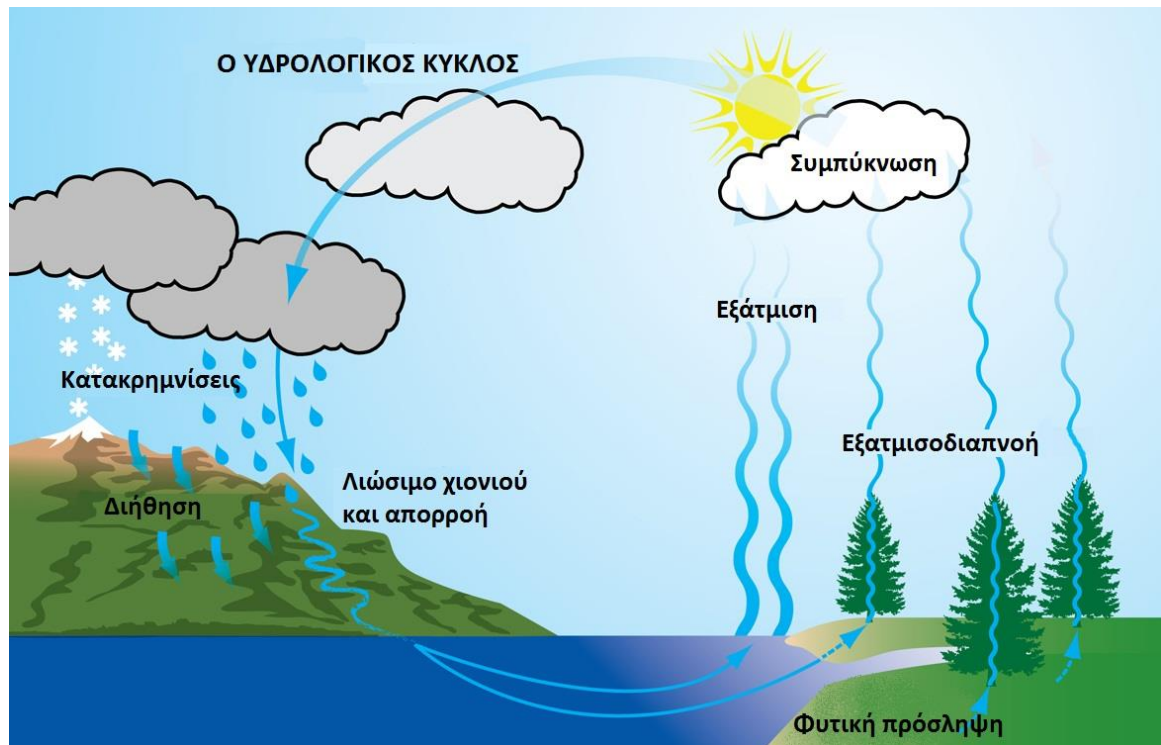
Περίληψη	3
Ευχαριστίες.....	4
1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
2. Εισαγωγή.....	7
2.1 Βροχή – Απορροή	7
2.2 Υδρολογικά μοντέλα.....	8
2.2.1 Γενικά.....	8
2.3 Νευρωνικά Δίκτυα	11
2.4 Σκοπός της διπλωματικής	15
3. Μεθοδολογία.....	16
3.1 Απλό Νευρωνικό Δίκτυο	16
3.2 Υδρολογική προσομοίωση με τη χρήση Νευρωνικού Δικτύου	19
3.3 Το υδρολογικό μοντέλο Sacramento	21
3.4 Κριτήρια σύγκρισης αποτελεσμάτων – επαλήθευση μοντέλου.....	23
4. Περιοχή Μελέτης.....	25
4.1 Γενικά.....	25
4.2 Κλιματικές συνθήκες	25
4.3 Λεκάνες απορροής.....	27
4.3.1 Λεκάνη 1: Σεμπρωνιώτης	27
4.3.2 Λεκάνη 2: Ρουματιανός	27
4.3.3 Λεκάνη 3: Πρασσανός	28
4.3.4 Λεκάνη 4: Πλατύς.....	28
4.3.5 Λεκάνη 5: Πατέλης.....	28
4.3.6 Λεκάνη 6: Μύρτος	28
4.3.7 Λεκάνη 7: Κουτσουλίδης.....	28
4.3.8 Λεκάνη 8: Καλαμαυκιανός.....	28
4.3.9 Λεκάνη 9: Κακοδικιανός	29
4.3.10 Λεκάνη 10: Γιόφυρος.....	29

4.3.11 Λεκάνη 11: Γεροπόταμος	29
4.3.12 Λεκάνη 12: Γαζανός	29
4.3.13 Λεκάνη 13: Αποσελέμης.....	30
4.3.14 Λεκάνη 14: Αναποδάρης	30
4.3.15 Λεκάνη 15: Αγ. Βασίλειος.....	30
5. Εφαρμογή Μοντέλων - Αποτελέσματα.....	32
5.1 Προσομοίωση με το υδρολογικό μοντέλο Sacramento	32
5.2 Προσομοίωση με Νευρωνικά Δίκτυα	32
5.2.1 Λεκάνη 1: Σεμπρωνιώτης	35
5.2.2 Λεκάνη 2: Ρουματιανός	37
5.2.3 Λεκάνη 3: Πρασσανός	39
5.2.4 Λεκάνη 4: Πλατύς.....	41
5.2.5 Λεκάνη 5: Πατέλης	43
5.2.6 Λεκάνη 6: Μύρτος	45
5.2.7 Λεκάνη 7: Κουτσουλίδης.....	47
5.2.8 Λεκάνη 8: Καλαμαυκιανός.....	49
5.2.9 Λεκάνη 9: Κακοδικιανός	52
5.2.10 Λεκάνη 10: Γιόφυρος.....	54
5.2.11 Λεκάνη 11: Γεροπόταμος	56
5.2.12 Λεκάνη 12: Γαζανός	58
5.2.13 Λεκάνη 13: Αποσελέμης.....	60
5.2.14 Λεκάνη 14: Αναποδάρης	62
5.2.15 Λεκάνη 15: Αγ. Βασίλειος.....	64
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	67
5.4 Συμπεράσματα & Προτάσεις.....	69
6. Βιβλιογραφία	71

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 Βροχή – Απορροή

Η βροχή αποτελεί την αφετηρία του επίγειου τμήματος του υδρολογικού κύκλου και βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία των επιφανειακών απορροών. Στην Εικόνα 1 διακρίνεται η διαδικασία βροχής – απορροής.



Εικόνα 1: Διαδικασία Βροχής - Απορροής

Μόλις η βροχή φθάσει στην επιφάνεια της Γης συγκρατείται από αυτήν ή τη βλάστηση και τις κατασκευές που την καλύπτουν και δεσμεύεται προσωρινά. Σε κάθε περίπτωση όμως, το νερό της βροχής θα καταμερισθεί τελικά σύμφωνα προς την ακόλουθη εξίσωση :

$$P = E + I + Q$$

όπου P η βροχή (mm), E η εξάτμιση (mm), I η διήθηση (mm) και Q η απορροή (mm).

Η παραπάνω σχέση είναι προσδιοριστική: Αν γνωρίζουμε την τιμή τριών από τους όρους της αμέσως προσδιορίζεται και ο τέταρτος. Η σημασία των όρων στη σχέση αυτή εξαρτάται από τη χωρική και χρονική κλίμακα με την οποία εξετάζουμε το φαινόμενο. Για παράδειγμα, συνήθως αγνοείται η εξάτμιση στις προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο σε περιορισμένη χωρική κλίμακα. Αντίθετα, λαμβάνουμε υπόψη την εξατμισοδιαπνοή κατά την κατάστροψη των ετησίων υδατικών ισοζυγίων σε επίπεδο υδατικού διαμερίσματος.

2.2 Υδρολογικά μοντέλα

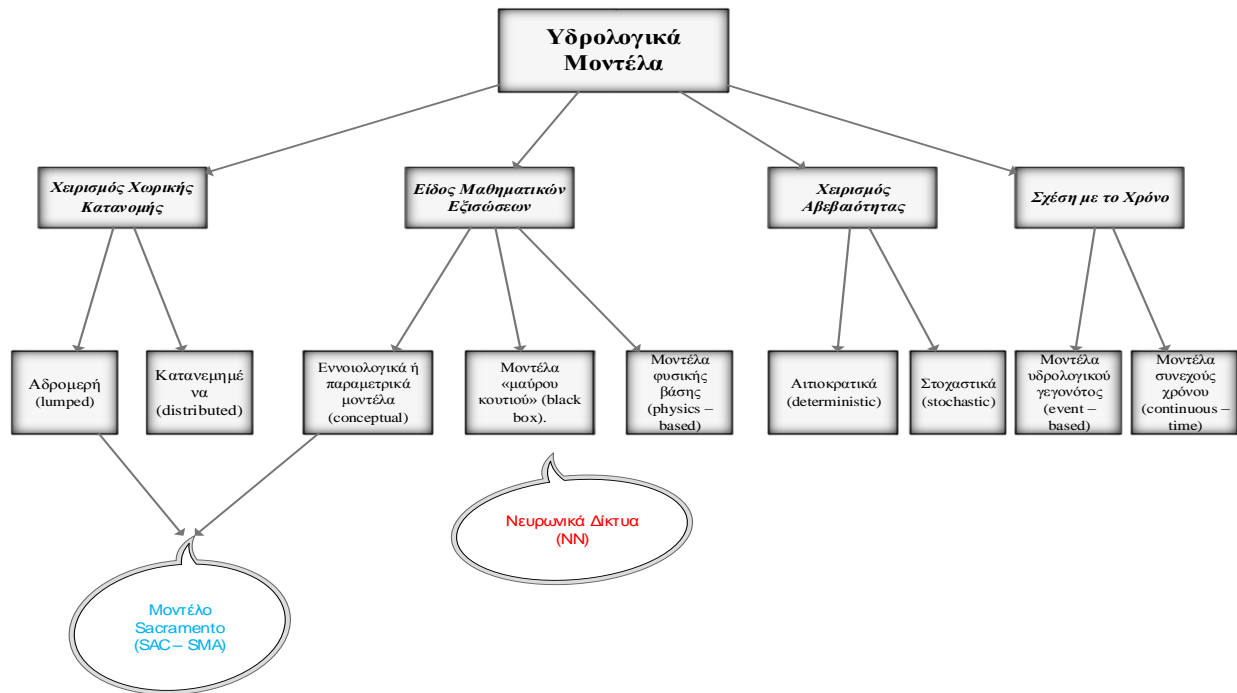
2.2.1 Γενικά

Ως υδρολογικό μοντέλο ορίζεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς και απόκρισης μιας υδρολογικής λεκάνης (σύστημα) από ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών. Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και παραδοχές σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν το σύστημα, με σκοπό την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών (Μαμάσης, 2007).

Πολλοί διαφορετικοί τύποι μοντέλων μετατροπής βροχής – απορροής έχουν προταθεί, το εύρος των οποίων εκτείνεται από αμιγώς απλά εμπειρικά μοντέλα, όπως η ορθολογιστική μέθοδος (rational method), μέχρι σε υψηλής πολυπλοκότητας κατανεμημένα μοντέλα φυσικών διεργασιών τα οποία ορίζονται μερικώς από διαφορικές εξισώσεις, όπως το μοντέλο SHE (Système Hydrologique Européen, Abbott et al., 1986). Βασιζόμενα στον βαθμό της αναπαράστασης των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, τα μοντέλα κατατάσσονται κατά αύξοντα βαθμό χρήσης φυσικών διεργασιών, σε μοντέλα μαύρου κουτιού, εννοιολογικά μοντέλα και φυσικής βάσης (Sajikumar and Thandaveswara, 1998). Στην επιχειρησιακή υδρολογία, (operational hydrology) τα στοχαστικά, «μαύρου κουτιού» και εννοιολογικά μοντέλα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την μοντελοποίηση της σχέσης βροχής – απορροής γιατί τα φυσικής βάσης είναι αρκετά πολύπλοκα, αρκετά «δυσκίνητα» στη χρήση και εξαρτώνται από μεγάλο όγκο δεδομένων. Τα εννοιολογικά μοντέλα επιχειρούν να αναπαραστήσουν την γνωστή φυσική διαδικασία που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της μετατροπής της βροχής σε απορροή με έναν απλοποιημένο τρόπο, η εκτέλεση και η βαθμονόμησή τους παρόλα αυτά παρουσιάζει διάφορες δυσκολίες. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που απαιτούν την χρήση ενός απλού μοντέλου συστημικής θεωρίας (system – theoretic, όπως τα γραμμικά «μαύρου κουτιού») τα οποία εγκαθιστούν μία σχέση μεταξύ συναρτήσεων εισόδου – εξόδου, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους πολύπλοκους φυσικούς κανόνες που κυβερνούν την φυσική διαδικασία όπως είναι και η μετατροπή βροχής – απορροής. Το μοναδιαίο υδρογράφημα (unit hydrograph), το οποίο είναι ένα γραμμικό μοντέλο σχέσης βροχής – απορροής, είναι ένα πασίγνωστο παράδειγμα μίας τέτοιας σχέσης. Παρόλα αυτά, αυτά τα απλούστερα μοντέλα αποτυγχάνουν στο να αναπαραστήσουν την μη γραμμική συμψηφύ δυναμική της διαδικασίας της μετατροπής της βροχής σε απορροή (Rajurkar et al., 2003). Τα μοντέλα μαύρου κουτιού χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά επειδή αποφεύγουν την αντιμετώπιση των προβλημάτων της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των δεδομένων και των παραμέτρων και τις πολυπλοκότητες των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα.

Τα υδρολογικά μοντέλα είναι δυνατόν να διακριθούν με βάση τη χωρική και χρονική κλίμακα, τη στοχαστική ή μη δομή των μεταβλητών του μοντέλου και το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών. Αυτά τα μοντέλα είναι σε θέση να περιγράψουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως για παράδειγμα ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας. Σε αυτές τις περιπτώσεις το γεγονός αναπαρίσταται με τη χρήση εμπειρικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), στις οποίες οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου οι οποίες δεν αφορούν τη μελέτη αγνοούνται. Τέτοιες

διεργασίες είναι, για παράδειγμα, η εξάτμιση και η διήθηση, καθώς επίσης και η διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (π.χ. μιας λεκάνης απορροής), όπου η διαδικασία διέπεται, εν μέρει από κάποιο φυσικό υπόβαθρο. Χρησιμοποιούνται λοιπόν εργαλεία προσομοίωσης, μέσω των οποίων αναπαρίστανται και λαμβάνονται υπόψη οι κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν υδρολογικό κύκλο. Παρακάτω (Εικόνα 2) παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση των κατηγοριών των υδρολογικών μοντέλων.



Εικόνα 2: Κατηγορίες και ήδη Υδρολογικών Μοντέλων

Τα κριτήρια με τα οποία ταξινομούνται τα μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής που αναφέρθηκαν στην παραπάνω εικόνα, είναι τα εξής (Μπούρα, 2010):

1. Ο χειρισμός της χωρικής κατανομής των φυσικών διεργασιών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή εντός της λεκάνης απορροής που βρίσκεται υπό εξέταση.
2. Το είδος των μαθηματικών εξισώσεων και σχέσεων που είναι απαραίτητες για να αναπαρασταθούν οι φυσικές διεργασίες στη θεωρούμενη λεκάνη.
3. Ο τρόπος χειρισμού της αβεβαιότητας των υδρολογικών μεγεθών.
4. Η λειτουργία του μοντέλου σε σχέση με το χρόνο.

Βάσει αυτών των κριτηρίων, τα μοντέλα βροχόπτωσης – απορροής διακρίνονται σε κατηγορίες, οι οποίες έχουν ως εξής:

1. Με βάση το κριτήριο 1 τον χειρισμό της χωρικής κατανομής, τα μοντέλα είναι δυνατόν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

1.1 Τα Αδρομερή (lumped), όπου ολόκληρη η λεκάνη απορροής αντιμετωπίζεται ως ενιαία χωρική ενότητα, όπου ως εισόδους δέχεται την χωρικά μέση βροχόπτωση και τις χωρικά μέσες τιμές άλλων μεγεθών.

1.2 Τα Κατανεμημένα (distributed), όπου η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε στοιχειώδη τμήματα, τέτοια ώστε να είναι δυνατή η αναπαράσταση της χωρικής κατανομής των φυσιογραφικών ή άλλων χαρακτηριστικών της λεκάνης.

2. Με βάση το κριτήριο 2, το είδος των μαθηματικών εξισώσεων και σχέσεων, τα μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

2.1 Τα Εννοιολογικά ή Παραμετρικά μοντέλα (conceptual), όπου οι φυσικές διεργασίες αναπαρίστανται με απλές μαθηματικές σχέσεις που έχουν καταρτιστεί με εμπειρικό τρόπο.

2.2 Τα Μοντέλα Φυσικής Βάσης (physics – based), στα οποία οι μαθηματικές σχέσεις αναπαριστούν τους φυσικούς νόμους που διέπουν την σχέση και το μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε απορροή.

2.3 Τα Μοντέλα «μαύρου κουτιού» (black box). Σε αυτού του είδους τα μοντέλα, οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα. Η δυνατότητα περιγραφής αρκετά πολύπλοκων συστημάτων είναι το βασικό τους πλεονέκτημα, όπου το υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης είναι πολύ μικρότερο (σχεδόν αμελητέο). Στην υδρολογία, ως μοντέλα μαύρου κουτιού αναφέρονται κυρίως τα Νευρωνικά Δίκτυα, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους.

3. Με βάση το κριτήριο 3, το χειρισμό της αβεβαιότητας, τα μοντέλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

3.1 Τα Αιτιοκρατικά (deterministic), στα οποία όλα τα υδρολογικά μεγέθη που υπεισέρχονται θεωρούνται ότι έχουν συγκεκριμένες τιμές, χωρίς αβεβαιότητα.

3.2 Τα Στοχαστικά (stochastic), τα οποία είναι βασισμένα στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων. Αυτού του είδους τα μοντέλα είναι πληρέστερα, καθώς είναι σε θέση να λαμβάνουν υπόψη και τη χρονική αλληλεπίδραση (στοχαστική δομή των φαινομένων), οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσομοίωση. Οι παράμετροί των παραπάνω μοντέλων εξαρτώνται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων δειγμάτων, τα οποία και αναπαράγουν, και όχι από τα ίδια τα δείγματα.

4. Με βάση το κριτήριο 4, τη λειτουργία του μοντέλου σε σχέση με το χρόνο, τα μοντέλα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

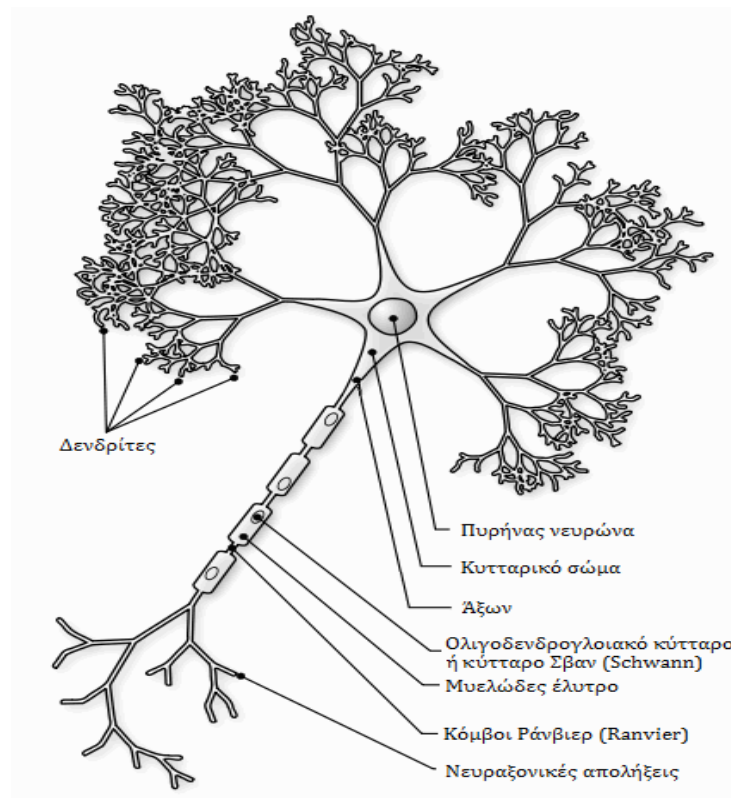
4.1 Τα Μοντέλα Υδρολογικού Γεγονότος (event – based), τα οποία λειτουργούν για ένα μεμονωμένο πλημμυρικό γεγονός και αναπαράγουν μόνο τις κύριες φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια πλημμυρών

4.2 Τα Μοντέλα Συνεχούς Χρόνου (continuous – time), τα οποία μπορούν να λειτουργούν αναπαριστώντας την πλήρη χρονική εξέλιξη των υδρολογικών διεργασιών, τόσο σε υγρές όσο και σε ξηρές χρονικές περιόδους.

2.3 Νευρωνικά Δίκτυα

Όταν τα τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks) έκαναν την εμφάνισή τους, είχαν οριστεί ως μαθηματικά μοντέλα που είχαν σκοπό να προσομοιώσουν την πολύπλοκη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η παράλληλη επεξεργασία δεδομένων είναι μία από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες της δομής του εγκεφάλου, καθώς επίσης και η δυνατότητα συνεχούς μάθησης μέσω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Τα δύο αυτά βασικά χαρακτηριστικά συμβάλλουν στην ικανότητα, αφενός, να εκτελεί δύσκολα καθήκοντα, όπως ταχύτατη αναγνώριση μορφών, ταξινόμηση κ.ά., αφετέρου, να εξελίσσεται συνεχώς, μαθαίνοντας από το περιβάλλον του κατά την αλληλεπίδρασή του με αυτό.

Η δομή του τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου και ειδικότερα ενός νευρώνα του, μιμείται κατά το δυνατό εκείνη ενός βιολογικού νευρώνα (Εικόνα 3), ώστε να εμφανίζει παρόμοιες ιδιότητες. Συνεπώς, όπως συμβαίνει και με ένα δίκτυο νευρώνων εγκεφάλου, ένα τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο τεχνητών νευρώνων που αλληλεπιδρούν, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με τις λεγόμενες συνάψεις (synapses). Ο βαθμός αλληλεπίδρασης για κάθε ζεύγος νευρώνων είναι διαφορετικός και καθορίζεται από τα λεγόμενα συναπτικά βάρη (synaptic weights).



Εικόνα 3: Δομή Βιολογικού Νευρώνα (foundalis.com)

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της εκμάθησης του Νευρωνικού Δικτύου μέσω της αλληλεπίδρασής του με το περιβάλλον, τα συναπτικά βάρη μεταβάλλονται συνεχώς, ενδυναμώνοντας ή αποδυναμώνοντας την ισχύ του κάθε δεσμού. Συνεπώς η εμπειρική γνώση που αποκτά το νευρωνικό δίκτυο μέσω αυτής της αλληλεπίδρασης κωδικοποιείται στα συναπτικά βάρη. Αυτά αποτελούν το χαρακτηριστικό εκείνο που δίνει στο δίκτυο την ικανότητα για εξέλιξη και προσαρμογή στο περιβάλλον.

Τα Νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εκπαιδευτούν με δύο τρόπους. Κατά τον πρώτο τρόπο, η εκπαίδευση γίνεται με εποπτεία. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα σύνολο γνωστών παραδειγμάτων τροφοδοτείται στο δίκτυο, δηλαδή ένα σύνολο καταστάσεων στις οποίες μπορεί αυτό να περιέλθει, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που καλείται να δίνει το δίκτυο για τις καταστάσεις αυτές. Για την εκμάθηση αυτή λοιπόν του δικτύου, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος εκπαίδευσης. Ο αλγόριθμος αυτός που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και από τη δομή του δικτύου που επιλέγεται για να το αντιμετωπίσει. Κατά τον δεύτερο τρόπο εκπαίδευσης, η εκπαίδευση γίνεται χωρίς εποπτεία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το δίκτυο καλείται να αναγνωρίσει ομοιότητες και μοτίβα σε δεδομένα που του έχουμε τροφοδοτήσει. Παρουσιάζονται τα δεδομένα (είσοδοι) στο δίκτυο και αυτό με τη σειρά του οφείλει να προσαρμοστεί ούτως ώστε να τα ομαδοποιήσει. Αυτό είναι ένα στάδιο μίας επαναληπτικής διαδικασίας η οποία επαναλαμβάνεται, μέχρι να μην παρατηρείται μεταβολή στην ταξινόμηση των δεδομένων.

Ένα σημαντικό και βασικό πλεονέκτημα των Νευρωνικών Δικτύων είναι ότι μπορούν να αποθηκεύσουν γνώση και εμπειρία από το περιβάλλον, η οποία μπορεί στη συνέχεια να ανακληθεί. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα της γενίκευσης, δηλαδή την δυνατότητα της εξαγωγής των βασικών χαρακτηριστικών ενός συστήματος, ακόμα και όταν αυτά είναι «κρυμμένα» σε θορυβώδη δεδομένα (Τσουχνικά, 2007).

Τα Νευρωνικά Δίκτυα διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους. Η δομή αυτών των δικτύων (αριθμός νευρώνων και κρυμμένων επιπέδων) καθώς και οι παράμετροί τους δεν έχουν κάποιο φυσικό υπόβαθρο και είναι απόρροια μίας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσαρμογής η οποία βασίζεται στη χρήση γενετικών, συνήθως, αλγορίθμων που είναι γνωστή ως εκπαίδευση (training) του δικτύου. Με άλλα λόγια, το Νευρωνικό Δίκτυο είναι ένας κρυφός υπολογιστικός κώδικας, στον οποίο δεν έχει πρόσβαση ο χρήστης (Ευστρατιάδης et al., 2009).

Έχει αποδειχθεί ότι τα Νευρωνικά Δίκτυα είναι ένα εύρωστο εργαλείο μοντελοποίησης πολλών μη γραμμικών υδρολογικών διεργασιών όπως η ροή ρευμάτων, η διαχείριση υπογείων υδάτων, η προσομοίωση ποιότητας υδάτων, η βροχόπτωση και η σχέση βροχής – απορροής που θα εξεταστεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Έπειτα από κατάλληλη εκπαίδευση, τα Νευρωνικά Δίκτυα είναι δυνατόν να προβλέψουν ικανοποιητικά τιμές αποτελεσμάτων για πολλά προβλήματα στην υδρολογία. Η καλή κατανόηση της φυσικής που διέπει την εκάστοτε προς μοντελοποίηση υδρολογική διεργασία, μπορεί να βοηθήσει στην καταλληλότερη επιλογή του διανύσματος εισαγωγής δεδομένων, δηλαδή και στην δημιουργία ενός αποτελεσματικότερου δικτύου. Παρόλα αυτά, τα Νευρωνικά Δίκτυα έχουν την τάση να εξαρτώνται από μεγάλο όγκο δεδομένων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σαφή μεθοδολογία επιτυχής

σχεδιασμού και εκτέλεσης. Πάνω σε αυτήν λοιπόν την αναδυόμενη τεχνική μοντελοποίησης και τον ρόλο της στην μηχανική, υπάρχουν ακόμα ζητήματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω μελέτης, καθώς επίσης και σημαντικές πτυχές όπως η από φυσικής πλευράς ερμηνεία της αρχιτεκτονικής των Νευρωνικών Δικτύων, το βέλτιστο σετ δεδομένων εκπαίδευσης, η προσαρμοστική εκμάθηση και η παρέκταση οι οποίες πρέπει να διερευνηθούν περισσότερο. Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των Νευρωνικών Δικτύων έχουν συζητηθεί, και δυνητικές ερευνητικές οδοί έχουν διερευνηθεί, όχι πλήρως όμως.

Ένα από τα προβλήματα της εφαρμοσμένης μηχανικής είναι ο υπολογισμός μια συνάρτησης βάσει της πληροφορίας που προκύπτει από κάποια ζεύγη δειγμάτων εισόδου – εξόδου (input – output). Αυτή η διαδικασία στα Νευρωνικά Δίκτυα είναι η εκμάθηση με εποπτεία που προαναφέρθηκε. Κάποιες άλλες ονομασίες είναι: προσέγγιση συνάρτησης (function approximation – αριθμητική ανάλυση), ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis – στατιστική) και ταυτοποίηση συστήματος (system identification – θεωρία συστημάτων ελέγχου). Το σετ εκπαίδευσης (δείγματα) αποτελείται από ζεύγη τιμών από τις ανεξάρτητες (είσοδος) και εξαρτημένες (έξοδος) μεταβλητές. Γενικά, το νευρωνικό δίκτυο παίζει το ρόλο της συνάρτησης $\varphi(\cdot)$ στη σχέση $y = \varphi(z)$, όπου z το διάνυσμα των δεδομένων εισόδου και y το διάνυσμα των δεδομένων εξόδου. Το πρόβλημα της εκμάθησης με επίβλεψη, μπορεί να διαιρεθεί σε παραμετρικά και μη παραμετρικά μοντέλα. Στον παραμετρικό υπολογισμό, είναι γνωστή η μορφή της συναρτησιακής σχέσης μπορεί, όμως, να περιέχει ελεύθερες παραμέτρους οι οποίες καθορίζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκμάθησης. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι ελεύθερες παράμετροι ενός παραμετρικού μοντέλου έχουν κάποια φυσική σημασία σχετικά με τις φυσικές παραμέτρους του συστήματος.

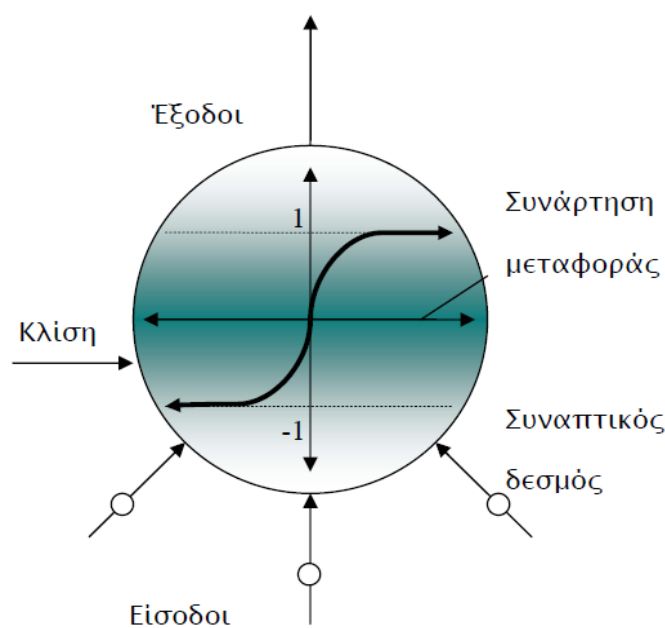
Η πολυωνυμική παλινδρόμηση είναι ένα παράδειγμα παραμετρικού μοντέλου. Τα μη παραμετρικά μοντέλα διαφέρουν υπό την έννοια ότι δεν μας είναι γνωστή εκ των προτέρων η μορφή της συνάρτησης που πρέπει να υπολογισθεί. Έτσι, η συνάρτηση μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια εξίσωση πολλών ελεύθερων παραμέτρων με τρόπο, όμως, ο οποίος επιτρέπει στην κλάση των συναρτήσεων που μπορούν να αναπαρασταθούν από το μοντέλο να είναι αρκετά ευρεία. Τα Νευρωνικά Δίκτυα, όπως και οι σειρές Φουριέ και οι συναρτήσεις spline είναι μη παραμετρικά μοντέλα.

Ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο αποτελούμενο από τεχνητούς νευρώνες (Εικόνα 4) είναι ένας ευμεγέθης παράλληλα κατανεμημένος επεξεργαστής ο οποίος μπορεί να αποθηκεύει πληροφορία. Προσομοιάζει τον ανθρώπινο εγκέφαλο ως προς τρεις απόψεις:

- Το δίκτυο αποκτά την πληροφορία (γνώση) μέσω μιας διαδικασίας εκμάθησης.
- Οι ισχύεις των δεσμών μεταξύ των νευρώνων, γνωστές και ως συναπτικά βάρη, χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της γνώσης.
- Το δίκτυο έχει την ικανότητα να κάνει γενικεύσεις.

Τα χαρακτηριστικά των Νευρωνικών Δικτύων τα οποία μας ενδιαφέρουν στη παρούσα εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Χαρτογράφηση εισόδου – εξόδου. Αφού εισαχθούν τα δεδομένα εκπαίδευσης στο δίκτυο, τα βάρη τροποποιούνται με τέτοιο τρόπο ο οποίος βοηθά στην ελαχιστοποίηση της διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του δικτύου και των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Η διαδικασία εκμάθησης συνεχίζεται έως ότου το δίκτυο να φτάσει σε ένα στάδιο στο οποίο η μεταβολή των βαρών είναι ασήμαντη.
- Μη γραμμικότητα. Ένα νευρώνας είναι βασικά μια μη γραμμική συνάρτηση. Συνεπώς, ένα νευρωνικό δίκτυο, κατασκευασμένο με την σειρά του από μια συλλογή νευρώνων, είναι και αυτό μη γραμμικό.
- Προσαρμοστικότητα. Ένα νευρωνικό δίκτυο εκπαιδευμένο να εκτελεί μια συγκεκριμένη εργασία σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (ζεύγη εισόδων – εξόδων) μπορεί εύκολα να εκπαιδευτεί ξανά ώστε να αντιμετωπίσει μικροαλλαγές στο περιβάλλον (Δαλιακόπουλος, 2003).



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση Τεχνητού Νευρώνα και Συνάρτησης Μεταφοράς

Ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονται και διασυνδέονται οι νευρώνες ενός νευρωνικού δικτύου, επηρεάζει σημαντικά τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στην εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Υπάρχουν πολλές αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων τις οποίες μπορούμε να ομαδοποιήσουμε ως εξής:

- Μονο-επίπεδα δίκτυα εμπρόσθιας ροής δεδομένων (Single-layer feedforward networks)
- Πολυ-επίπεδα δίκτυα εμπρόσθιας ροής δεδομένων (Multilayer feedforward networks)
- Παλινδρομικά δίκτυα (Recurrent networks)
- Πεπλεγμένα δίκτυα (Lattice networks)

Άλλη κατηγορία μοντέλων μαύρου κουτιού είναι τα γενετικού προγραμματισμού, στα οποία χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος που εντοπίζει μια «βέλτιστη» σχέση ή και σύστημα εξισώσεων

μεταξύ φορτίσεων και αποκρίσεων. Η διαφορά σε σχέση με τα Νευρωνικά Δίκτυα είναι ότι οι εξισώσεις του μοντέλου, αν και επίσης δεν έχουν φυσική ερμηνεία, είναι ορατές στον χρήστη, οπότε προσεγγίζουν περισσότερο την κατηγορία των εννοιολογικών προσεγγίσεων. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 ξεκίνησε η διάδοση των Νευρωνικών Δικτύων στις υδρολογικές επιστήμες. Η εφαρμογή των Νευρωνικών Δικτύων που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι αυτή για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων. Ο γενετικός προγραμματισμός έχει μικρό χρόνο ζωής στις επιστήμες των υδατικών πόρων και ακόμα μικρότερη εφαρμογή στην προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών (Efstratiadis et al, 2006).

2.4 Σκοπός της διπλωματικής

Υπάρχουν πολλοί λόγοι που καθιστούν σημαντική την πρόβλεψη, συνεπώς και την μοντελοποίηση, των διαδικασιών βροχής – απορροής. Ο κύριος λόγος είναι απόρροια των περιορισμών που υπάρχουν στις τεχνικές υδρολογικών μετρήσεων. Δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν όλα εκείνα που πρέπει να είναι γνωστά στα υδρολογικά συστήματα. Πράγματι, υπάρχει ένα περιορισμένο εύρος τεχνικών μέτρησης χωρικής και χρονικής εξάρτησης. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη προεκβολής (extrapolation) από αυτές τις διαθέσιμες μετρήσεις σε συνάρτηση και με το χώρο και με τον χρόνο, ειδικά για μη μετρημένες λεκάνες (όπου οι μετρήσεις είναι ανύπαρκτες) και για προβλέψεις (όπου αυτές δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν) ούτως ώστε να αξιολογηθούν οι πιθανές μελλοντικές υδρολογικές αλλαγές (Beaven, 2012).

Ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει τη σχέση βροχής – απορροής είναι ένα βασικό συστατικό στη διαδικασία της αξιολόγησης των έργων αξιοποίησης υδατικών πόρων για τα οποία, τις περισσότερες φορές, δεν είναι διαθέσιμα επαρκή καταγεγραμμένα δεδομένα απορροής. Αυτό είναι πράγματι ένα μεγάλο πρόβλημα για τις αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Ινδία, όπου η χρήση ενός άρτια εξοπλισμένου συστήματος μέτρησης είναι ανύπαρκτο ή πρόσφατα εγκατεστημένο. Ακόμη και όταν υπάρχουν τέτοια δεδομένα, το πλήθος των εγγραφών είναι περιορισμένο. Ως εκ τούτου, ένα μοντέλο βροχής-απορροής που μπορεί να αποφέρει αρκετά ακριβή αποτελέσματα με τέτοια μικρά πλήθη δεδομένων είναι επιθυμητό και χρήσιμο (Sajikumar and Thandaveswara, 1998).

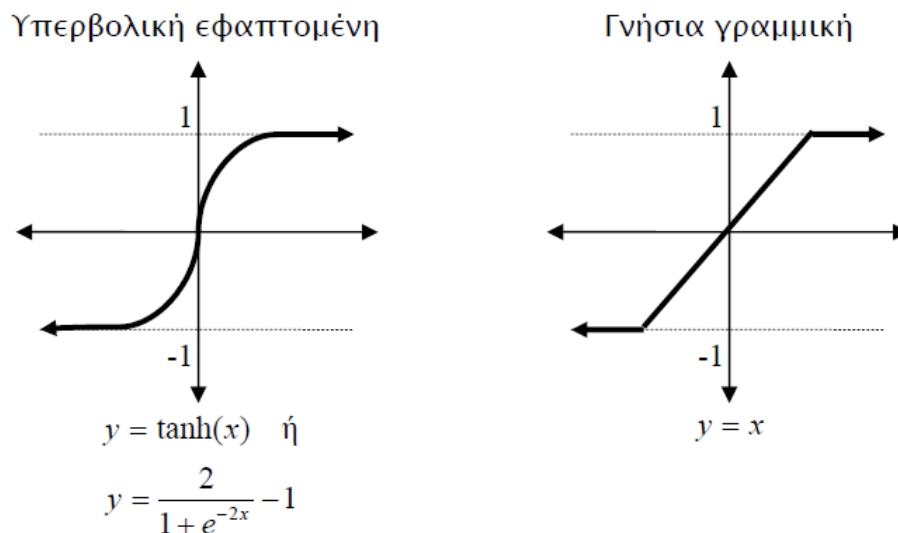
Μια μελλοντική πτυχή της προσομοίωσης αυτής είναι να περιοριστούν οι κίνδυνοι πλημμυρών, παρέχοντας ένα σύστημα προειδοποίησης για τις πλημμύρες που θα περιλαμβάνει μια πολύπλοκη σχέση μεταξύ της βροχόπτωσης και της απορροής. Η πολυπλοκότητα αυτή υπάρχει λόγω της ασυνέπειας των χαρακτηριστικών της υδρολογικής λεκάνης, της ανομοιομορφίας στη βροχόπτωση, καθώς επίσης και διαφόρων άλλων παραγόντων που εμπλέκονται στην διαδικασία της απορροής όπου κύριοι είναι η εξάτμιση, η διήθηση, η υγρασία του εδάφους, η επιφανειακή ροή και η ροή του καναλιού (Mittal et al., 2012).

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Απλό Νευρωνικό Δίκτυο

Για την ευκολότερη κατανόηση της μεθοδολογίας που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα στο υδρολογικό μοντέλο, θα δοθεί σε αυτήν την ενότητα ένα παράδειγμα απλής συνάρτησης και πως ένα μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου μπορεί να κάνει ακριβείς προβλέψεις σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν τη συνάρτηση. Θα πραγματοποιηθεί κωδικοποίηση αρκετών Νευρωνικών Δικτύων τα οποία έχοντας «εκπαιδευτεί» με συγκεκριμένα δεδομένα και αποτελέσματα, θα είναι σε θέση, χωρίς να γνωρίζουν την υπό εξέταση συνάρτηση, να δίνουν ακριβή αποτελέσματα για τυχαία δεδομένα που μπορεί να τους τεθούν εν συνεχεία, πάντα στα πλαίσια του εύρους τιμών στο οποίο έχουν εκπαιδευτεί.

Η αρχιτεκτονική των δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή είναι εκείνη της εμπρόσθιας ροής δεδομένων πολύ-επίπεδων δικτύων (multilayer feed forward neural network). Τα δίκτυα του συγκεκριμένου τύπου είναι πολυστρωματικά δίκτυα. Το πρώτο στρώμα έχει βάρη που καθορίζονται από την είσοδο. Κάθε ένα από τα ενδιάμεσα στρώματα έχει πολώσεις και βάρη. Τα βάρη καθορίζονται αποκλειστικά από την έξοδο του προηγούμενου στρώματος. Το τελευταίο στρώμα είναι και η έξοδος του δικτύου. Ειδικότερα, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώματα. Η συνάρτηση μεταφοράς στο «κρυφό» στρώμα που χρησιμοποιήθηκε είναι η υπερβολική εφαιπτομένη ενώ στο στρώμα εξόδου είναι η γνήσια γραμμική (Εικόνα 5) που περιγράφονται οι μορφές των εξισώσεων (Δαλιακόπουλος, 2003, Βιδάλη, 2011).



Εικόνα 5: Συναρτήσεις Μεταφοράς Νευρωνικών Δικτύων

Εδώ χρησιμοποιείται η τεχνική «παραθύρων» ή αλλιώς χρονικών βημάτων (time lags) προκειμένου να προσομοιωθεί η χρονική εξάρτηση που έχουν τα δεδομένα (η κάθε τιμή εξαρτάται και από τις

προηγούμενες της σε έναν βαθμό). Δημιουργούνται λοιπόν χρονικά βήματα ή «παράθυρα» στις μεταβλητές των δεδομένων, δηλαδή νέες μεταβλητές τιμών οι οποίες περιέχουν τις ίδιες τιμές, ένα μέχρι n βήματα μπροστά, ξεκινώντας δηλαδή από την πρώτη έως και την n -οστή τιμή αντίστοιχα, τελειώνοντας δε, ανάλογα n φορές πριν την τελευταία τιμή. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα «παραθύρου» τιμών:

Έστω διάνυσμα τιμών

$$v = [x_1, x_2, x_3 \dots x_n]$$

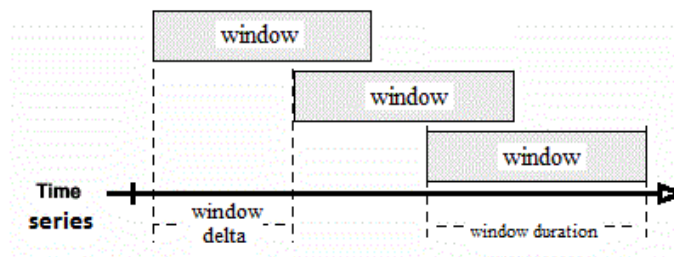
Για «παράθυρο» τριών χρονικών βημάτων δημιουργούνται μέσα από αυτοματοποιημένη διαδικασία τρία νέα διανύσματα τιμών

$$v1 = [x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_{n-2}], v2 = [\text{NaN}, x_2, x_3, x_4, \dots, x_{n-1}] \text{ και } v3 = [\text{NaN}, \text{NaN}, x_3, x_4, x_5, \dots, x_n]$$

τα οποία εν συνεχεία συγχωνεύονται σε ένα νέο διάνυσμα (παραλείποντας τις μη ορισμένες τιμές NaN), το οποίο είναι και το τελικό διάνυσμα τιμών του συγκεκριμένου «παραθύρου» τιμών, που χρησιμοποιείται και στους μετέπειτα υπολογισμούς.

$$\text{window3} = \begin{bmatrix} x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-2} \\ x_2, x_3, x_4, \dots, x_{n-1} \\ x_3, x_4, x_5, \dots, x_n \end{bmatrix}$$

Παρακάτω (Εικόνα 6), φαίνεται μία σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της παραπάνω διαδικασίας:



Εικόνα 6: Διαδικασία Χρονικού Βήματος - «Παραθύρου» (cmu.edu)

όπου φαίνεται η «διάρκεια» ή το μέγεθος του «παραθύρου» τιμών (window duration) καθώς επίσης και η απόσταση μεταξύ δύο διανυσμάτων τιμών ενός «παραθύρου» (window delta, στο παραπάνω παράδειγμα απόσταση μίας τιμής).

Η συνάρτηση που εξετάζεται είναι ημιτονοειδής και έχει την μορφή:

$$y = \sin(x) + a$$

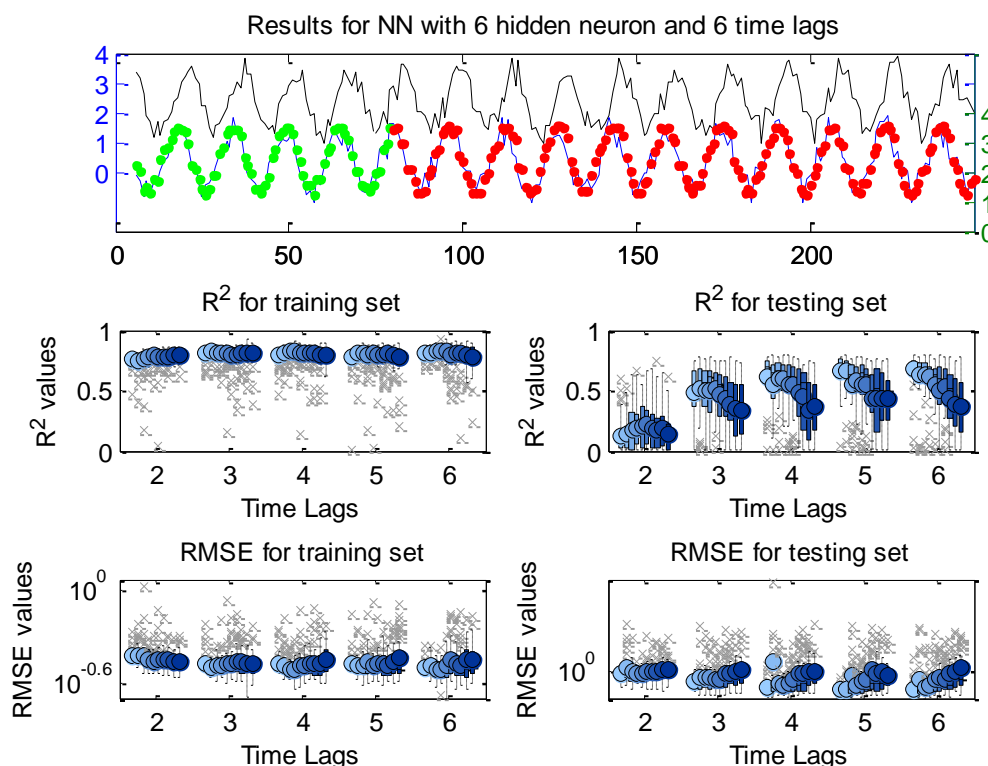
όπου a τυχαία μεταβλητή. Ορίζεται διάνυσμα συγκεκριμένου αριθμού τιμών x από το οποίο το 30% των τιμών του θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση και το υπόλοιπο 70% για την επαλήθευση των Νευρωνικών Δικτύων που θα δημιουργηθούν. Στο στάδιο της αρχικοποίησης των δεδομένων, ορίζονται ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός νευρώνων των δικτύων, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων εκπαίδευσης και ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός «παραθύρων». Στο τελικό στάδιο της παραπάνω διαδικασίας

ορίζεται και ένα διάνυσμα συγκεκριμένου πλήθους τιμών στις οποίες έχει προστεθεί ένας «θόρυβος» με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση πειραματικών μετρήσεων.

Οι τιμές των παραπάνω διανυσμάτων και μεταβλητών είναι οι εξής:

- Διάνυσμα x 500 τυχαίων τιμών κανονικής κατανομής με ελάχιστη – μέγιστη τιμή 0-200 αντίστοιχα.
- Ελάχιστος και μέγιστος αριθμός νευρώνων 1-10 αντίστοιχα.
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων εκπαίδευσης = 50.
- Ελάχιστος και μέγιστος αριθμός «παραθύρων» 2-6 αντίστοιχα.
- Διάνυσμα 500 τιμών, a_obs με ελάχιστη και μέγιστη τιμή 1,8 – 2,9 αντίστοιχα η οποία έχει το ρόλο του «θορύβου» στα δεδομένα της συνάρτησης.

Εφαρμόζεται η τεχνική των παραθύρων και στα δύο σετ δεδομένων εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης. Δίνεται δηλαδή ως δεδομένο εισαγωγής (input) στο δίκτυο η τιμή t_0 του ημιτόνου, και καλείται να προβλέψει την τιμή t_{0+3} που για τη δειγματοληψία που έχει γίνει στο παράδειγμα είναι $3 \times 1/200$ (εφόσον το διάστημα μεταξύ των τιμών είναι $1/200 = 0,005$) μπροστά (output). Εν συνεχεία δημιουργείται ένα Νευρωνικό Δίκτυο για κάθε επανάληψη, κάθε νευρώνα, κάθε «παραθύρου» τιμών, εκπαιδεύονται και δίνουν τα ακόλουθα αποτελέσματα, όπως περιγράφονται παρακάτω (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Αποτελέσματα Training – Testing.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι όσον αφορά το σετ εκπαίδευσης, οι αποκλίσεις του R^2 αλλά και του σφάλματος RMSE των δικτύων μεταξύ τους είναι πολύ μικρές, γεγονός που δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή ενός βέλτιστου δικτύου (όλα δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα). Στο σετ τεκμηρίωσης παρόλα αυτά, υπάρχει μία φανερή τάση βελτίωσης των δικτύων όσο αυξάνονται τα χρονικά βήματα (μνήμη), αλλά όχι απαραίτητα όσο αυξάνεται και ο αριθμός των νευρώνων (πολυπλοκότητα). Υπάρχει λοιπόν η αναγκαιότητα ανάπτυξης ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης που θα επιλέγει το καλύτερο δίκτυο.

3.2 Υδρολογική προσομοίωση με τη χρήση Νευρωνικού Δικτύου

Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας υπάρχει η αρχικοποίηση δεδομένων, σταθερών και μεταβλητών. Δημιουργούνται διανύσματα όπου αποθηκεύονται τα υδρολογικά δεδομένα και οι μεταβλητές που καθορίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά των Νευρωνικών Δικτύων που θα δημιουργηθούν:

Υδρολογικά δεδομένα:

- Μηνιαία δεδομένα βροχής
- Μηνιαία δεδομένα εξατμισοδιαπνοής
- Μηνιαία δεδομένα απορροής

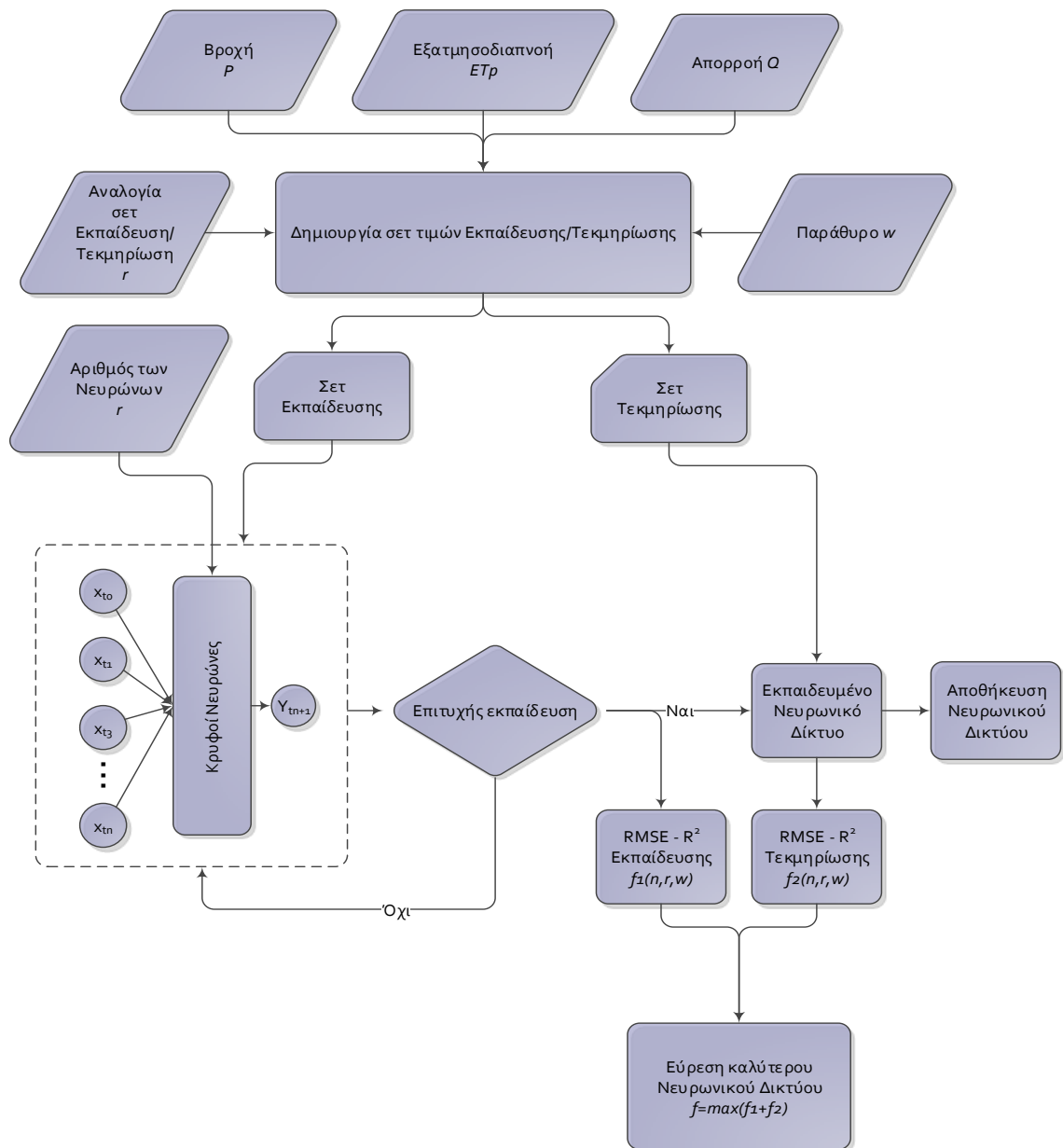
Δεδομένα χαρακτηριστικών Νευρωνικών Δικτύων:

- Ελάχιστος και μέγιστος αριθμός νευρώνων (1-15)
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων εκπαίδευσεων των δικτύων (50)
- Ελάχιστος και μέγιστος αριθμός «παραθύρων» που θα χρησιμοποιηθούν (2-10)

Εκτός από τα παραπάνω δεδομένα δημιουργούνται επίσης κενά διανύσματα όπου αργότερα θα αποθηκευτούν όλα τα Νευρωνικά Δίκτυα που θα δημιουργηθούν καθώς και οι τιμές RMSE και R^2 . Σε αυτό το στάδιο επίσης ορίζονται οι διαφορετικές αναλογίες που θα χρησιμοποιηθούν στα δεδομένα για εκπαίδευση και επαλήθευση των δικτύων (διαφορετικά σετ τιμών εκπαίδευσης – επαλήθευσης). Ορίζονται δηλαδή συγκεκριμένος αριθμός δεδομένων εισόδου (βροχή) τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση των δικτύων, και τα υπόλοιπα για να επαληθευτούν οι τιμές που δίνει σαν αποτελέσματα, λαμβάνοντας αυτή τη φορά όμως τα τελευταία δεδομένα ως άγνωστες τιμές εισόδου. Τα σετ αναλογιών λοιπόν είναι 50-50, 60-40, 70-30, 80-20 (%) εκπαίδευση – επαλήθευση.

Εν συνεχεία, τα δεδομένα μετατρέπονται με την τεχνική των «παραθύρων» που έχει περιγραφτεί παραπάνω (Απλό Νευρωνικό Δίκτυο) και αποθηκεύονται σε κατάλληλου μεγέθους διανύσματα τα αργότερα θα είναι οι παράμετροι εισόδου – εξόδου εκπαίδευσης των δικτύων που θα δημιουργηθούν. Στο επόμενο στάδιο του κώδικα δημιουργείται επαναληπτική διαδικασία σε κάθε βήμα της οποίας παράγεται και ένα ξεχωριστό Νευρωνικό Δίκτυο με διαφορετικό αριθμό νευρώνων, αριθμό επαναλήψεων εκπαίδευσης και «παραθύρων» (Εικόνα 8). Αξίζει να σημειωθεί ότι όσον αφορά την αρχιτεκτονική των δικτύων που δημιουργούνται, η μόνη παράμετρος που αλλάζει είναι ο αριθμός νευρώνων ή κρυφών

στρωμάτων. Κάθε ένα Νευρωνικό Δίκτυο που δημιουργείται, αποθηκεύεται και επαληθεύεται απευθείας (στάδιο τεκμηρίωσης). Τα αποτελέσματα από την επαλήθευση αυτή (πίνακες R^2 , RMSE) αποθηκεύονται σε κατάλληλα διανύσματα ούτως ώστε να συγκριθούν αργότερα τα αποτελέσματα για την επιλογή του βέλτιστου.



Εικόνα 8: Οπτική Απεικόνιση Διαδικασίας Νευρωνικού Δικτύου.

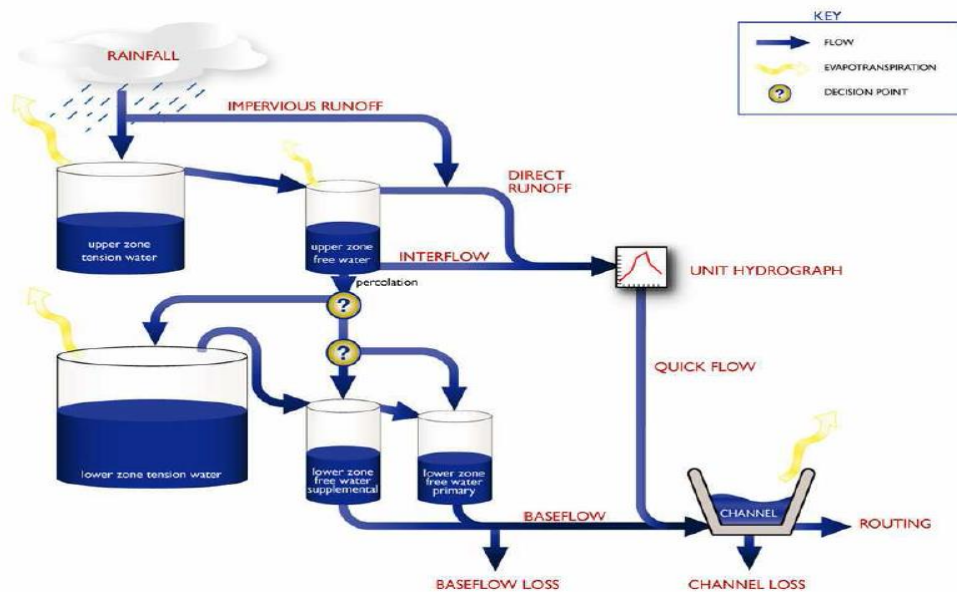
Όσον αφορά την επιλογή του βέλτιστου Νευρωνικού Δικτύου για κάθε μία λεκάνη απορροής, δημιουργήθηκε κατάλληλος κώδικας λαμβάνοντας υπόψη τον βέλτιστο συνδυασμό του δείκτη R^2 των δεδομένων εκπαίδευσης - επαλήθευσης. Δημιουργείται ένα διάνυσμα τιμών στο οποίο εισάγονται ως τιμές τα αθροίσματα των τιμών R^2 εκπαίδευσης - επαλήθευσης για κάθε επανάληψη, κάθε νευρώνα, κάθε «παραθύρου». Σε επαναληπτική διαδικασία που ορίζεται, συγκρίνεται η μέγιστη τιμή του παραπάνω πίνακα με το αντίστοιχο R^2 για κάθε λεκάνη ξεχωριστά, και στην περίπτωση που ταυτίζονται, αποθηκεύεται σε έναν δείκτη (index) η θέση του βέλτιστου Νευρωνικού Δικτύου για λεκάνη. Εν συνεχεία

αυτό το δίκτυο που επιλέχθηκε προσομοιώνεται εκ νέου με τα δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης (training – testing). Μία σύντομη οπτική απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας φαίνεται παρακάτω.

3.3 Το υδρολογικό μοντέλο Sacramento

Το μοντέλο Sacramento ή αλλιώς Γενικευμένο Μοντέλο Υδρολογικής Προσομοίωσης αναπτύχθηκε από το Κοινό Ομοσπονδιακό – Πολιτειακό Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών των Ηνωμένων Πολιτειών και έγινε ευρύτερα γνωστό με το όνομα αυτό, Sacramento. Ανήκει στην κατηγορία των εννοιολογικών και αδρομερών μοντέλων, με άλλα λόγια, προσομοιώνει τις κυριότερες φυσικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου σε λεκάνες απορροής με βάση ένα σύστημα από στοιχειώδεις διεργασίες που αναπαριστούν φυσικές διεργασίες, όπως η διήθηση, η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας και η εξατμισοδιαπνοή. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύστημα διασυνδεδεμένων δεξαμενών διά μέσου των οποίων ρέει το νερό. Η ροή γίνεται σύμφωνα με κατάλληλες εξισώσεις που περιγράφουν τις επιμέρους διεργασίες. Η επιφανειακή βροχοπτώση της λεκάνης θεωρείται ότι πέφτει σε δύο ξεχωριστά τμήματα της λεκάνης (Εικόνα 9):

- Το Υδροπερατό τμήμα, που αντιστοιχεί στην εδαφική επιφάνεια της λεκάνης και
- Το Αδιαπέρατο τμήμα (Direct Runoff), που καλύπτεται από λίμνες, υδατορεύματα, έλη ή αδιαπέρατα εδαφικά υλικά και παράγει άμεση απορροή, ακόμη και για πολύ μικρής έντασης βροχή.



Εικόνα 9: Προσομοίωση υδροπερατού τμήματος υδρολογικής λεκάνης από το Sacramento.

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 9) αναπαρίσταται το υδροπερατό τμήμα της λεκάνης, στο οποίο διακρίνουμε δύο ζώνες εδάφους κατά την κατακόρυφη έννοια:

- Την Ανώτερη Ζώνη (Upper Zone) και
- Την Κατώτερη Ζώνη (Lower Zone)

Το νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων γεμίζει τη Δεξαμενή Εδαφικής Υγρασίας της Ανώτερης Ζώνης (Upper Zone Tension Water). Μια παρατεταμένη βροχόπτωση που συμβαίνει μετά από περίοδο ξηρασίας συμβάλει πρώτα στην ικανοποίηση των αναγκών της παρεμπόδισης από τη χλωρίδα και στη συνέχεια αυξάνει την εδαφική υγρασία σε σημείο ώστε να αρχίσει η διήθηση σε βαθύτερες ζώνες του εδάφους, ενώ είναι δυνατό να δημιουργηθεί και οριζόντια στράγγιση. Ο όγκος νερού που απαιτείται για την έναρξη της διήθησης ή και της οριζόντιας στράγγισης αποτελεί και τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα της ανώτερης ζώνης του εδάφους που αναπαρίσταται από την χωρητικότητα της Δεξαμενής Εδαφικής Υγρασίας της Ανώτερης Ζώνης. Όταν η Δεξαμενή Εδαφικής Υγρασίας της Ανώτερης Ζώνης γεμίσει, η περίσσεια νερού αποθηκεύεται προσωρινά στη Δεξαμενή του Νερού Βαρύτητας της Ανώτερης Ζώνης (Upper Zone Free Water). Αυτή τροφοδοτεί με τη διήθηση κατά κύριο λόγο τις κατώτερες εδαφικές ζώνες, αλλά αποστραγγίζεται και πλευρικά παράγοντας υποδερμική απορροή (interflow).

Η διήθηση από τη Δεξαμενή Νερού Βαρύτητας της Ανώτερης Ζώνης πραγματοποιείται πριν από κάθε άλλη διεργασία που αφορά την δεξαμενή αυτή. Ο ρυθμός διήθησης εξαρτάται από το απόθεμα νερού στη Δεξαμενή Νερού Βαρύτητας της Ανώτερης Ζώνης και από το έλλειμμα νερού της κατώτερης ζώνης. Όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας της Δεξαμενής του Νερού Βαρύτητας της Ανώτερης Ζώνης από τη Δεξαμενή Εδαφικής Υγρασίας της Ανώτερης Ζώνης ξεπεράσει το ρυθμό της διήθησης, τότε η περίσσεια νερού αποθηκεύεται προσωρινά στη Δεξαμενή του Νερού Βαρύτητας και παράγει υποδερμική ροή. Εφόσον η Δεξαμενή Νερού Βαρύτητας γεμίσει, τότε η περίσσεια νερού εμφανίζεται ως επίγεια απορροή (Surface Runoff).

Η Κατώτερη Ζώνη του εδάφους περιλαμβάνει τρεις δεξαμενές που είναι οι ακόλουθες:

- Δεξαμενή Εδαφικής Υγρασίας της Κατώτερης Ζώνης (Lower Zone Tension Water), η οποία περιλαμβάνει το τμήμα εκείνο των υπόγειων αποθεμάτων που τροφοδοτεί την εξατμισοδιαπονοή
- Κύρια Δεξαμενή Εδαφικής Υγρασίας Νερού Βαρύτητας της Κατώτερης Ζώνης (Lower Zone Primary Free Water) και
- Βοηθητική Δεξαμενή Νερού Βαρύτητας της Κατώτερης Ζώνης (Lower Zone Supplementary Free Water) Η απορροή, η οποία είναι και η έξοδος του μοντέλου, εμφανίζεται με τις ακόλουθες πέντε μορφές:
- Άμεση απορροή (Direct runoff) από επιφάνειες που είναι μόνιμα ή προσωρινά αδιαπέραστες από νερό
- Επίγεια απορροή (Surface runoff) στην ανώτερη εδαφική ζώνη που εμφανίζεται, όταν η ένταση της βροχής ξεπερνά το άθροισμα του ρυθμού διήθησης και του ρυθμού της υποδερμικής ροής
- Υποδερμική ροή (Interflow), που προκύπτει ως πλευρική αποστράγγιση του νερού Βαρύτητας της Ανώτερης Ζώνης
- Δευτερεύουσα Βασική Ροή (supplementary base flow)
- Κύρια Βασική Ροή (primary base flow)

Το μοντέλο δέχεται μια μόνιμα διαπερατή επιφάνεια, όπως για παράδειγμα αυτή των πλακόστρωτων των πόλεων και μία προσωρινά αδιαπέρατη επιφάνεια, όπως για παράδειγμα ταμειυτήρες, έλη και επιφάνειες ανάβλυσσης. Η εξάτμιση από την επιφάνεια που καλύπτεται από νερά ή υδροχαρή φυτά, θεωρείται ίση με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Στο υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι συνάρτηση της ζήτησης για εξατμισοδιαπνοή (Μπούρα, 2010).

Προκειμένου να αποφευχθεί η υποκειμενική κρίση του χρήστη για την επιλογή παραμέτρων του μοντέλου, αυτό βαθμονομήθηκε με ένα αλγόριθμο του βασίστηκε σε εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms). Οι γενετικών αλγόριθμοι είναι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι τυχαίας αναζήτησης που μιμούνται την αρχή της επιλογής και της εξέλιξης του ισχυρότερου σε ένα φυσικό σύστημα. Λαμβάνοντας υπόψη ένα ορισμένο χώρο αναζήτησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι προσεγγίζουν τη λύση καθολικά και έτσι είναι χρήσιμοι για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης (Wang, 1998) με μία ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις. Παρόλο που οι υδρολογικές παράμετροι που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση μπορεί να μην έχουν άμεση φυσική έννοια, συχνά αναπαριστούν «ενεργές» ιδιότητες (effective properties) αντισταθμίζοντας έτσι της σύμφυτες ανεπάρκειες των αδρομερών μοντέλων (Vrugt et al., 2006). Σε αυτή τη μελέτη, ως αντικειμενική συνάρτηση για τη βελτιστοποίηση του υδρολογικού μοντέλου Sacramento χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Nash-Sutcliffe (Nash και Sutcliffe, 1970):

$$NSE_Q = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q^t - \bar{Q})^2}$$

όπου Q^t η παρατηρούμενη και Q_m^t η προσομοιωμένη απορροή τη χρονική στιγμή t και \bar{Q} η μέση απορροή.

3.4 Κριτήρια σύγκρισης αποτελεσμάτων – επαλήθευση μοντέλου

Ένα από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του κάθε δικτύου και η δυνατότητά του να κάνει ακριβείς προβλέψεις είναι η ρίζα μέσης τετραγωνικής απόκλισης (root mean square error ή εν συντομία συντελεστής RMSE) που υπολογίζεται ως εξής:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{N}}$$

Όπου Q_i είναι οι παρατηρούμενες τιμές, \hat{Q}_i τα υπολογισμένα ή προσομοιωμένα αποτελέσματα και N το πλήθος των δεδομένων. Ο RMSE υποδεικνύει την απόκλιση που έχουν οι παρατηρούμενες τιμές με τις προσομοιωμένες. Όσο πιο μικρή τιμή RMSE τόσο πιο ακριβής είναι η πρόβλεψη.

Επίσης το κριτήριο R^2 ή αλλιώς συντελεστής προσδιορισμού δίνεται από την σχέση:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\varrho_i - \hat{\varrho}_i)^2}{\sum \varrho_i^2 - \frac{\sum \hat{\varrho}_i^2}{n}}$$

και αντιπροσωπεύει το ποσοστό της αρχικής αβεβαιότητας που εξηγείται από το μοντέλο. Ο ιδανικός συνδυασμός των δύο παραπάνω συντελεστών για ένα σετ παρατηρημένων και υπολογισμένων τιμών, όπου είναι σχεδόν αδύνατον να επιτευχθεί, είναι να έχουν $RMSE = 0$ και $R^2 = 1$.

Τα δύο παραπάνω κριτήρια ισχύουν για περιπτώσεις καθολικής αντιστοιχίας παρατηρούμενων – προσομοιωμένων τιμών. Στις περισσότερες περιπτώσεις παρόλα αυτά, οι ερευνητές δίνουν περισσότερο βάρος σε ακραίες τιμές, είτε μέγιστες είτε ελάχιστες, που αναπαριστούν γεγονότα όπως πλημμύρες ή ξηρασίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ειδική αντιστοιχία των τιμών για την κάθε περίπτωση είναι πιο σημαντική από την καθολική αντιστοιχία οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα κριτήρια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ενός Νευρωνικού Δικτύου.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Γενικά

Το νησί της Κρήτης (Εικόνα 10) καλύπτει μια επιφάνεια 8.265 km^2 , περίπου 6,3% της επιφάνειας της Ελλάδας. Έχει μέσο υψόμετρο 482 m και μέση κλίση εδάφους 228 m/km με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο που διαμερίζει την επιφάνεια σε πολυάριθμες μικρές υδρολογικές λεκάνες. Από τις λεκάνες αυτές, στις οποίες συχνά απαντάται καρστικό γεωλογικό υπόβαθρο (π.χ. Fleury *et al.*, 2007; Siart *et al.*, 2009; Maramathas and Boudouvis, 2006), απορρέουν εποχιακά ρέματα και σπανιότερα ποτάμια μόνιμης ροής. Η Κρήτη έχει τυπικό Μεσογειακό νησιωτικό κλίμα με περίπου 40% της βροχόπτωσης να λαμβάνει χώρα κατά τους χειμερινούς μήνες ενώ κατά τη διάρκεια των μακρών και ξηρών καλοκαιριών η ποσότητά της είναι αμελητέα. Η μέση βροχόπτωση κυμαίνεται από 440 mm/year στα ανατολικά σε περισσότερο από 2.000 mm/year στα ορεινά δυτικά όπου η επίδραση της ορειογραφίας αυξάνει τόσο την συχνότητα όσο και την ένταση των χειμερινών κατακρημνίσεων (Naoum and Tsanis, 2004; Roe, 2005; Koutroulis and Tsanis, 2010).



Εικόνα 10: Το Νησί της Κρήτης (πηγή: sunbed.gr).

4.2 Κλιματικές συνθήκες

Ο κύριος κλιματικός χαρακτήρας της Κρήτης είναι εύκρατος κι αυτό γιατί το νησί ανήκει στη Μεσογειακή κλιματολογική ζώνη. Η ατμόσφαιρα της είναι αρκετά υγρή, γεγονός βέβαια το οποίο επηρεάζεται από την απόσταση μίας περιοχής από τη θάλασσα. Ο χειμώνας μπορεί να χαρακτηριστεί ως αρκετά ήπιος και υγρός, με αρκετές βροχοπτώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στην πλειοψηφία τους, στα δυτικά τμήματα του νησιού. Επίσης, η χιονόπτωση στις πεδινές περιοχές είναι σπάνια, αλλά αρκετά συχνή στα ορεινά τμήματα. Το καλοκαίρι, η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται από 25 έως 30 βαθμούς $^{\circ}\text{C}$, σίγουρα σε χαμηλότερα επίπεδα από εκείνη της ηπειρωτικής Ελλάδας. Το νότιο τμήμα, συμπεριλαμβανομένης της πεδιάδας της Μεσσήρας και των Αστερούσιων ορέων, έχει πιο πολλές ηλιόλουστες ημέρες και σχετικά με το υπόλοιπο νησί υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

Η Κρήτη, ως νησιωτική περιοχή, μπορεί να επωφεληθεί μόνο από τα νερά που φτάνουν σε αυτήν με φαινόμενα κατακρημνισμάτων (βροχή, χαλάζι, χιόνι). Λόγω της γεωγραφικής της θέσης, όμως, (νοτιότερο άκρο της Ευρώπης) και του γεωφυσικού της περιβάλλοντος, δεν ευνοείται η συγκέντρωση μεγάλου όγκου κατακρημνίσεων. Εξάλλου η γεωγραφική της τοποθέτηση στη διεύθυνση ανατολής – δύσης, καθώς και η ύπαρξη υψηλών οροσειρών καθορίζουν και το ύψος των νερών που δέχεται ετησίως. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στο Υδατικό Διαμέρισμα ανέρχεται στα 927 mm ή διαφορετικά $7,69 \times 10^6 \text{ m}^3$ κατακρημνισμάτων σε μέση ετήσια βάση. Είναι γεγονός ότι παρουσιάζεται μια σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης γεωγραφικά (η μέση ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζει αύξηση από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα νότια προς τα βόρεια) και φυσιογραφικά (πεδινές προς ορεινές περιοχές). Παραδείγματος χάρη, η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι στην ανατολική Κρήτη κατά 23% μικρότερη σε σχέση με τη Δυτική (Μπούρα, 2009).

Επίσης, στην Κρήτη εμφανίζεται βροχοβαθμίδα (αύξηση βροχόπτωσης με το υψόμετρο) 61 mm/100 m, η οποία είναι μια από τις μεγαλύτερες σε ολόκληρη τη χώρα. Η μέση θερμοκρασία είναι υψηλότερη στα ανατολικότερα τμήματα του νησιού ανατολικά από ότι στα δυτικά (18,4 έναντι 17 °C) όπως και στα νότια από ότι στα βόρεια (19,6 έναντι 18,6 °C). Η ηλιοφάνεια είναι ιδιαίτερα υψηλή σε όλη την έκτασή της και ειδικότερα στη νότια Κρήτη στην οποία ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας είναι κατά 10% τουλάχιστον υψηλότερος (περίπου 3.000 ώρες) (Μπούρα, 2010).

Πιο αναλυτικά, ο νομός Λασιθίου υπάγεται κατά το μεγαλύτερο μέρος του στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Οι ημιορεινές περιοχές ανήκουν στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ψυχρό, ενώ οι ορεινές περιοχές (οροπέδιο Λασιθίου) ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ψυχρό. Στην πόλη της Σητείας η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 490 mm και η ηλιοφάνεια στις 2.699 ώρες (Σητεία) και 3.068 ώρες στην Ιεράπετρα. Ο αριθμός ωρών ηλιοφάνειας της Ιεράπετρας είναι ο μεγαλύτερος της Ελλάδας (Μπούρα, 2010).

Από τον Νομό Ηρακλείου, μόνο το βόρειο τμήμα του ανήκει στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα θερμό. Το υπόλοιπο του νομού ανήκει στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Στην πόλη του Ηρακλείου η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι ίση με 470 mm. Η τιμές της ηλιοφάνειας ανέρχονται σε 2.707 ώρες (υψηλότερη στο Τυμπάκι με 2.948 ώρες).

Ο νομός Ρεθύμνου ανήκει στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές του στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Οι ορεινές περιοχές του ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό. Ένα πολύ μικρό μέρος των πολύ ορεινών περιοχών του νομού ανήκει στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα δριμύ. Όσον αφορά την βροχόπτωση, η ετήσια τιμή της ανέρχεται στα 672,4 mm και η τιμή της ηλιοφάνειας στις 2.592 ώρες (Μπούρα, 2010).

Ο νομός Χανίων ανήκει στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές του στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα θερμό ήπιο ή ψυχρό. Οι ορεινές περιοχές του ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό. Ένα πολύ μικρό μέρος των πολύ ορεινών περιοχών του νομού ανήκει στον υγρό

βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα δριμύ. Όσον αφορά τις τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, αυτές ανέρχονται σε 824 και 600 mm αντίστοιχα στους σταθμούς του Αλικιανού και της Σούδας και οι τιμή της ηλιοφάνειας στις 2.765 ώρες (Σούδα) (Μπούρα, 2010).

4.3 Λεκάνες απορροής

Στον παρακάτω χάρτη της Κρήτης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, φαίνονται όλες οι λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν και ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή τους. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι τα μηνιαία δεδομένα βροχής – απορροής – εξατμισοδιαπνοής, είναι απόρροια μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην πλειονότητα των λεκανών από τον Σεπτέμβριο του 1977 μέχρι και τον Ιανουάριο του 1997.



Εικόνα 11: Λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν στο νησί της Κρήτης.

4.3.1 Λεκάνη 1: Σεμπρωνιώτης

Στον νομό Χανίων, στο Αποπηγάδι και στους γύρω λόφους που περιβάλλουν το χωριό Σέμπρωνα, υπάρχουν πάρα πολλές φυσικές πηγές, πάνω από 80 τον αριθμό. Προς το Βορειοδυτικό τμήμα του χωριού, στη θέση "Καμπί" υπάρχει μία φυσική πηγή με παγωμένο νερό. Λέγεται ότι είναι το νερό του Αποπηγαδιού, το οποίο χάνεται από ένα σημείο και μετά και ξαναπηγάζει. Στην ευρύτερη περιοχή αυτής της Πηγής υπάρχουν και άλλες πηγές που καθώς ενώνονται δημιουργείται ο ποταμός Σεμπρωνιώτης (22km²) ο οποίος φτάνει στις Βουκολιές και στη συνέχεια χύνεται στον Ταυρωνίτη. Ο Σεμπρωνιώτης διαρρέεται όλο το χρόνο από νερό. Το ποτάμι αλλά και οι όχθες του δεξιά και αριστερά είναι γεμάτο πλατάνια και άλλα δένδρα που δημιουργούν ένα πανέμορφο τοπίο (sempronas.blogspot.gr).

4.3.2 Λεκάνη 2: Ρουματιανός

Ο Ρουματιανός που βρίσκεται και αυτός στον νομό Χανίων, είναι ο δεύτερος παραπόταμος του ποταμού Ταυρωνίτη ο οποίος σχηματίζει και την ομώνυμη λεκάνη απορροής, και έχει επιφάνεια 28 km² (Μπούρα, 2010).

4.3.3 Λεκάνη 3: Πρασσανός

Στον νομό Ρεθύμνου η πηγή του Πρασσανού είναι η πιο εντυπωσιακή, έχει 11 km μήκος και ο ποταμός σχηματίζει τη λεκάνη απορροής του Πρασσανού. Βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του χωριού του Πλατανιά (discoveronfoot.com, 2014).

4.3.4 Λεκάνη 4: Πλατός

Ο ποταμός Πλατός (ή Αμαριανός) στην αρχαιότητα ήταν γνωστός ως ποταμός της Ηλέκτρας και εκβάλλει κοντά στο χωριό Αγία Γαλήνη του Νομού Ρεθύμνης, στο βορειοδυτικό τμήμα του κόλπου της Μεσσάρας. Η εκβολή του απέχει από την πόλη του Ρεθύμνου περίπου 62 km. (Μπούρα, 2010).

4.3.5 Λεκάνη 5: Πατέλης

Ο ποταμός Πατέλης βρίσκεται στην περιοχή της Σητείας στο Νομό Λασιθίου και αποτελεί την πιο μεγάλη λεκάνη του Ανατολικού τμήματος του νομού. Ο ποταμός εισέρχεται στην κοιλάδα από το νότιο άκρο της μέσω ενός φαράγγιου, το οποίο έχει διανοιχθεί μέσα σε μαργαϊκούς ασβεστολίθους. Παλιότερα είχαν σημειωθεί πλημμύρες και υλικές ζημιές στην περιοχή από υπερχειλίση του ποταμού, ωστόσο πλέον η υπάρχουσα αντιπλημμυρική περιφερειακή τάφρος εκτιμάται ότι προσφέρει επαρκή αντιπλημμυρική προστασία στην πόλη της Σητείας (Μπούρα, 2010).

4.3.6 Λεκάνη 6: Μύρτος

Ο ποταμός Μύρτος (γνωστός και ως Κρυός ή Σαραντάπηχος) βρίσκεται στον νομό Λασιθίου, πηγάζει από τις κορυφές Σπαθί (νότια) και Αφέντης Χριστός (ανατολικά) και αφού διασχίσει το Σελάκανο εκβάλλει νότια στο Λιβυκό πέλαγος στο παραθαλάσσιο χωριό Μύρτος. Σε αυτόν σχηματίζεται το φαράγγι Σαρακίνα. Εδώ βρίσκεται μία ομάδα χωριών που την αποτελούν ο Μύρτος, οι Μύθοι, οι Μάλλες, ο Χριστός, το Μεταξοχώρι, οι Μουρνιές, η Ρίζα και τα Γδόχια (Μπούρα, 2010).

4.3.7 Λεκάνη 7: Κουτσουλίδης

Ο Κουτσουλίδης ποταμός είναι και αυτός άλλος ένας παραπόταμος του Γεροποτάμου. Βρίσκεται στο Νομό Ηρακλείου και ανήκει στην ευρύτερη λεκάνη απορροής της Δυτικής Μεσσαράς. Πηγάζει από τις πηγές Βότομος και Στέρνα από τις οποίες αρδευόταν η αρχαία Γόρτυνα, πρωτεύουσα της Ρωμαϊκής Κρήτης, ενώ έχει μόνιμη ροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ο ποταμός Κουτσουλίδης είναι συνέχεια του φαράγγιου του Αγίου Νικολάου, περνάει μέσα από τον οικισμό του Ζαρού και αφού διασχίσει την ομώνυμη κοιλάδα καταλήγει στο φράγμα της Φανερωμένης (Μπούρα, 2010).

4.3.8 Λεκάνη 8: Καλαμανκιανός

Ο Καλαμανκιανός ή αλλιώς το φαράγγι του Χανγά βρίσκεται πολύ κοντά στο χωριό Καλαμαύκα, σε απόσταση 12 km από την πόλη της Ιεράπετρας. Το βάθος του φαράγγιου φτάνει τα 300 m. Το φαράγγι

είναι ιδιαίτερα όμορφο και με χαρακτηριστικούς βραχώδεις σχηματισμούς, οι οποίοι οφείλονται σε σπάνια γεωλογικά χαρακτηριστικά (cretanbeaches.com/faraggia, 2014).

4.3.9 Λεκάνη 9: Κακοδικιανός

Ο Κακοδικιανός ποταμός βρίσκεται στο νότιο τμήμα του Νομού Χανίων και συγκεκριμένα στον Δήμο Πελεκάνου και εκβάλλει πολύ κοντά στην πόλη της Παλαιοχώρας. Το όνομά του προέρχεται από το ομώνυμο χωριό Κακοδίκι. Ο ποταμός, ο οποίος διαρρέει το χωριό, εξ' αιτίας των ορμητικών νερών του ιδιαίτερα τη χειμερινή περίοδο, δημιουργεί προβλήματα επικοινωνίας μεταξύ των δύο τμημάτων του χωριού (Μπούρα, 2010).

4.3.10 Λεκάνη 10: Γιόφυρος

Ο Γιόφυρος ποταμός βρίσκεται στο Νομό Ηρακλείου και η λεκάνη απορροής που σχηματίζει ανήκει κυρίως στο Δήμο Ηρακλείου. Ονομάζεται αλλιώς Διακονιάρης κατά τους ντόπιους και διασχίζει από τα ανατολικά και νότια μέχρι τα βόρεια σύνορα την περιοχή του δήμου Τεμένους, δημιουργώντας βαθιές κοιλάδες. Αναφέρεται ότι στην αρχαιότητα στις πηγές του υπήρχε ναός της Αθηνάς. Δυτικά από το χωριό Τσαγκαράκι μέχρι το χωριό Κυπαρίσσι, το ποτάμι σχηματίζει ένα απόκρημνο φαράγγι με πυκνή βλάστηση και μικρούς καταρράκτες (Μπούρα, 2010, explore-crete.gr).

4.3.11 Λεκάνη 11: Γεροπόταμος

Γνωστός και ως Ιερός ποταμός, έχει διατηρήσει το όνομα του ως παλιό, επιβλητικό και μεγάλο ποτάμι της Κρήτης. Η λεκάνη απορροής του Γεροποτάμου βρίσκεται στο Νομό Ηρακλείου. Ο Γεροπόταμος διασχίζει την πεδιάδα της Μεσαράς, 55 km νότια του Ηρακλείου. Αρκετοί παραπόταμοι του διαρρέουν όλη την πεδιάδα και αφού ενωθούν με αυτόν, καταλήγουν στην παραλία που βρίσκεται μέσα στο πολεμικό αεροδρόμιο του Τυμπακίου. Επίσης, ένα μικρό μέρος των υδάτων παροχετεύεται λίγο βορειότερα, στη παραλία της Καταλυκής του Κόκκινου Πύργου. Ο Γεροπόταμος κάποτε είχε μεγάλες παροχές αλλά τα τελευταία χρόνια είναι σχεδόν πάντα ξηρός. Εκτός από το πρόβλημα της γενικής ανομβρίας που αντιμετωπίζει η Μεσσαρά, η κύρια μείωση των υδάτων του ποταμού οφείλεται στην κατασκευή του φράγματος της Φανερωμένης, κοντά στο χωριό Βώροι. Στο ποτάμι αυτό έχουν γίνει κατά καιρούς διάφορα τεχνικά έργα, κατά κύριο λόγο αντιπλημμυρικά και γέφυρες, εκ των οποίων οι πιο γνωστές είναι η Γαραζανή, η Μουσανή, η νέα γέφυρα του Περάματος κ.ά. (Μπούρα, 2010, cretanbeaches.com, 2012).

4.3.12 Λεκάνη 12: Γαζανός

Ο χείμαρρος Γαζανός αποστραγγίζει μια περιοχή συνολικής έκτασης 181 km² με μέσο υψόμετρο ίσο με 920 m και εκβάλλει στο Κρητικό πέλαγος. Η αντίστοιχη υδρολογική λεκάνη εκτείνεται στο βόρειο-δυτικό τμήμα του Νομού Ηρακλείου στις Ανατολικές παρυφές του Ψηλορείτη. Το υδρογραφικό της δίκτυο είναι δένδριτικού τύπου, με σχετικά αραιούς κλάδους που ακολουθούν τις κύριες τεκτονικές γραμμές της περιοχής και αναπτύσσονται σχεδόν μονόπλευρα στο δυτικό τμήμα της λεκάνης, ακολουθώντας τις

μορφολογικές κλίσεις των παρυφών του Ψηλορείτη. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επικρατούν είναι τα ανθρακικά πετρώματα και οι λευκές και ανοικτόφαιες μάργες του Νεογενούς. Επίσης υπάρχουν σημαντικές εμφανίσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων με ενδιαστρώσεις γύψων και περιορισμένης έκτασης αλλουβιακές αποθέσεις στην περιοχή του κάτω ρού του ποταμού. Χαρακτηριστική της λεκάνης είναι η έντονη εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών διαθεσίμων από γεωτρήσεις. Κατά μια πρόσφατη εκτίμηση, ο μέσος ετήσιος αντλούμενος όγκος νερού από το σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης, ανέρχεται σε 17,5 Mm³ περίπου (Δολαψάκης, Νταλακογιώργου, 2009).

4.3.13 Λεκάνη 13: Αποσελέμης

Αποσελέμης ποταμός βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Νομού Ηρακλείου και συγκεκριμένα στο Δήμο Χερσονήσου, ανάντη του χωριού Ποταμιές. Ο ποταμός Αποσελέμης, πηγάζει κατά κύριο λόγο από το όρος Δίκη και στη συνέχεια και από την περιοχή της Κασταμονίτσας, όπου δέχεται τα πλημμυρικά νερά του Οροπεδίου Λασιθίου και εκβάλλει στο Κρητικό Πέλαγος. Ποικίλες αντιδράσεις και από τους κατοίκους και από επιστήμονες έχει δημιουργήσει η απόφαση να δημιουργηθεί φράγμα στον ποταμό Αποσελέμη, αφού έχει τεθεί υπό αμφισβήτηση η χρησιμότητα του (Μπούρα, 2010).

4.3.14 Λεκάνη 14: Αναποδάρης

Ο Αναποδάρης ποταμός βρίσκεται στο Νομό Ηρακλείου και είναι ένας από τους μεγαλύτερους ποταμούς, όχι μόνο του νομού αλλά και ολόκληρης της Κρήτης και για την ακρίβεια, είναι ο πιο μακρύς ποταμός του νησιού. Ο Αναποδάρης ποταμός πηγάζει από τις Ν.Α. κορφές του Ψηλορείτη, ενισχύεται από τους μικρότερους ποταμούς Δραπεγιάνο, Αυλιώτη και Μπαρίτη και εκβάλλει στο Λιβυκό Πέλαγος στην περιοχή Δερμάτου, ανάμεσα στους παραθαλάσσιους οικισμούς Κερατόκαμπου και Τσούτσουρου. Πιο συγκεκριμένα συγκεντρώνει όλα τα νερά του κεντροανατολικού Νομού Ηρακλείου και μεγάλο μέρος των νερών της νότιας Δείκτης, ενώ τροφοδοτείται από διάφορους παραπόταμους, όπως ο Μπαρίτης ποταμός. Ο Αναποδάρης κάθε χρόνο απορρέει περίπου 40 Mm³ νερού στην θάλασσα. Το όνομα του οφείλεται στο γεγονός ότι στην έξοδο του τις μέρες του χειμώνα που τρέχει πολύ νερό (επειδή συνήθως τους χειμερινούς μήνες στην περιοχή επικρατούν νότιοι άνεμοι), οι άνεμοι τραβούν προς τα μέσα το νερό του έτσι που αν κάποιος δει το ποτάμι να νομίζει ότι έχει ανάποδη ροή (Μπούρα, 2010; cretanbeaches.com, 2012).

4.3.15 Λεκάνη 15: Αγ. Βασίλειος

Στον νομό Ρεθύμνης βρίσκεται ο Δήμος Αγίου Βασιλείου στον οποίο ανήκουν 2 λεκάνες απορροής, αυτή του Ακουμιανού και αυτή του Κουρταλιώτη, στην οποία ανήκει και το ρέμα Αγίου Βασιλείου. Ονομάζεται αλλιώς και Κακοπέρατος λόγω του ομώνυμου φαραγγιού που βρίσκεται στην περιοχή. Αποτελεί παραπόταμο του Μέγα Ποταμού (Κουρταλιώτη) και όπως λέει και το όνομά του είναι κακό-πέρατος επειδή ακριβώς η κοίτη του δεν μπορεί να περαστεί από άνθρωπο (Μπούρα, 2010).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) είναι συγκεντρωμένα κάποια βασικά χαρακτηριστικά των παραπάνω λεκανών:

Πίνακας 1: Βασικά Χαρακτηριστικά Λεκανών

Λεκάνες	Έκταση km ²	Μέση Ετήσια Θερμοκρασία (°C)	Μέση Ετήσια Βροχόπτωση (mm)	Μέση Ετήσια Απορροή (mm)	Μέση Ετήσια Εξατμισο-διαπνοή (mm)
Σεμπρωνιώτης	27,5	17,74	1285,32	520,77	877
Ρουματιανός	21,9	15,14	1317,97	256,67	1045
Πρασσανός	120,2	17,83	1100,57	209,88	846
Πλατύς	210,4	17,96	925,88	247,42	670
Πατέλης	123,3	16,95	804,02	102,29	816
Μύρτος	96,2	14,59	759,62	111,41	631
Κουτσουλίδης	121,9	11,48	924,81	99,86	804
Καλαμαυκιανός	35,2	15,00	733,08	174,13	638
Κακοδικιανός	77,8	17,66	1256,5	175,46	1071
Γιόφυρος	183,7	18,00	802,83	145,61	476
Γεροπόταμος	600,6	19,33	680,85	54,91	627
Γαζανός	181	17,17	884,5	34,01	823
Αποσελέμης	123,9	13,83	922,16	55,95	839
Αναποδάρης	510,2	18,44	670,24	60,38	603
Αγ. Βασίλειος	24,7	17,52	1012,31	55,76	854

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, έχουν επιλεγθεί λεκάνες απορροής των οποίων οι εκτάσεις κυμαίνονται από 21,9 m² (Ρουματιανός) μέχρι και 600,6 m² (Γεροπόταμος) άρα υπάρχει καλή κατανομή σε έκταση. Επίσης η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 670,2 mm και 1318,0 mm αντίστοιχα γεγονός που αναδεικνύει τις υψηλές τιμές βροχόπτωσης που έχει η Κρήτη. Η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της απορροής είναι 34,0 mm και 520,1 mm, της εξατμισοδιαπνοής 476,0 mm και 1071,0 mm και της θερμοκρασίας 11,5 °C και 19,3 °C αντίστοιχα σε κάθε περίπτωση. Τα υδρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση, ήταν μηνιαίου βήματος για την χρονική περίοδο 1977 – 1997.

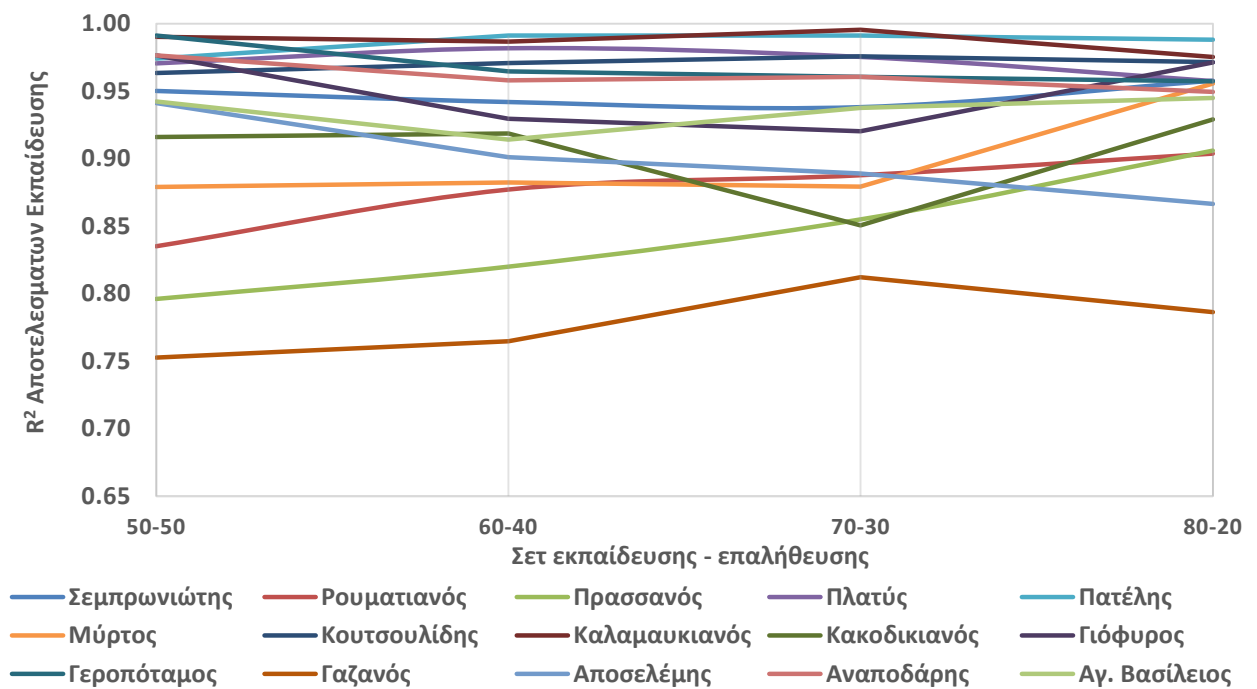
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Προσομοίωση με το υδρολογικό μοντέλο Sacramento

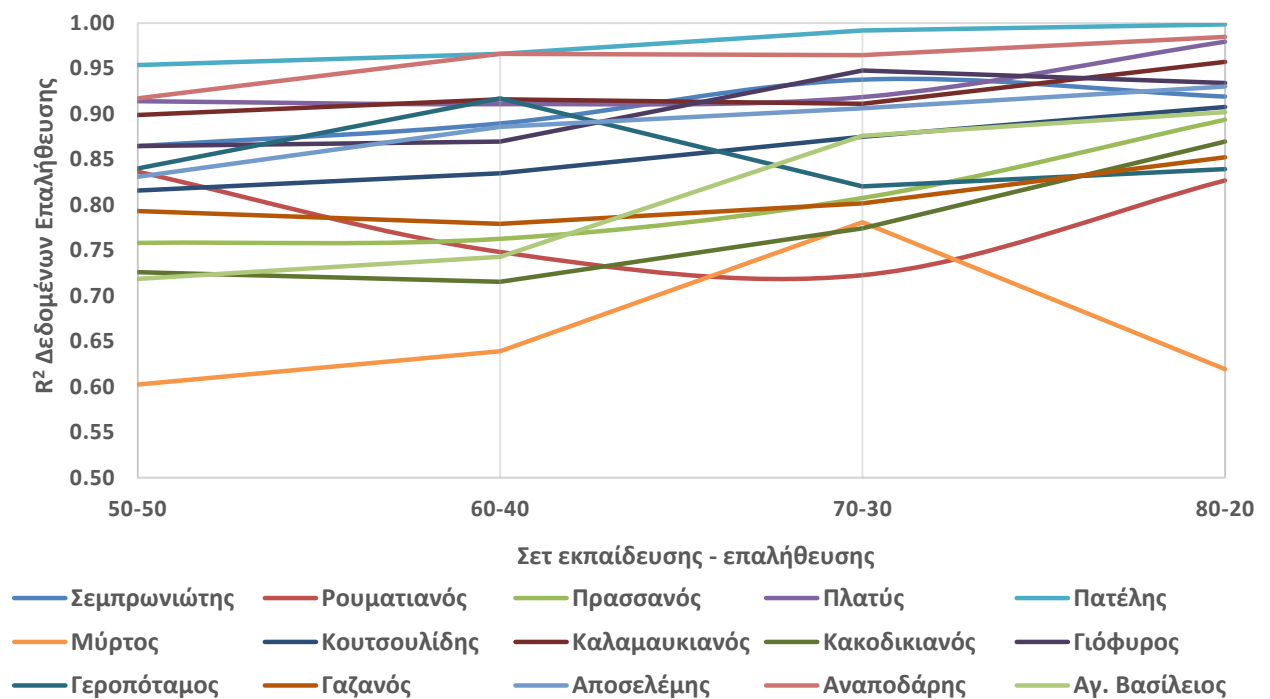
Η εφαρμογή και η καλή ρύθμιση του μοντέλου μπορεί να γίνει μόνο στις λεκάνες όπου υπάρχουν σταθμηγράφοι ή τουλάχιστον στις λεκάνες όπου υπάρχουν μηνιαίες εκτιμήσεις βασισμένες σε παρατηρήσεις σταθμημέτρων και υδρομετρήσεις. Οι λεκάνες της Κρήτης, αν και παρουσιάζουν δυσχέρειες ως φυσικό σύστημα, προσομοιώθηκαν επιτυχώς με το μοντέλο Sacramento. Οι λεκάνες αυτές έχουν πολλές ιδιαιτερότητες στην υδρολογική τους απόκριση, επειδή πρόκειται για λεκάνες ξηρού καθεστώτος και διαλείπουσας απορροής. Ένα μεγάλο πρόβλημα, το οποίο αφορά την προσομοίωση τέτοιων λεκανών είναι η μηδενική απορροή που παρατηρείται σε ορισμένες χρονοσειρές. Οι λεκάνες αυτές, συνεπώς, περιέχουν σημαντικά μικρότερη πληροφορία, ώστε να καθοδηγήσουν ορθά τους μηχανισμούς οποιουδήποτε μοντέλου. Τα στοιχεία εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου είναι η επιφανειακή βροχόπτωση P και η δυναμική εξατμισοδιαπνοή ET_0 , που προέκυψαν από παρεμβολή με τη μέθοδο IDW (Wei and McGuinness, 1973) σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης με βάση τα δεδομένα σταθμών της Περιφέρειας Κρήτης (για περισσότερες λεπτομέρειες βλέπε Koutroulis et al., 2012). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις απορροής των αντίστοιχων σταθμηγράφων. Η χρονοσειρά των παρατηρημένων όγκων απορροής, μετατράπηκε στη συνέχεια στην αντίστοιχη χρονοσειρά mm/μήνα, έτσι ώστε να είναι άμεση η σύγκριση μεταξύ της προσομοιωμένης χρονοσειράς και της παρατηρημένης χρονοσειράς. Η ανάπτυξη των αποτελεσμάτων του μοντέλου Sacramento δεν αποτελεί άμεσο στόχο της παρούσας εργασίας, συνεπώς, τα αποτελέσματα του μοντέλου θα παρουσιαστούν σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη χρήση Νευρωνικών Δικτύων.

5.2 Προσομοίωση με Νευρωνικά Δίκτυα

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων πρόβλεψης των Νευρωνικών Δικτύων επηρεάζεται σε πρώτο στάδιο από το πλήθος των δεδομένων που τους παρέχεται για τις διαδικασίες εκπαίδευσης και επαλήθευσης. Αποδεδειγμένα, με όσο περισσότερα δεδομένα (μεγαλύτερη χρονοσειρά) εκπαιδευτεί ένα δίκτυο, τόσο και πιο ακριβή αποτελέσματα θα δώσει. Αυτό όμως έχει σαν κόστος ότι τα δεδομένα της επαλήθευσης θα είναι λιγότερα με αποτέλεσμα να τίθεται σε κίνδυνο η αξιοπιστία του μοντέλου. Στην αντίθετη περίπτωση, με λίγα δεδομένα εκπαίδευσης και περισσότερα επαλήθευσης θα δημιουργείται μοντέλο το οποίο θα είναι αρκετά αξιόπιστο αλλά όχι τόσο ακριβές. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ως βέλτιστο ποσοστό δεδομένων εκπαίδευσης – επαλήθευσης το 70 – 30 (%) αντίστοιχα καθώς έδινε τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα τιμών R^2 για την πλειονότητα των λεκανών (Εικόνα 12, Εικόνα 13).



Εικόνα 12: Αποτελέσματα Τιμών R^2 Εκπαίδευσης.



Εικόνα 13: Αποτελέσματα Τιμών R^2 Επαλήθευσης.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα RMSE και R^2 από όλα τα σετ εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης, για τα βέλτιστα χρονικά βήματα («παράθυρα») όπως αυτά επιλέχθηκαν κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης.

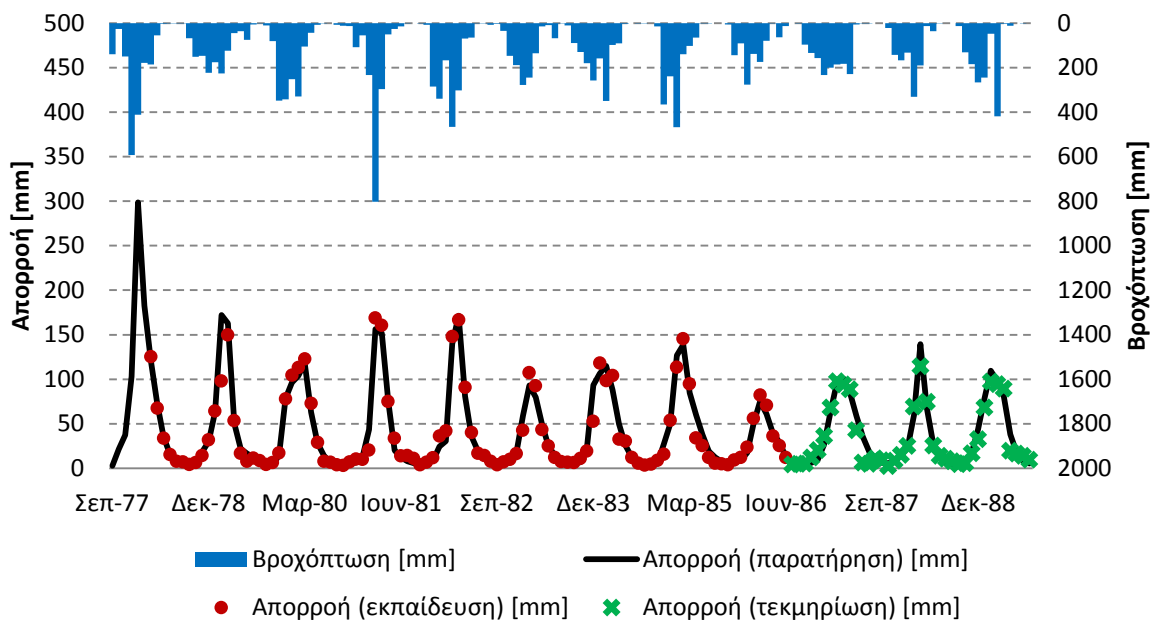
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τεσσάρων σετ εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης, βέλτιστων χρονικών βημάτων για τις 15 λεκάνες.

Σετ Εκπαίδευσης - Επαλήθευσης (%) Βέλτιστα χρονικά βήματα (παράθυρα)																
	50 - 50				60 - 40				70 - 30				80-20			
	Εκπαίδευση		Επαλήθευση		Εκπαίδευση		Επαλήθευση		Εκπαίδευση		Επαλήθευση		Εκπαίδευση		Επαλήθευση	
ΛΕΚΑΝΕΣ	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
Σεμπρωνιώτης	10,62	0,95	14,61	0,86	11,33	0,94	13,57	0,89	11,33	0,94	9,43	0,94	10,65	0,96	11,35	0,92
Ρουματιανός	14,59	0,84	11,16	0,84	12,29	0,88	14,13	0,75	11,35	0,89	13,75	0,72	9,24	0,90	26,51	0,83
Πρασσανός	13,38	0,80	11,30	0,76	11,42	0,82	13,85	0,76	9,54	0,86	12,60	0,81	8,02	0,91	15,59	0,89
Πλατύς	6,77	0,97	8,99	0,91	6,65	0,98	8,24	0,91	5,36	0,98	7,98	0,92	6,75	0,96	4,87	0,98
Πατέλης	2,05	0,97	5,89	0,95	1,52	0,99	5,37	0,97	1,78	0,99	2,40	0,99	1,79	0,99	1,12	1,00
Μύρτος	6,91	0,88	7,55	0,60	6,40	0,88	8,56	0,64	5,98	0,88	6,86	0,78	3,43	0,96	10,40	0,62
Κουτσουλίδης	3,62	0,96	6,53	0,82	2,74	0,97	9,38	0,83	2,37	0,98	7,75	0,88	2,32	0,97	6,90	0,91
Καλαμανκιανός	2,51	0,99	8,25	0,90	2,00	0,99	7,23	0,92	1,45	1,00	8,60	0,91	3,15	0,98	8,35	0,96
Κακοδικιανός	3,84	0,92	6,98	0,73	5,14	0,92	10,14	0,72	6,64	0,85	8,28	0,77	4,46	0,93	5,93	0,87
Γιόφυρος	5,45	0,98	9,37	0,86	8,87	0,93	10,77	0,87	8,89	0,92	11,89	0,95	5,00	0,97	11,13	0,93
Γεροπόταμος	1,14	0,99	3,18	0,84	2,06	0,96	4,01	0,92	1,97	0,96	3,70	0,82	2,13	0,96	3,35	0,84
Γαζανός	2,55	0,75	1,73	0,79	2,49	0,76	3,77	0,78	2,00	0,81	2,31	0,80	1,87	0,79	1,93	0,85
Αποσελέμης	3,67	0,94	5,95	0,83	4,50	0,90	4,08	0,89	4,52	0,89	4,24	0,91	4,76	0,87	5,52	0,93
Αναποδάρης	1,81	0,98	3,22	0,92	2,17	0,96	2,07	0,97	1,78	0,96	2,34	0,96	2,23	0,95	2,00	0,98
Αγ. Βασίλειος	1,25	0,94	5,36	0,72	1,45	0,91	5,48	0,74	2,26	0,92	3,07	0,88	1,86	0,94	2,05	0,90

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, το σετ εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης 70-30 % δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για τις περισσότερες λεκάνες με ελάχιστη και μέγιστη τιμή R^2 εκπαίδευσης και επαλήθευσης 0,81 - 1,00 και 0,72 – 0,99 αντίστοιχα, χωρίς να θυσιάζεται η αξιοπιστία του μοντέλου υπερφορτώνοντας το με δεδομένα εκπαίδευσης.

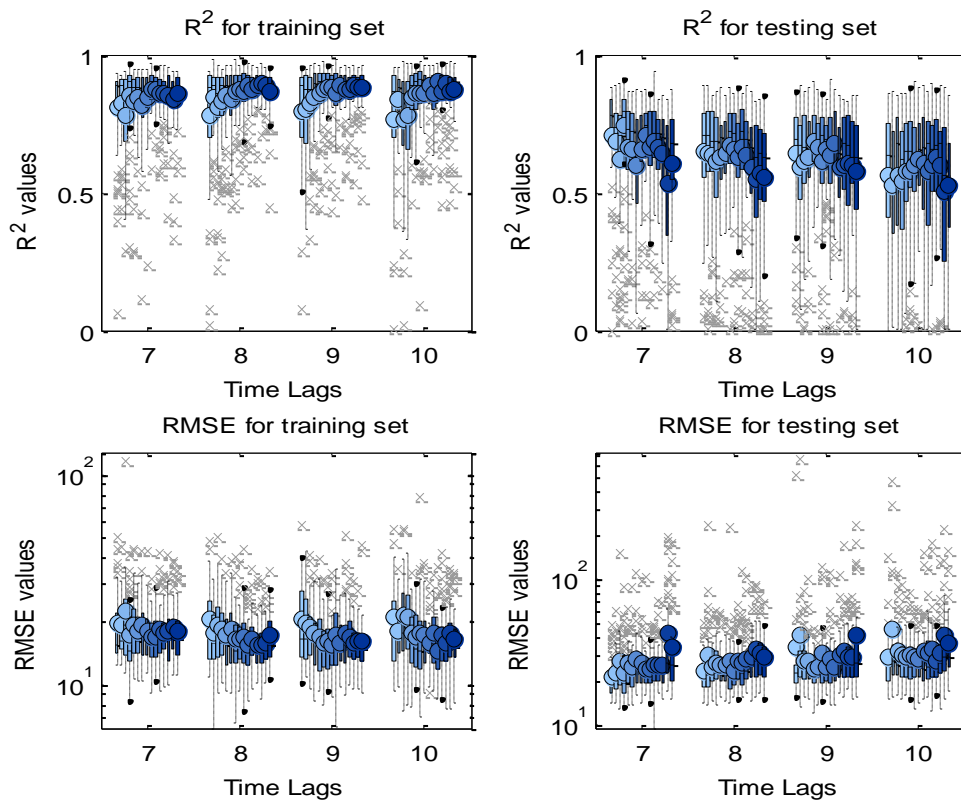
5.2.1 Λεκάνη 1: Σεμπρωνιώτης

Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 803,1 mm τον μήνα Φεβρουάριο του 1981 και η μέγιστη τιμή απορροής 298,5 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1978. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 14) ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης.



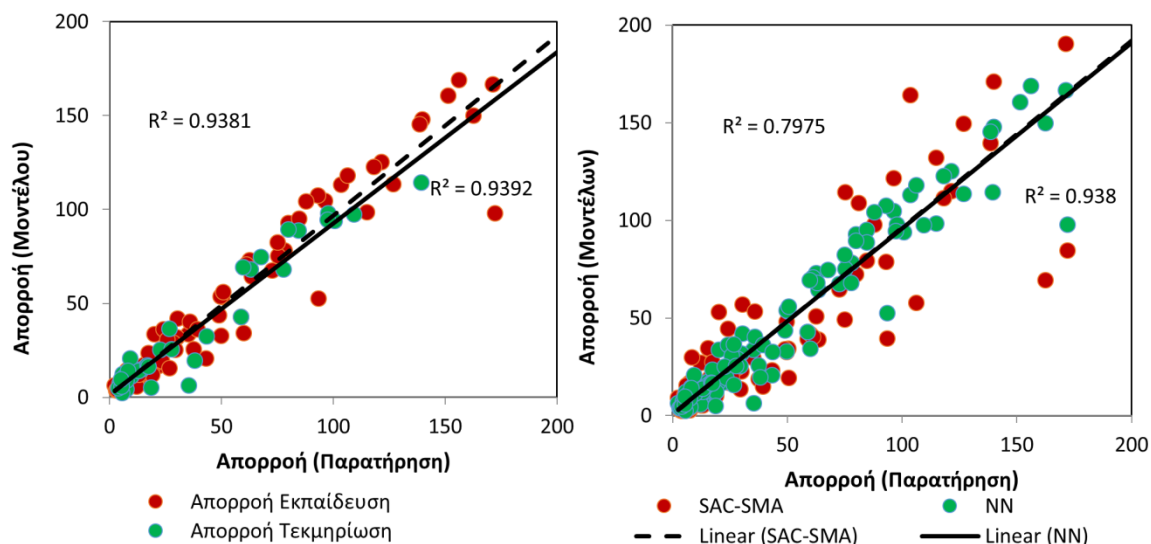
Εικόνα 14: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Σεμπρωνιώτη

Παρακάτω (Εικόνα 15) παρατηρείται μία τάση αύξησης της αξιοπιστίας των Νευρωνικών Δικτύων (αύξηση του R^2 και μείωση του RMSE) καθώς αυξάνεται ο αριθμός των νευρώνων για όλα τα χρονικά βήματα στο σετ εκπαίδευσης, ενώ στο σετ τεκμηρίωσης, μείωση αυτής της αξιοπιστίας όσο αυξάνονται τα χρονικά βήματα, και μία αύξουσα και έπειτα πτωτική διακύμανση της ανάλογα με τον αριθμό των νευρώνων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 11 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 7 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,94 - 11,33 και 0,94 - 10,65 αντίστοιχα.



Εικόνα 15: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Σεμπρονιώτη.

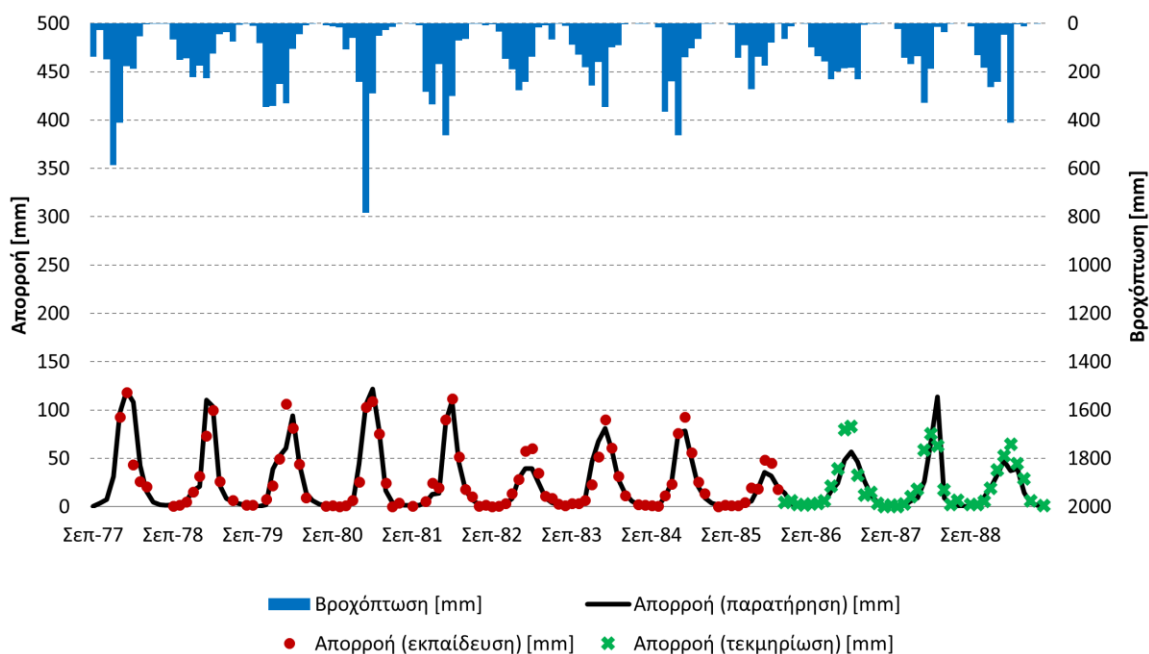
Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, και οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι αρκετά υψηλές (0,94 και οι δυο), γεγονός που υποδεικνύει την μεγάλη ακρίβεια του μοντέλου. Επίσης συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento, όπου και γίνεται φανερό ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι υψηλότερη (τιμή R^2 0,94 για ΤΝΔ, έναντι 0,80 για το Sacramento, βλ. Εικόνα 16).



Εικόνα 16: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Σεμπρωνιώτη.

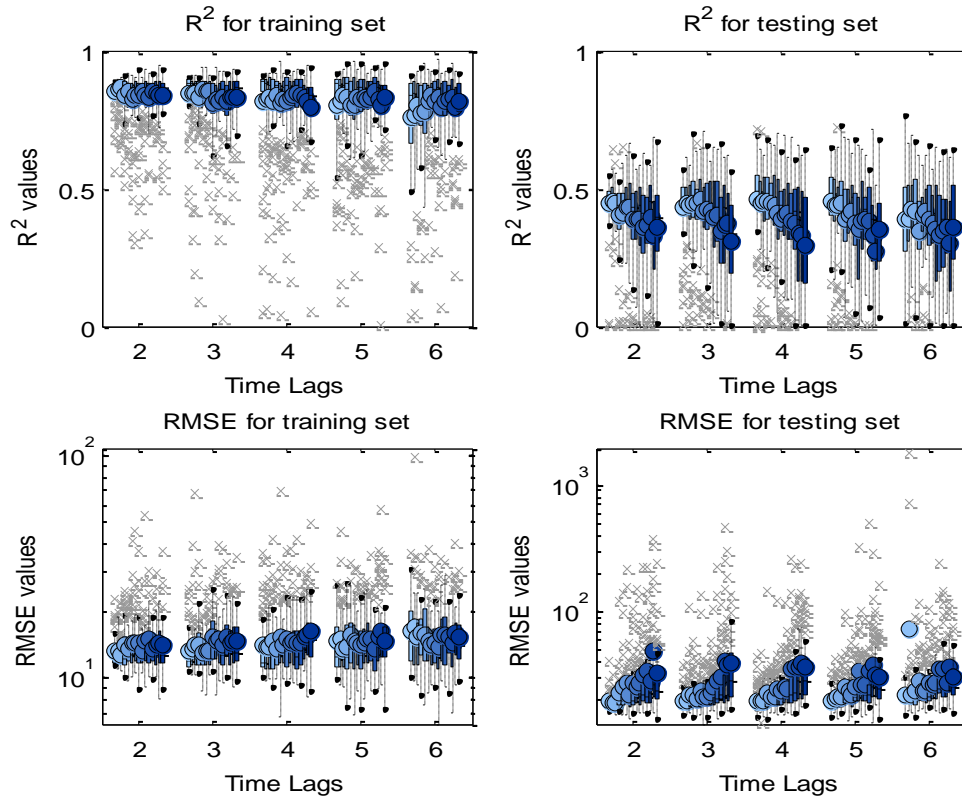
5.2.2 Λεκάνη 2: Ρουματιανός

Εδώ παρατηρείται (βλ. Εικόνα 17) ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 784,3 mm τον μήνα Φεβρουάριο του 1981 και η μέγιστη τιμή απορροής 121,5 mm τον μήνα Μάρτιο του 1981. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης.



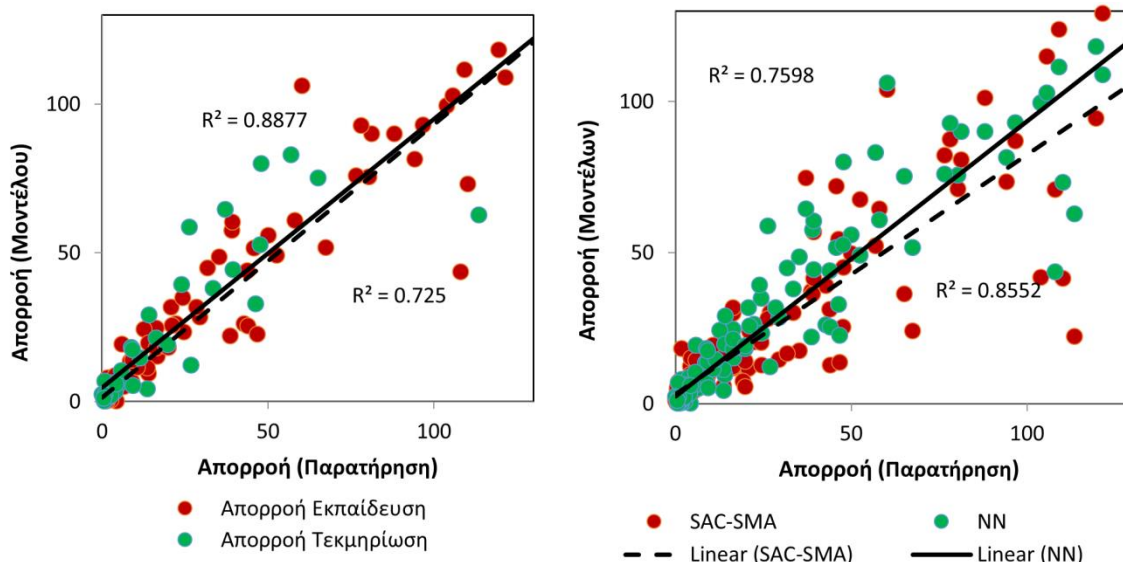
Εικόνα 17: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Ρουματιανού.

Παρακάτω (Εικόνα 18) παρατηρείται μία γενικότερα υψηλή αξιοπιστία όλων των Νευρωνικών Δικτύων για το σετ εκπαίδευσης, ενώ η αξιοπιστία δείχνει μία καθοδική τάση για το σετ τεκμηρίωσης όσο αυξάνεται ο αριθμός νευρώνων, και τυχαία διακύμανση με την αύξηση των χρονικών βημάτων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 3 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 5 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,89 - 11,35 και 0,72 -13,75 αντίστοιχα.



Εικόνα 18: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Ρουματιανού.

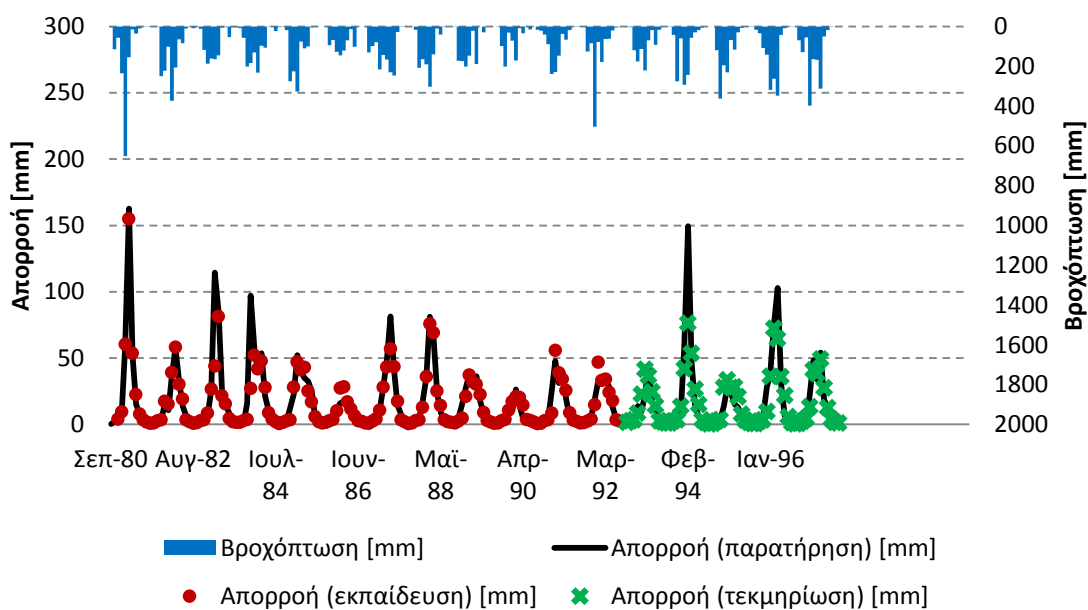
Στο διάγραμμα που ακολουθεί (βλ. Εικόνα 19) παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι υψηλές (0,89 και 0,73 αντίστοιχα), με την μεταξύ τους διαφορά να κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα. Το μοντέλο φαίνεται και σε αυτήν την περίπτωση να προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές. Επίσης στο ίδιο διάγραμμα συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento, όπου και γίνεται φανερό ότι, και στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι υψηλότερη (τιμή R^2 0,94 για ΤΝΔ έναντι 0,8 για Sacramento).



Εικόνα 19: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Ρουματιανού.

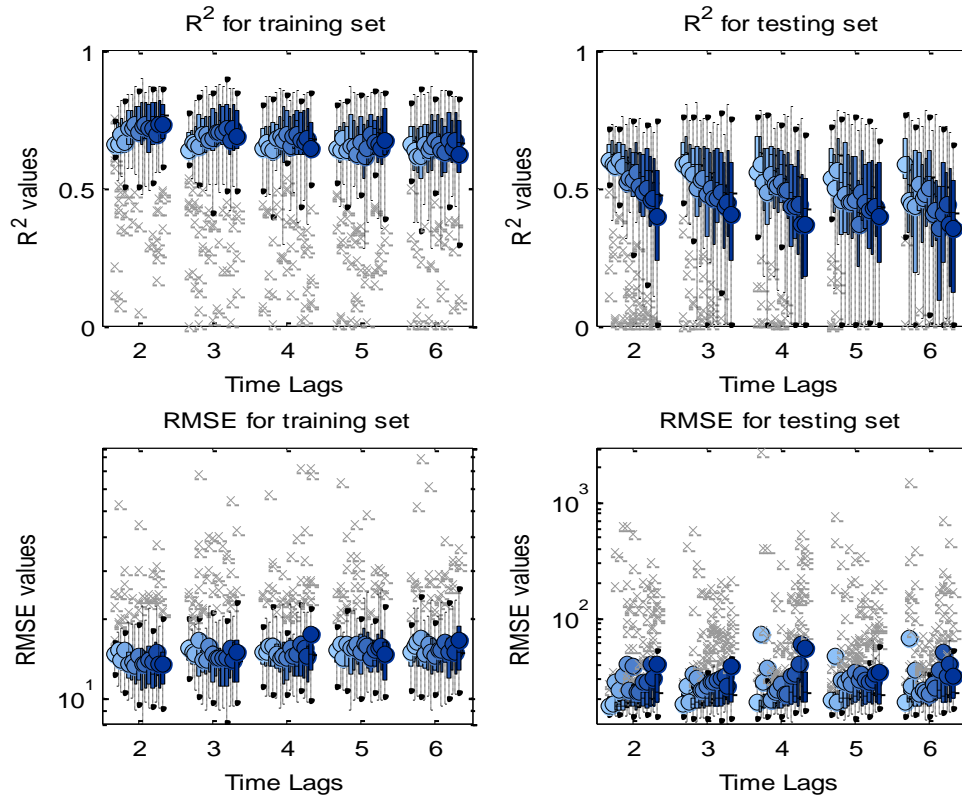
5.2.3 Λεκάνη 3: Πρασσανός

Εδώ παρατηρείται (βλ. Εικόνα 20) ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης και απορροής είναι 652,0 mm και 59,3 mm αντίστοιχα τον μήνα Ιανουάριο του 1981. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης με εξαίρεση κάποιες ακραίες τιμές (peaks) στις οποίες φαίνεται ότι υπάρχει υποεκτίμηση από το μοντέλο (π.χ. Φεβρουάριος 1994).



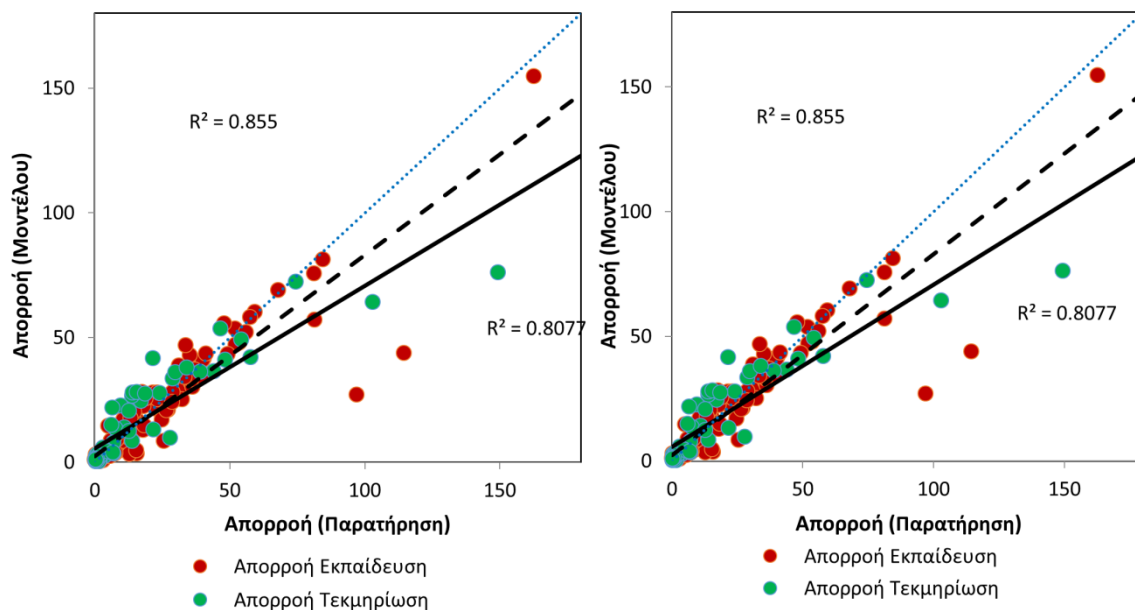
Εικόνα 20: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Πρασσανού.

Παρακάτω (Εικόνα 21) παρατηρείται ότι για το σετ εκπαίδευσης υπάρχει μία ανοδική τάση της αξιοπιστίας των Νευρωνικών Δικτύων με την αύξηση του αριθμού των νευρώνων ενώ αντίθετα καθοδική τάση με την αύξηση των χρονικών βημάτων. Το ίδιο φαίνεται να συμβαίνει όσον αφορά τα χρονικά βήματα και στο σετ τεκμηρίωσης μόνο που εδώ αντίθετως η αύξηση των νευρώνων ισοδυναμεί με μείωση της αξιοπιστίας των δικτύων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 5 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 3 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,86 – 9,54 και 0,81 -12,60 αντίστοιχα.



Εικόνα 21: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Πρασσανού.

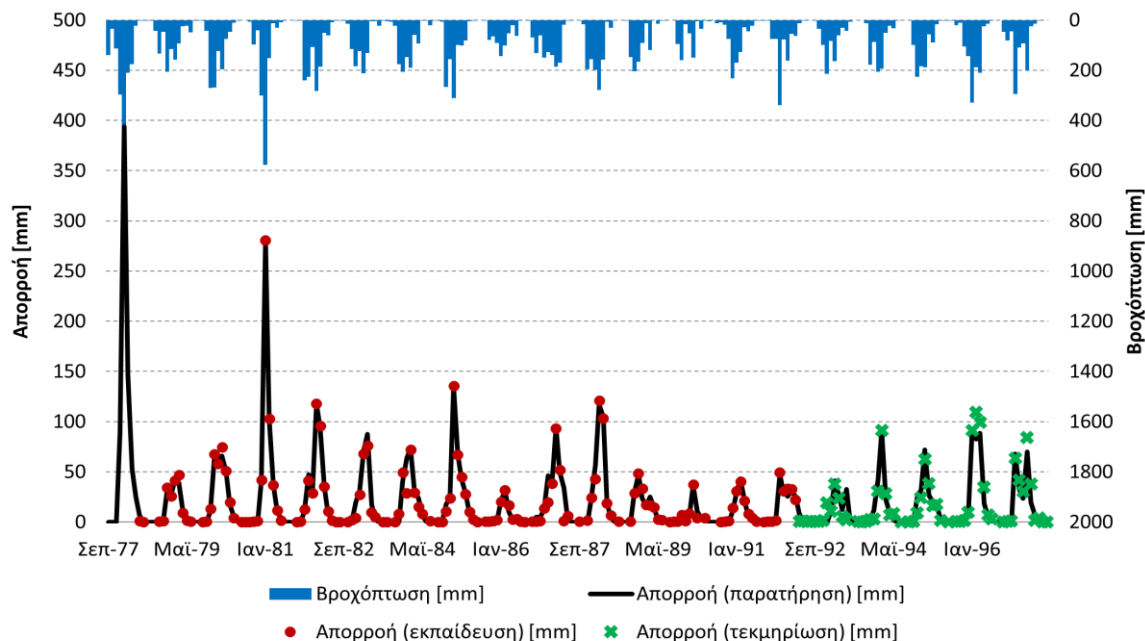
Σε αυτό το διάγραμμα (βλ. Εικόνα 22) παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, και οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι αρκετά υψηλές και με μικρή διαφορά (0,85 – 0,80 αντίστοιχα), γεγονός που υποδεικνύει την αρκετά μεγάλη ακρίβεια του μοντέλου. Επίσης συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento, όπου και γίνεται φανερό ότι, και στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι σαφώς υψηλότερη (τιμή R^2 0,86 για ΤΝΔ έναντι 0,81 για Sacramento).



Εικόνα 22: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Πρασσανού.

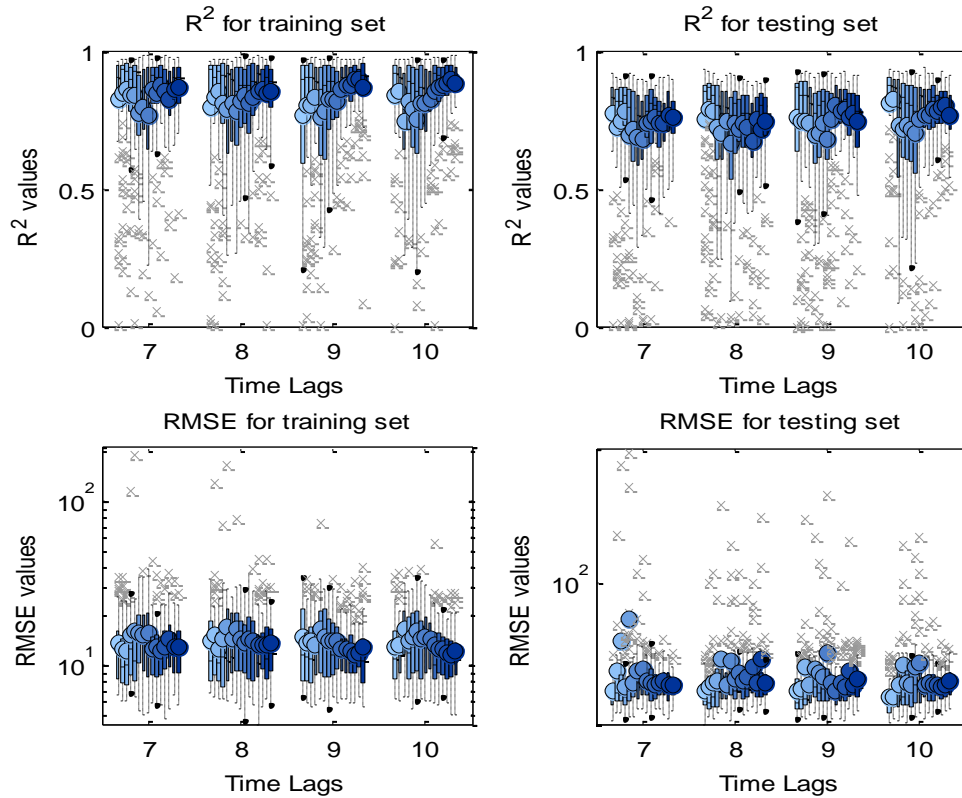
5.2.4 Λεκάνη 4: Πλατύς

Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 576,0 mm τον μήνα Φεβρουάριο του 1981 και η μέγιστη τιμή απορροής 393,9 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1978. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης ακόμα και στις περισσότερες ακραίες τιμές (peaks) (βλ. Εικόνα 23).



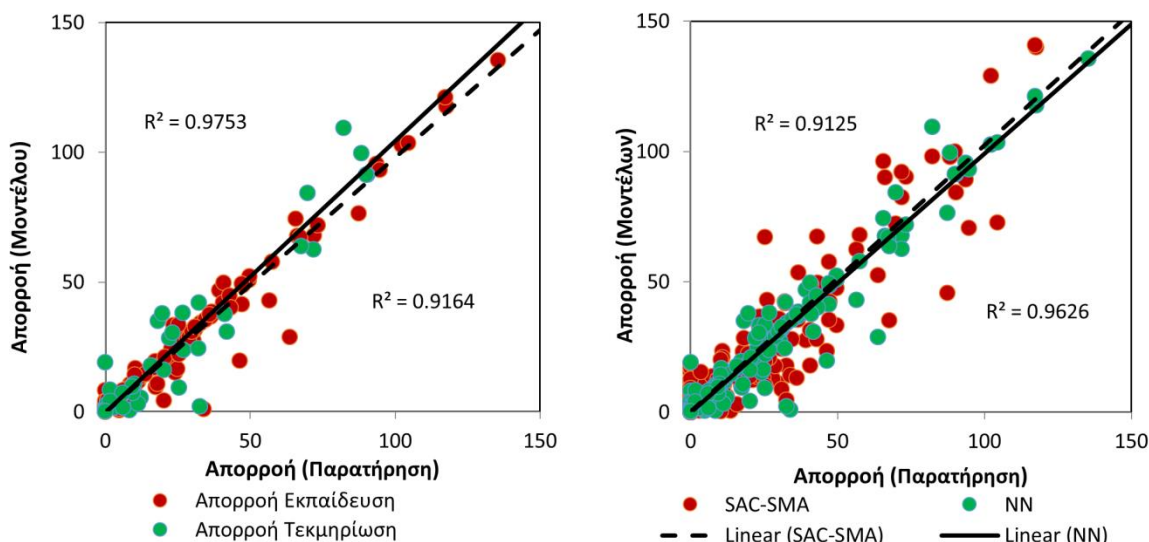
Εικόνα 23: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Πλατύ.

Παρακάτω (Εικόνα 24) παρατηρείται ότι και για τα δύο σετ (εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) η απόδοση των Νευρωνικών Δικτύων ακολουθεί για την πλειονότητα των χρονικών βημάτων ανοδική, καθοδική, και ξανά ανοδική τάση με την αύξηση του αριθμού των νευρώνων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 7 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 9 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,98 – 5,36 και 0,92 - 7,98 αντίστοιχα.



Εικόνα 24: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Πλατύ.

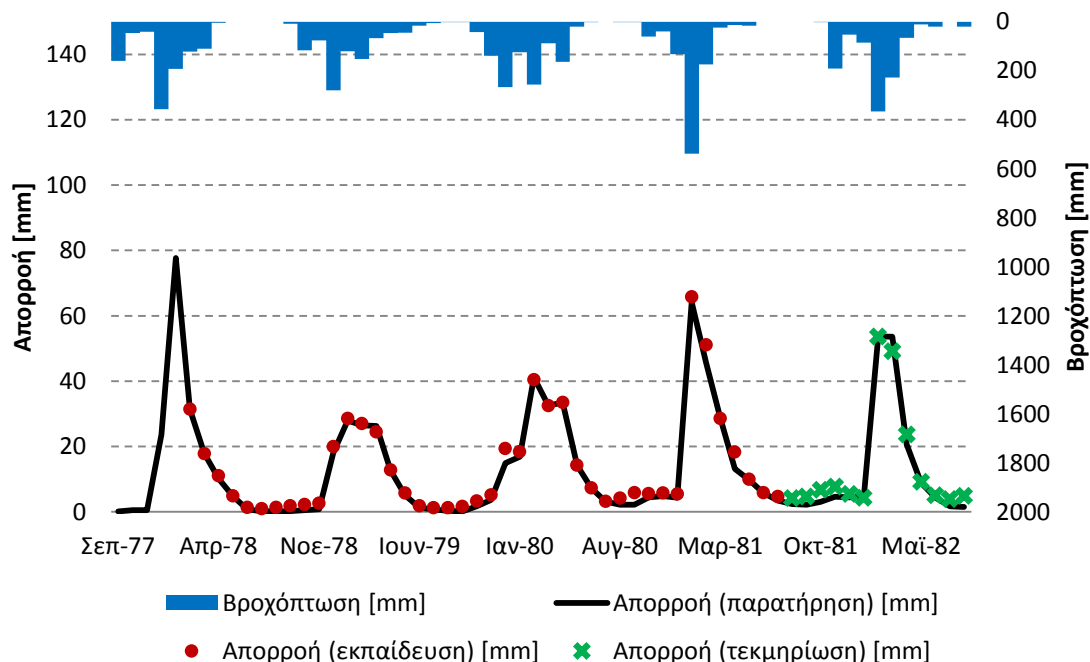
Στο επόμενο διάγραμμα παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, και οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι πολύ υψηλές (0,98 – 0,92 αντίστοιχα) και με μικρή διαφορά μεταξύ τους, πράγμα που υποδεικνύει την μεγάλη ακρίβεια του μοντέλου. Επίσης εδώ συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento, όπου και γίνεται φανερό ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι ελάχιστα υψηλότερη με τιμή R^2 0,96 για ΤΝΔ έναντι 0,91 για Sacramento (Εικόνα 25).



Εικόνα 25: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Πλατύ.

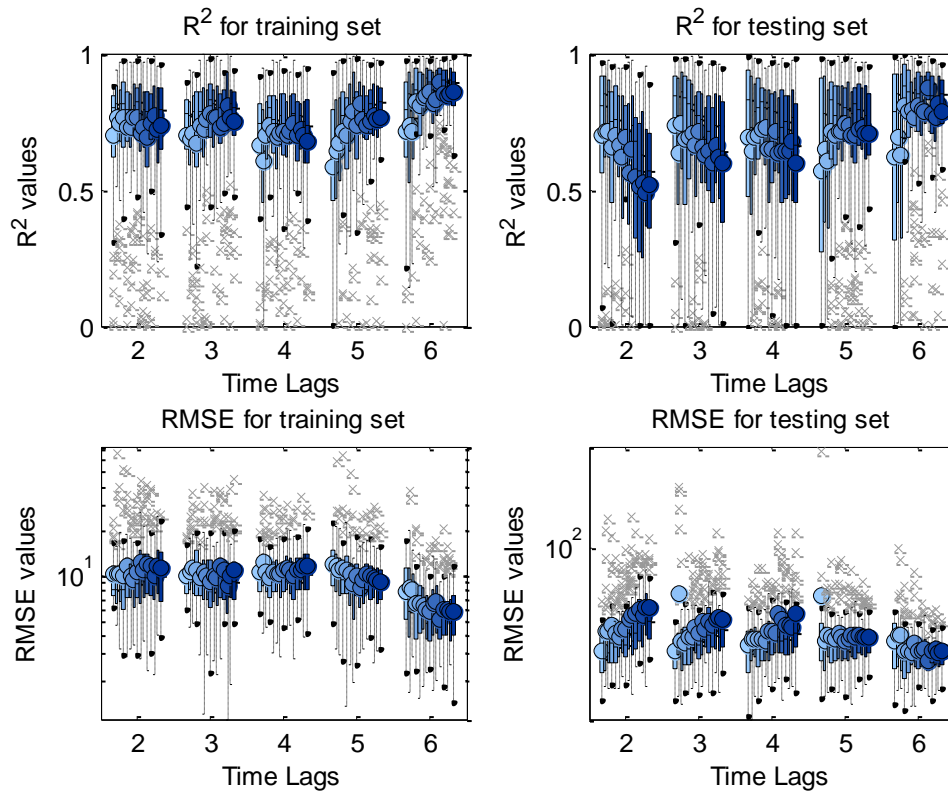
5.2.5 Λεκάνη 5: Πατέλης

Παρακάτω παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 539,0 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 και η μέγιστη τιμή απορροής 77,7 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1978. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα (Εικόνα 26) ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ καλά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πάρα πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης.



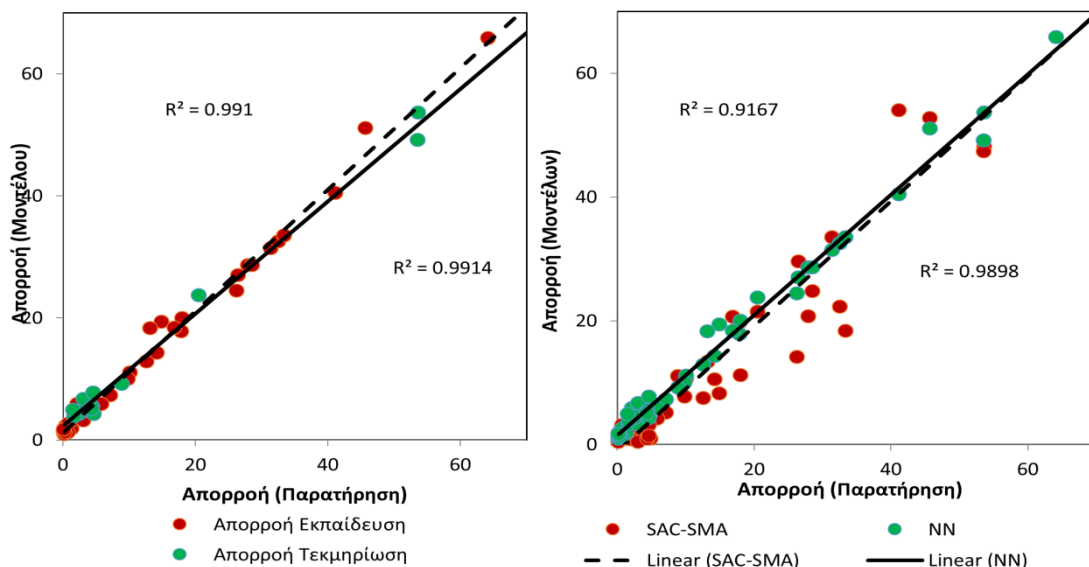
Εικόνα 26: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Πατέλη.

Παρακάτω (Εικόνα 27) παρατηρείται μία ανοδική τάση της απόδοσης των Νευρωνικών δικτύων με την αύξηση του χρονικού βήματος και μία ανοδική και έπειτα πτωτική τάση με την αύξηση του αριθμού των νευρώνων για το σετ εκπαίδευσης. Στο σετ τεκμηρίωσης από την άλλη παρατηρείται πτωτική τάση με την αύξηση του αριθμού των νευρώνων αρχικά, και έπειτα ανοδική τάση που οδηγεί σε τυχαία κατανομή με την πάροδο των χρονικών βημάτων. Η αύξηση δε των τελευταίων οδηγεί σε αύξηση της αξιοπιστίας των δικτύων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 6 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 6 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,99 – 1,78 και 0,99 – 2,40 αντίστοιχα.



Εικόνα 27: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Πατέλη.

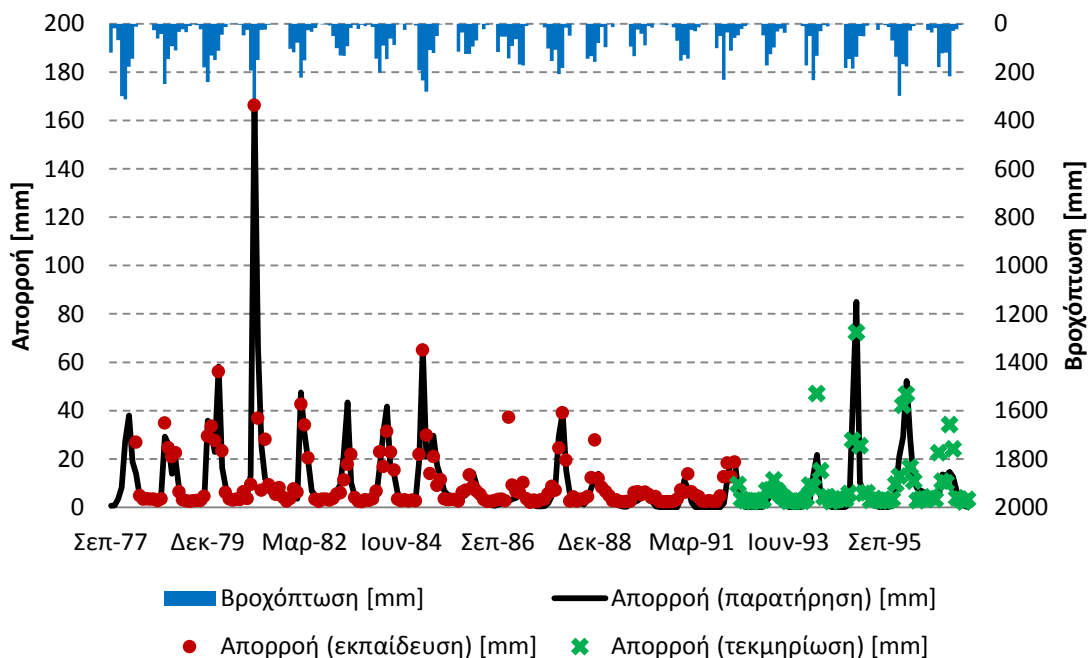
Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι εξαιρετικά υψηλές (0,99 και στις 2 περιπτώσεις), γεγονός που δείχνει ότι το μοντέλο φαίνεται, σε αυτήν την περίπτωση, να προσομοιώνει άψογα τις πραγματικές τιμές. Επίσης συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου και του μοντέλου Sacramento, όπου διαπιστώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις η ακρίβεια της προσομοίωσης είναι αρκετά υψηλή με αυτήν του Νευρωνικού Δικτύου να υπερτερεί ελάχιστα με τιμή R^2 0,99 για έναντι 0,92 που δίνει Sacramento (βλ. Εικόνα 28).



Εικόνα 28: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Πατέλη.

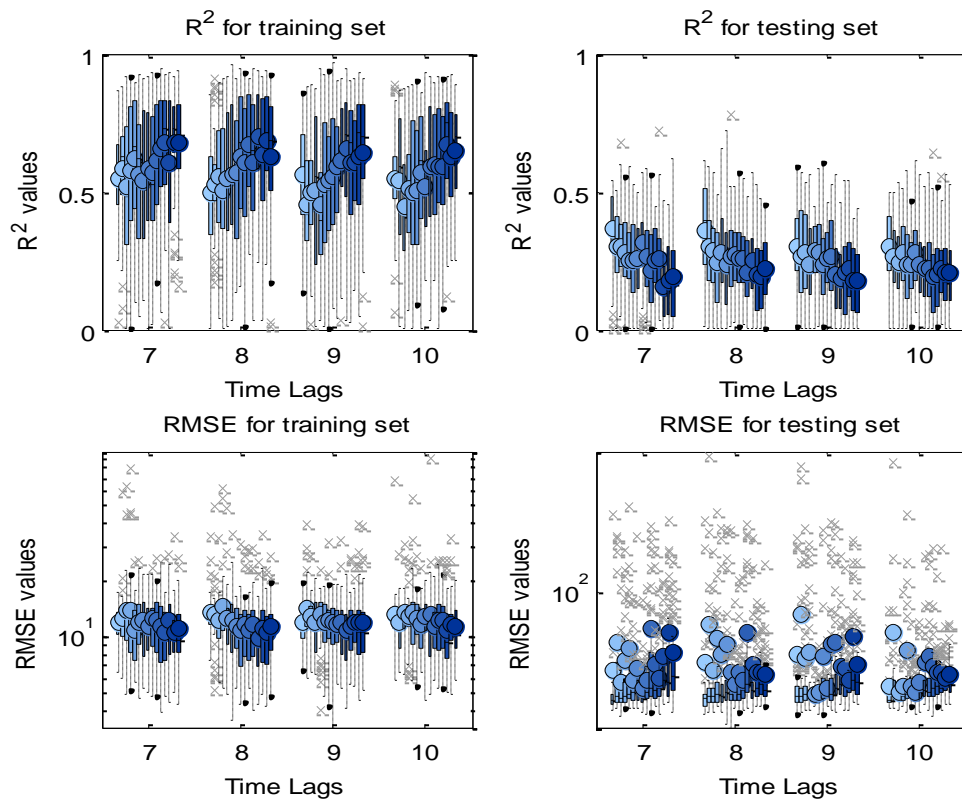
5.2.6 Λεκάνη 6: Μύρτος

Παρατηρείται (βλ. Εικόνα 29) ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 424,1mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 όπως επίσης και η μέγιστη τιμή της απορροής, η οποία ανέρχεται στα 167,8 mm. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης ακόμα και στις περισσότερες ακραίες τιμές (peaks).



Εικόνα 29: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Μύρτου.

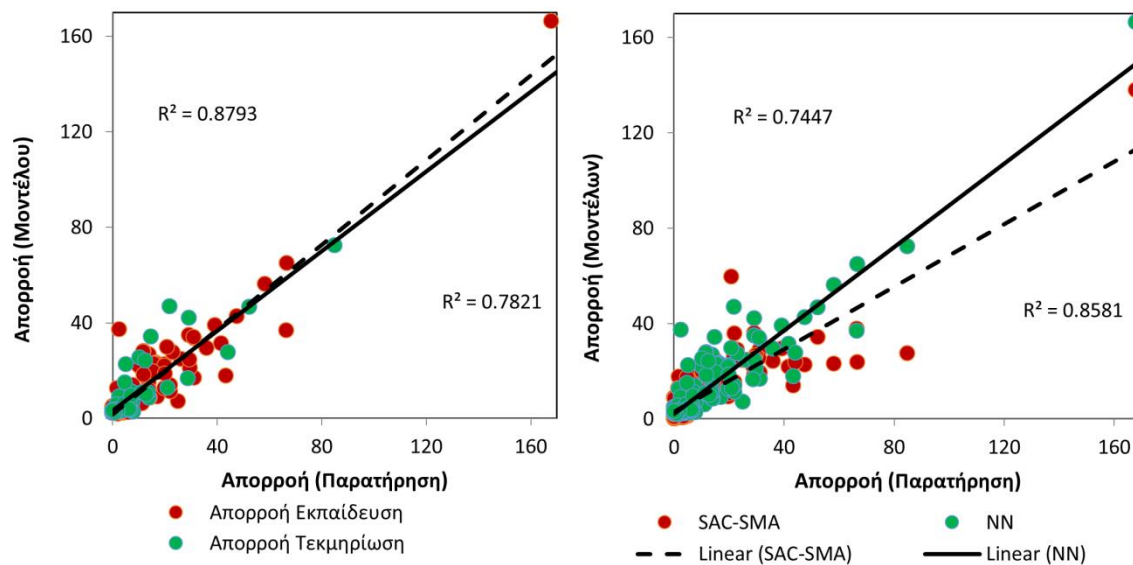
Παρακάτω (Εικόνα 30) παρατηρείται στασιμότητα στην απόδοση των Νευρωνικών δικτύων με την αύξηση των χρονικών βημάτων και για τα δύο σετ τιμών (εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης). Καθώς αυξάνει ο αριθμός των νευρώνων παρατηρείται αυξητική τάση στην απόδοση στο σετ εκπαίδευσης ενώ πτωτική στο σετ τεκμηρίωσης. Σε αυτήν την περίπτωση, λόγω του περιορισμένου αριθμού δεδομένων εισαγωγής τα δίκτυα φαίνεται ότι δεν είναι σε θέση να κάνουν συστηματικά ακριβείς προβλέψεις. Υπάρχουν παρόλα αυτά τυχαίες περιπτώσεις δικτύων που ήταν σε θέση να αποδώσουν πιο ικανοποιητικά. Τέτοια περίπτωση ήταν και το δίκτυο που επέλεξε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη, επιλέγοντας ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 7 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 8 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,88 – 5,98 και 0,78 – 6,86 αντίστοιχα.



Εικόνα 30: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Μύρτου.

Στα παρακάτω διαγράμματα (βλ. Εικόνα 31) ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι υψηλές (0,88 – 0,78 αντίστοιχα), με την μεταξύ τους διαφορά να κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα. Το μοντέλο φαίνεται και σε αυτήν την περίπτωση να προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές. Επίσης συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento, όπου και γίνεται

φανερó ότι, και στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι υψηλότερη (τιμή R^2 ΤΝΔ ίση με 0,86 έναντι 0,74 για Sacramento).

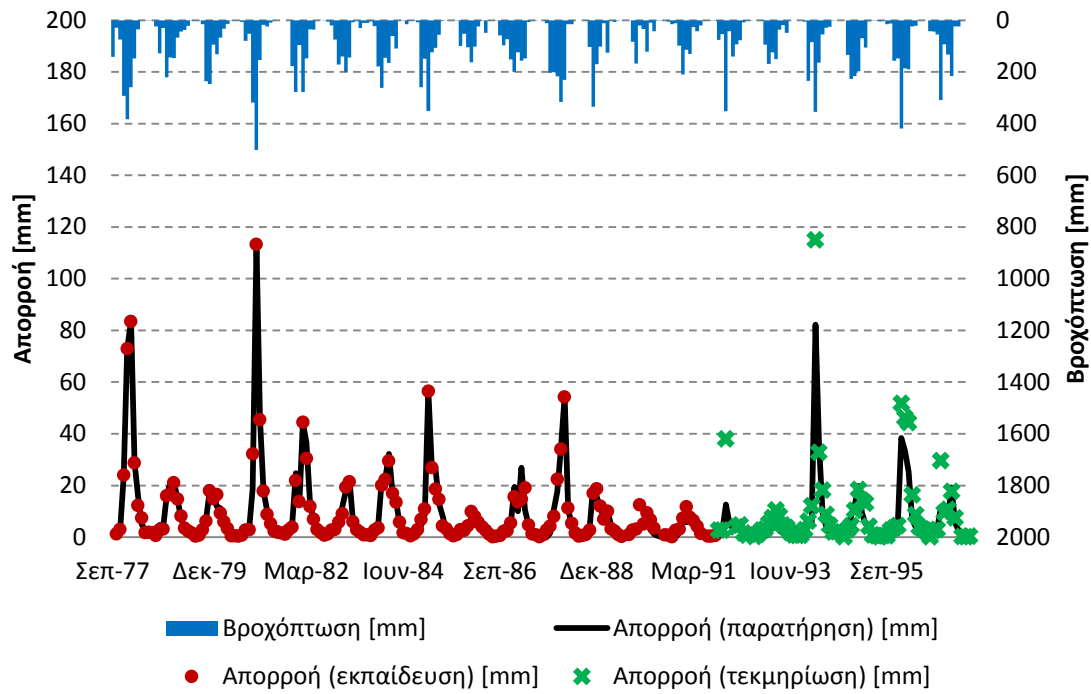


Εικόνα 31: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Μύρτου.

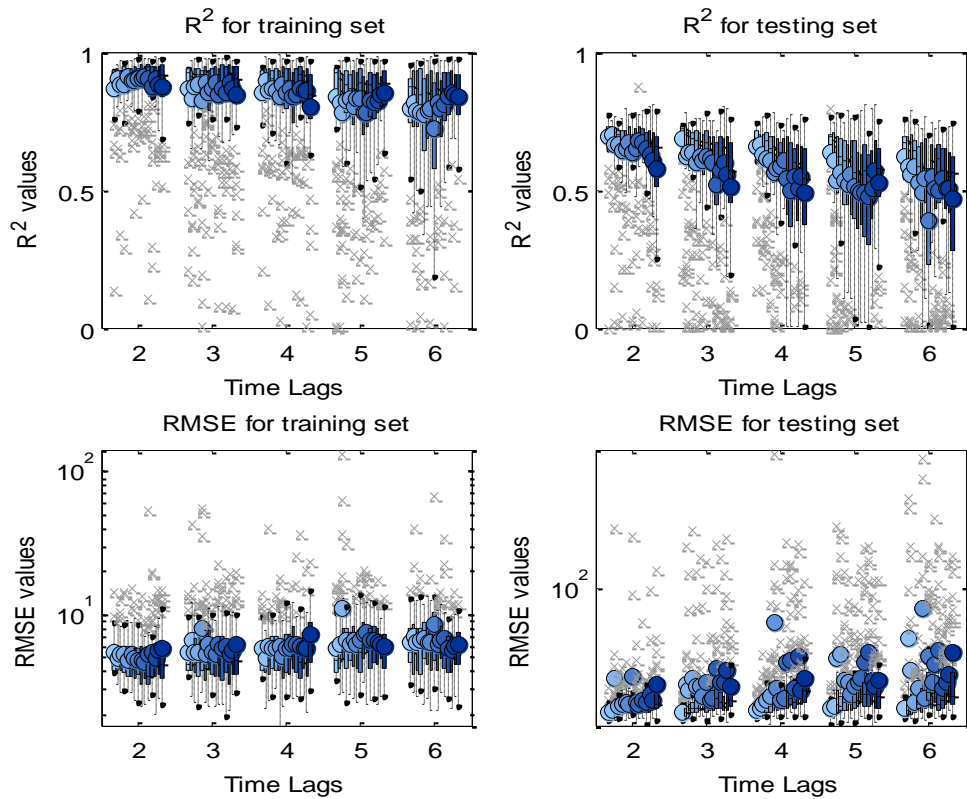
5.2.7 Λεκάνη 7: Κουτσογλίδης

Εδώ παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 501,7 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 όπως επίσης και η μέγιστη τιμή της απορροής η οποία ανέρχεται στα 113,2 mm. Επίσης φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 32) ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης με εξαίρεση κάποιες ακραίες τιμές (peaks). Κατά το στάδιο της τεκμηρίωσης, φαίνεται ότι υπάρχει υπερεκτίμηση στις ακραίες αυτές τιμές παροχών.

Παρακάτω (Εικόνα 33) παρατηρείται μία καθοδική τάση της απόδοσης του Νευρωνικού Δικτύου κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων και των χρονικών βημάτων όσον αφορά το σετ τεκμηρίωσης. Στο σετ εκπαίδευσης οι τιμές R^2 και RMSE κυμαίνονται σε πιο σταθερά επίπεδα με διακύμανση των τιμών κυρίως λόγω της αλλαγής του αριθμού των νευρώνων (η αλλαγή των χρονικών βημάτων δεν φαίνεται να επηρεάζει αρκετά τις τιμές). Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 10 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 2 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,98 – 2,37 και 0,88 - 7,75 αντίστοιχα.

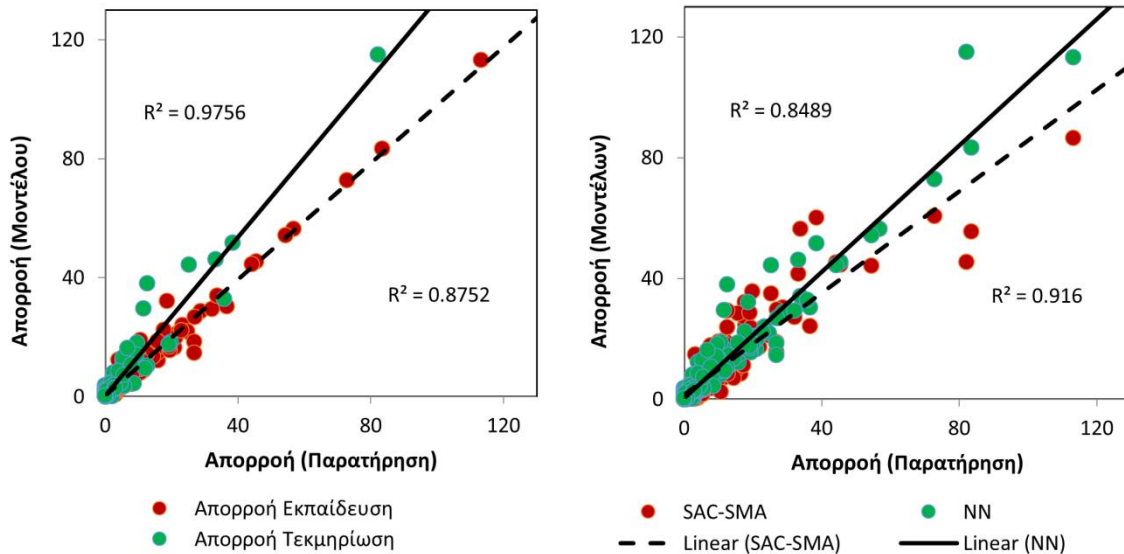


Εικόνα 32: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Κουτσουλίδη.



Εικόνα 33: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Κουτσουλίδη.

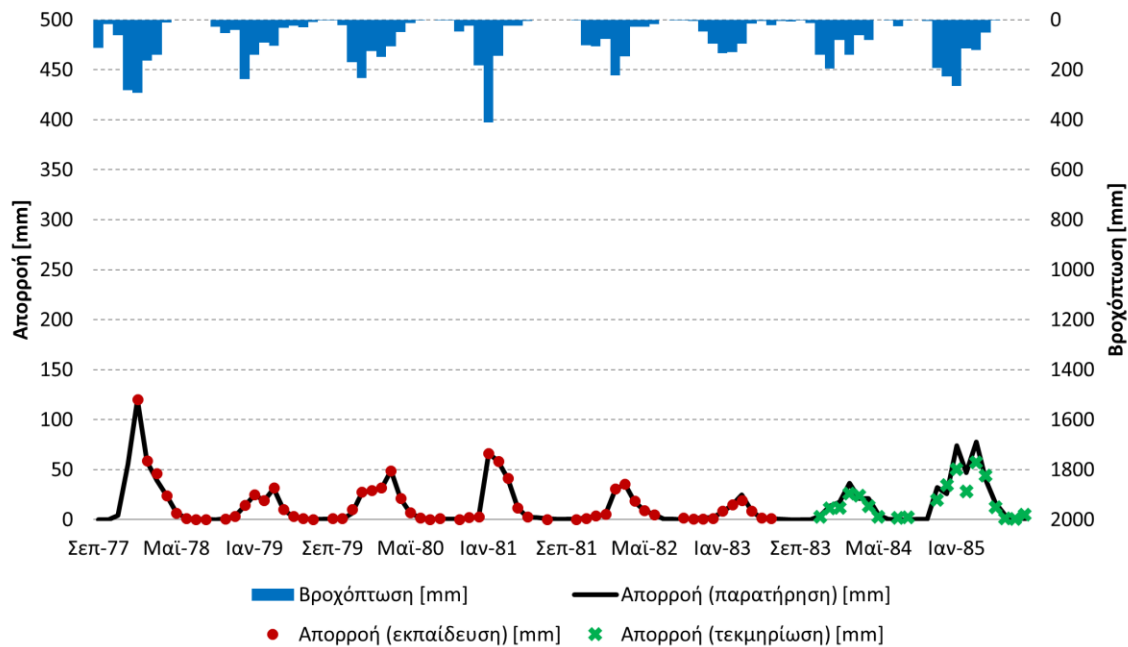
Στο ακόλουθο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 34) παρατηρείται ότι, σε αυτήν την λεκάνη, οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι αρκετά υψηλές με μικρή, σε αποδεκτά επίπεδα, διαφορά (0,98 – 0,88 αντίστοιχα). Αυτό φανερώνει ότι το μοντέλο φαίνεται, σε αυτήν την περίπτωση, να προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές. Επιπροσθέτως, συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento, όπου και γίνεται φανερό ότι, και στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι ελαφρώς υψηλότερη (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,91 έναντι 0,85 για Sacramento).



Εικόνα 34: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Κουτσουλίδη.

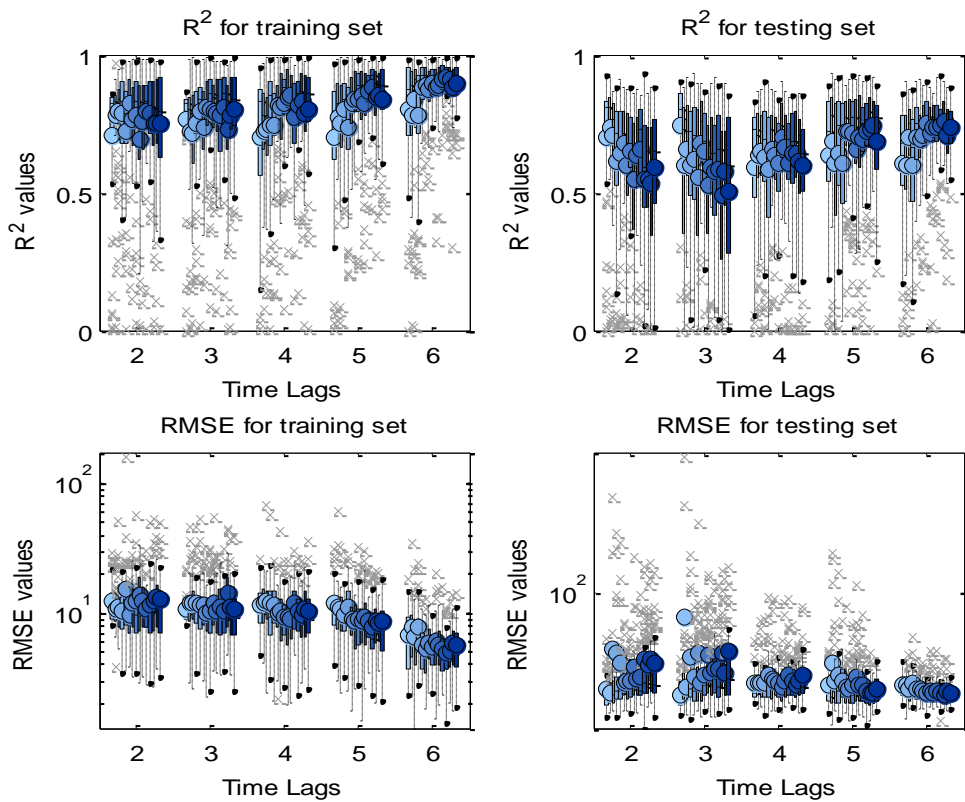
5.2.8 Λεκάνη 8: Καλαμανκιανός

Εδώ παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 410,9 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 ενώ η μέγιστη τιμή της απορροής 120,0 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1978. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 35) ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης.

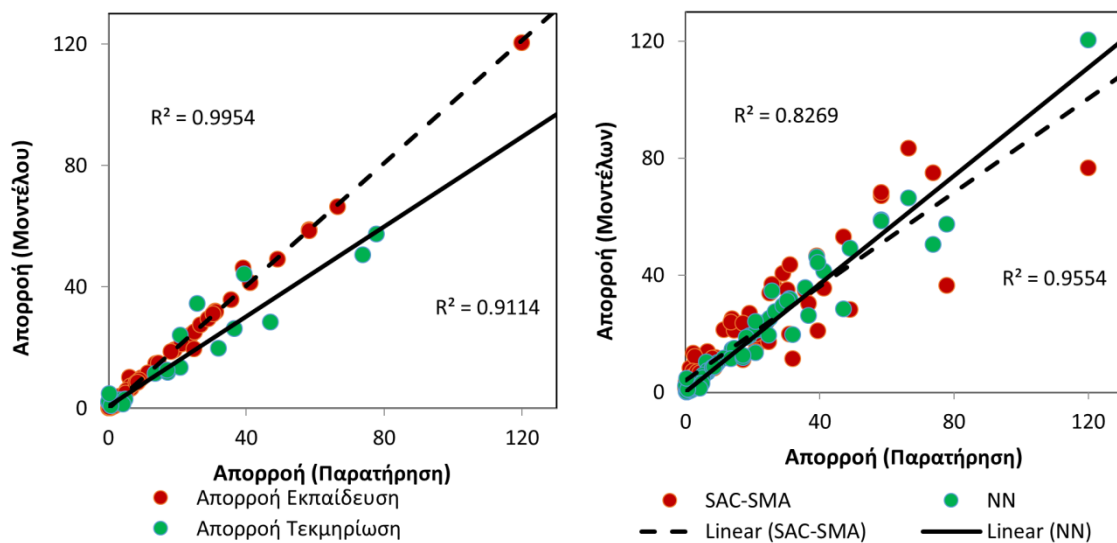


Εικόνα 35: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Καλαμαουκιανού.

Παρακάτω (Εικόνα 36) παρατηρείται μία τυχαιότητα στην κατανομή των τιμών αρχικά, ενώ όσο αυξάνονται τα χρονικά βήματα αρχίζει να παρουσιάζεται μία ανοδική τάση στην απόδοση του Νευρωνικού Δικτύου με την αύξηση του αριθμού των νευρώνων όσον αφορά το σετ εκπαίδευσης. Η αλλαγή των χρονικών βημάτων δεν φαίνεται να παίζει μεγάλο ρόλο στην συγκεκριμένη λεκάνη σε κανένα από τα δύο σετ τιμών (εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης). Στο σετ τεκμηρίωσης παρατηρείται καθοδική τάση της απόδοσης με την αύξηση του αριθμού των νευρώνων αρχικά, ενώ το αντίθετο αρχίζει να συμβαίνει στα μετέπειτα χρονικά βήματα. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 9 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 5 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 1,00 – 1,45 και 0,91 – 8,6 αντίστοιχα.



Εικόνα 36: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Καλαμαυκιανού.



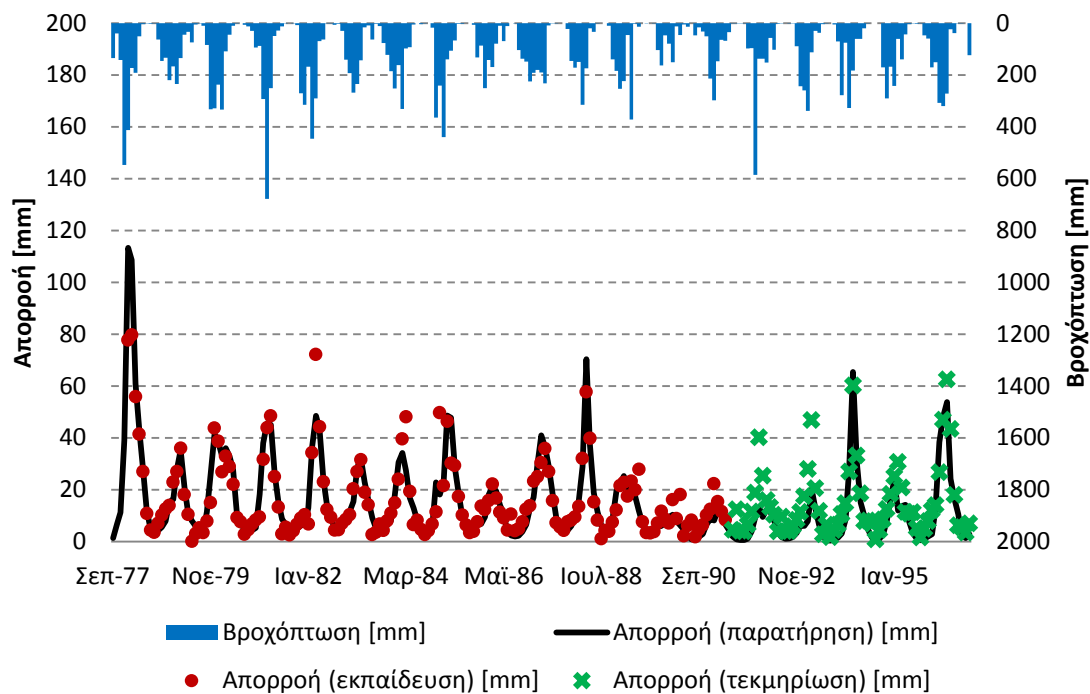
Εικόνα 37: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Καλαμαυκιανού.

Στα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Εικόνα 37) φαίνεται η μεγάλη ακρίβεια της προσομοίωσης του Νευρωνικού Δικτύου στην συγκεκριμένη λεκάνη καθώς οι τιμές R^2 εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι αρκετά υψηλές (1,00 – 0,91 αντίστοιχα). Συγκρίνοντας επίσης τις τιμές R^2

που προκύπτουν από το Νευρωνικό Δίκτυο και το μοντέλο Sacramento αντίστοιχα, γίνεται φανερό ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του πρώτου είναι αρκετά υψηλότερη (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,96 έναντι 0,83 για Sacramento).

5.2.9 Λεκάνη 9: Κακοδικιανός

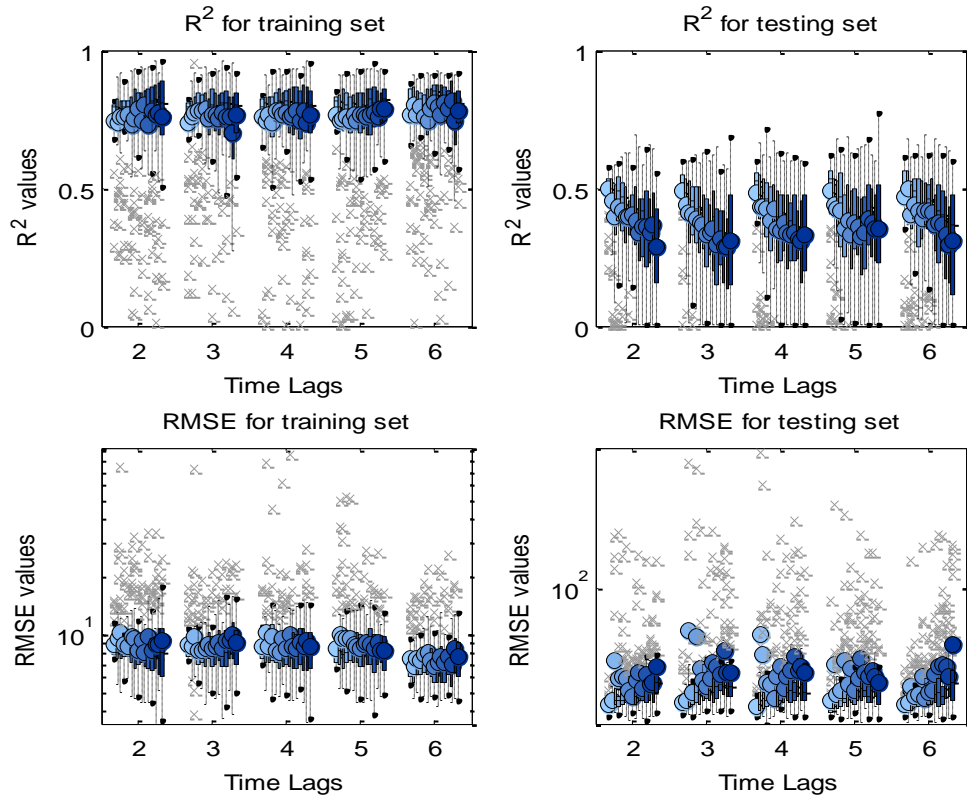
Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 678,8 mm τον μήνα Φεβρουάριο του 1981 ενώ η μέγιστη τιμή της απορροής 113,3 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1978. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 38) ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης με εξαίρεση κάποιες ακραίες τιμές (peaks) στις οποίες φαίνεται να υπάρχει υπερεκτίμηση από το μοντέλο.



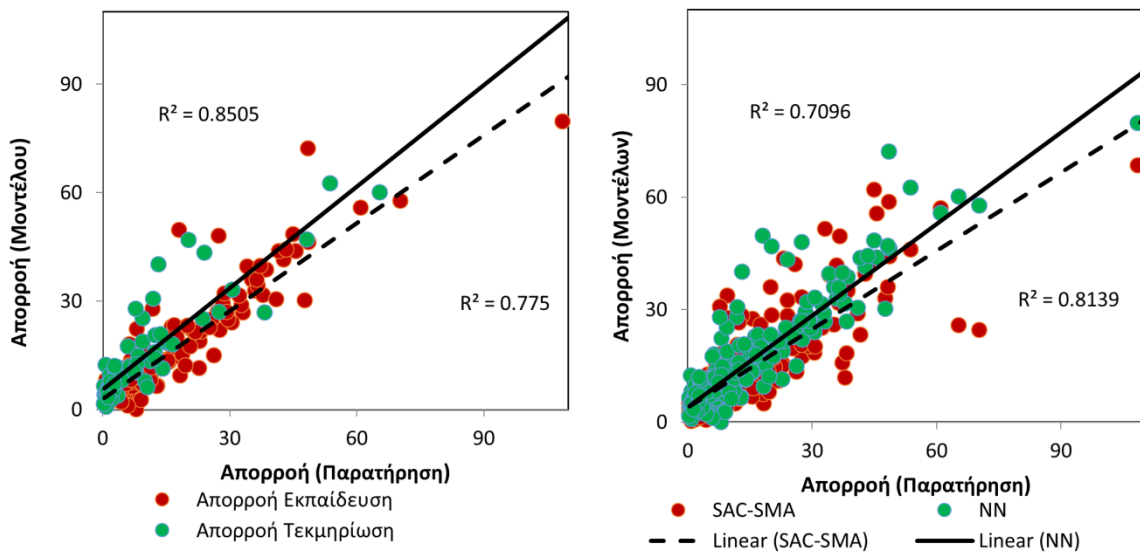
Εικόνα 38: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Κακοδικιανού.

Παρακάτω (Εικόνα 39) παρατηρείται μία τυχαιότητα στην κατανομή των τιμών R^2 και RMSE κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων και μία σταθερότητα κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων στο σετ εκπαίδευσης. Αυτή η σταθερότητα κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων διατηρείται και στο σετ τεκμηρίωσης, με την απόδοση των δικτύων να φθίνει παρόλα αυτά κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 15 νευρώνες και με

αριθμό «παραθύρων» ίσο με 5 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,85 – 6,64 και 0,77 – 8,28 αντίστοιχα.



Εικόνα 39: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Κακοδικιανού.

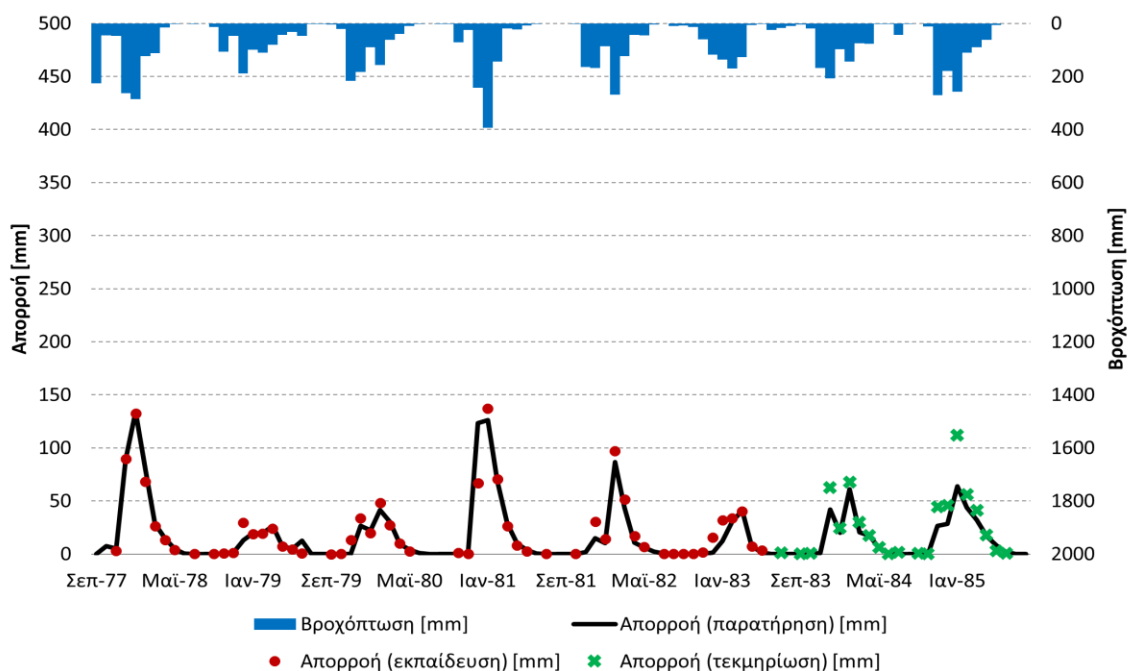


Εικόνα 40: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Κακοδικιανού.

Στα παραπάνω διαγράμματα (βλ. Εικόνα 40) παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, και οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι ικανοποιητικά υψηλές και με μικρή διαφορά (0,85 – 0,78 αντίστοιχα) η οποία είναι εντός αποδεκτών πλαισίων. Αυτό υποδεικνύει την αρκετά μεγάλη ακρίβεια προσομοίωσης του μοντέλου. Εδώ συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου και του μοντέλου Sacramento, όπου διαπιστώνεται ότι η ακρίβεια της προσομοίωσης του πρώτου είναι υψηλότερη (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,81 έναντι 0,71 για Sacramento).

5.2.10 Λεκάνη 10: Γιοφύρος

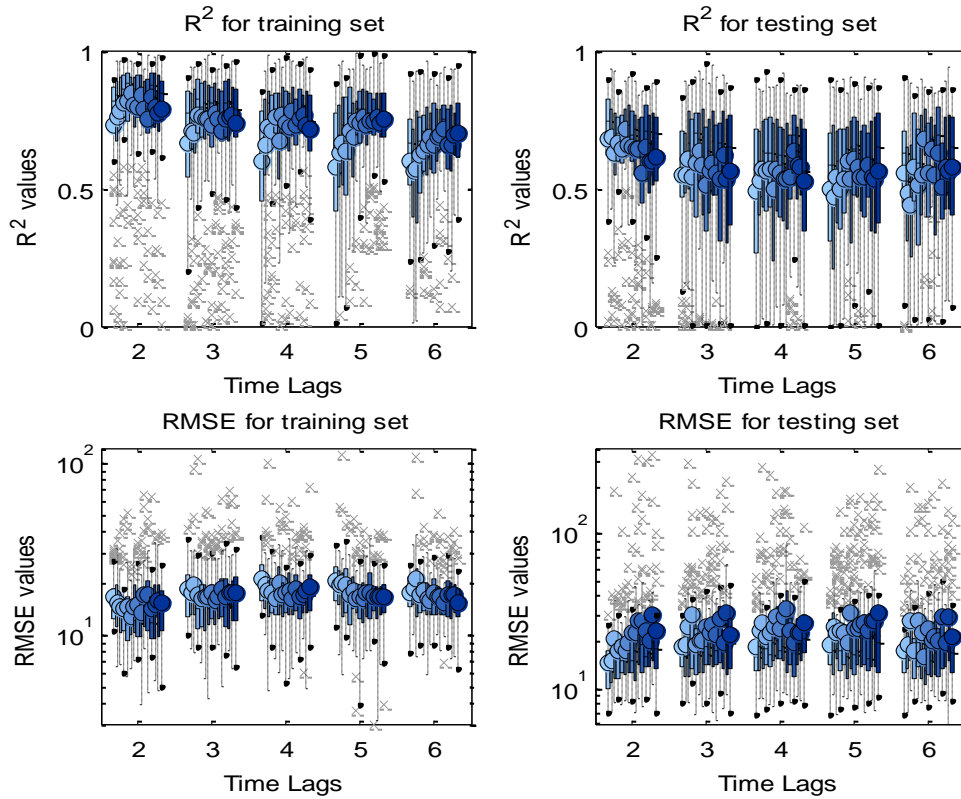
Εδώ παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 393,7 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 ενώ η μέγιστη τιμή απορροής ανέρχεται στα 134,3 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1978. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 41). ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ καλά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πάρα πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης.



Εικόνα 41: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Γιοφύρου

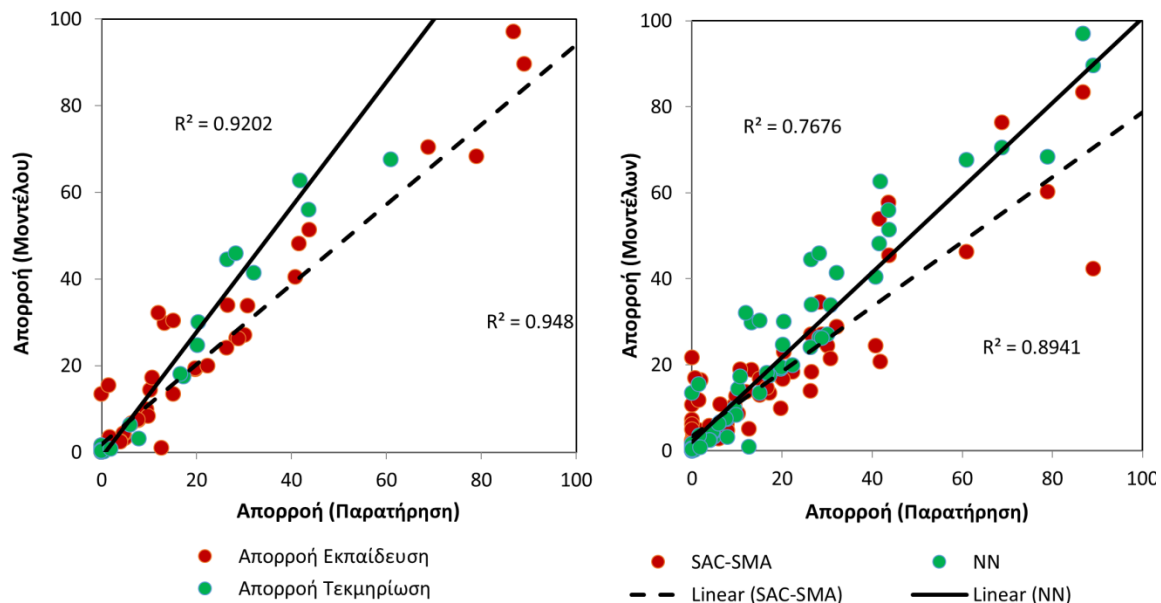
Παρακάτω (Εικόνα 42) παρατηρείται μια ανοδική τάση της απόδοσης των Νευρωνικών Δικτύων κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων και πτωτική κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων στο σετ εκπαίδευσης. Στο σετ τεκμηρίωσης διακρίνεται επίσης η πτωτική τάση κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων ενώ ο αριθμός των νευρώνων δεν φαίνεται να επηρεάζει σε

σημαντικό βαθμό την απόδοση καθώς οι τιμές R^2 και RMSE είναι τυχαία κατανομημένες. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 10 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 3 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,92 – 8,89 και 0,95 - 11,89 αντίστοιχα.



Εικόνα 42: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Γιόφουρου.

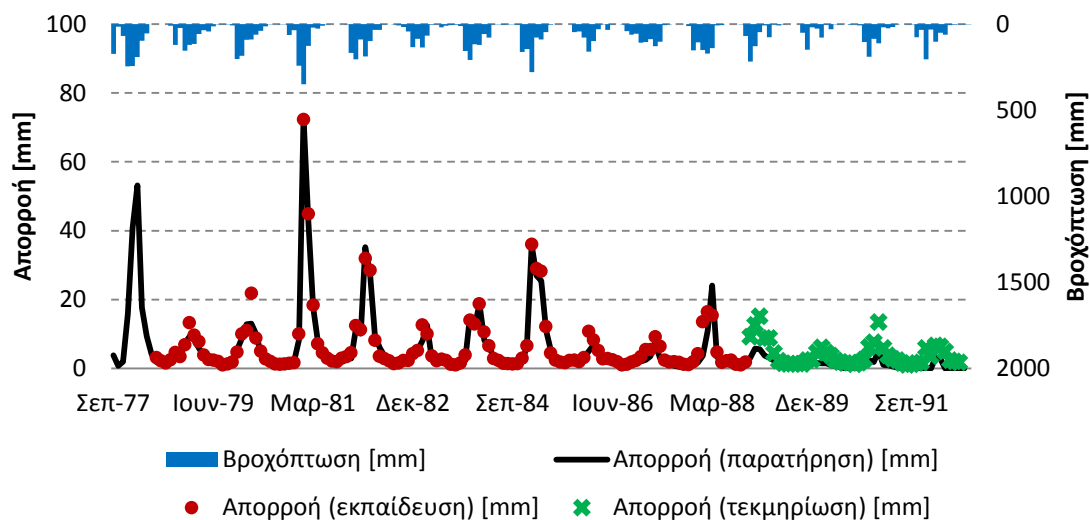
Στην συγκεκριμένη λεκάνη διαπιστώνεται σε αυτό το διάγραμμα (βλ. Εικόνα 43). ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι αρκετά υψηλή καθώς οι τιμές R^2 εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα (0,92 – 0,95 αντίστοιχα). Εδώ επίσης συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento, όπου και γίνεται φανερό ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι υψηλότερη (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,89 έναντι 0,77 για Sacramento).



Εικόνα 43: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Γιοφύρου

5.2.11 Λεκάνη 11: Γεροπόταμος

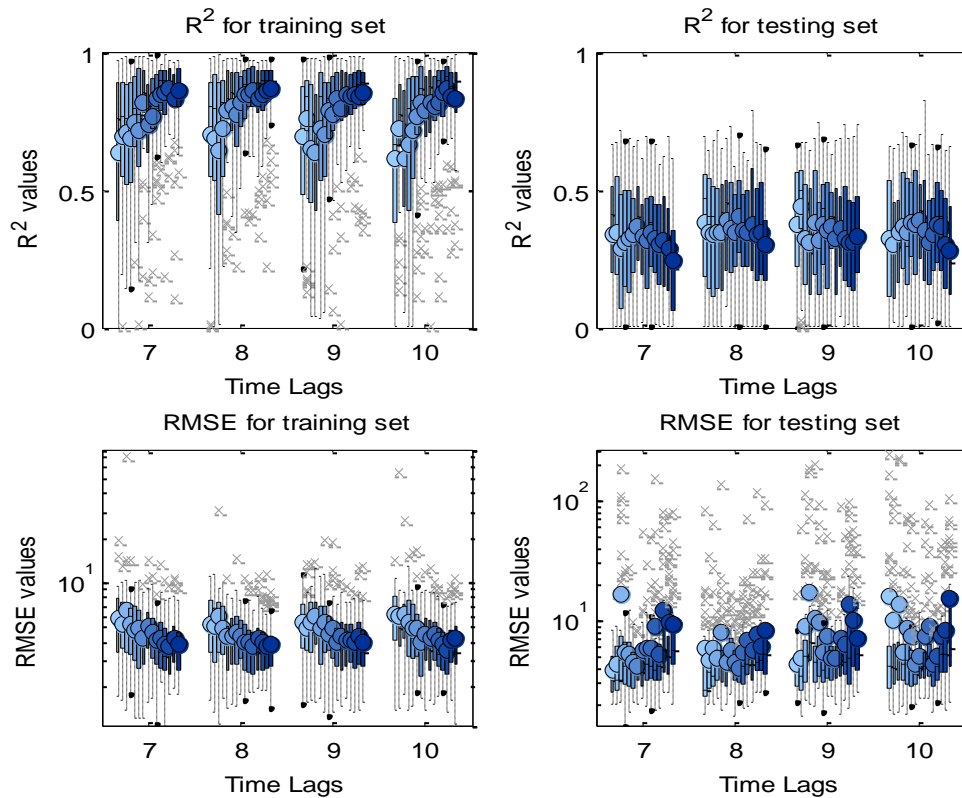
Στην συγκεκριμένη λεκάνη όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 44) η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 350,9 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 όπως επίσης και η τιμή της απορροής η οποία ανέρχεται στα 73,11 mm. Επίσης φαίνεται ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης ακόμα και στην περίπτωση των ακραίων τιμών (peaks) με κάποιες εξαιρέσεις στις τιμές τεκμηρίωσης που φαίνεται να υπάρχει μία υπερεκτίμηση από το μοντέλο.



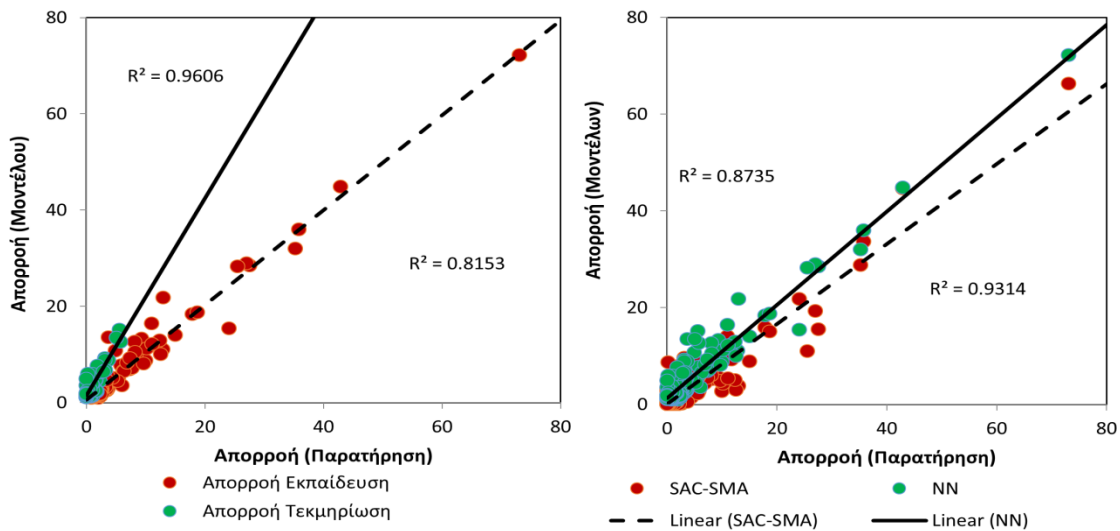
Εικόνα 44: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Γεροπόταμου.

Παρακάτω παρατηρείται (Εικόνα 46) μία σταθερότητα στην απόδοση των Νευρωνικών δικτύων με την αύξηση των χρονικών βημάτων και για τα δύο σετ τιμών (εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης). Στο σετ εκπαίδευσης παρατηρείται αύξηση της απόδοσης των δικτύων με την αύξηση του αριθμού των νευρώνων, ενώ στο σετ τεκμηρίωσης συμβαίνει το αντίθετο. Από το διάγραμμα διακρίνεται ότι η πλειονότητα των δικτύων, όπως και στην λεκάνη απορροής του Μύρτου, δεν είναι σε θέση να κάνουν ασφαλείς προβλέψεις. Παρόλα αυτά υπάρχουν δίκτυα που λόγω τυχαιότητας αποδίδουν καλύτερα. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 9 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 10 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,96 – 1,97 και 0,82 – 3,70 αντίστοιχα.

Στα ακόλουθα διαγράμματα (βλ. Εικόνα 46). παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι υψηλές (0,96 – 0,82 αντίστοιχα), με την μεταξύ τους διαφορά να κυμαίνεται σε αποδεκτά επίπεδα. Το μοντέλο φαίνεται και σε αυτήν την περίπτωση να προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές. Επίσης εδώ παρατηρείται η διαφορά στην ακρίβεια των υπολογισμών μεταξύ του Νευρωνικού Δικτύου και του μοντέλου Sacramento με το πρώτο να παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια προσομοίωσης (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,93 έναντι 0,87 για Sacramento).



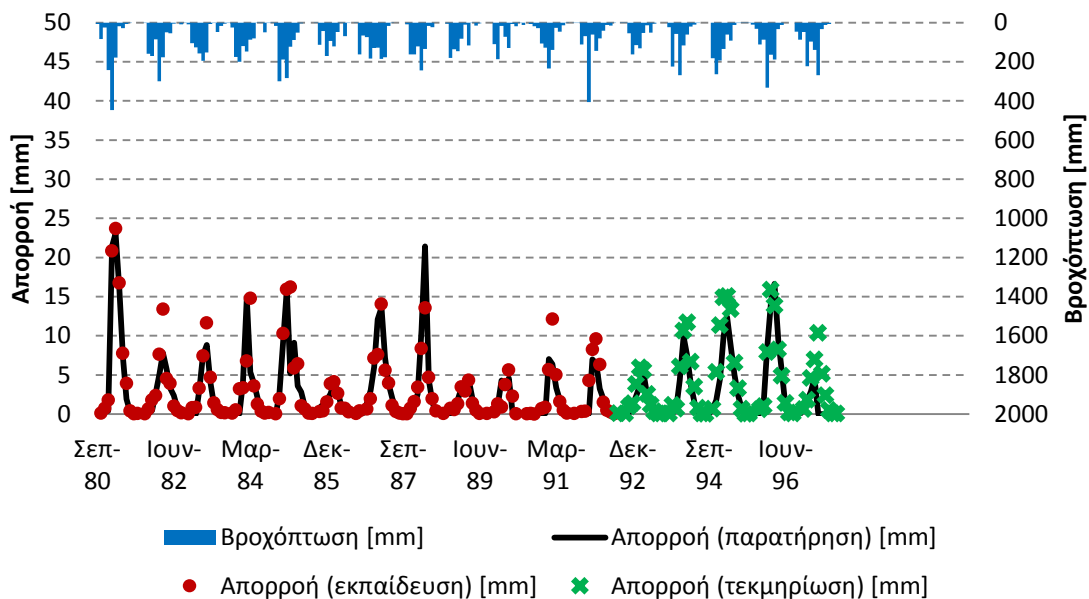
Εικόνα 45: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Γεροπόταμου.



Εικόνα 46: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Γεροπόταμου.

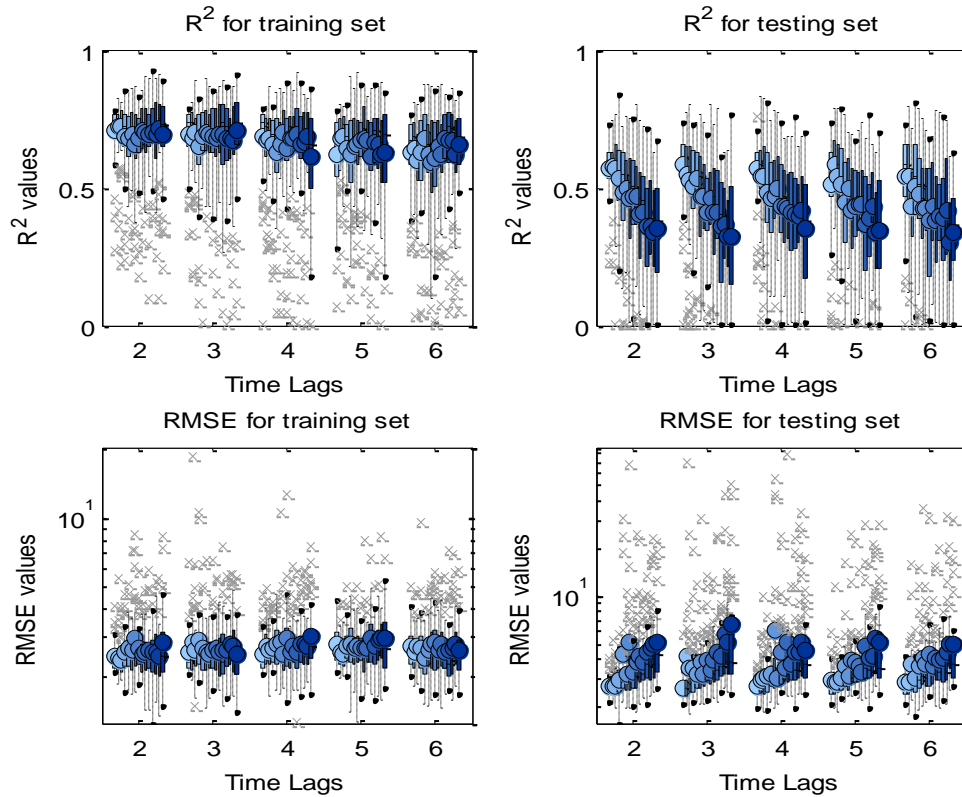
5.2.12 Λεκάνη 12: Γαζανός

Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 446,3 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 ενώ η μέγιστη τιμή της απορροής ανέρχεται στα 23,03 mm τον μήνα Φεβρουάριο του ίδιου έτους. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 47) ότι το μοντέλο προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης με εξαίρεση κάποιες ακραίες τιμές (peaks) που και στα δύο στάδια (εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) φαίνεται να υπάρχει υπερεκτίμηση από το μοντέλο.



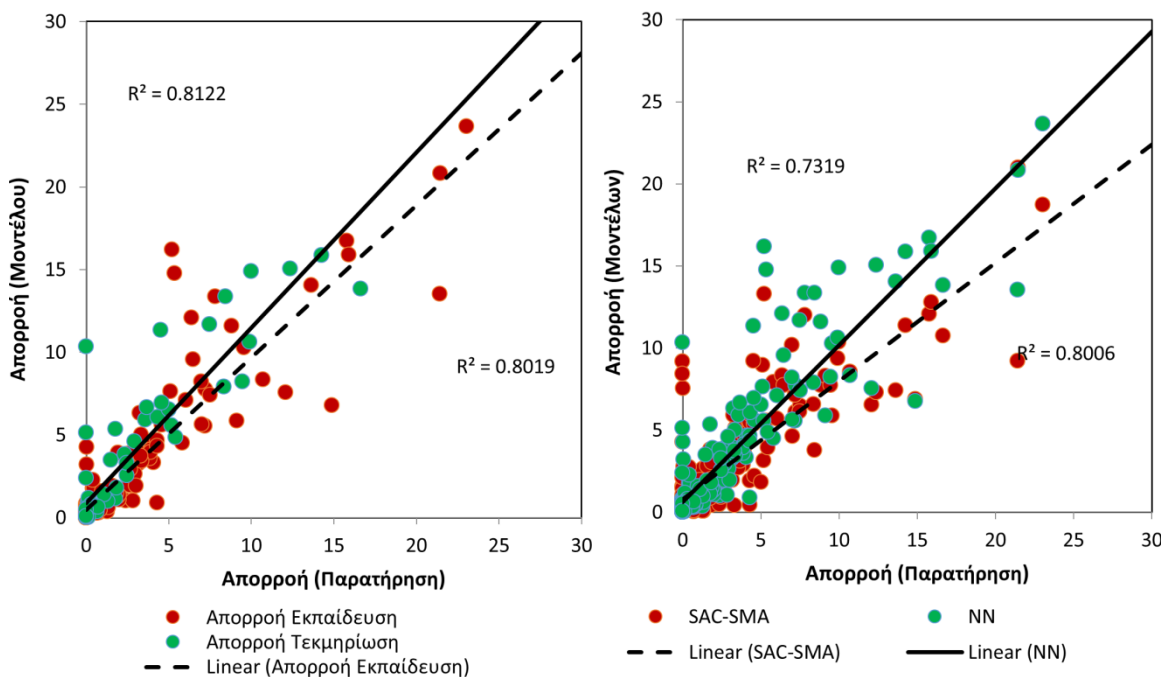
Εικόνα 47: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Γαζανού.

Παρακάτω (Εικόνα 48) παρατηρείται μια τυχαιότητα στην απόδοση των Νευρωνικών Δικτύων με την αύξηση των νευρώνων και μία ελαφρώς πτωτική τάση της απόδοσης κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων για το σετ εκπαίδευσης. Στο σετ τεκμηρίωσης η αύξηση των χρονικών βημάτων δεν φαίνεται να επηρεάζει την απόδοση σε αντίθεση με την σημαντική πτωτική τάση που παρουσιάζει κατά την αύξηση των νευρώνων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 9 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 2 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,81 - 2 και 0,80 – 2,31 αντίστοιχα.



Εικόνα 48: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Γαζανού.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 49, σε αυτήν την λεκάνη, οι τιμές R^2 εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι ικανοποιητικά υψηλές (0,81 – 0,8 αντίστοιχα), γεγονός που φανερώνει την σημαντική ακρίβεια υπολογισμών του μοντέλου. Εδώ παρατηρείται η υπεροχή του Νευρωνικού δικτύου και σε αυτήν την περίπτωση έναντι του μοντέλου Sacramento καθώς οι τιμές R^2 του πρώτου είναι υψηλότερες, πράγμα που υποδηλώνει την μεγαλύτερη ακρίβεια προσομοίωσης του (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,8 έναντι 0,73 για Sacramento).

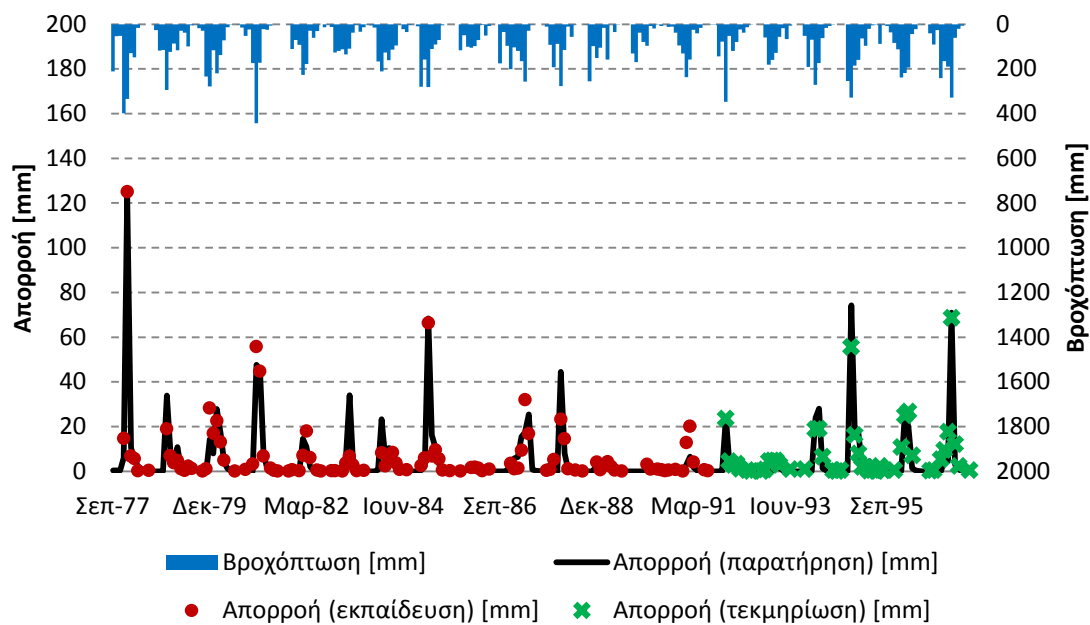


Εικόνα 49: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Γαζανού.

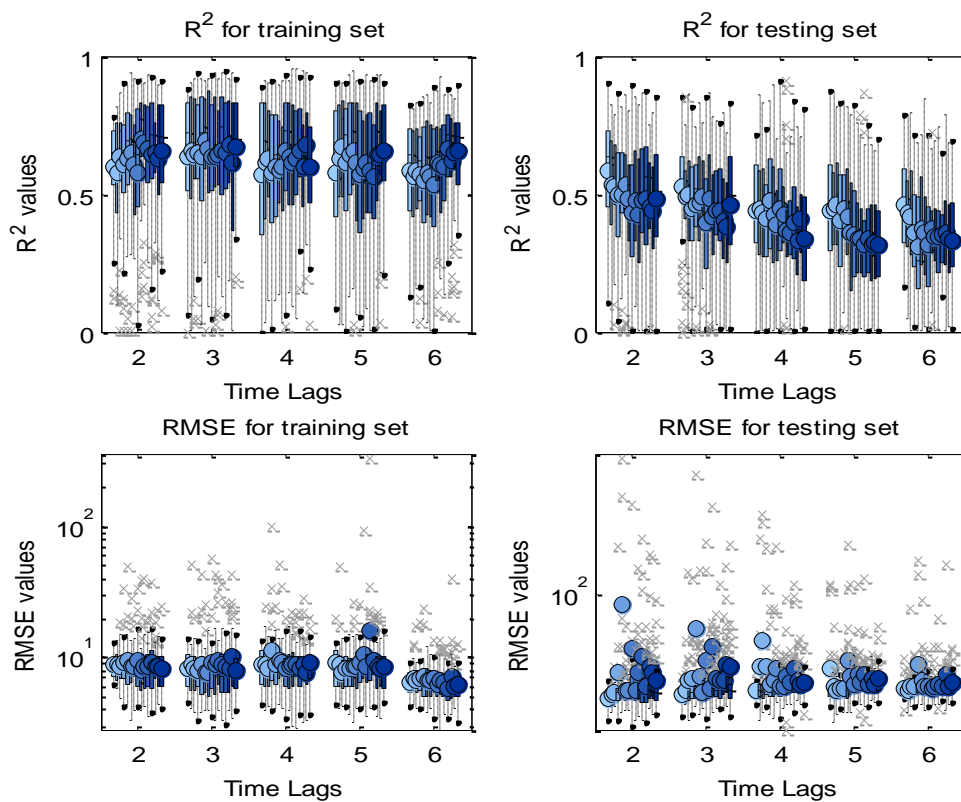
5.2.13 Λεκάνη 13: Αποσελέμης

Εδώ παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της βροχοπτώσης είναι 442,9 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 ενώ η μέγιστη τιμή απορροής ανέρχεται στα 125,00 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1978. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (βλ. Εικόνα 50) ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πάρα πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης. Στις ακραίες τιμές (peaks) στο στάδιο της εκπαίδευσης φαίνεται να υπάρχει μία μικρής τάξης υπερεκτίμηση και στο στάδιο της τεκμηρίωσης υποεκτίμηση από το μοντέλο.

Παρακάτω (Εικόνα 51) παρατηρείται μία αυξομειωτική τάση στην απόδοση των Νευρωνικών Δικτύων κατά την αύξηση του αριθμού των Νευρώνων και μία ελαφρώς πτωτική τάση κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων στο σετ εκπαίδευσης. Όσον αφορά το σετ τεκμηρίωσης, παρατηρείται και εδώ μία πτωτική τάση της απόδοσης κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων αλλά και κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 10 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 4 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,89 – 4,52 και 0,91 – 4,24 αντίστοιχα.



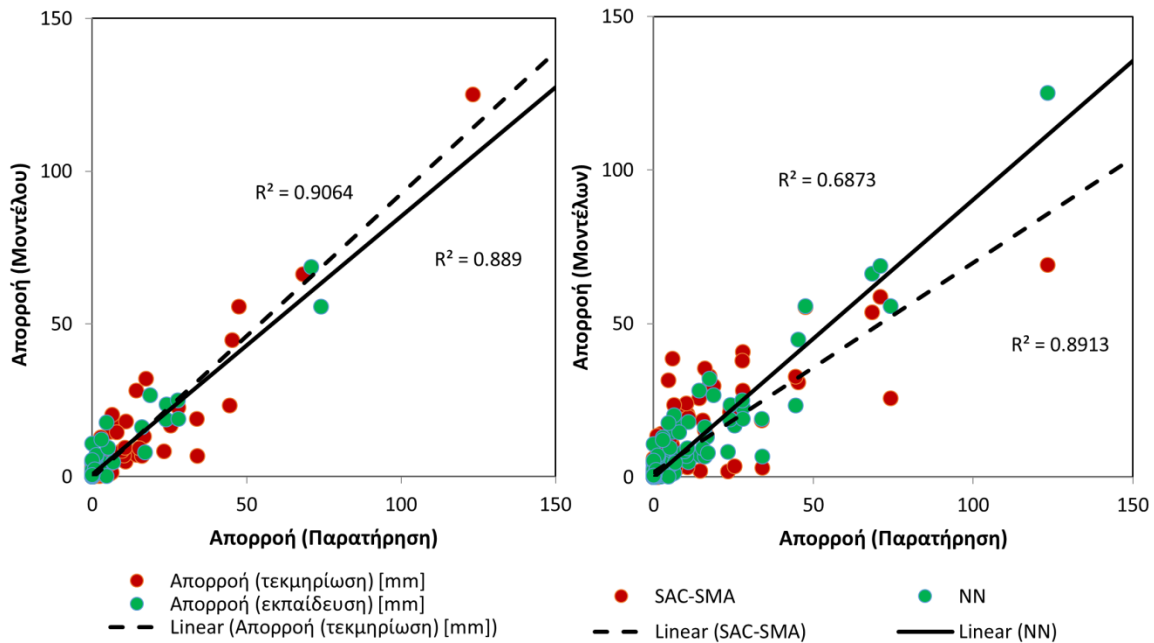
Εικόνα 50: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Αποσελέμη.



Εικόνα 51: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Αποσελέμη.

Οι υψηλές τιμές R^2 εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης που παρατηρούνται στο παρακάτω διάγραμμα (0,90 – 0,89 αντίστοιχα) φανερώνουν την μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης

για την συγκεκριμένη λεκάνη (βλ. Εικόνα 52). Συγκρίνοντας τις τιμές R^2 Νευρωνικού Δικτύου και μοντέλου Sacramento διαπιστώνεται ότι η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι σαφώς μεγαλύτερη (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,89 έναντι 0,69 για Sacramento).

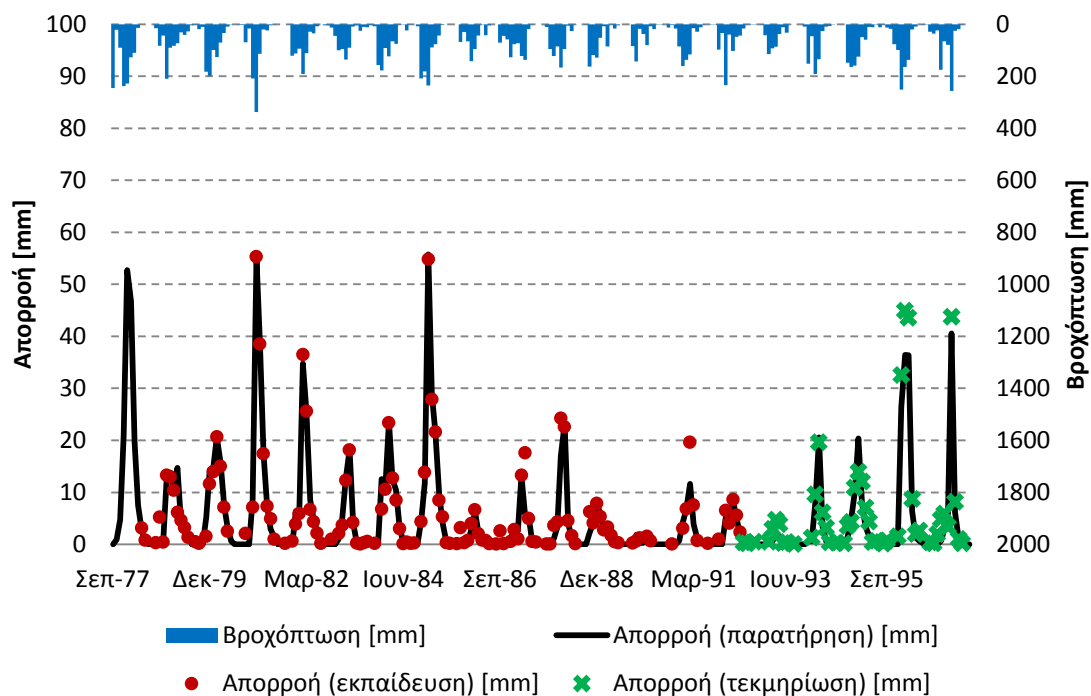


Εικόνα 52: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Αποσελέμης.

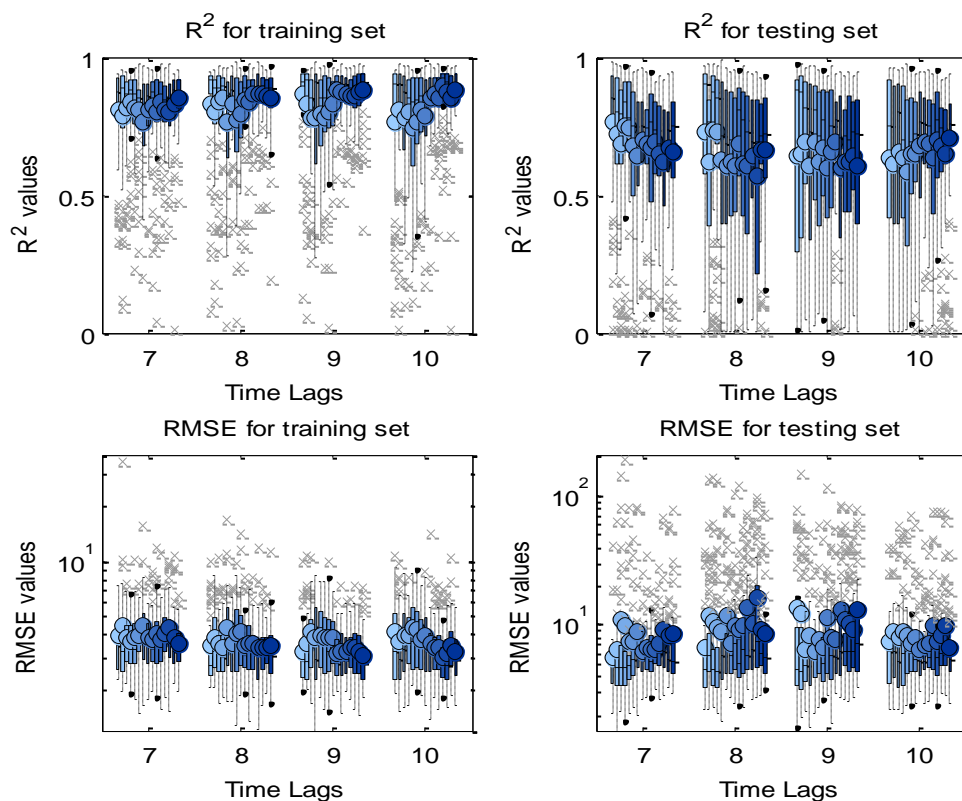
5.2.14 Λεκάνη 14: Αναποδόρης

Στην συγκεκριμένη λεκάνη όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 53) η μέγιστη τιμή της βροχοπτώσης είναι 337,5 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1981 ενώ η μέγιστη τιμή απορροής ανέρχεται στα 55,72 mm τον μήνα Ιανουάριο του 1985. Επίσης φαίνεται ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης ακόμα και στην περίπτωση των ακραίων τιμών (peaks) με εξαίρεση κάποιες από αυτές στο στάδιο της τεκμηρίωσης όπου υπάρχει μία μικρής τάξης υποεκτίμηση από το μοντέλο.

Παρακάτω (Εικόνα 54) παρατηρείται μία πτωτική και έπειτα ανοδική τάση στην απόδοση των Νευρωνικών δικτύων κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων, και μία σταθερότητα κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων στο σετ εκπαίδευσης. Στο σετ τεκμηρίωσης συμβαίνει το ίδιο κατά την αύξηση του αριθμού των νευρώνων αλλά υπάρχει και μία πτωτική τάση της απόδοσης κατά την αύξηση των χρονικών βημάτων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη υπέδειξε ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 4 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 9 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,96 – 1,78 και 0,96 – 2,34 αντίστοιχα.

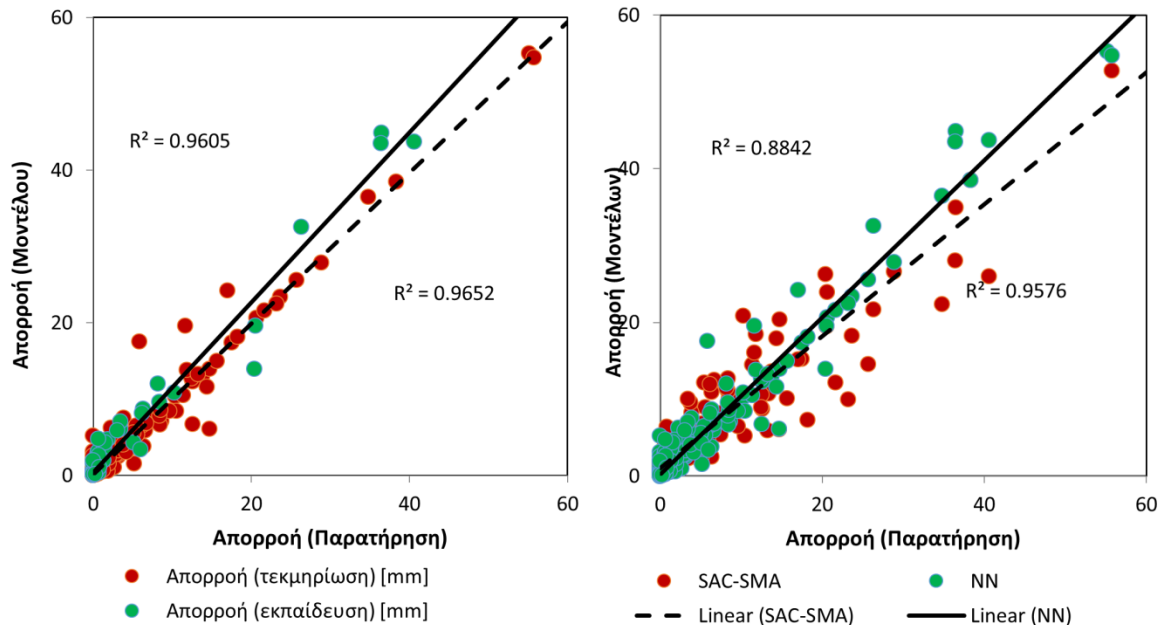


Εικόνα 53: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Αναποδάρη.



Εικόνα 54: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Αναποδάρη.

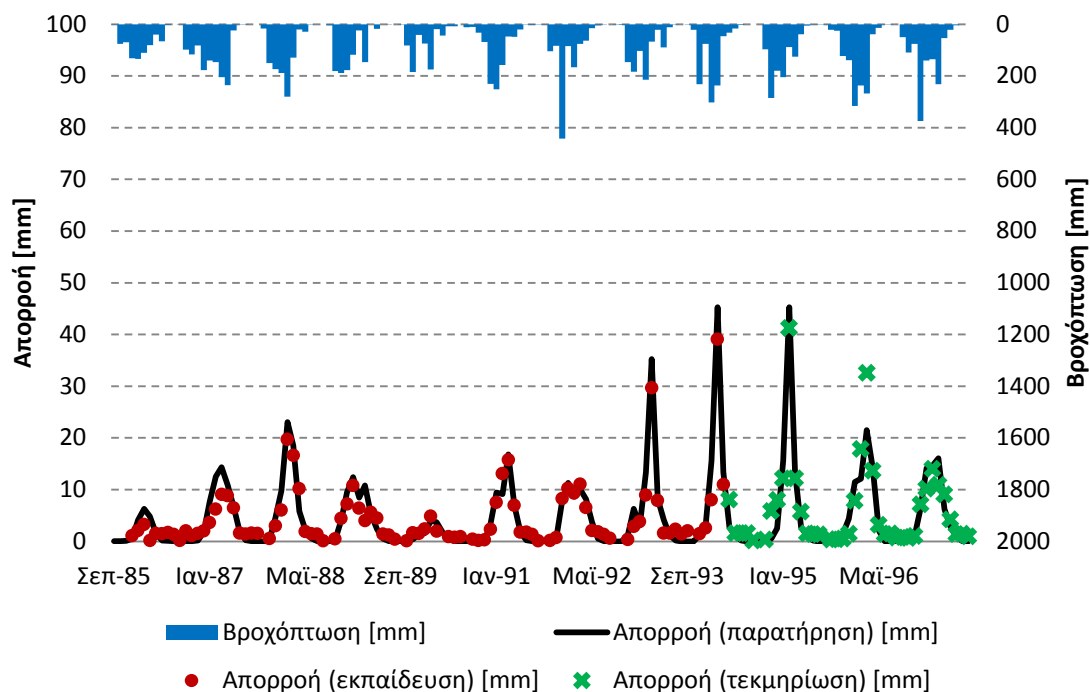
Και σε αυτήν την περίπτωση η ακρίβεια των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του Νευρωνικού Δικτύου είναι αρκετά υψηλή όπως φαίνεται από τις υψηλές τιμές R^2 εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης (0,96 – 0,97). Επίσης στο παρακάτω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 55) παρατηρούμε την μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών του Νευρωνικού Δικτύου έναντι του μοντέλου Sacramento, όπως γίνεται φανερό από την σύγκριση τιμών R^2 που αντιστοιχούν στο κάθε ένα (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,96 έναντι 0,88 για Sacramento).



Εικόνα 55: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Αναποδάρη.

5.2.15 Λεκάνη 15: Αγ. Βασίλειος

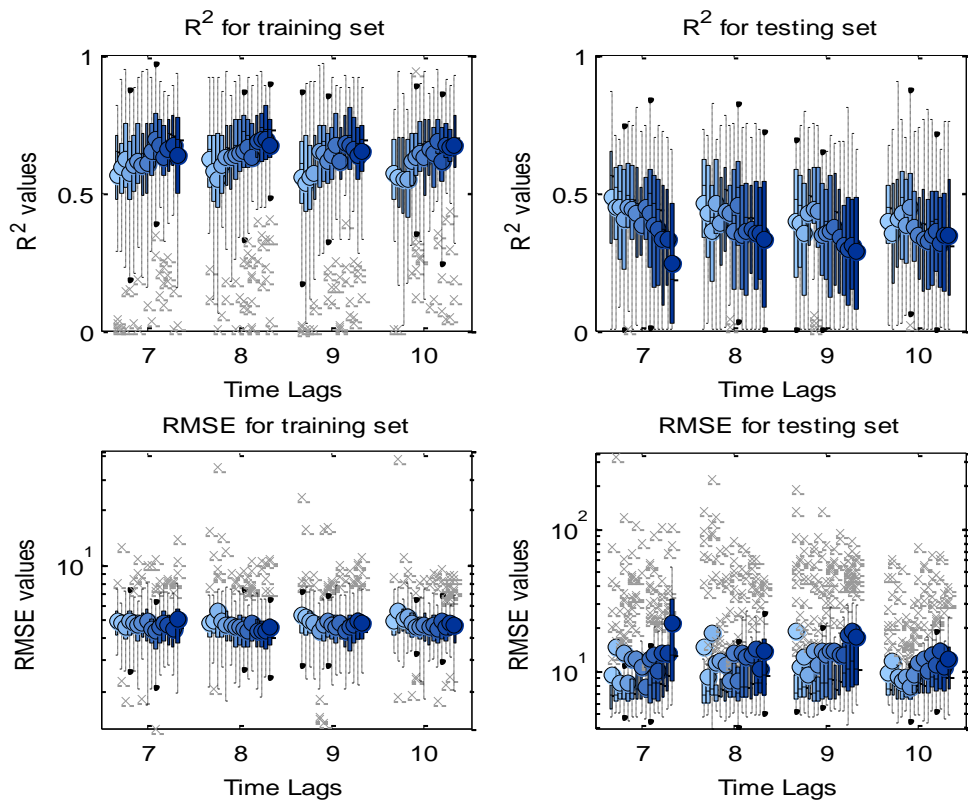
Για την συγκεκριμένη λεκάνη όπως φαίνεται στο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 56) η μέγιστη τιμή της βροχόπτωσης είναι 442,1 mm τον μήνα Δεκέμβριο του 1991 ενώ η μέγιστη τιμή της απορροής ανέρχεται στα 45,3 mm και απαντάται τον μήνα Φεβρουάριο του 1994 αλλά και του 1995. Επίσης γίνεται φανερό ότι το μοντέλο προσομοιώνει πολύ καλά τις παρατηρούμενες τιμές απορροής καθώς οι τιμές εκπαίδευσης και τεκμηρίωσης είναι πάρα πολύ κοντά στην καμπύλη των τιμών παρατήρησης ακόμα και στις ακραίες τιμές (peaks).



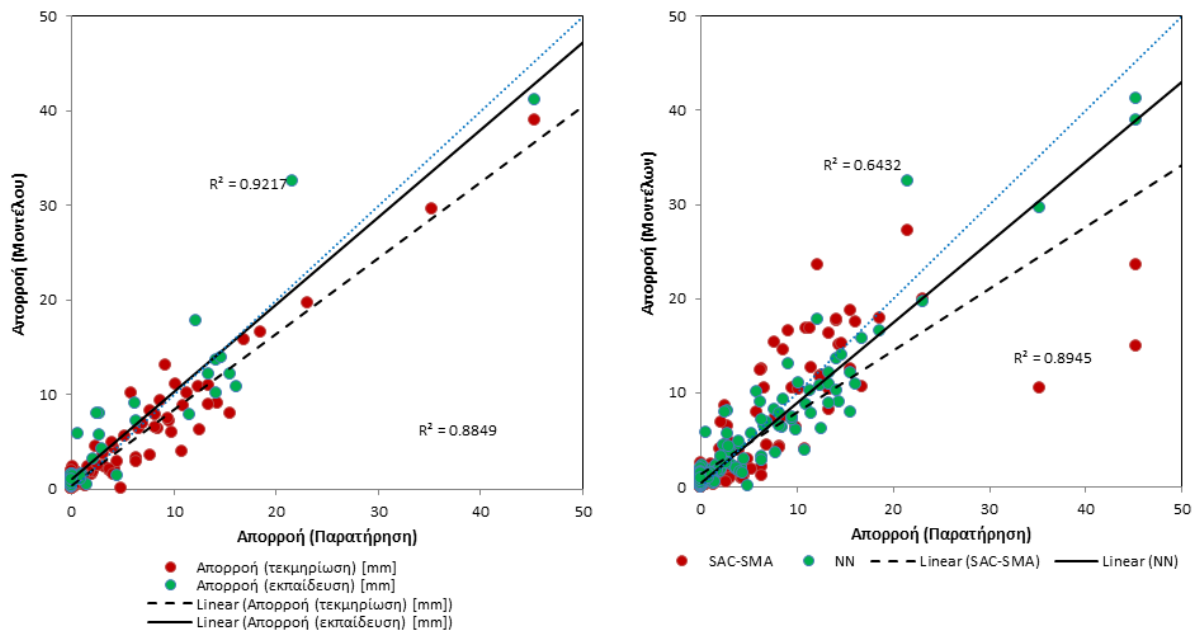
Εικόνα 56: Βροχόπτωση, Παρατηρημένη Απορροή και Απορροή Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης Αγ. Βασιλείου.

Παρακάτω (Εικόνα 57) παρατηρείται στασιμότητα στην απόδοση των Νευρωνικών δικτύων με την αύξηση των χρονικών βημάτων και για τα δύο σετ τιμών (εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης). Καθώς αυξάνει ο αριθμός των νευρώνων παρατηρείται αυξητική τάση στην απόδοση στο σετ εκπαίδευσης ενώ αυξομειωτική στο σετ τεκμηρίωσης. Και σε αυτήν την περίπτωση, λόγω του περιορισμένου αριθμού δεδομένων εισαγωγής τα δίκτυα φαίνεται ότι δεν είναι σε θέση να κάνουν συστηματικά ακριβείς προβλέψεις. Υπάρχουν παρόλα αυτά τυχαίες περιπτώσεις δικτύων που ήταν σε θέση να αποδώσουν πιο ικανοποιητικά. Τέτοια περίπτωση ήταν και το δίκτυο που επέλεξε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη λεκάνη, επιλέγοντας ως βέλτιστο Νευρωνικό Δίκτυο αυτό με 6 νευρώνες και με αριθμό «παραθύρων» ίσο με 10 με τιμές R^2 και RMSE εκπαίδευσης – επαλήθευσης 0,92 – 2,26 και 0,88 - 3,07 αντίστοιχα.

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 58) παρατηρείται ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, οι δύο τιμές R^2 (τιμών εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) είναι εξαιρετικά υψηλές (0,92 – 0,88), γεγονός που δείχνει ότι το μοντέλο φαίνεται, σε αυτήν την περίπτωση, να προσομοιώνει άψογα τις πραγματικές τιμές. Επιπροσθέτως, συγκρίνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του Νευρωνικού Δικτύου με το μοντέλο Sacramento (βλ. Εικόνα 58), όπου και γίνεται φανερό ότι, στην συγκεκριμένη λεκάνη, η ακρίβεια υπολογισμών του πρώτου είναι υψηλότερη (τιμή R^2 για ΤΝΔ ίση με 0,89 έναντι 0,64 για Sacramento).



Εικόνα 57: Διάγραμμα R^2 – RMSE για διαφορετικές τιμές χρονικών παραθύρων και αριθμού νευρώνων στα σετ Εκπαίδευσης – Τεκμηρίωσης του Αγ. Βασιλείου.



Εικόνα 58: Διαγράμματα R^2 Νευρωνικού, Νευρωνικού – Sacramento Αγ. Βασιλείου.

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

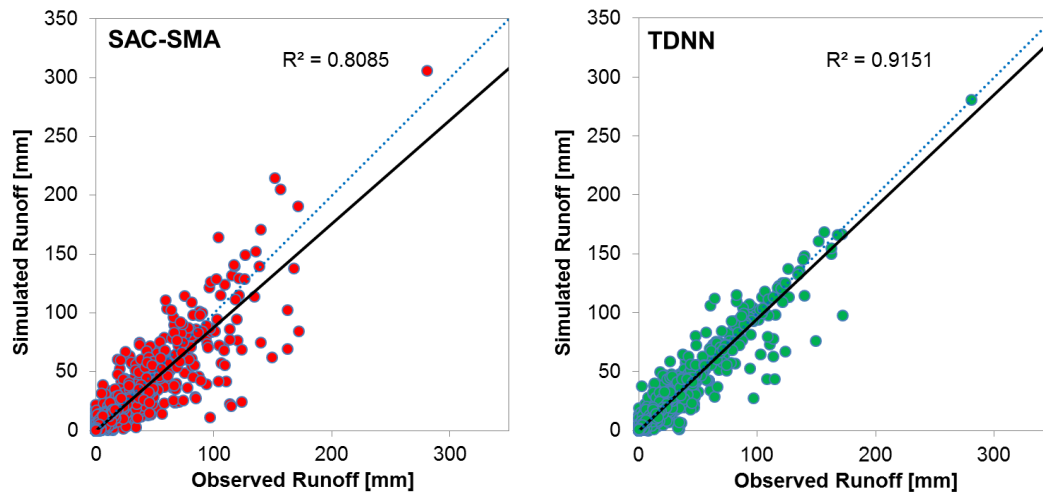
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) φαίνεται η διαφορά στις τιμές R^2 μεταξύ Νευρωνικού Δικτύου και μοντέλου Sacramento:

Πίνακας 3: Συγκριτικός Πίνακας RMSE – R^2 .

Λεκάνη Απορροής	R^2		RMSE		Διαφορά RMSE
	Νευρωνικό Δίκτυο	SAC-SMA	Νευρωνικό Δίκτυο	SAC-SMA	
Σεμπρωνιώτης	0,94	0,79	10,83	20,65	9,82
Ρουματιανός	0,86	0,76	12,07	15,48	3,41
Πρασσανός	0,83	0,59	10,54	16,38	5,84
Πλατύς	0,96	0,91	6,24	10,10	3,86
Πατέλης	0,99	0,92	1,97	4,86	2,89
Μύρτος	0,86	0,74	6,24	8,41	2,17
Κουτσουλίδης	0,92	0,85	4,67	5,60	0,93
Καλαμαφκιανός	0,96	0,83	4,65	8,95	4,30
Κακοδικιανός	0,81	0,71	7,74	9,24	1,50
Γιόφυρος	0,89	0,77	9,85	13,78	3,93
Γεροπόταμος	0,93	0,87	2,51	3,14	0,63
Γαζανός	0,80	0,73	2,09	2,20	0,11
Αποσελέμης	0,89	0,69	4,43	7,48	3,05
Αναποδάρης	0,96	0,88	1,95	3,06	1,11
Αγ. Βασίλειος	0,89	0,64	2,52	4,58	2,06

Στον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα, φαίνεται η υπεροχή στην ακρίβεια των προβλέψεων που έχουν τα Νευρωνικά Δίκτυα έναντι του μοντέλου Sacramento. Αυτό γίνεται φανερό από την διαφορά των δεικτών RMSE και R^2 καθώς σε όλες τις λεκάνες, για τα Νευρωνικά Δίκτυα, ο δείκτης RMSE είναι χαμηλότερος και ο δείκτης R^2 υψηλότερος. Έτσι αναδεικνύεται η ανωτερότητα των Νευρωνικών Δικτύων που τους προσδίδει η μη γραμμικότητά τους έναντι του γραμμικού μοντέλου του Sacramento

Παρακάτω (Εικόνα 59) παρουσιάζεται ένα συγκεντρωτικό γράφημα και ο μέσος όρος για τις τιμές R^2 των δύο μοντέλων για τις 15 λεκάνες απορροής:



Εικόνα 59: Σύγκριση της αποτελεσματικότητας της προσομοίωσης μεταξύ Νευρωνικού Δικτύου και Sacramento.

Όπως φάνηκε και από τα διαγράμματα κάθε λεκάνης έτσι και από το παραπάνω συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των μετρήσεων από όλες τις λεκάνες απορροής γίνεται φανερό η μεγαλύτερη ακρίβεια των Νευρωνικών Δικτύων (συνολικό R^2 για ΤΝΔ ίσο με 0,92 έναντι 0,80 για το Sacramento).

5.4 Συμπεράσματα & Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η υπολογιστική ικανότητα των Νευρωνικών Δικτύων όσον αφορά στην πρόβλεψη της απορροής υδρολογικών λεκανών με περιορισμένο αριθμό δεδομένων. Έγινε φανερό η χρησιμότητά τους, και παρότι η ανάπτυξή τους βρίσκεται σε πρώιμα στάδια, ακόμα και τώρα, αρκετά χρόνια μετά την εμφάνισή τους, παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την προσομοίωση της βροχής – απορροής στις εξεταζόμενες λεκάνες.

Μέσω της δημιουργίας Νευρωνικών Δικτύων με διαφορετικές παραμέτρους το καθένα (αριθμός νευρώνων, χρονικών βημάτων και σετ εκπαίδευσης – τεκμηρίωσης) υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ενός μοναδικού Νευρωνικού Δικτύου για κάθε μία λεκάνη, το οποίο προσομοιώνει στον βέλτιστο βαθμό την σχέση βροχής – απορροής. Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης αυτών των δικτύων έδειξαν ότι το βέλτιστο σετ τιμών εκπαίδευσης επαλήθευσης ήταν το 70-30 % καθώς έδινε τις βέλτιστες τιμές R^2 για την πλειονότητα των λεκανών, χωρίς να «θυσιάζεται» η ικανότητα πρόβλεψης του δικτύου. Επίσης επιλέχθηκε μέσω του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, το ιδανικό χρονικό βήμα για κάθε δίκτυο, το οποίο ήταν απόρροια κάποιας αυξητικής ή μειωτικής τάσης της απόδοσης των δικτύων στην εκάστοτε λεκάνη.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι επειδή ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης λάμβανε υπόψιν τις βέλτιστες τιμές RMSE και R^2 , τα Νευρωνικά Δίκτυα που κρίθηκαν βέλιστα σε κάποιες περιπτώσεις ήταν κατά πολύ εκτός του εύρους των τιμών RMSE και R^2 που έδινε η πλειονότητα των δικτύων. Αυτό βέβαια οφειλόταν αποκλειστικά σε τυχαίους παράγοντες. Συνεπώς σε αυτές τις περιπτώσεις επιλέχθηκαν από τον αλγόριθμο Νευρωνικά Δίκτυα τα οποία δεν έδιναν τα πιο συνεπή – σταθερά αποτελέσματα σε σχέση με τα υπόλοιπα τα οποία ήταν πιο ανακριβή αλλά ταυτόχρονα πιο σταθερά.

Παρατηρείται λοιπόν ότι δεδομένου μιας ικανοποιητικής χρονοσειράς δεδομένων και μετά από αρκετές επαναλήψεις εκπαίδευσης – επαλήθευσης, σε συνδυασμό με μία απλή μέθοδο βελτιστοποίησης, τα Νευρωνικά Δίκτυα δίνουν αποτελέσματα προβλέψεων των οποίων η ακρίβεια είναι ίση, ή/και σε αρκετές περιπτώσεις σημαντικά μεγαλύτερη, από ένα κλασσικό γραμμικό εννοιολογικό μοντέλο όπως το Sacramento, καθιστώντας τα αποτελεσματικότερα. Αυτό συμβαίνει διότι η μη γραμμικότητα των Νευρωνικών Δικτύων μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα τα μη γραμμικά φυσικά φαινόμενα με αποτέλεσμα τα γραμμικά μοντέλα να υστερούν σε ακρίβεια έναντι αυτών που στηρίζονται στα Νευρωνικά Δίκτυα.

Στο μέλλον, θα πρέπει να ερευνηθούν σε μεγαλύτερο βάθος οι παράμετροι που καθορίζουν τη λειτουργία του Νευρωνικού Δικτύου, καθώς και άλλες παράμετροι που σχετίζονται με την εκπαίδευση και την προσομοίωση (αριθμός παραθύρων, αριθμός νευρώνων, επαναλήψεις

εκπαίδευσης). Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να βελτιωθεί προς την κατεύθυνση της επιλογής των βέλτιστων δικτύων λαμβάνοντας υπόψη και άλλες παραμέτρους, όπως το εύρος της κατανομής των τιμών RMSE και R^2 , ούτως ώστε να αποφευχθούν οι επιλογές ασταθών δικτύων που δίνουν τυχαία καλύτερα αποτελέσματα από την πλειονότητα. Επίσης πρέπει να γίνουν αρκετά βήματα για μια πληρέστερη συλλογή δεδομένων (όπως εδαφική υγρασία, κατεΐσδυση), τα οποία εάν εισαχθούν σωστά στις μεταβλητές εισόδου ενός Νευρωνικού Δικτύου και ελεγχθεί η επίδρασή τους στα αποτελέσματα, θα μπορούσαν να το καταστήσουν ένα πανίσχυρο εργαλείο πρόβλεψης, απαραίτητο για την διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής και την λήψη αποφάσεων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσσες αναφορές

- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell, J.Rasmussen, 1986, "An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system" J.Hydrology
- Efstratiadis, A., A. Koukouvinos, E. Rozos, A. Tegos, and I. Nalbantis, Theoretical documentation of model for simulating hydrological-hydrogeological processes of river basin "Hydrogeios", Integrated Management of Hydrosystems in Conjunction with an Advanced Information System (ODY SSEUS), Contractor: NAMA, Report 4a, 103 pages, Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering – National Technical University of Athens, Athens, December 2006.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., de Marsily, G., 2007. Submarine springs and coastal karst aquifers: A review Journal of Hydrology, 339, 79– 92
- Keith J. Beven, 2012. Rainfall – Runoff modeling: The Primer, Second Edition.
- Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K. Daliakopoulos, I.N., Jacob, D., 2012. Impact of climate change on water resources status: a case study for Crete Island, Greece. Journal of Hydrology 479 (4) 146-158
- Maramathas, A.J. and Boudouvis, A.G., 2006. Manifestation and measurement of the fractal characteristics of karst hydrogeological formations, Advances in Water Resources 29 112–116
- Naoum, S. and Tsanis, I.K., 2004. Orographic precipitation modeling with multiple linear regression. Journal of Hydraulic Engineering 9(2), 79–102.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. Journal of Hydrology 10, 282–290.
- Pallavi Mittal, Swaptik Chowdhury, Sangeeta Roy, Nikhil Bhatia, Roshan Srivastav, Journal of Water Resource and Protection, 2012 , 4, 1024-1028. Dual Artificial Neural Network for Rainfall-Runoff Forecasting.
- M.P Rajurkar, U.C Kothiyari, U.C Chaube, 2003. Artificial neural networks for daily rainfall-runoff. Journal of Hydrology 285 96-113
- Siart, C., Bubenzer, O., Eitel, B., 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. Geomorphology 112, 106–121
- Sajikumar, Thandaveswara, 1998. «A non-linear rainfall–runoff model using an artificial neural network».

- Vrugt, J.A., Gupta, H.V. Nualláin, B., Bouten, W., 2006. Real-Time Data Assimilation for Operational Ensemble Streamflow Forecasting. J. Hydrometeor, 7, 548–565.
- Wang, Q.J., 1998. Using genetic algorithms to optimise model parameters, Environmental Modelling & Software, Volume 12, Issue 1, 1999, Pages 27-34
- Wei T.C., McGuinness J.L., 1973. Reciprocal distance squared method, a computer technique for estimating area precipitation. Technical Report ARS-Nc-8, US Agricultural Research Service, North Central Region, Ohio.

Ελληνικές Αναφορές

- Βιδάλη Ρ., Γ., 2011. Μεταπτυχιακή Διατριβή με τίτλο «Αυτόματη Ταξινόμηση Μελωδίας σε Μουσικά Είδη με τη Χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων», Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
- Δαλιακόπουλος Γ., 2003. Διπλωματική εργασία με θέμα «Ανάπτυξη Λογισμικού για την Πρόβλεψη της Στάθμης του υδροφόρου Ορίζοντα στην Πεδιάδα της Μεσσαράς», Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Δολαψάκης Β., Νταλακογιώργου Αντωνία, 2009. Διπλωματική εργασία με θέμα «Οριοθέτηση Πεδινής Κοίτης Γαζανού», ΣΤΕΦ.
- Μαμάσης Ν., 2007. Παρουσιάσεις στο μάθημα «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ.
- Μπούρα Β., 2010. Διπλωματική εργασία με θέμα «Προσδιορισμός Συστημάτων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων στην Κρήτη», ΕΜΠ.
- Τσουχνικά Μ., 2007. Διπλωματική εργασία με θέμα «Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Πηγές από το διαδύκτιο

- <http://www.cmu.edu/joss/content/articles/volume7/deMollMcFarland/>
- <http://www.cretanbeaches.com/p%CE%BFtamia/p%CE%BFtamia/geropotamos-messara/>
- <http://www.cretanbeaches.com/faraggia/faraggia-lasithi%CE%BFy/faraggi-havga-kalamafka/>
- http://www.discoveronfoot.com/pages/sub/67295/Gorges_of_Crete.html#Prassanos Gorge
- <http://www.explore-crete.gr/natural-enviroment/rivers/giofiros.html>
- http://itia.ntua.gr/nikos/adv_hydrology/modela09.pdf
- <http://osarena.net/logismiko/applications/neural-networks-ti-einai.html>
- http://sempronas.blogspot.gr/2011/11/blog-post_14.html
- <http://www.sunbed.gr/η-γεωγραφία-της-κρήτης-με-λίγα-λόγια/>