

## ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΡΑΓΔΑΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

**Νάστος Παναγιώτης<sup>1\*</sup>, Μουστρής Κωνσταντίνος<sup>2</sup>, Λαρίσση Ιωάννα<sup>3</sup>, Παλιατσός Αθανάσιος<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εργαστήριο Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστημιούπολη, 157 84 Αθήνα, Τηλ. 210 7274191, E-mail: [nastos@geol.uoa.gr](mailto:nastos@geol.uoa.gr)

<sup>2</sup>Καθηγητής Εφαρμογών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Τμήμα Μηχανολογίας, Π. Ράλλη και Θηβών 250, 122 44 Αιγάλεω, Τηλ. 210 538 1234, E-mail: [kmoustris@teipir.gr](mailto:kmoustris@teipir.gr)

<sup>3</sup>Εργαστηριακός Συνεργάτης, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Τμήμα Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων, Εργαστήριο Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Π. Ράλλη και Θηβών 250, 122 44 Αιγάλεω, Τηλ. 210 5381261, E-mail: [jklar@teipir.gr](mailto:jklar@teipir.gr)

<sup>4</sup>Καθηγητής, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Γενικό Τμήμα Μαθηματικών, Π. Ράλλη και Θηβών 250, 122 44 Αιγάλεω, Τηλ. 210 5381256, E-mail: [aqpal@in.teipir.gr](mailto:aqpal@in.teipir.gr)

### Περίληψη

Η πρόγνωση των ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων καθίσταται επιτακτική εξαιτίας των διαφαινόμενων κλιματικών αλλαγών και των πιθανών δυσμενών επιπτώσεων στον άνθρωπο. Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια δημιουργίας προγνωστικών μοντέλων για την πρόγνωση της ραγδαιότητας της βροχής στην Αθήνα, με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Συγκεκριμένα γίνεται πρόγνωση της μέσης, της μέγιστης και της ελάχιστης μηνιαίας ραγδαιότητας της βροχής για τέσσερις διαδοχικούς μήνες στην Αθήνα. Για την εκπαίδευση των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες τιμές ραγδαιότητας της βροχής που καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1899-2004.

Τα αποτελέσματα των ΤΝΔ, που δημιουργήθηκαν, δείχνουν ότι, τα ΤΝΔ μπορούν να δώσουν μια αρκετά αξιόπιστη πρόγνωση των παραπάνω μεγεθών. Οι προβλεπόμενες τιμές συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές ραγδαιότητας της βροχής, δείχνουν μια αρκετά ικανοποιητική συσχέτιση, σε επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας  $p < 0.01$ .

## FORECAST OF RAIN INTENSITY IN ATHENS, USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

**Nastos Panagiotis<sup>1\*</sup>, Moustris Konstantinos<sup>2</sup>, Larissi Ioanna<sup>3</sup>, Paliatsos Athanasios<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Associate Professor, University of Athens, Faculty of Geology & Geoenvironment, Laboratory of Climatology & atmospheric Environment, Panepistimiopolis, 157 84 Athens, Tel. 210 7274191, E-mail: [nastos@geol.uoa.gr](mailto:nastos@geol.uoa.gr)

<sup>2</sup>Professor of Technological Applications, Technological & Education Institute of Piraeus, Department of Mechanical Engineering, P. Ralli & Thivon 250, 122 44 Aigaleo, Tel. 210 538 1234, E-mail: [kmoustris@teipir.gr](mailto:kmoustris@teipir.gr)

<sup>3</sup>Laboratory Assistant, Technological & Education Institute of Piraeus, Department of Electronic Computer Systems, Laboratory of Environmental Technology, P. Ralli & Thivon 250, 122 44 Aigaleo, Tel. 210 5381261, E-mail: [jklar@teipir.gr](mailto:jklar@teipir.gr)

<sup>4</sup>Professor, Technological & Education Institute of Piraeus, Department of Mathematics, P. Ralli & Thivon 250, 122 44 Aigaleo, Tel. 210 5381256, E-mail: [aqpal@in.teipir.gr](mailto:aqpal@in.teipir.gr)

**Abstract**

The forecast of extreme meteorological phenomena is of great importance because of projected climate change and the possible adverse impacts on humans. In this paper, an effort to develop prognostic models for rain intensity in Athens, using Artificial Neural Networks (ANN), was made. More specifically, the forecast of mean, maximum and minimum rain intensity for four consecutive months in Athens was attempted. Regarding the ANNs' education, the monthly rain intensity values during the period 1899-2004 were used.

The results of the constructed ANNs showed that, the ANNs can give quite reliable prognosis of the aforementioned parameters. The projected values compared to the respective original rain intensity values showed a quite satisfactory correlation at the statistically significant level  $p < 0.01$ .

**Λέξεις κλειδιά:** Πρόγνωση, Ραγδαιότητα βροχής, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, Αθήνα

**Key words:** Prognosis, Rain Intensity, Artificial Neural Networks, Athens

**1. Εισαγωγή**

Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον για τα ακραία φαινόμενα, που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, όπως βροχοπτώσεις με έντονη ραγδαιότητα, που θα έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικά πλημμυρικά φαινόμενα. Γίνεται εύκολα αντιληπτή η επικινδυνότητα τέτοιων φαινομένων και κυρίως στις μεγάλες πυκνοκατοικημένες πόλεις. Για τους λόγους αυτούς, καθίσταται σημαντική η όποια προσπάθεια πρόγνωσης τέτοιων ακραίων φαινομένων βροχόπτωσης, με στόχο την προστασία του πληθυσμού αλλά και την αποφυγή καταστροφών, μεγάλης οικονομικής αξίας. Για το σκοπό αυτό, και σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια αρκετές μελέτες στον τομέα της πρόγνωσης της βροχόπτωσης.

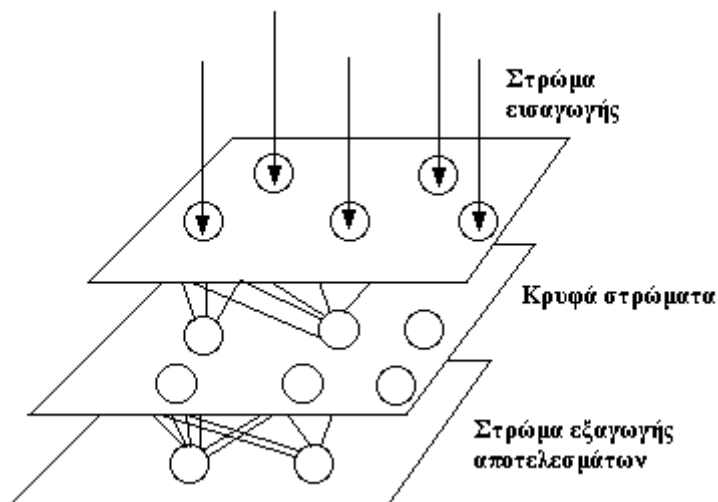
Οι Freinwan and Cigizoglu (2005) ανέπτυξαν ένα πλήθος διαφορετικών Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης, που εκπαιδεύτηκαν με τη μέθοδο της οπισθοδρομικής διάδοσης του λάθους ώστε να κάνουν πρόγνωση της βροχόπτωσης για τον επόμενο μήνα στην περιοχή του αεροδρομίου στο Αμάν της Ιορδανίας, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου, τη βροχόπτωση των δύο προηγούμενων μηνών και ένα συντελεστή περιοδικότητας για κάθε μήνα. Οι Chiang et al. (2007) χρησιμοποίησαν δεδομένα μετεωρολογικών ραντάρ και ανέπτυξαν ΤΝΔ ποσοτικής πρόβλεψης του υετού προς όφελος της επιχειρησιακής υδρολογίας, σε λεκάνες απορροής του ποταμού Keelung στην Ταϊβάν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ΤΝΔ μπορούν να δώσουν αξιόπιστες προγνώσεις της ποσότητας της βροχόπτωσης στην περιοχή, σε βάθος χρόνου μιας ώρας πριν την εκδήλωση της βροχής.

Ο Manzano (2007) ανέπτυξε ΤΝΔ πρόβλεψης της εμφάνισης και της έντασης καταιγίδων πάνω από την περιοχή Friuli Venezia Giulia στην Ιταλία, με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι Wardah et al. (2008) χρησιμοποίησαν μετεωρολογικά δορυφορικά δεδομένα και ΤΝΔ οπισθοδρομικής διάδοσης του λάθους, για την εκτίμηση των βροχοπτώσεων που προκαλούν τεράστιες καταστροφές και πλημμύρες στην λεκάνη απορροής Klang της Μαλαισίας. Οι Sokol and Bližňák (2009) ανέλυσαν δεδομένα περιπτώσεων ισχυρής βροχόπτωσης μικρής διάρκειας κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους, στην Τσεχία. Τέλος, οι Fenderico et al. (2009) παρουσίασαν τις πρώτες διερευνητικές αναλύσεις και σχετικά αποτελέσματα για τη βροχόπτωση στην περιοχή της χερσονήσου της Καλαβρίας της νότιας Ιταλίας, για τη χρονική περίοδο 1978-2007. Διαπιστώθηκε ότι παρά το γεγονός ότι η ετήσια βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη στη δυτική πλευρά της χερσονήσου, πιο έντονες βροχοπτώσεις πλήττουν κυρίως την ανατολική πλευρά, η οποία εκτίθεται θετικά σε έντονες και ισχυρές καταιγίδες.

**2. Δεδομένα και μεθοδολογία****2.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα**

Τα ΤΝΔ είναι ουσιαστικά μια προσπάθεια προσέγγισης και προσομοίωσης της λειτουργίας των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου μέσω μαθηματικών συναρτήσεων και αλγόριθμων. Η πρώτη αναφορά στα ΤΝΔ γίνεται παγκοσμίως στις δεκαετίες του 1940 και του 1950 με την εμφάνιση ταυτόχρονα του πρώτου βασικού μοντέλου τεχνητού νευρώνα (McCulloch και Pitts, 1943) και του πρώτου αλγόριθμου εκπαίδευσης των ΤΝΔ (Rosenblatt, 1958). Κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, η χρήση των ΤΝΔ εγκαταλείφθηκε εξαιτίας της ανάγκης υπολογιστικών συστημάτων μεγάλης ισχύος που απαιτούνταν για την ανάπτυξη και εκπαίδευση των ΤΝΔ, κάτι το οποίο δεν υπήρχε την εποχή εκείνη. Τα ΤΝΔ επανέρχονται ουσιαστικά ξανά στο προσκήνιο στη

δεκαετία 1980-1990, λόγω της εμφάνισης νέων πιο εξελιγμένων μοντέλων ΤΝΔ (Hopfield, 1982, 1987), ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα νέα αυτά μοντέλα ΤΝΔ είναι γνωστά ως ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης, τα οποία με την ταυτόχρονη ανάπτυξη του αλγόριθμου για την εκπαίδευσή τους, γνωστού ως αλγόριθμος της οπισθοδρόμησης του λάθους (Werbos, 1974), προσέλκυσαν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας ξανά. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική δομή των ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης.



Σχήμα 1. Αρχιτεκτονική δομή των ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης.

Αρχικά δημιουργείται ένα στρώμα εισαγωγής των δεδομένων εκπαίδευσης των ΤΝΔ, πάνω στο οποίο δημιουργούνται τόσο τεχνητοί νευρώνες, όσα και τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εκπαίδευση των ΤΝΔ. Ακολουθούν ένα ή και περισσότερα κρυφά στρώματα πάνω στα οποία δημιουργούνται οι κρυφοί τεχνητοί νευρώνες. Τέλος, ακολουθεί το στρώμα εξαγωγής των αποτελεσμάτων, πάνω στο οποίο δημιουργούνται τόσο τεχνητοί νευρώνες, όσες είναι και οι τιμές-στόχοι για τις οποίες εκπαιδεύεται το ΤΝΔ.

Γενικά τα ΤΝΔ ως προγνωστικά μοντέλα θεωρούνται καθολικοί προσεγγιστές και έχουν εφαρμογές σε ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών επιστημονικών πεδίων όπως η πρόγνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, των βιοκλιματικών συνθηκών που επικρατούν σε μια περιοχή, της ποιότητας του νερού, της πρόγνωσης της βροχόπτωσης, ανάλυσης του κλίματος και των κλιματικών αλλαγών κ.λ.π. (Melas et al. 2000, Papanastasiou et al. 2007, Sengorur et al. 2006, Freiwan and Cigizoglu 2005, Zwick and Canarelli 1996, Diamantopoulou et al. 2007, Moustris et al. 2009, Moustris et al. 2010).

## 2.2 Δεδομένα ραγδαιότητας της βροχής και περιοχή μελέτης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν μηνιαίες τιμές ραγδαιότητας της βροχής (mm/ημέρα), που έχουν καταγραφεί στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ), για τη χρονική περίοδο 1899-2004.

Αρχικά έγινε μια επεξεργασία των τιμών αυτών και υπολογίστηκε για κάθε μήνα του έτους, η μέση μηνιαία τιμή ραγδαιότητας. Επίσης, η συχνότητα εμφάνισης με τιμή ραγδαιότητας μεγαλύτερης ίσης των 14.4 mm/ημέρα, που είναι το άθροισμα της μέσης τιμής της ραγδαιότητας για όλη τη εξεταζόμενη περίοδο και της τυπικής της απόκλισης, για κάθε μήνα του έτους χωριστά, επί του συνόλου των 106 μηνών που αντιστοιχούν στη χρονική περίοδο 1899-2004. Ταυτόχρονα, και με βάση τη μέση μηνιαία τιμή ραγδαιότητας, δόθηκε σε κάθε μήνα του έτους ένα συντελεστής περιοδικότητας (Μουστρής κ. ά., 2009). Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Για την καλύτερη κατανόηση των στοιχείων του Πίνακα 1, η τιμή π.χ. 3.8% συχνότητας εμφάνισης για το μήνα Ιανουάριο με ραγδαιότητα βροχής τουλάχιστον 14.4 mm/ημέρα σημαίνει ότι από τους 106 Ιανουάριους που αντιστοιχούν στη χρονική περίοδο 1899-2004, το 3.8% από αυτούς εμφανίζει τιμές ραγδαιότητας της βροχής μεγαλύτερες από το άθροισμα της μέσης τιμής όλης της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου, συν την τυπική της απόκλιση κ.ο.κ.

Πίνακας 1. Στατιστικά δεδομένα ραγδαιότητας της βροχής στο σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, για την περίοδο 1899-2004.

Μήνας	Μέση τιμή ραγδαιότητας (mm/ημέρα)	Συχνότητα εμφάνισης με ραγδαιότητα $\geq 14.4$ mm/ημέρα (%)	Συντελεστής περιοδικότητας
Ιανουάριος	7.6	3.8	3
Φεβρουάριος	7.5	6.6	2
Μάρτιος	7.0	4.7	3
Απρίλιος	6.3	3.8	2
Μάιος	5.6	3.8	1
Ιούνιος	5.1	9.4	1
Ιούλιος	4.1	3.8	0
Αύγουστος	3.9	7.5	0
Σεπτέμβριος	6.0	10.4	2
Οκτώβριος	9.9	24.5	4
Νοέμβριος	10.2	17.9	4
Δεκέμβριος	9.7	16.0	4

Πίνακας 2. Δεδομένα εκπαίδευσης και αποτελέσματα πρόγνωσης των ΤΝΔ.

Δεδομένα εκπαίδευσης (input layer)	ΤΝΔ#1	ΤΝΔ#2	ΤΝΔ#3
Μέση μηνιαία ραγδαιότητα βροχής των προηγούμενων 4 μηνών (mm/ημέρα)	√	√	√
Τυπική απόκλιση της μέσης μηνιαίας ραγδαιότητας βροχής των προηγούμενων 4 μηνών (mm/ημέρα)	√	√	√
Το άθροισμα του συντελεστή περιοδικότητας των προηγούμενων 4 μηνών	√	√	√
Το άθροισμα της συχνότητας εμφάνισης με ραγδαιότητα βροχής μεγαλύτερης ή ίσης των 14 mm/ημέρα, των προηγούμενων 4 μηνών	√	√	√
Ελάχιστη μηνιαία ραγδαιότητα βροχής των προηγούμενων 4 μηνών (mm/ημέρα)	√	√	√
Μέγιστη μηνιαία ραγδαιότητα βροχής των προηγούμενων 4 μηνών (mm/ημέρα)	√	√	√
Το άθροισμα του συντελεστή περιοδικότητας των επόμενων 4 μηνών	√	√	√
Το άθροισμα της συχνότητας εμφάνισης με ραγδαιότητα βροχής μεγαλύτερης ή ίσης των 14 mm/ημέρα, των επόμενων 4 μηνών	√	√	√
<b>Αποτελέσματα πρόγνωσης (output layer)</b>			
Μέση μηνιαία ραγδαιότητα βροχής των επόμενων 4 μηνών (mm/ημέρα)	√		
Μέγιστη μηνιαία ραγδαιότητα βροχής των επόμενων 4 μηνών (mm/ημέρα)		√	
Ελάχιστη μηνιαία ραγδαιότητα βροχής των επόμενων 4 μηνών (mm/ημέρα)			√

### 2.3 ΤΝΔ πρόγνωσης ραγδαιότητας της βροχής

Στην εργασία αυτή δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά ΤΝΔ. Συγκεκριμένα, το ΤΝΔ#1, το οποίο προβλέπει τη μέση μηνιαία τιμή ραγδαιότητας της βροχής, για τους επόμενους τέσσερις μήνες, το ΤΝΔ#2, το οποίο κάνει πρόβλεψη της μέγιστης μηνιαίας τιμής ραγδαιότητας της βροχής, για τους

επόμενους τέσσερις μήνες και τέλος το ΤΝΔ#3 που κάνει πρόβλεψη της ελάχιστης μηνιαίας τιμής ραγδαιότητας της βροχής, για τους επόμενους τέσσερις μήνες.

Τα ΤΝΔ που αναπτύχθηκαν ανήκουν στην κατηγορία των ΤΝΔ πολυστρωματικής αντίληψης-νόησης. Αποτελούνται από το στρώμα εισαγωγής των δεδομένων (input layer) με 8 τεχνητούς νευρώνες, ένα κρυφό στρώμα (hidden layer) με 10 τεχνητούς νευρώνες και τέλος, το στρώμα εξαγωγής των αποτελεσμάτων (output layer) με 1 τεχνητό νευρώνα, την τιμή πρόγνωσης-στόχο. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα (Inputs) που χρησιμοποιήθηκαν για την «εκπαίδευση» των τριών ΤΝΔ, καθώς επίσης και η παραγόμενη-προβλεπόμενη (output) από το κάθε ένα ΤΝΔ τιμή.

## 2.4 Αξιολόγηση των ΤΝΔ-προγνωστικών μοντέλων

Για την εκπαίδευση των ΤΝΔ της πρόγνωσης της ραγδαιότητας, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των ετών 1899-2004 του ΕΑΑ, εκτός των ετών 1900, 1910, 1920, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 και 2000. Τα δεδομένα αυτών των έντεκα ετών «αφαιρέθηκαν» από τη χρονοσειρά εκπαίδευσης και ως άγνωστα δεδομένα, για τα «εκπαιδευμένα» πλέον ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της ικανότητάς τους στην πρόγνωση της ραγδαιότητας της βροχής.

Για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκαν τρεις στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας:

i) Η ρίζα του μέσου τετραγώνου των υπολοίπων (RMSE), που είναι ένα συχνά χρησιμοποιημένο μέτρο των διαφορών μεταξύ των τιμών που προβλέπονται από ένα προγνωστικό μοντέλο ή έναν εκτιμητή και των τιμών που παρατηρούνται πραγματικά για το μέγεθος που προβλέπεται ή που υπολογίζεται (σχέση (1)). Αυτές οι μεμονωμένες διαφορές καλούνται επίσης υπόλοιπα και το RMSE αθροίζει τις διαφορές αυτές. Χρησιμεύει σε ένα ενιαίο μέτρο που δείχνει την ικανότητα της πρόγνωσης. Επίσης, το RMSE έχει τις ίδιες μονάδες μέτρησης με το μέγεθος για το οποίο γίνεται πρόγνωση από το μοντέλο. Όσο μικρότερο είναι το RMSE, τόσο πιο κοντά στις πραγματικές τιμές είναι οι προβλεπόμενες από το προγνωστικό μοντέλο τιμές.

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ii) Ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ), που δίνει πληροφορίες για το πόσο λαμβάνεται υπόψη και υπολογίζεται από το προγνωστικό μοντέλο η παρατηρούμενη μεταβλητότητα των τιμών για τις οποίες γίνεται η πρόγνωση. Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος (σχέση (2)) και παίρνει τιμές μεταξύ του μηδέν και της μονάδας ( $0 \leq R^2 \leq 1$ ). Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του, τόσο καλύτερη και ακριβέστερη είναι η πρόγνωση του μοντέλου.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{i\text{ave}})^2} \quad (2)$$

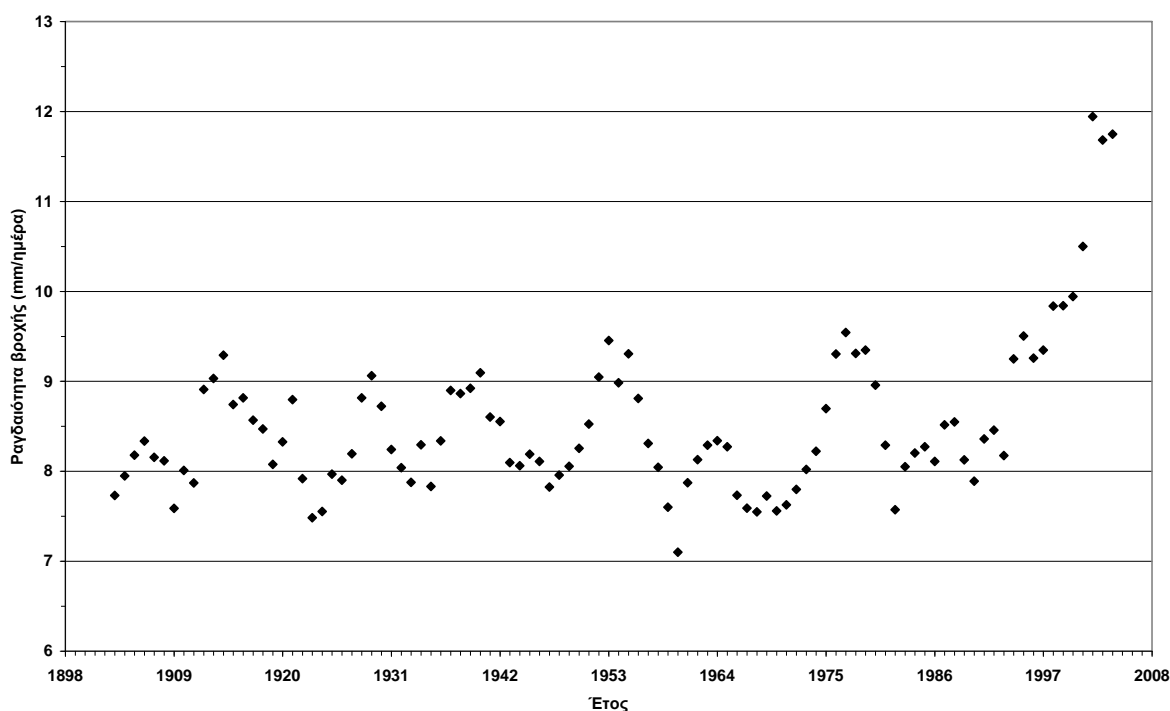
iii) Τέλος, ο δείκτης συμφωνίας (IA) είναι ένα αδιάστατο μέγεθος με τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας ( $0 \leq IA \leq 1$ ). Όταν  $IA=0$  δεν υπάρχει καμία απολύτως συμφωνία μεταξύ της πρόβλεψης και της παρατήρησης. Όταν  $IA=1$ , τότε έχουμε την τέλεια συμφωνία μεταξύ της πρόβλεψης και της παρατήρησης (σχέση (3)).

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_{i\text{ave}}| + |O_i - O_{i\text{ave}}|)^2} \quad (3)$$

Με  $P_i$  συμβολίζονται οι προβλεπόμενες τιμές της ραγδαιότητας της βροχής από τα ΤΝΔ και με  $O_i$  συμβολίζονται οι πραγματικές-παρατηρούμενες τιμές ραγδαιότητας της βροχής. Τέλος, με  $O_{i\text{ave}}$  συμβολίζεται ο μέσος όρος των πραγματικών τιμών του μεγέθους για το οποίο γίνεται η πρόγνωση, στην αντίστοιχη χρονική περίοδο που αναφέρεται η πρόγνωση αυτή.

### 3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Υπολογίσθηκαν για τη χρονική περίοδο 1899-2004 οι μέσες ετήσιες τιμές ραγδαιότητας (mm/ημέρα). Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι κυλιόμενοι μέσοι όροι 5-ετών της ραγδαιότητας της βροχής για το ΕΑΑ και για τη χρονική περίοδο 1899-2004.



Σχήμα 2. Κυλιόμενοι μέσοι όροι 5-ετών της ραγδαιότητας της βροχής για το ΕΑΑ κατά τη χρονική περίοδο 1899-2004.

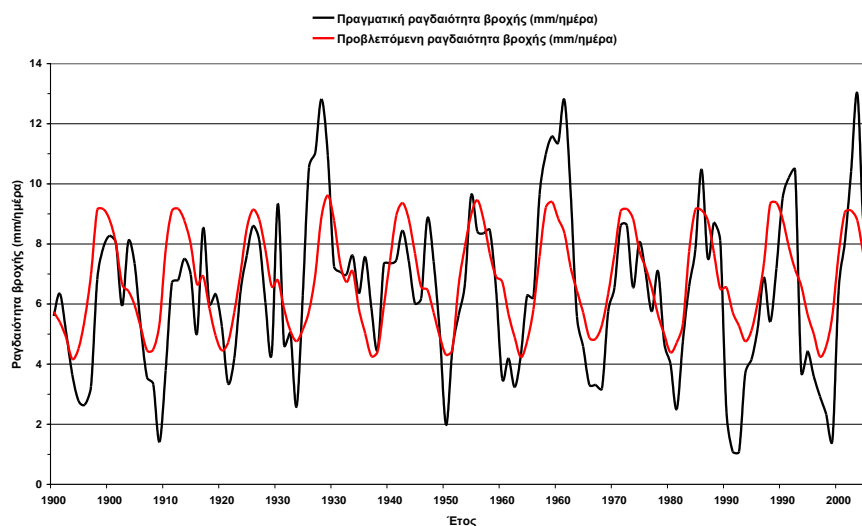
Σύμφωνα με το Σχήμα 2, φαίνεται ότι από τη δεκαετία του 1990 και μέχρι και το τέλος της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου, οι κυλιόμενοι μέσοι όροι 5-ετών της ραγδαιότητας της βροχής εμφανίζουν μια συνεχώς αυξανόμενη τάση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες η ετήσια ραγδαιότητα της βροχής στο σταθμό του ΕΑΑ αυξάνεται. Στη διαπίστωση αυτή μπορεί να αποδοθεί η εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων στην πόλη της Αθήνας (Tzavelas et al., 2010). Οι Koukis and Koutsoyannis (1997) αναφέρουν ότι τα πλημμυρικά φαινόμενα στην Αθήνα αποτελούν τον πιο σοβαρό παράγοντα υδρομετεωρολογικού κινδύνου από οποιαδήποτε περιοχή της Ελληνικής επικράτειας. Τουλάχιστον 179 ανθρώπινες ζωές έχουν χαθεί στην Αθήνα εξαιτίας πλημμυρικών φαινομένων. Ειδικότερα, οι μεγαλύτερες απώλειες ανθρώπινων ζώων κατεγράφησαν στις 14/11/1896 (61 θάνατοι), στις 5-6/11/1961 (40 θάνατοι) και στις 2/11/1977 (38 θάνατοι) (Νικολαΐδου και Χατζηχρίστου, 1995).

Στον Πίνακα 3, παρουσιάζονται οι τιμές των στατιστικών δεικτών αξιολόγησης της προγνωστικής ικανότητας των τριών ΤΝΔ-μοντέλων για την πρόγνωση της ραγδαιότητας της βροχής.

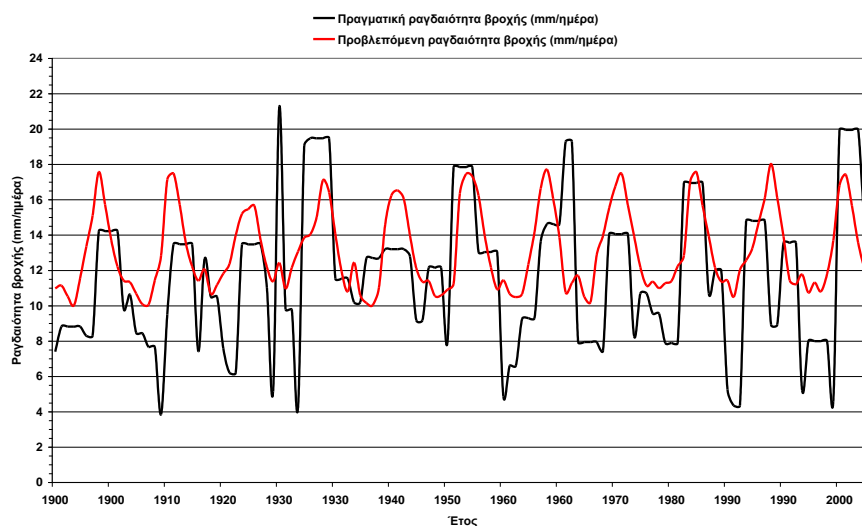
Πίνακας 3. Τιμές στατιστικών δεικτών αξιολόγησης της προγνωστικής ικανότητας των ΤΝΔ-μοντέλων πρόγνωσης ραγδαιότητας της βροχής.

	ΤΝΔ#1	ΤΝΔ#2	ΤΝΔ#3
<b>RMSE (mm/ημέρα)</b>	±1.9	±3.8	±1.6
<b>R<sup>2</sup></b>	0.48	0.25	0.55
<b>IA</b>	0.77	0.62	0.83

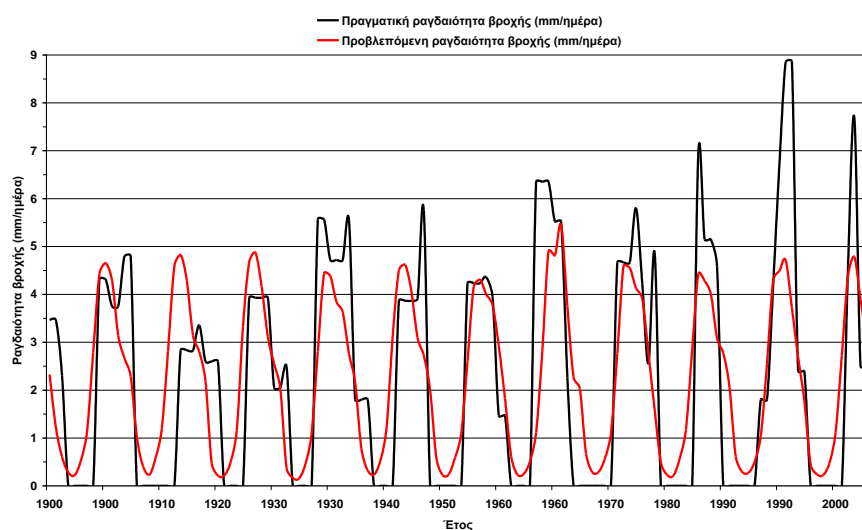
Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 3, διαπιστώνεται ότι γίνεται μια αρκετά ικανοποιητική πρόγνωση της μέσης, της μέγιστης και της ελάχιστης μέσης μηνιαίας ραγδαιότητας της βροχής, στην πόλη της Αθήνας, με τη χρήση των ΤΝΔ, για τους επόμενους 4 διαδοχικούς μήνες.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3. Προβλεπόμενες και πραγματικές-παρατηρούμενες τιμές ραγδαιότητας (mm/ημέρα) της βροχής στην Αθήνα για τους επόμενους τέσσερις διαδοχικούς μήνες. (α) Μέση μηνιαία ραγδαιότητα, (β) Μέγιστη μηνιαία ραγδαιότητα και (γ) Ελάχιστη μηνιαία ραγδαιότητα.

Στο Σχήμα 3, απεικονίζονται οι πραγματικές-παρατηρούμενες τιμές ραγδαιότητας (mm/ημέρα) της βροχής στην Αθήνα και οι προβλεπόμενες από τα ΤΝΔ τιμές της για: (α) για τη μέση μηνιαία, (β) τη μέγιστη μηνιαία και (γ) τη ελάχιστη μηνιαία ραγδαιότητα της βροχής για τους επόμενους τέσσερις διαδοχικούς μήνες, στο σταθμό του ΕΑΑ. Από το σχήμα αυτό διαπιστώνεται ότι η δυναμικότητα των ΤΝΔ ως προγνωστικών μοντέλων της ραγδαιότητας της βροχής, για τέσσερις διαδοχικούς μήνες, είναι αρκετά ικανοποιητική. Βέβαια, εμφανίζουν μια αδυναμία στην επιτυχή πρόβλεψη των αιχμών. Η αδυναμία αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτούνται και άλλες παράμετροι-στοιχεία εισόδου για την καλύτερη εκπαίδευση των ΤΝΔ. Επίσης, σε ότι αφορά κυρίως την πόλη της Αθήνας, τέτοιες αιχμές εμφανίζονται με μικρή σχετικά συχνότητα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το γεγονός των αιχμών δεν δημιουργεί μια σταθερή «εμπειρία» για την πόλη της Αθήνας, με αποτέλεσμα τα ΤΝΔ, που κατά κύριο λόγο εκπαιδεύονται για την απόκτηση εμπειρίας, να μην μπορούν να προβλέπουν με ακρίβεια τέτοιου είδους αιχμές. Το ίδιο ακριβώς έχει παρατηρηθεί και κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας των ΤΝΔ ως προγνωστικών μοντέλων της βροχόπτωσης, για τέσσερις διαδοχικούς μήνες, στην πόλη της Αθήνας (Μουστρής κ. ά., 2009).

#### 4. Συμπεράσματα

Στη μελέτη αυτή γίνεται μια προσπάθεια δημιουργίας προγνωστικών μοντέλων της ραγδαιότητας της βροχής, στην πόλη της Αθήνας, με ανάπτυξη και εφαρμογή των ΤΝΔ. Τα αποτελέσματα της πρόγνωσης των ΤΝΔ, για τη μέση μηνιαία, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της ραγδαιότητας της βροχής, για τους τέσσερις επόμενους διαδοχικούς μήνες, δείχνουν μια αρκετά ικανοποιητική ικανότητα πρόγνωσης, σε επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας  $p < 0.01$ .

Η περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα αντίστοιχων προγνωστικών μοντέλων καθίσταται σημαντική, με στόχο την προστασία του πληθυσμού από ακραία καιρικά φαινόμενα και ειδικότερα βροχοπτώσεις έντονης ραγδαιότητας, που μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά πλημμυρικά φαινόμενα. Φαίνεται δε ότι, στην προσπάθεια αυτή, τα ΤΝΔ με την κατάλληλη εκπαίδευση μπορούν να αποτελέσουν στο μέλλον ένα σημαντικό εργαλείο πρόγνωσης της ραγδαιότητας της βροχής.

#### Βιβλιογραφία

- Μουστρής, Κ. Π., Λαρίσση, Ι. Κ. και Παλιατσός, Α. Γ., 2009: *Πρόγνωση βροχόπτωσης για τέσσερις διαδοχικούς μήνες στην Αθήνα και την Αλεξανδρούπολη με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων*. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ), Θεσσαλονίκη, 67-74.
- Νικολαΐδου, Μ. Και Χατζηχρίστου, Ε., 1995: *Καταγραφή και Εκτίμηση των πλημμυρικών καταστροφών στην Ελλάδα και Κύπρο*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Chiang, Y.-M., Chang, F.-J., Jou, B. J.-D. and Lin, P.-F., 2007: Dynamic ANN for precipitation estimation and forecasting from radar observations. *Journal of Hydrology*, **334**, 250-261.
- Diamantopoulou, M. J., Georgiou, P. E. and Papamichail, D. M., 2007: Performance of neural network models with Kalman learning rule for flow routing in a river system. *Fresenius Environmental Bulletin*, **16**(11b), 1474-1484.
- Federico, S., Avolio, E., Pasqualoni, L., De Leo, L., Sempreviva, A.-M. and Bellecci, C., 2009: Preliminary results of a 30-year daily rainfall data base in southern Italy. *Atmospheric Research*, **94**, 641–651.
- Freiwan, M. and Cigizoglu, H. K., 2005: Prediction of total monthly rainfall in Jordan using feed forward backpropagation method. *Fresenius Environmental Bulletin*, **14**(20), 142-151.
- Hopfield, J. J., 1982: *Neural networks and physical systems with emergent collective computational properties*. Proceedings of National Academy of Sciences (USA), **79**, 2554-2558.
- Hopfield, J. J., 1987: *Learning algorithms and probability distributions in feed-forward and feed-back networks*. Proceedings of National Academy of Sciences (USA), **84**, 8429-8433.
- Koukis, G. C. and Koutsoyiannis, D., 1997: *Geomorphological hazards in Europe*. In: C. & C. Embleton (eds), Elsevier, Amsterdam, 215-241.
- Manzato, A., 2007: Sounding-derived indices for neural network based short-term thunderstorm and rainfall forecasts. *Atmospheric Research*, **83**, 349–365.
- McCulloch, W. and Pitts, W., 1943: A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, **5**, 33-115.



- Melas, D., Kioutsoukis, I. and Ziomas, I., 2000: Neural network model for predicting peak photochemical pollutant levels. *Journal of Air and Waste Management Association*, **50**, 495-501.
- Moustris, K. P., Tsiros, I. X., Ziomas, I. C. and Paliatsos, A. G., 2010: Artificial neural network models as a useful tool to forecast human thermal comfort using microclimatic and bioclimatic data in the great Athens area (Greece). *Journal of Environmental Science and Health Part A*, **45** (in press).
- Moustris, K., Ziomas, I. C. and Paliatsos, A. G., 2009: 3-days ahead forecasting of regional pollution index for the pollutants NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> using artificial neural networks in Athens, Greece. *Water, Air & Soil Pollution* (DOI: 10.1007/s11270-009-0179-5).
- Papanastasiou, D. K., Melas, D. and Kioutsoukis, I., 2007: Development and Assessment of Neural Network and Multiple Regression Models in Order to Predict PM10 Levels in a Medium-sized Mediterranean City. *Water Air Soil Pollution*, **182**, 325-334.
- Rosenblatt, F., 1958: The Perceptron: A Probabilistic model for information storage and organization in the brain. Cornell Aeronautical Laboratory. *Psychological Review*, **65** (6), 386-408.
- Şengörür, B., Dogan, E., Koklu, R. and Samandar, A., 2006: Dissolved oxygen estimation using artificial neural network for water quality control. *Fresenius Environmental Bulletin*, **15**(9), 1064-1067.
- Sokol, Z. and Bližňák, V., 2009: Areal distribution and precipitation–altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year. *Atmospheric Research*, **94**, 652–662.
- Tzavelas, G., Paliatsos, A.G. and Nastos, P.T., 2010: Models for the exceedances of high thresholds over the precipitation daily totals in Athens, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 105-108.
- Wardah, T., Abu Bakar, S. H., Bardossy, A. and Maznorizan, M., 2008: Use of geostationary meteorological satellite images in convective rain estimation for flash-flood forecasting. *Journal of Hydrology*, **356**, 283– 298.
- Werbos, P., 1974: *Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis on the Behavior Sciences*. Ph.D. Thesis, Harvard University.
- Zwick, A. and Canarelli, P., 1996: Climate sensitivity analysis using neural networks. *Fresenius Environmental Bulletin*, **5**,(11-12), 700-705.