

**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ - ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΛΑΜΠΡΙΝΗ Π. ΨΑΡΡΗ**

**Φυσικός**

***Ο τοπικός άνεμος της Θεσσαλονίκης, Βαρδάρης***

*Μια προσέγγιση του προβλήματος με κλασσικές μεθόδους και με τη χρήση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.*



**ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**Ειδίκευση Μετεωρολογία – Κλιματολογία**

---

**Νοέμβριος 2005, Θεσσαλονίκη**

### **Τριμελής Συμβουλευτική και Εξεταστική Επιτροπή**

1. Αγγελική Αρσένη-Παπαδημητρίου, Καθηγήτρια Τμήματος Γεωλογίας, Α.Π.Θ.  
(Επιβλέπουσα)
2. Παναγιώτης Μαχαίρας, Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
3. Θεόφιλος Παπαδημητρίου, Λέκτορας Τμήματος Διεθνών Οικονομικών Σχέσεων και Ανάπτυξης, Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	4
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>6</b>
1.1 <i>Ο ΒΑΡΔΑΡΗΣ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ .....</i>	6
1.2 <i>Η ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ .....</i>	7
1.3 <i>ΤΟΠΙΚΟΙ ΑΝΕΜΟΙ .....</i>	10
1.4 <i>ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ .....</i>	11
<b>2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ .....</b>	<b>15</b>
2.1 <i>ΜΕΘΟΔΟΣ-ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....</i>	16
2.2 <i>ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΗΜΕΡΩΝ ΒΑΡΔΑΡΗ ΣΤΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ</i> <i>ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ .....</i>	16
2.3 <i>ΕΠΟΧΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΜΕΡΩΝ ΒΑΡΔΑΡΗ .....</i>	25
2.4 <i>Η ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΒΑΡΔΑΡΗ .....</i>	28
2.5 <i>ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΒΑΡΔΑΡΗ .....</i>	31
2.5.1 <i>ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ .....</i>	31
2.5.2 <i>ΜΕΣΕΣ ΩΡΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ</i> <i>ΒΑΡΔΑΡΗ .....</i>	32
2.5.3 <i>ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ</i> <i>ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΒΑΡΔΑΡΗ.....</i>	34
2.5.4 <i>ΜΗΝΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ</i> <i>ΑΝΕΜΟΥ ΒΑΡΔΑΡΗ .....</i>	35
2.5.5 <i>ΠΟΡΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΕΤΗΣΙΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΤΑ-</i> <i>ΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΒΑΡΔΑΡΗ .....</i>	36
2.5.6 <i>ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΗΜΕΡΩΝ ΒΑΡΔΑΡΗ ΑΝΑ ΕΤΟΣ</i>	39
2.5.7 <i>ΠΟΡΕΙΑ ΤΩΝ ΑΚΡΑΙΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΤΟΥ</i> <i>ΑΝΕΜΟΥ ΒΑΡΔΑΡΗ .....</i>	40
2.6 <i>ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΙΣ ΗΜΕΡΕΣ ΒΑΡΔΑΡΗ.</i>	42
2.6.1 <i>ΧΕΙΜΩΝΑΣ .....</i>	42
2.6.2 <i>ΑΝΟΙΞΗ .....</i>	45
2.6.3 <i>ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ .....</i>	47
2.6.4 <i>ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ .....</i>	49

2.7	<i>ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΙΣ ΗΜΕΡΕΣ ΒΑΡΔΑΡΗ</i> .....	51
2.8	<i>ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΤΙΜΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΙΣ ΗΜΕΡΕΣ ΒΑΡΔΑΡΗ</i> .....	54
2.9	<i>ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΒΑΡΔΑΡΗ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΩΝ</i> .....	56
2.9.1	<i>ΧΕΙΜΩΝΑΣ</i> .....	56
2.9.2	<i>ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ</i> .....	60
<b>3</b>	<b>ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΒΑΡΔΑΡΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ</b> .....	<b>66</b>
3.1	<i>ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ</i> .....	66
3.1.1	<i>ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ</i> .....	68
3.1.2	<i>Ο ΝΕΥΡΩΝΑΣ</i> .....	70
3.1.3	<i>Η ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΕΝΟΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ</i> .....	74
3.1.4	<i>Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΛΑΘΟΥΣ</i> .....	75
3.1.5	<i>ΥΠΕΡΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ</i> .....	79
3.2	<i>ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</i> .....	83
3.3	<i>ΔΟΚΙΜΕΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ</i> .....	88
3.4	<i>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ</i> .....	90
3.4.1	<i>ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΠΕΝΤΕ ΝΕΥΡΩΝΕΣ ΣΤΟ ΚΡΥΦΟ ΣΤΡΩΜΑ</i> ....	90
3.4.1.1	<i>ΠΑΡΕΛΘΟΝ ΜΙΑΣ ΗΜΕΡΑΣ</i> .....	91
3.4.1.2	<i>ΠΑΡΕΛΘΟΝ ΔΥΟ ΗΜΕΡΩΝ</i> .....	93
3.4.1.3	<i>ΠΑΡΕΛΘΟΝ ΤΡΙΩΝ ΗΜΕΡΩΝ</i> .....	94
3.4.1.4	<i>ΠΑΡΕΛΘΟΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΗΜΕΡΩΝ</i> .....	95
3.4.2	<i>ΥΠΕΡΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ</i> .....	96
<b>4</b>	<b>ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>98</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>104</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης, εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με ειδίκευση στη Μετεωρολογία-Κλιματολογία.

**Στόχος** της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη του τοπικού ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η γνώση και η εξερεύνηση των ιδιαίτερων μετεωρολογικών φαινομένων τοπικού χαρακτήρα αποτελεί πολύτιμο στοιχείο για την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη της ίδιας της περιοχής. Ένας τοπικός άνεμος, όπως αυτός της Θεσσαλονίκης έχει τις αρνητικές αλλά και τις θετικές του επιδράσεις. Ο Βαρδάρης μπορεί να πνέει με ταχύτητες που φθάνουν τη βαθμίδα της θύελλας προκαλώντας τεράστιες ζημιές σε δεντροφυτείες και καλλιέργειες. Ωστόσο, η συμβολή του στην εξυγίανση της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης είναι ουσιαστική και ορατή, διότι συνδυάζεται με μια φωτεινότητα του ουρανού και μια διαύγεια της ατμόσφαιρας, που πραγματικά σπανίζουν τη σημερινή εποχή σε πολλές μεγαλουπόλεις.

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται γενικά στοιχεία που σχετίζονται με τον άνεμο Βαρδάρη. Περιγράφεται η γεωγραφία της περιοχής μελέτης και γίνεται μια εισαγωγική αναφορά στους τοπικούς ανέμους. Επιπλέον, αναφέρονται προηγούμενες μελέτες του παρελθόντος με θέμα τον άνεμο Βαρδάρη και καταγράφονται τα πορίσματα των ερευνών αυτών.

Το **δεύτερο κεφάλαιο**, έχει ως κύριο θέμα τη στατιστική μελέτη του ανέμου Βαρδάρη για τις περιόδους 1961-1986 και 1996-2002. Με στόχο τον προσδιορισμό των συνοπτικών καταστάσεων που σχετίζονται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης έγινε η κατανομή των ημερών Βαρδάρη στους τύπους κυκλοφορίας (Maheras et al., 2000). Εξετάστηκε η εποχική και η μηνιαία κατανομή των ημερών αυτών καθώς και η διάρκεια των επεισοδίων τους. Μελετήθηκαν στατιστικά οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου όπως επίσης και οι τιμές της θερμοκρασίας αέρα και της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη.

Στο  **τρίτο κεφάλαιο**, μελετάται η ακρίβεια με την οποία ένα νευρωνικό δίκτυο που τροφοδοτείται με ωριαία μετεωρολογικά στοιχεία προηγούμενων ημερών μπορεί να προβλέψει την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, προς τούτο, είναι η διεύθυνση και η ένταση του ανέμου, η

θερμοκρασία αέρα και η σχετική υγρασία για τα διαστήματα 1982-1986 και 1996-2002.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο, γίνεται η σύνοψη των όσων πραγματοποιήθηκαν στη διατριβή αυτή και δίνονται τα γενικότερα συμπεράσματα.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους, που η συμβολή τους για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας υπήρξε πολύτιμη.

Αρχικά, ευχαριστώ την Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας, Α.Π.Θ., κ. Αγγελική Αρσένη-Παπαδημητρίου, για την ανάθεση του θέματος, τις πολύτιμες υποδείξεις της, τη συνεχή καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας, Α.Π.Θ., κ. Παναγιώτη Μαχαίρα, μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για το αμέριστο ενδιαφέρον που έδειξε, τις εύστοχες υποδείξεις του και την ιδιαίτερη βοήθεια που μου προσέφερε, επιτρέποντας μου τη χρήση του ημερολογίου αυτόματων τύπων κυκλοφορίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τομέα Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας του Α.Π.Θ., για τη συμβολή τους στην επιστημονική μου κατάρτιση, μεταδίδοντάς μου τις γνώσεις τους, τόσο κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, όσο και κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διατριβής μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο Λέκτορα του τμήματος Διεθνών Οικονομικών Σχέσεων και Ανάπτυξης, Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, κ. Θεόφιλο Παπαδημητρίου, μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εντρυφήσω σε ένα σχετικά καινούριο, σύγχρονο επιστημονικό κλάδο, αυτό των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Η φιλότιμη προσπάθειά του να μου μεταδώσει τις γνώσεις του και οι σημαντικές συμβουλές του, υπήρξαν θεμελιώδεις, για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Δε θα ήθελα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του τμήματος Πληροφορικής, Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, κ. Κώστα Διαμαντάρα, για τη βοήθεια που μου προσέφερε όποτε εγώ την χρειάστηκα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου τόσο για την ηθική τους συμπαράσταση και κατανόηση, όσο και για την υλική υποστήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1*

## *1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

---

### *1.1 Ο Βαρδάρης στην ιστορία*

Ο Αξίος, ο επονομαζόμενος Βαρδάρης, όπως αναφέρεται ο ποταμός από τα μεσαιωνικά χρόνια και μετά, μαζί με τον ανατολικό γείτονα του, το Στρυμόνα, αποτελούν τα μοναδικά ανοίγματα του Ελληνικού γεωγραφικού χώρου προς το βορρά. Όσον αφορά στην ονομασία του ποταμού αυτού έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς ποικίλες ιστορικές απόψεις.

Ο Φ. Κουκουλές ερμήνευσε την ετυμολογία του ονόματος από τα βαρδάρια «τα από κοφινίδος συγκρατούμενα ξύλα και στην μυλόπετρα ακουμβώντα» προσθέτοντας ότι ο Βαρδάρης ονομάστηκε έτσι ως θορυβώδης, ως κροτών δίκην βαρδαρίου. Επίσης από το επιφώνημα βάρδα, το οποίο εκφωνούνταν για να χαρακτηρίσει το ορμητικά κινούμενο και απειλητικό να παρασύρει ότι συναντήσει στην πορεία του (Αφιέρωμα στο Γ. Χατζιδάκη, 1921, σ. 37).

Ο *Tafel* (1837, De Bardaris et de gent Bardariotarum, Rhein. Museum, Vol.5, p.187) σχετίζει το όνομα του ποταμού με τα γνωστά βυζαντινά ονόματα Βαρδάριος, Βάρδας και Βαρδάνης. Κατά τον *K. Αμαντο* (1923, Λεξικογραφικό αρχείο της Μέσης και Νέας Ελληνικής, τ.6, σ.102) το όνομα Βαρδάριος και Βεριδάρης προέρχονται από τη λατινική λέξη *Veredarius* που σημαίνει ταχυδρομικός, ταχύς, ενώ στο Βυζάντιο χρησιμοποιούνταν συχνά ο χαρακτηρισμός, βεριδάριος ως τιμητικό αξίωμα.

Σήμερα, η επικρατούσα άποψη είναι ότι την ονομασία αυτή την οφείλει στο γεγονός ότι κατά την εποχή του Βυζαντίου είχαν εγκατασταθεί στην περιοχή γύρω από τον ποταμό Βαρδαριώτες, που ήρθαν από την Περσία και αφομοιώθηκαν σταδιακά στο ελληνικό στοιχείο. Δια μέσου των περασμάτων του ποταμού πραγματοποιούνταν οι μεταναστεύσεις των λαών κατά μήκος της Βαλκανικής χερσονήσου.

Ο Αξιός αποτελεί διαχωριστική γραμμή στη γεωγραφία της Μακεδονίας, που ενώ διευκολύνει τις μετακινήσεις μεταξύ Βορρά και Νότου, τις δυσχεραίνει μεταξύ Ανατολής και Δύσης. Κατά τη Ρωμαϊκή κατοχή, όταν διαμελίστηκε η Μακεδονία σε τέσσερις Μερίδες, ο Αξιός διαχώριζε την Πρώτη και Δεύτερη Μερίδα στα ανατολικά, από την Τρίτη και την Τέταρτη στα δυτικά. Αποτέλεσε θέατρο σημαντικών και αποφασιστικών μαχών κατά το Α' Παγκόσμιο πόλεμο μεταξύ των Συμμάχων και των Βουλγάρων, με σημαντικότερη την Μάχη του Αξιού, το Μάιο του 1917.

## **1.2 Η γεωγραφία της περιοχής**

Η Ελλάδα στο σύνολό της εμφανίζει τα χαρακτηριστικά του κλίματος μεσογειακού τύπου, ξηρό θερμό καλοκαίρι και ήπιο βροχερό χειμώνα. Το έντονο και πολύμορφο ανάγλυφο ωστόσο, επηρεάζει σημαντικά την ένταση με την οποία εκδηλώνονται τα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα και αποτελεί σημαντικό συντελεστή διαμόρφωσης του κλίματός της. Ειδικότερα, το τοπογραφικό μέρος του παράγοντα «γεωγραφία» της περιοχής, με τον πολυσχιδή και πολύπλοκο διαμελισμό-οριζόντιο και κατακόρυφο, συντελεί στη διαμόρφωση μωσαϊκού κλιμάτων πάνω από την ελληνική περιοχή.



Ο Αξιός ονομαζόμενος και Βαρδάρης από τα Βυζαντινά χρόνια είναι ο μεγαλύτερος ποταμός της Μακεδονίας. Πηγάζει από το όρος Σαρ που βρίσκεται στα σύνορα μεταξύ της Αλβανίας, της Σερβίας και της Πρώην Γιουγκοσλαβικής Δημοκρατίας της Μακεδονίας. Ο ποταμός διαγράφει μεγάλο τόξο στην ορεινή Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας, την οποία και διχотоμεί. Στην περιοχή εναλλάσσονται υψώματα (Κόραμπ 2.764m, Πέλιστερ 2.600m) με μεγάλες κοιλάδες, όπου διαπερνά ο ποταμός Βαρδάρης.



**Σχήμα 1.1:** Η γεωγραφία της περιοχής μελέτης.  
(www.travelpost.com)



**Σχήμα 1.2:** Η διαδρομή του Αξιού ποταμού.  
(www.meteogiornale.it)



**Σχήμα 1.3:** Περιοχές υψωμάτων όπου διαπερνά ο ποταμός Αξιός.  
(www.vindafjord.kommune.no)

Στο Ελληνικό έδαφος εισέρχεται δια της μικρής πεδιάδας (Γευγελής), μήκους 4-5 χιλιομέτρων με υψόμετρα 50-70 m. Στη συνέχεια της πορείας του ο ποταμός εισέρχεται στα στενά Τσιγγάν, μήκους δέκα περίπου χιλιομέτρων, εκατέρωθεν των οποίων οι ισοϋψείς καμπύλες των 100 και 200 m βρίσκονται εγγύτατα. Από τα στενά Τσιγγάν εισέρχεται ο ποταμός στην πεδιάδα της Καμπανίας την οποία διαρρέει σε όλο το μήκος αυτής προς την ανατολική πλευρά, ενώ συνεχή αναχώματα προστατεύουν την πεδιάδα, της οποίας τα υψόμετρα είναι ίσα ή και μικρότερα της στάθμης του ποταμού. Καθώς ρέει ανάμεσα στην Αξιούπολη και το Πολύκαστρο, συνεχίζει νοτιότερα προς την περιοχή του Ευρωπού. Σήμερα τα νερά του ποταμού αυτού, αφού διανύσουν απόσταση μεγαλύτερη των 300 χιλιομέτρων, χύνονται στο Θερμαϊκό Κόλπο.

Η γενική μορφή της εξεταζόμενης περιοχής στον ελληνικό χώρο παρουσιάζει δύο σειρές ορεινών όγκων εκατέρωθεν και παράλληλα του Αξιού ποταμού. Από τους δυο ορεινούς όγκους, ο δυτικός είναι πιο ψηλός, πιο ογκώδης, πλούσιος σε νερό και βλάστηση. Αποτελείται στα βόρεια από το συγκρότημα της Τζένας (2183 m) - Πάικου (1430 m) και συνεχίζεται μέχρι τη θάλασσα με τη διαδοχή των εξής ορέων: του Βόρα (2525 m), του Βέρμιου (1900 m), των Πιέριων Ορέων (1878 m) και του Ολύμπου (2896 m). Η εδαφική έκταση, ανατολικά του Αξιού παρουσιάζει πιο ομαλό ανάγλυφο σε σχέση με τη δυτική πλευρά. Είναι η περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στους ποταμούς Γαλλικό και Αξιό και τα υψώματα που βρίσκονται ανατολικά του Κιλκίς (Κρούσια 1060 m), των μεταξύ Θεσσαλονίκης και Λαγκαδά ορεινών εξάρσεων (Κούριο 789 m) και νοτιότερα του Χορτιάτη (1199 m). Η ιστορική, γεωγραφική και κλιματική αξία της Κοιλιάδας του Αξιού υπήρξε μέγιστη και απασχόλησε πολλούς συγγραφείς.

Ο άνεμος Βαρδάρης, που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής ειδίκευσης, αρχικά δημιουργείται κατά μήκος του ποταμού Αξιού, στο κράτος της Π.Γ.Δ.Μ. Στη συνέχεια, ενισχυμένος, εισβάλλει στην Ελληνική Κεντρική Μακεδονία διαμέσου της κορυφογραμμής Πάικου και Κερκίνης και ακολουθώντας το αυλάκι του Αξιού παρουσιάζεται στη Σίνδο και Θεσσαλονίκη ως βόρειος ή βορειοδυτικός άνεμος. Διαχέεται ανάλογα με την ορμητικότητα και τη διάρκειά του προς τα δυτικά, μέχρι τις εκβολές του Αλιάκμονα ενίοτε έως το Ελευθεροχώρι, όσο και πολύ περισσότερο προς τ' ανατολικά, προσβάλλοντας την περιοχή του Κιλκίς, τις πεδιάδες Λαγκαδά και Σέδες και ολόκληρη τη βόρεια Χαλκιδική .

### 1.3 Τοπικοί άνεμοι

Η τοπογραφική διαμόρφωση διαφόρων περιοχών της γης σε συνδυασμό με συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες δημιουργεί ανέμους μικρής κλίμακας, που είναι γνωστοί ως «τοπικοί άνεμοι». Η ονομασία των ανέμων αυτών τις περισσότερες φορές σχετίζεται με τη γεωγραφική περιοχή εμφάνισής τους.

Στην διεθνή βιβλιογραφία, οι τοπικοί άνεμοι κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

Η 1η κατηγορία περιλαμβάνει ανέμους που δημιουργούνται στη διάρκεια του 24ώρου, εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας που παρατηρείται ανάμεσα στη ξηρά και στη θάλασσα, τόσο κατά την ημέρα (θαλάσσια αύρα) όσο και κατά τη νύχτα (απόγειος αύρα), ή ανάμεσα σε πεδινές και ορεινές περιοχές (αύρα κοιλάδας ή άνεμος αναβατός και αύρα βουνού ή άνεμος καταβατός).

Στη 2<sup>η</sup> κατηγορία κατατάσσονται οι άνεμοι οι οποίοι δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση μιας ροής συνοπτικής κλίμακας με την ορειογραφία της περιοχής. Όταν ένα ισχυρό και βαθύ ρεύμα συναντήσει κατά την κίνησή του ορειογραφικό εμπόδιο, τότε στην προσήνεμη πλευρά ο αέρας είναι πλούσιος σε υδρατμούς, ανερχόμενος - ψύχεται αδιαβατικά και δημιουργούνται τα ορογραφικά νέφη με μεγάλα ποσά υετού. Αντίθετα στην υπήνεμη πλευρά του βουνού, ο αέρας κατερχόμενος θερμαίνεται αδιαβατικά με ρυθμό περίπου διπλάσιο από τον αντίστοιχο της ψύξης κατά την ανάβασή του, κι ο αέρας φθάνει στα χαμηλότερα στρώματα ως πολύ θερμός και πολύ ξηρός. Ο άνεμος που δημιουργείται στην υπήνεμη πλευρά του ορεινού φραγμού, γνωστός στην Ελλάδα ως Λίβας ή Μέγας, μεταφέρει την αέρια μάζα στην επιφάνεια ιδιαίτερα θερμή αλλά κυρίως ξηρή. Στην διεθνή βιβλιογραφία, οι άνεμοι τέτοιου τύπου είναι γνωστοί ως «άνεμοι τύπου Foehn» στις Άλπεις, «Chinook» στα Βραχώδη όρη των Η.Π.Α., Ljuka στη ΒΔ Γιουγκοσλαβία, «zonda» στην Αργεντινή κ.ο.κ. Το αποτέλεσμα Foehn παρατηρείται επίσης και στους ανέμους που πνέουν κατά μήκος του κύριου άξονα μιας εκτεταμένης κοιλάδας. Ο άνεμος επιταχύνεται όταν εξαναγκάζεται να περάσει από μια κοιλάδα δημιουργώντας ένα ρεύμα αέρα μεγάλης ταχύτητας. Ο μηχανισμός αυτός πραγματοποιείται κατά την εμφάνιση του ανέμου Βαρδάρη κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού, τη μελέτη του οποίου πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Άνεμος της ίδιας

κατηγορίας είναι ο Mistral που πνέει κατά μήκος της κοιλάδας του Ροδανού, ο Bora της Αδριατικής, ο Kossava στην Κεντρική Γιουγκοσλαβία.

Η 3<sup>η</sup> κατηγορία περιλαμβάνει ανέμους που δημιουργούνται από συνοπτικά κυρίως αίτια κι εμφανίζουν έντονο εποχιακό χαρακτήρα. Οι «Ετησίες», σταθεροί άνεμοι αυτής της κατηγορίας, με ΒΑ-ΒΔ διεύθυνση, πνέουν στην Ανατολική λεκάνη της Μεσογείου και κυρίως στο Αιγαίο, από το Μάιο έως τα μέσα Οκτωβρίου. Η ύπαρξη των ανέμων αυτών, από τη μελέτη ιστορικών γεγονότων αποδεικνύει τη σταθερότητα του κλίματος της Ελλάδος από τους Αρχαίους χρόνους μέχρι σήμερα.

### **1.4 Προηγούμενες Μελέτες**

Οι τοπικοί ισχυροί άνεμοι βορείου τομέα, που πνέουν στην περιοχή της Θεσσαλονίκης κατά τη διάρκεια όλου του έτους, είναι κοινώς γνωστοί με την ονομασία «Βαρδάρης».

Ο άνεμος Βαρδάρης για την ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς επηρεάζει τόσο τον άνθρωπο όσο και το περιβάλλον γύρω του με θετικές ή αρνητικές συνέπειες. Ωστόσο οι μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν είναι λίγες κι αυτό γιατί λόγω της έντονης ρευστότητας του ατμοσφαιρικού αέρα είναι δύσκολη η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων διεύθυνσης - έντασης ανέμου, και απαιτούνται ακριβή όργανα μέτρησης στα οποία πρέπει να επιτελείται συνεχής έλεγχος.

Ο Μαχαίρας (1982) στη Μονογραφία «Συνοπτικές Καταστάσεις και Πολυδιάστατη Ανάλυση του Καιρού στη Θεσσαλονίκη» κατατάσσει τους συνοπτικούς τύπους καιρού με βάση την ανάλυση των συνθηκών της κυκλοφορίας στην κατώτερη και στη μέση τροπόσφαιρα πάνω από τη Μεσόγειο και τη Νότια Ευρώπη. Από την κατάταξη αυτή, προέκυψαν πέντε αντικυκλωνικοί (A1, A2, A3, A4, A5), έξι υφεσιακοί (W1, W2, NW1, NW2, SW1, SW2), δύο μικτοί (Mt1, Mt2) και τρεις χαρακτηριστικοί (Dsec, Mb, Dor) τύποι κυκλοφορίας. Ο πρώτος μικτός τύπος καιρού (Mt1) χαρακτηρίζει μια κατάσταση που επικρατεί όταν πνέει στην περιοχή της Θεσσαλονίκης ο άνεμος Βαρδάρης. Κατά τη συνοπτική αυτή κατάσταση, η Ελλάδα βρίσκεται υπό την επίδραση ενός ηπειρωτικού αντικυκλώνα στα δυτικά και των χαμηλών πιέσεων που επεκτείνονται

από τη Μαύρη Θάλασσα μέχρι τη Μεσόγειο στα ανατολικά. Η φορά των ισοβαρών στην επιφάνεια είναι καθαρά μεσημβρινή, με αποτέλεσμα να ευνοείται ο καναλισμός των αερίων μαζών κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού. Από τον καναλισμό αυτό δημιουργείται καταβατικός άνεμος τύπου Mistral με κατεύθυνση βόρεια-βορειοδυτική και μεγάλη ένταση.

Ο πρώτος μικτός τύπος κυκλοφορίας χαρακτηρίζει μια ενδιάμεση κατάσταση ανάμεσα σε έναν αντικυκλωνικό τύπο και έναν υφεσιακό W1 ή NW2, γι' αυτό και τις περισσότερες φορές η διάρκειά του είναι πολύ περιορισμένη. Για να εμφανιστεί θα πρέπει η ύφεση που απομακρύνεται προς τα ανατολικά να παρουσιάζει ένα στάσιμο χαρακτήρα πάνω από τη Μαύρη Θάλασσα. Αυτό συμβαίνει πιο συχνά κατά τη θερμή περίοδο όπου η συχνότητα εμφάνισης Mt1 είναι η υψηλότερη την εποχή αυτή.

Οι τύποι κυκλοφορίας Mt1 της ψυχρής περιόδου έχουν μικρότερη διάρκεια από εκείνους της θερμής. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στην περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι ιδιαίτερα χαμηλές παρά την υψηλή ηλιοφάνεια και με έντονη την αίσθηση του ψύχους λόγω των ισχυρών Β-ΒΔ ανέμων. Πρόκειται για τις χαμηλότερες μέσες κι ελάχιστες θερμοκρασίες. Η σχετική υγρασία είναι πάρα πολύ χαμηλή για την εποχή. Οι Β-ΒΔ άνεμοι, ισχυροί με μέση ταχύτητα 16,7 km/h και μέγιστη που μπορεί να ξεπεράσει τα 90 km/h. Το ποσό βροχής είναι ελάχιστο, όπως και η διάρκεια βροχής λόγω του καναλισμού των αερίων μαζών κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού που προκαλούν νεφοδιάλυση και τον ισχυρό άνεμο Βαρδάρη. Επιπλέον, η ορατότητα και το κλάσμα της ηλιοφάνειας για τον ίδιο προαναφερθέντα λόγο είναι πολύ υψηλά.

Τα χαρακτηριστικά των Mt1 τύπων κυκλοφορίας κατά τη θερμή περίοδο δε διαφέρουν πολύ από εκείνα της ψυχρής, έχουν όμως πολύ μεγαλύτερη διάρκεια. Οι μέσες θερμοκρασίες έχουν έντονες αρνητικές αποχές, ενώ οι μέγιστες κι οι ελάχιστες είναι μέτριες. Η σχετική υγρασία είναι πολύ χαμηλή, όπως επίσης και το ύψος βροχής σχεδόν μηδενικό. Η μέση ταχύτητα του ανέμου Βαρδάρη ανέρχεται στα 18,5 km/h. Γενικά, πρόκειται για τον τύπο κυκλοφορίας που καθορίζει στην περιοχή της Θεσσαλονίκης τον επικρατούντα καιρό «Βαρδάρη» κατά τη θερμή περίοδο, με έντονους βορειοδυτικούς ανέμους και σημαντική πτώση της θερμοκρασίας.

Ο Βαρδάρης και οι άνεμοι βορειοδυτικής κατεύθυνσης που πνέουν στην περιοχή της Θεσσαλονίκης μελετήθηκαν στατιστικά από τους Angouridakis et al (1981). Στη

συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μέγιστων ωριαίων τιμών ταχύτητας των ΒΔ ανέμων, η κατανομή των ωρών έναρξης και λήξης αυτών, καθώς επίσης η μέση και η μέγιστη διάρκεια πνοής τους. Λαμβάνονται δεδομένα έντασης και διεύθυνσης ανέμου για το χρονικό διάστημα 1957-1977. Από την παραπάνω μελέτη προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα: 1) Παρόλο που η βορειοδυτική ροή επικρατεί στην περιοχή της Θεσσαλονίκης καθ' όλη τη χρονιά, οι μέρες με ισχυρό άνεμο είναι πολύ σπάνιες. 2) Ο χειμώνας είναι η εποχή όπου πνέουν πιο συχνά άνεμοι ΒΔ κατεύθυνσης για συνεχόμενες ημέρες, σε αντίθεση με το καλοκαίρι όπου η μέση διάρκεια των ανέμων αυτών είναι 1-2 ημέρες. 3) Όσο αφορά στην κατανομή των ωρών έναρξης και λήξης των μεγίστων ωριαίων τιμών ταχύτητας των ανέμων ΒΔ κατεύθυνσης προκύπτει αναλογία με τα αντίστοιχα διαγράμματα κατανομής των ανέμων «Mistral» και «Foehn». Αυτό υποδηλώνει τη μεγάλη επίδραση του παράγοντα-γεωγραφία της περιοχής στην εμφάνιση τοπικών ανέμων. 4) Για τη συγκεκριμένη περίοδο μελέτης η μέση ένταση των ανέμων ΒΔ κατεύθυνσης υπολογίστηκε ίση με 12 km/h, με κατώτερο κατώφλι έντασης στο διάστημα 12-15 km/h. 5) Οι υψηλότερες τιμές έντασης παρατηρούνται πιο συχνά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.

Οι Maheras et al (1982) μελέτησαν την επίδραση του Βαρδάρη στον καιρό της Θεσσαλονίκης. Στην παραπάνω εργασία, τα δεδομένα χωρίστηκαν σε δυο επιμέρους περιόδους, τη χειμερινή (Οκτώβριος-Απρίλιος) και τη θερινή (Μάιος-Σεπτέμβριος) και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν ήταν τα εξής: Κατά την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης τη χειμερινή περίοδο, η πτώση της θερμοκρασίας εμφανίζει κάποια υστέρηση (περίπου 2 ώρες) σε σχέση με την ώρα έναρξης του ανέμου και η πτώση αυτή είναι κατά μέσο όρο 3,5°C. Σε αντίθεση με τη θερμοκρασία, η πτώση της σχετικής υγρασίας αρχίζει συγχρόνως με την έναρξη πνοής του Βαρδάρη και είναι περίπου της τάξης του 20%. Κατά τη θερινή περίοδο, η απότομη πτώση της θερμοκρασίας δεν εμφανίζει κάποια υστέρηση και είναι ίση με 5°C, ενώ η αντίστοιχη πτώση της σχετικής υγρασίας φθάνει το 13%. Ο Βαρδάρης όταν πνέει, επιδρά ευνοϊκά στην αύξηση της εξάτμισης του ύδατος και της ηλιοφάνειας. Στην περίπτωση παρουσίας νεφών στην κοιλάδα του Αξιού, ο καναλισμός των ξηρών αερίων μαζών κατά μήκος της κοιλάδας έχει ως αποτέλεσμα τη βίαιη απόθεση των νεφών προς το νότο και τη διάλυσή τους.

Μετά ή κατά τη διάρκεια των επεισοδίων Βαρδάρη είναι πιθανή η επικράτηση εξαιρετικής ορατότητας στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, που φθάνει τα 80-100 km (Arseni-Papadimitriou et al., 1980).

Οι Arseni-Papadimitriou και Maheras (1985) μελέτησαν την επίδραση του Βαρδάρη στη μεταβολή μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου την θερινή περίοδο για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Από την εργασία αυτή προέκυψε ότι οι μέγιστες ταχύτητες ΒΔ ανέμου παρατηρούνται το απόγευμα, η πορεία των ταχυτήτων του ακολουθεί τον κανονικό ημερήσιο κύκλο και είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη των Ετησίων. Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία παρουσιάζουν απότομη πτώση ταυτόχρονα με την έναρξη του επεισοδίου κατά τη θερινή περίοδο, της ίδιας τάξης μ' αυτή που είχε υπολογισθεί σε προηγούμενη εργασία.

Η δομή της βάσης της τροπόσφαιρας κατά την επικράτηση του Βαρδάρη εξετάστηκε από τους Maheras, Flocas και Karakostas (1984). Σε όλα τα επεισόδια Βαρδάρη που μελετήθηκαν τα τεφιγράμματα από τα δεδομένα ραδιοβολίσεων, παρατηρείται αναστροφή θερμοκρασίας που ξεκινά από τη μέση τροπόσφαιρα. Μια επιπλέον αναστροφή παρατηρείται από το έδαφος έως το επίπεδο των 1000 mb. Η σχετική υγρασία αυξάνει από το έδαφος μέχρι το επίπεδο της αναστροφής, και στη συνέχεια μειώνεται με το υψόμετρο.

*ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ*

---

Στη δεύτερη ενότητα της παρούσας διατριβής ειδίκευσης γίνεται μια προσπάθεια στατιστικής μελέτης των ημερών με άνεμο Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης για τη χρονική περίοδο 1961-1986 και 1996-2002. Επειδή στην ενότητα αυτή, η επεξεργασία των δεδομένων αλλά και τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις ημέρες Βαρδάρη είναι αμιγώς στατιστικά, θεωρήθηκε σκόπιμο να επεκταθεί το χρονικό διάστημα μελέτης στα 32 έτη. Από τη χρονική περίοδο 1961-1986 και 1996-2002, εξαιρέθηκε το έτος 1965 λόγω έλλειψης δεδομένων διεύθυνσης κι έντασης ανέμου από το σταθμό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.



## 2.1 Μέθοδος-Δεδομένα

Σε πρώτο στάδιο, με υποκειμενική κατάταξη επιλέχθηκαν για το χρονικό διάστημα των 32 ετών οι ημέρες με άνεμο Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι ημέρες με επικρατούντα άνεμο Β-ΒΔ κατεύθυνσης, διάρκειας μεγαλύτερης των 8 ωρών και έντασης υψηλότερης των 8 knots=15 km/h. Επιπλέον, ελήφθησαν υπ' όψιν τα τυπικά χαρακτηριστικά ημερών 'Βαρδάρη', όπως αυτά έχουν περιγραφεί σε προηγούμενες μελέτες. (Angouridakis et al., 1980, Arseni-Papadimitriou et al., 1980, Maheras, 1982, Maheras et al., 1982, Arseni-Papadimitriou et al., 1985). Τα σημαντικότερα από αυτά είναι: α) η πτώση της θερμοκρασίας του αέρα η οποία δεν υπερβαίνει τους 2°C-3°C από ημέρα σε ημέρα, μπορεί όμως να φτάσει τους 4°C-6°C για πνοή ανέμου επί σειρά ημερών, β) η σημαντική πτώση της σχετικής υγρασίας του αέρα, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται τόσο από την εποχή όσο και από τη χρονική διάρκεια πνοής του ανέμου. Επιπλέον, και η απόλυτη υγρασία του αέρα μειώνεται αισθητά ακόμη και τους υγρούς μήνες του έτους, γ) η αύξηση της εξάτμισης του ύδατος κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, δ) η αύξηση του κλάσματος της ηλιοφάνειας, ε) η έλλειψη βροχής και ζ) η μεγάλη ορατότητα. Με τον τρόπο αυτό ξεχωρίσαμε 875 ημέρες Βαρδάρη για τις χρονικές περιόδους μελέτης, 1961-1986 και 1996-2002.

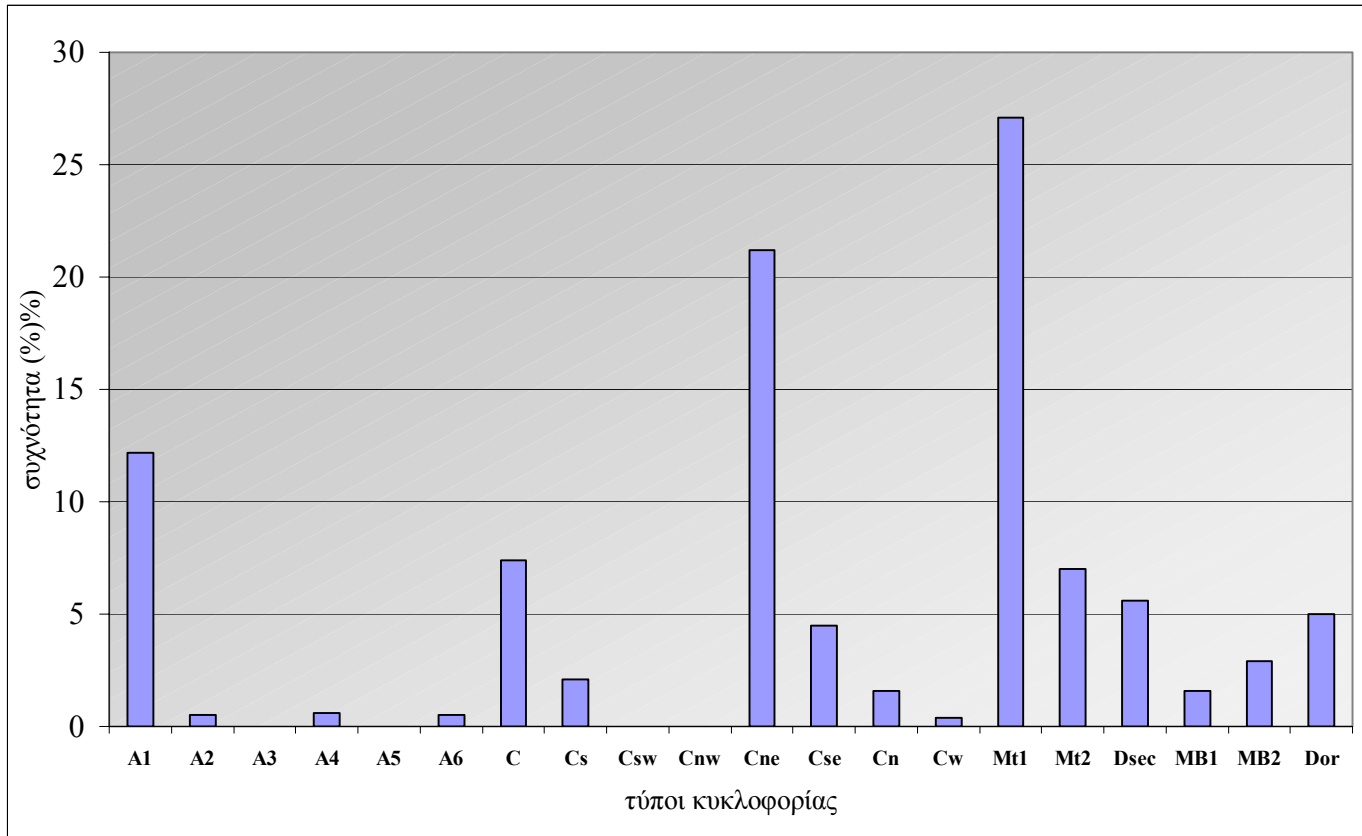
## 2.2 Κατανομή ημερών Βαρδάρη στους τύπους κυκλοφορίας

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι ο προσδιορισμός των συνοπτικών καταστάσεων που σχετίζονται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το ημερολόγιο των τύπων κυκλοφορίας που προέκυψε από αυτόματη κατάταξη (Maheras et al., 2000), έως και το έτος 2000. Η αυτόματη κατάταξη τύπων κυκλοφορίας που πραγματοποιήθηκε από τους Maheras et al. (2000), βασίζεται στην χρησιμοποίηση ημερήσιων στοιχείων γεωδυναμικών υψών της επιφάνειας και των 500 hPa για οκτώ κομβικά σημεία της περιοχής μελέτης. Μετά την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιώντας χωρικές μεθόδους γεωμετρίας και τοπολογίας, προέκυψαν έξι αντικυκλωνικοί τύποι, οκτώ κυκλωνικοί, δύο μικτοί και τέσσερις χαρακτηριστικοί τύποι κυκλοφορίας. Στο χρονικό διάστημα των 30 ετών (1961-1986 και 1996-2000),

ξεχωρίσαμε 826 ημέρες Βαρδάρη, έγινε η κατανομή των ημερών αυτών στους τύπους κυκλοφορίας και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

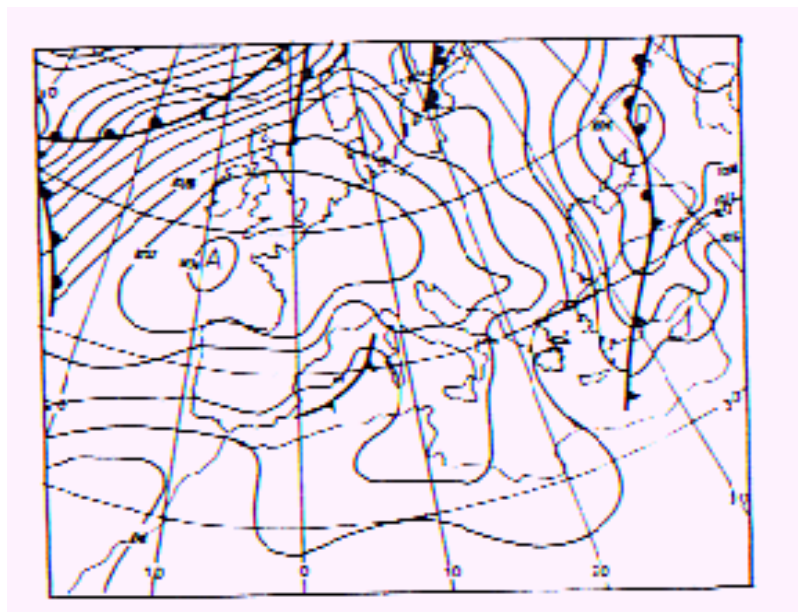
**Πίνακας 2.1:** Κατανομή ημερών Βαρδάρη στους τύπους κυκλοφορίας (Maheras et al., 2000)

ΤΥΠΟΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΗΜΕΡΩΝ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ (%)
<b>A1</b>	<b>101</b>	<b>12,2</b>
A2	4	0,4
A3	0	0,0
A4	5	0,6
A5	0	0,0
A6	4	0,4
C	61	7,4
Cs	17	2,1
Csw	0	0,0
Cnw	0	0,0
<b>Cne</b>	<b>175</b>	<b>21,2</b>
Cse	37	4,5
Cn	13	1,6
Cw	3	0,4
<b>Mt1</b>	<b>224</b>	<b>27,1</b>
Mt2	58	7,0
Dsec	46	5,6
MB1	13	1,6
MB2	24	2,9
Dor	41	5,0

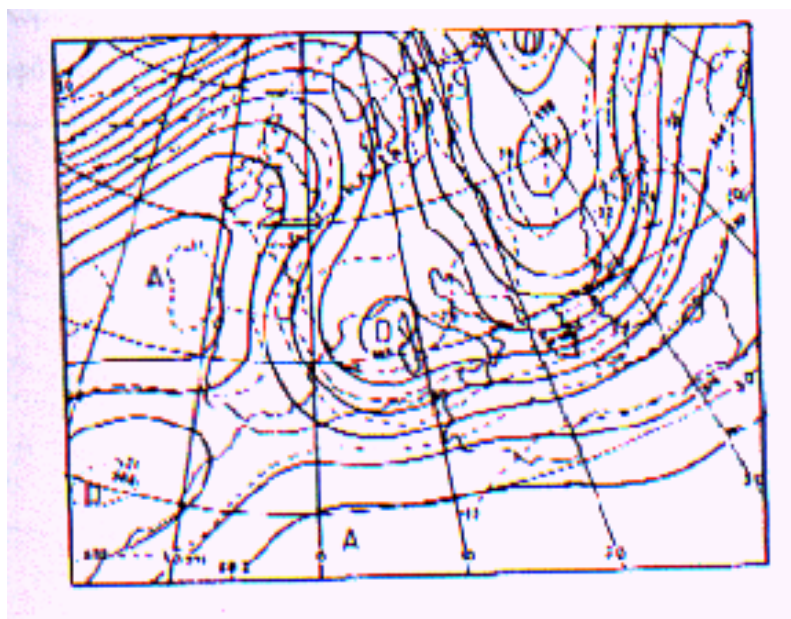


**Σχήμα 2.1:** Κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης ημερών Βαρδάρη στους τύπους κυκλοφορίας (Maheras et al., 2000)

Από το παραπάνω διάγραμμα ο τύπος με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στις ημέρες Βαρδάρη (27,1 %) είναι ο πρώτος μικτός συνοπτικός M1. Ο τύπος αυτός χαρακτηρίζεται από τη μεσημβρινή διάταξη των ισοβαρών πάνω από την Ελληνική περιοχή, την ύπαρξη ενός αντικυκλώνα στα δυτικά και μιας ύφεσης στα ανατολικά, με το σύστημα των υψηλών πιέσεων να καλύπτει σχεδόν όλη την Ελλάδα (σχήμα 2.2). Στα ανώτερα στρώματα κυριαρχεί η έντονη μεσημβρινή ροή σ' όλη την περιοχή των Βαλκανίων και της Τουρκίας (σχήμα 2.3). Η διάταξη των ισοβαρών στην επιφάνεια καθορίζει ένα ρεύμα βορείων ανέμων πολύ ισχυρό. Η απόκλιση που λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα δυο κέντρα δράσης και ο 'καναλισμός' των αερίων μαζών κατά μήκος της κοιλάδας του Αξιού, αυξάνει την ένταση των βορείων ανέμων και προκαλεί νεφοδιάλυση στις περιοχές από τις οποίες διέρχεται.



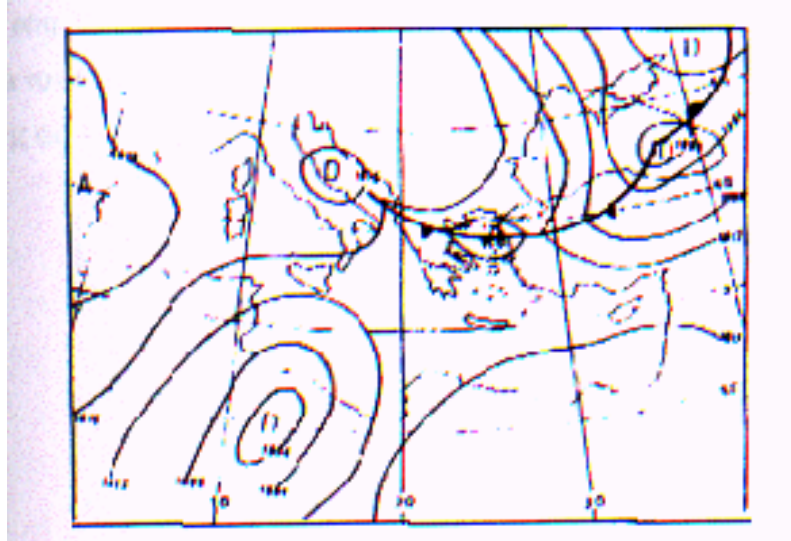
**Σχήμα 2.2:** Χάρτης συνοπτικής κατάστασης του μικτού τύπου κυκλοφορίας (Mt1) στην επιφάνεια (Μαχαίρας, 1982).



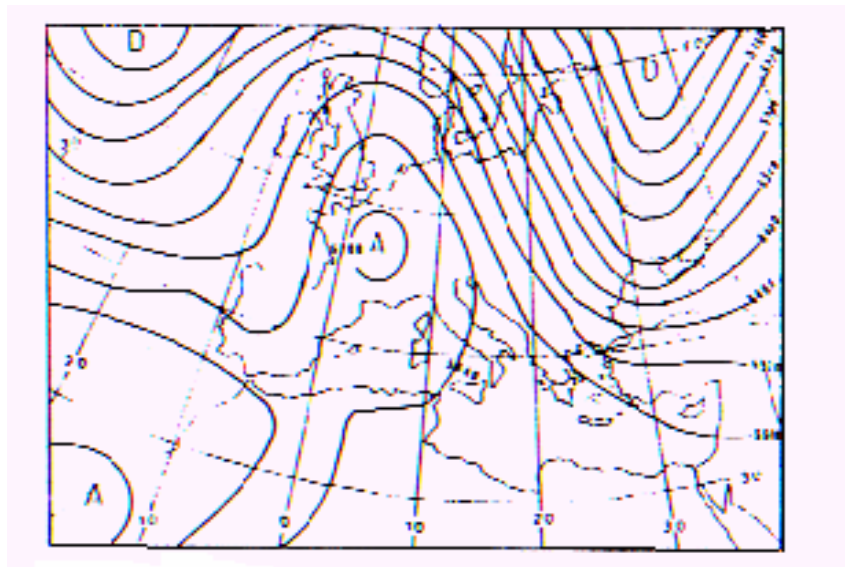
**Σχήμα 2.3:** Χάρτης συνοπτικής κατάστασης του μικτού τύπου κυκλοφορίας (Mt1) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (Μαχαίρας, 1982).

Ένα ποσοστό ίσο με 21,2% των ημερών που επικρατεί άνεμος Βαρδάρης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης συνδέεται με την εμφάνιση του υφεσιακού τύπου κυκλοφορίας Cpe (υφεσιακός τύπος με το κέντρο του να βρίσκεται στα βορειοανατολικά της Ελληνικής περιοχής). Στον χάρτη επιφάνειας το κέντρο της ύφεσης βρίσκεται βορειοανατολικά της Ελληνικής περιοχής ενώ στο επίπεδο των 500 hPa ο άξονας του αυλώνα είναι κατακόρυφος και εκτείνεται περίπου από την Αίγυπτο

έως την ανατολική Σκανδιναβία. Ψυχρό μέτωπο διέρχεται πάνω από την Ελληνική περιοχή ενώ πεδίο υψηλών πιέσεων εκτείνεται στα Βαλκάνια και στην Κεντρική Ευρώπη.



**Σχήμα 2.4:** Χάρτης συνοπτικής κατάστασης του κυκλωνικού τύπου κυκλοφορίας (Cne) στην επιφάνεια (Π. Μαχαίρας, 1982).

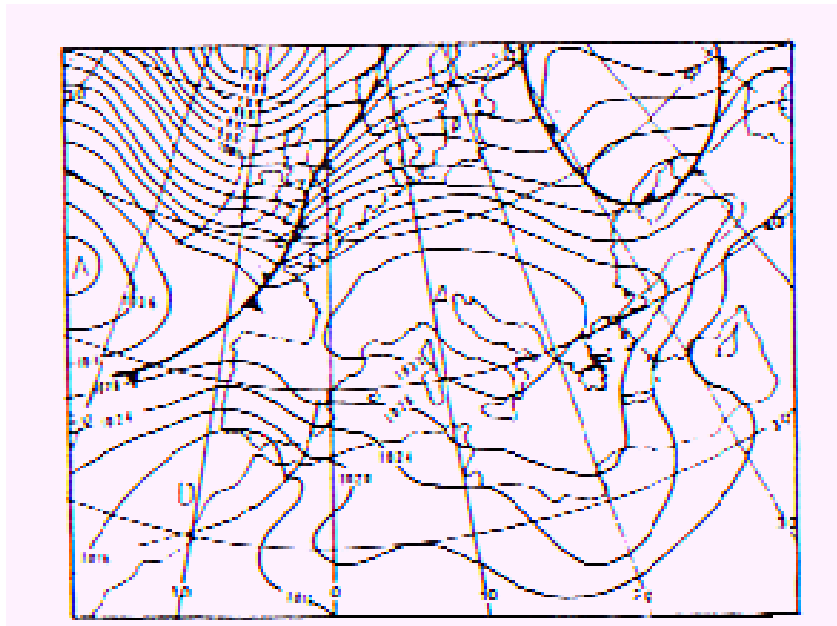


**Σχήμα 2.5:** Χάρτης συνοπτικής κατάστασης του κυκλωνικού τύπου κυκλοφορίας (Cne) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (Π. Μαχαίρας, 1982).

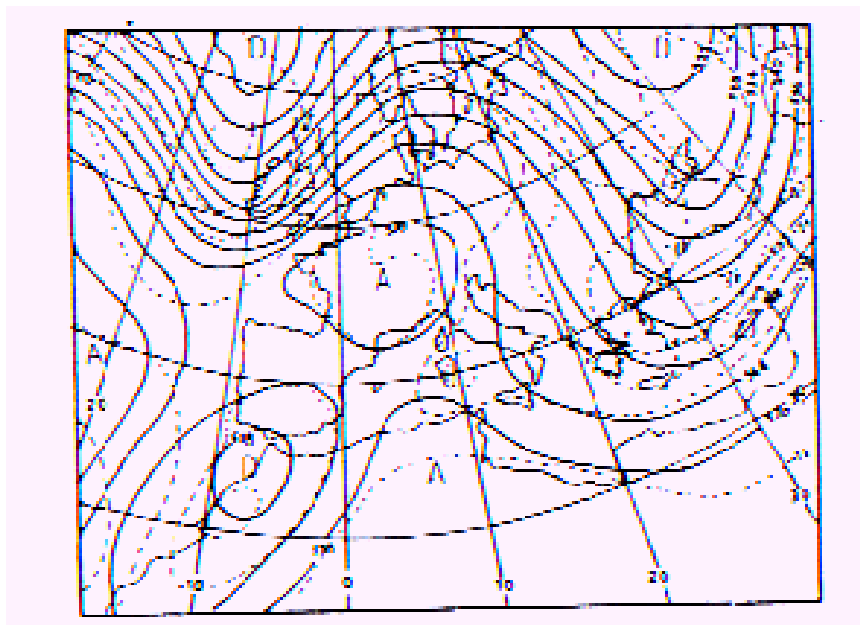
Με τη διέλευση του ψυχρού μετώπου γίνεται μεταβολή στη διεύθυνση των ανέμων, από νοτιοανατολικοί γίνονται βορειοδυτικοί και αυξάνει σημαντικά η ταχύτητά τους.

Ο τύπος κυκλοφορίας με την τρίτη κατά σειρά υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης (12,2%) τις ημέρες Βαρδάρη είναι ο αντικυκλωνικός A1. Στην επιφάνεια,

σύστημα υψηλών πιέσεων υπάρχει δυτικά ή βορειοδυτικά της Ελληνικής περιοχής κυρίως στη δυτική, βόρεια ή κεντρική Ευρώπη. Ο άξονας της έξαρσης όντας κατακόρυφος στο επίπεδο των 500 hPa προκαλεί έντονη μεσημβρινή ροή. Η μεσημβρινή ροή σε συνδυασμό με την κυκλοφορία στην επιφάνεια δημιουργεί βόρειο ρεύμα το οποίο διασχίζοντας την κοιλάδα του Αξιού φθάνει στην περιοχή της Θεσσαλονίκης ως άνεμος Βαρδάρης.



**Σχήμα 2.6:** Χάρτης συνοπτικής κατάστασης του αντικυκλωνικού τύπου κυκλοφορίας (A1) στην επιφάνεια (Μαχαίρας, 1982).



**Σχήμα 2.7:** Χάρτης συνοπτικής κατάστασης του αντικυκλωνικού τύπου κυκλοφορίας (A1) στην ισοβαρική επιφάνεια των 500 hPa (Μαχαίρας, 1982).

Ο μικτός τύπος κυκλοφορίας (Mt1), ο κυκλωνικός (Cne) και ο αντικυκλωνικός (A1), των οποίων οι συνοπτικές καταστάσεις περιγράφηκαν παραπάνω, επικρατούν σε ποσοστό ίσο με το 60,2% των συνολικών ημερών Βαρδάρη. Για την κατανομή των ημερών Βαρδάρη στους επιμέρους τύπους κυκλοφορίας αξίζει να σημειωθούν τα εξής:

- Με εξαίρεση τον τύπο κυκλοφορίας A1, οι υπόλοιποι πέντε αντικυκλωνικοί τύποι έχουν σχεδόν μηδενικές συχνότητες εμφάνισης ημερών Βαρδάρη. Αυτό σημαίνει ότι η μοναδική αντικυκλωνική κατάσταση που συνδέεται με την επικράτηση του ανέμου αυτού στην περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι αυτή του τύπου κυκλοφορίας A1, με υψηλό ποσοστό, ίσο με 12,2%.
- Όσον αφορά τις ημέρες Βαρδάρη σε σχέση με τους κυκλωνικούς τύπους κυκλοφορίας, αυτές παρουσιάζουν ένα μέγιστο συχνοτήτων στον κυκλωνικό τύπο Cne, το κέντρο του οποίου βρίσκεται στα βορειοανατολικά της Ελληνικής περιοχής, ίσο με 21,2%. Ο δεύτερος σε συχνότητα εμφάνισης κυκλωνικός τύπος είναι ο C, με την ύφεση να βρίσκεται πάνω από την ελληνική περιοχή και συχνότητα ίση με 7,4%. Τέλος, ακολουθεί ο Cse τύπος κυκλοφορίας, του οποίου το κέντρο βρίσκεται στα νοτιοανατολικά της Ελληνικής περιοχής, με ποσοστό ίσο με 4,6%. Οι υπόλοιποι πέντε κυκλωνικοί τύποι εμφανίζουν πολύ μικρά έως μηδενικά ποσοστά εμφάνισης ημερών Βαρδάρη.
- Το μέγιστο συχνοτήτων εμφάνισης ημερών Βαρδάρη παρατηρείται στο μικτό συνοπτικό τύπο 1 (Mt1), ίσο με 27,1% των συνολικών ημερών Βαρδάρη. Ο τύπος κυκλοφορίας-Mt1 θεωρείται ως η κυριότερη συνοπτική κατάσταση που σχετίζεται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (Π. Μαχαίρας, 1982).
- Οι χαρακτηριστικοί τύποι κυκλοφορίας έχουν χαμηλά ποσοστά εμφάνισης των ημερών Βαρδάρη. Τα υψηλότερα είναι 5,6% και 5,3% στο ξηρό υφεσιακό (Dsec) και στον τύπο κυκλοφορίας της ψυχρής λίμνης (Dor), αντίστοιχα. Ο ξηρός υφεσιακός παρατηρείται κυρίως το καλοκαίρι και σχετίζεται με την επικράτηση των Ετησίων ανέμων στην περιοχή του Αιγαίου. Ο χαρακτηριστικός τύπος κυκλοφορίας Dor εμφανίζεται κυρίως κατά τη θερμή περίοδο, από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο και συνδυάζεται συνήθως με

συνθήκες έντονης δυναμικής αστάθειας που προκαλούν καταιγίδες. Από τις ημέρες που εμφανίζεται ο τύπος κυκλοφορίας Dοg κι επικρατούν B-BΔ ισχυροί άνεμοι επιλέχθηκαν μόνο αυτές στις οποίες δεν παρατηρούνται καταιγίδες, το ημερήσιο βροχομετρικό ύψος είναι μηδενικό και η σχετική υγρασία χαμηλή. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί σε περίπτωση καταιγίδας δύναται να επικρατήσουν βόρειοι άνεμοι με σημαντικές ριπές, που δεν οφείλονται σε συνοπτικό αίτιο αλλά λόγω έντονης δυναμικής αστάθειας, τα έντονα καθοδικά ρεύματα που αντισταθμίζουν τα ανοδικά, μετατρέπονται σε ρεύματα αέρος με οριζόντια κίνηση κοντά στο έδαφος.

- Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι στους δώδεκα από τους είκοσι τύπους κυκλοφορίας η συχνότητα εμφάνισης ημερών Βαρδάρη για κάθε τύπο είναι μικρότερη του 3%, κι επιπλέον στους τέσσερις από τους δώδεκα είναι ίση με μηδέν. Επίσης οι υπόλοιποι οκτώ τύποι κυκλοφορίας παρουσιάζουν ποσοστό εμφάνισης που ξεπερνά το 90% των συνολικών ημερών Βαρδάρη. Αυτό πιθανόν να επιβεβαιώνει ότι τα γενεσιουργά αίτια της επικράτησης ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι κυρίως συνοπτικά.

Στη συνέχεια εξετάστηκε πιο αναλυτικά η κατανομή των ημερών Βαρδάρη στους τύπους κυκλοφορίας για κάθε μήνα χωριστά, και τα αποτελέσματα καταγράφονται στον πίνακα 2.2. Όταν ο αριθμός ημερών ανά μήνα είναι μεγαλύτερος του δέκα, οι συχνότητες καταγράφονται με κόκκινο χρώμα.

**Πίνακας 2.2:** Μηνιαία κατανομή ημερών Βαρδάρη στους τύπους κυκλοφορίας κατά Μαχαίρα

	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ	σύνολο
<b>A1</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	9	4	6	6	4	4	<b>10</b>	7	<b>12</b>	<b>101</b>
<b>A2</b>	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	4
<b>A3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>A4</b>	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5
<b>A5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>A6</b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	4
<b>C</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	3	1	1	0	0	1	3	7	<b>10</b>	<b>61</b>
<b>Cs</b>	4	2	0	0	1	0	0	0	0	4	2	4	17
<b>Csw</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Cnw</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Cne</b>	<b>24</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>28</b>	<b>14</b>	7	8	3	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>175</b>



<b>Cse</b>	1	1	0	0	2	6	10	5	5	1	2	4	37
<b>Cn</b>	4	3	0	0	1	0	0	2	0	1	2	0	13
<b>Cw</b>	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	3
<b>Mt1</b>	26	9	28	11	7	7	46	19	22	16	21	12	224
<b>Mt2</b>	19	6	6	0	0	0	0	0	1	0	7	19	58
<b>Dsec</b>	1	0	0	0	0	13	21	6	5	0	0	0	46
<b>MB1</b>	2	0	1	0	0	2	0	1	2	1	1	3	13
<b>MB2</b>	1	1	2	3	3	0	3	3	0	3	4	1	24
<b>Dor</b>	0	0	0	3	5	9	11	6	6	1	0	0	41

Με στόχο την εκ βαθέως διερεύνηση της συσχέτισης ημερών Βαρδάρη και τύπων κυκλοφορίας, θεωρήθηκε σκόπιμο να καταγραφούν οι πέντε πιο ‘συχνοί’ τύποι κυκλοφορίας των ημερών Βαρδάρη, με τις μηνιαίες συχνότητες εμφάνισής τους (Maheras et al., 2000).

**Πίνακας 2.3:** Πέντε πιο ‘συχνοί’ τύποι κυκλοφορίας των ημερών Βαρδάρη με τις μηνιαίες συχνότητές τους (%), (Maheras et al., 2000).

Μήνες	Mt1	Cne	A1	C	Dsec
I	3,6	8,2	7,7	5,6	0,0
Φ	3,4	9,2	6,2	6,3	0,0
M	3,8	10,1	6,5	4,7	0,0
A	3,2	15,6	6,9	3,7	0,0
M	2,4	8,5	8,6	2,4	0,0
I	1,8	8,7	6,3	1,1	16,3
I	6,6	3,3	10,0	0,2	32,3
A	3,4	3,7	11,9	0,2	23,9
Σ	5,4	3,6	12,4	0,8	9,0
O	3,5	4,5	11,1	1,8	0,0
N	3,9	5,0	5,1	5,3	0,0
Δ	2,9	7,7	4,2	6,4	0,0

Μελετώντας τους πίνακες 2.2 και 2.3 προκύπτουν τα εξής:

- Ο τύπος κυκλοφορίας με τον υψηλότερο αριθμό ημερών Βαρδάρη είναι ο μικτός τύπος 1, και το μήνα Ιούλιο σημειώνεται το μέγιστο των ημερών αυτών. Ωστόσο, στον Mt1 τύπο κυκλοφορίας εντοπίζεται μεγάλος αριθμός

ημερών Βαρδάρη για κάθε μήνα, με εξαίρεση το Μάιο και τον Ιούνιο. Επιπλέον, βάσει του πίνακα 2.3, ο Mt1 τύπος κυκλοφορίας, το μήνα Ιούλιο παρουσιάζει και μέγιστο ποσοστό εμφάνισης, ίσο με 6,6%.

- Όσον αφορά στον αντικυκλωνικό τύπο καιρού A1, όπως προκύπτει από τον πίνακα 2.2, κυρίως ο A1 της ψυχρής περιόδου (Οκτώβριος έως Μάιος) σχετίζεται με την επικράτηση ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η ίδια περίπτωση παρατηρείται και για τον κυκλωνικό τύπο C και μάλιστα σε πιο διακριτό βαθμό. Κατά τους μήνες της ψυχρής περιόδου σημειώνεται το 95% των συνολικών ημερών Βαρδάρη του κυκλωνικού τύπου κυκλοφορίας C.
- Ο ξηρός υφειακός τύπος Dsec, χαρακτηριστικός τύπος κυκλοφορίας της θερινής περιόδου, συνεπικρατεί με τον άνεμο Βαρδάρη κυρίως τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο. Ο τύπος αυτός συναντάται μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες και το Σεπτέμβριο, με μέγιστο ποσοστό εμφάνισης το μήνα Ιούλιο, ίσο με 32,3%.
- Ο χαρακτηριστικός τύπος κυκλοφορίας Doγ παρουσιάζει μέγιστο εμφάνισης ημερών Βαρδάρη το μήνα Ιούλιο και σχεδόν μηδενική συχνότητα τους χειμερινούς μήνες.

### **2.3 Εποχική και Μηνιαία Κατανομή ημερών Βαρδάρη**

Για τη χρονική περίοδο μελέτης των 32 ετών, 1961-1986 και 1996-2002 εντοπίστηκαν 875 ημέρες Βαρδάρη και υπολογίσθηκε η συχνότητα εμφάνισης ανά έτος, η οποία είναι ίση με 7,5%, δηλαδή περίπου 27 ημέρες το χρόνο.

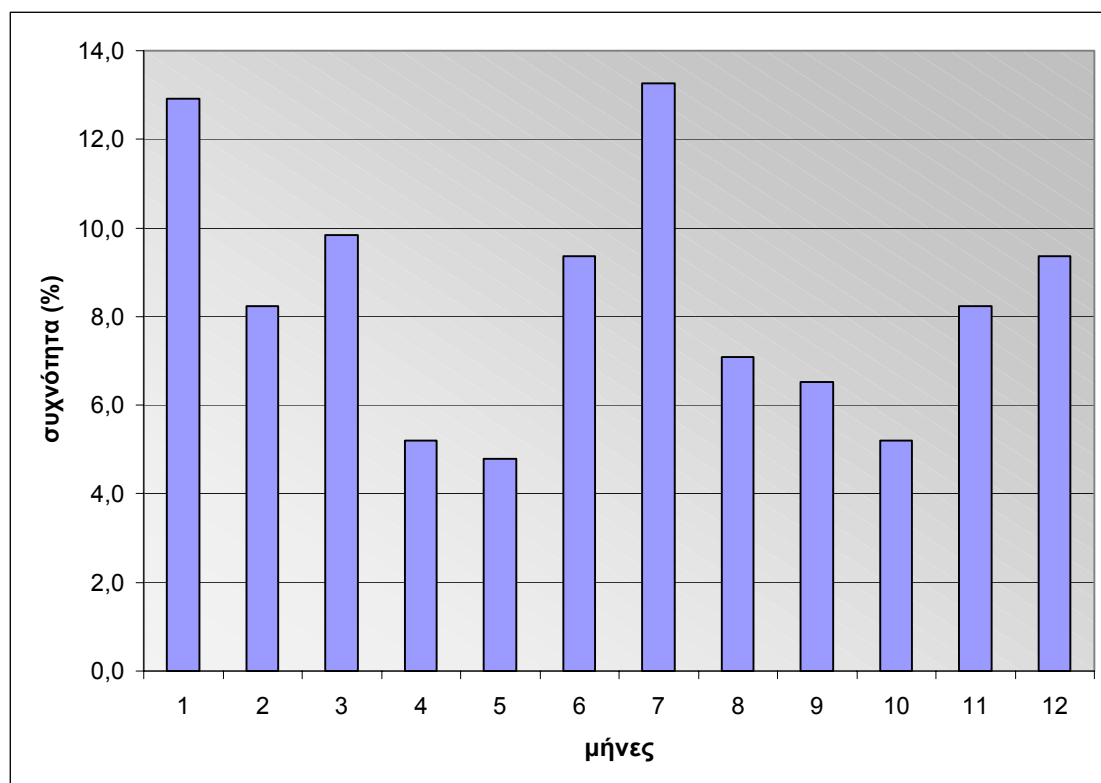
Σε πρώτο στάδιο, έγινε η κατανομή των ημερών αυτών για τη θερμή (Μάιος-Σεπτέμβριος) και ψυχρή (Οκτώβριος-Απρίλιος) περίοδο, στη συνέχεια για κάθε εποχή χωριστά, και τέλος για κάθε μήνα και υπολογίσθηκαν οι αντίστοιχες επιμέρους συχνότητες εμφάνισης.

Από το σύνολο των ημερών Βαρδάρη, ένα ποσοστό ίσο με 41% παρατηρείται τη θερμή περίοδο ενώ το αντίστοιχο της ψυχρής περιόδου είναι ίσο με 59%. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου είναι συχνότερο το φαινόμενο της επικράτησης ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Όσον αφορά στην εποχιακή κατανομή, το χειμώνα και το καλοκαίρι καταγράφονται τα μέγιστα ποσοστά εμφάνισης ημερών Βαρδάρη, 30,5% και 29,7% αντίστοιχα. Έπονται η άνοιξη και το φθινόπωρο με συχνότητα 19,9% και στις δύο εποχές. Οι διαφορές οι οποίες παρατηρούνται στα ποσοστά των ημερών Βαρδάρη, οφείλονται στις διαφορετικές συνοπτικές καταστάσεις που επικρατούν συχνότερα ανά εποχή και οι οποίες συνδέονται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη. Το υψηλό ποσοστό ημερών Βαρδάρη το καλοκαίρι, πιθανόν να σχετίζεται με την υψηλή συχνότητα εμφάνισης του μικτού τύπου κυκλοφορίας Mt1 σε συνδυασμό με τη συχνή εμφάνιση του ξηρού υφειακού τύπου (Dsec) την εποχή αυτή, στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (Πίνακας 2.3). Αυτός ο τύπος κυκλοφορίας σχετίζεται με τους Ετησίες ανέμους που επικρατούν στην περιοχή του Αιγαίου την ίδια περίοδο (Maheras, 1980). Εξάλλου, η υψηλή συχνότητα ημερών Βαρδάρη τη χειμερινή περίοδο πιθανό να συνδέεται και με το μέγιστο συχνοτήτων του κυκλωνικού τύπου C την ίδια περίοδο (Πίνακας 2.3). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εποχική κατανομή των ημερών Βαρδάρη βρίσκονται σε συμφωνία με προηγούμενη εργασία του παρελθόντος στην οποία μελετήθηκε στατιστικά η εμφάνιση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, για την χρονική περίοδο 1957-1977 (Angouridakis et al., 1981). Η μηνιαία κατανομή των ημερών Βαρδάρη δίνεται στον πίνακα 2.4 και παριστάνεται γραφικά στο διάγραμμα που ακολουθεί.

**Πίνακας 2.4:** Μηνιαία κατανομή ημερών Βαρδάρη

	ΜΗΝΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΗΜΕΡΩΝ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (%)
1	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	113	12,9
2	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	72	8,2
3	ΜΑΡΤΙΟΣ	86	9,8
4	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	46	5,2
5	ΜΑΙΟΣ	42	4,8
6	ΙΟΥΝΙΟΣ	82	9,4
7	ΙΟΥΛΙΟΣ	116	13,3
8	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	62	7,1
9	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	57	6,5
10	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	45	5,2
11	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	72	8,2
12	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	82	9,4



**Σχήμα 2.8:** Μηνιαία κατανομή ημερών Βαρδάρη

Το μέγιστο συχνοτήτων των ημερών Βαρδάρη σημειώνεται το μήνα Ιούλιο (13,3%) και ακολουθούν οι μήνες Ιανουάριος (12,9%), Μάρτιος (9,8%) και Ιούνιος (9,4%). Οι χαμηλότερες συχνότητες εμφάνισης ημερών Βαρδάρη παρατηρούνται τους μήνες των ενδιάμεσων εποχών, Μάιο (4,8%) , Απρίλιο (5,2%) και Οκτώβριο (5,2%). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι τους μήνες των ενδιάμεσων εποχών σημειώνονται οι μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ θάλασσας και ξηράς.

Οι υψηλές συχνότητες ημερών Βαρδάρη τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Ιούλιο, πιθανόν να σχετίζονται, με τα μέγιστα συχνοτήτων του μικτού Mt1 τύπου κυκλοφορίας και του ξηρού υφειακού Dsec, τον ίδιο μήνα (Πίνακας 2.3). Η εμφάνιση του ξηρού υφειακού Dsec τύπου κυκλοφορίας προκαλεί συχνά την επικράτηση στην περιοχή του Αιγαίου των λεγόμενων «Ψευδοετησίων» ανέμων (Maheras, 1980). Οι «Ψευδοετησίες» αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία των Ετησίων ανέμων. Η επικράτησή τους στην περιοχή του Αιγαίου οφείλεται σε συνοπτικά αίτια σε συνδυασμό με θερμικά. Οι χαμηλές πιέσεις στα βορειοανατολικά της Ελλάδας σε συνδυασμό με τις διαφορές θερμοκρασίας ανάμεσα στα Βαλκάνια και τη Μαύρη Θάλασσα έχουν ως αποτέλεσμα την επικράτηση ισχυρών βορείων-

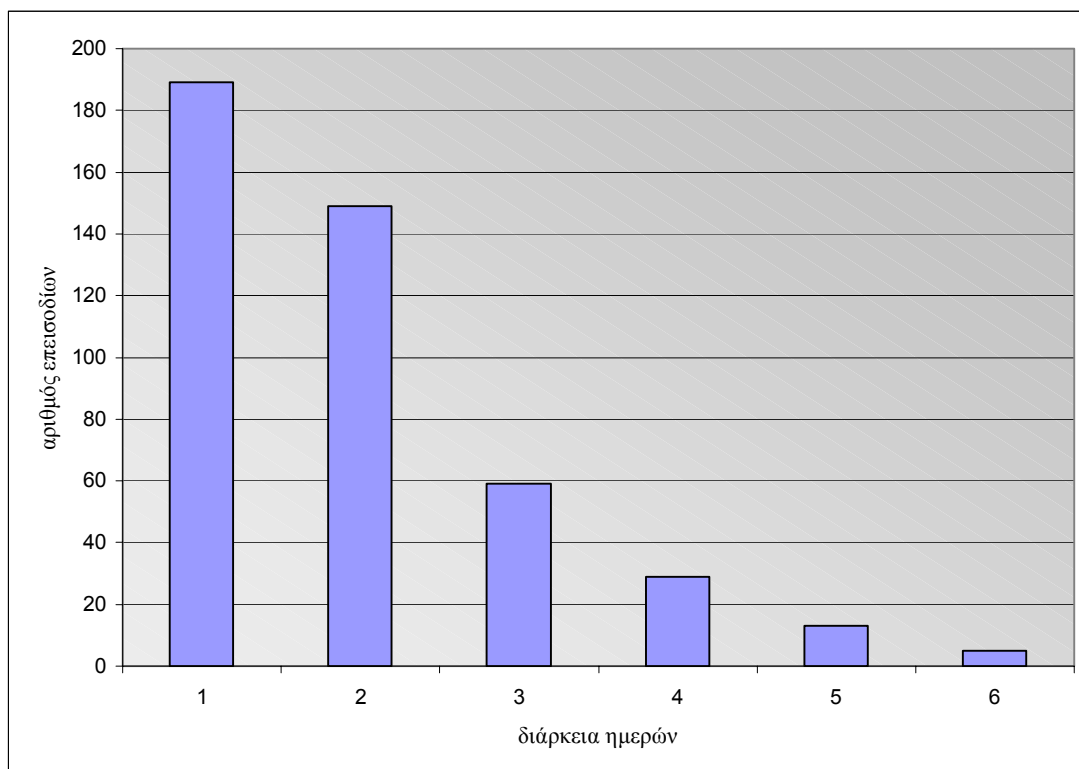
βορειοδυτικών ανέμων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης και ασθενέστερων στην περιοχή του Αιγαίου.

## 2.4 Η διάρκεια των επεισοδίων Βαρδάρη

Για την χρονική περίοδο της παρούσας μελέτης, εξετάστηκε η χρονική διάρκεια των επεισοδίων Βαρδάρη και προέκυψε ο παρακάτω πίνακας (2.5). Τα αποτελέσματα παριστάνονται γραφικά στο σχήμα 2.9.

**Πίνακας 2.5:** Κατανομή των επεισοδίων Βαρδάρη ως προς τη διάρκειά τους

Διάρκεια ημερών	Αριθμός επεισοδίων	Συχνότητα επεισοδίων (%)
<b>1</b>	<b>189</b>	<b>42,6</b>
<b>2</b>	<b>149</b>	<b>33,6</b>
<b>3</b>	<b>59</b>	<b>13,3</b>
<b>4</b>	<b>29</b>	<b>6,5</b>
<b>5</b>	<b>13</b>	<b>2,9</b>
<b>6</b>	<b>5</b>	<b>1,1</b>

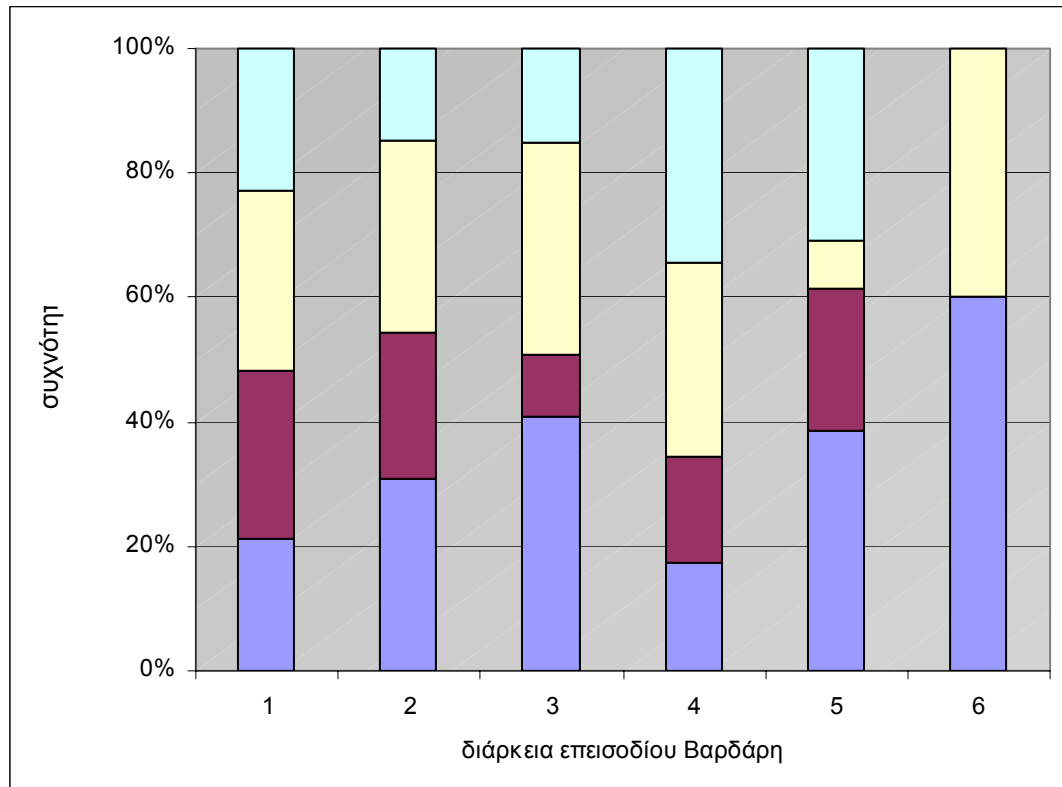


**Σχήμα 2.9:** Κατανομή των επεισοδίων Βαρδάρη ως προς τη διάρκειά τους.

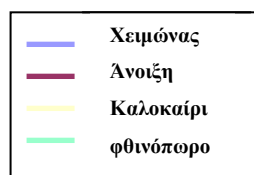
Τα επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια μιας ημέρας έχουν την υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης, ίση με 42,6%, και όσο η διάρκεια σε ημέρες των επεισοδίων αυξάνει, τόσο η συχνότητα αυτή σταδιακά μειώνεται (Πίνακας 2.5). Με βάση την υποκειμενική κατάταξη των ημερών Βαρδάρη που έγινε για τη χρονική περίοδο μελέτης, σημειώθηκαν επεισόδια Βαρδάρη με μεγαλύτερη την ακολουθία των έξι ημερών. Ωστόσο, εντοπίστηκαν και περιπτώσεις επικράτησης Β-ΒΔ ανέμων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης για πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ημερών (για παράδειγμα, 23 ημέρες, Αύγουστος 1964). Σ' αυτές τις περιπτώσεις παρατηρήθηκαν τα εξής: Οι Β-ΒΔ άνεμοι έπνεαν για διάρκεια μικρότερης των οκτώ ωρών και ήταν μικρής έντασης, μικρότερης του ορίου των 15 km/h=8 knots που τέθηκε στην παρούσα κατάταξη. Συνεπώς, με βάση τα κριτήρια της παρούσας κατάταξης (και σε συμφωνία με εργασίες του παρελθόντος) οι ημέρες αυτές δεν μπορούν να ληφθούν ως ημέρες Βαρδάρη. Είναι δυνατόν οι ημέρες αυτές να χαρακτηρισθούν ως ημέρες με πνέοντα ασθενή άνεμο Β-ΒΔ κατεύθυνσης που μπορεί να οφείλεται σε θερμικά αίτια. Επιπλέον, το σύνηθες φαινόμενο που παρατηρήθηκε είναι το εξής: Διαδοχικές ημέρες Βαρδάρη, στη συνέχεια μια διακοπή των ανέμων για μια-δυο-τρεις ημέρες και τέλος νέα επικράτηση αυτών, στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η περίπτωση αυτή δεν θεωρήθηκε ως ένα επεισόδιο Βαρδάρη αλλά ως δύο μεμονωμένα επεισόδια. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η εποχιακή κατανομή των επεισοδίων Βαρδάρη ως προς τη διάρκειά τους. Τα επεισόδια τα οποία σημειώθηκαν στο τέλος μιας εποχής και στην αρχή της επομένης, κατηγοριοποιήθηκαν στην εποχή έναρξης του επεισοδίου.

**Πίνακας 2.6:** Εποχιακή κατανομή επεισοδίων Βαρδάρη ως προς τη διάρκειά τους

Εποχές	1 ημέρα	2 ημέρες	3 ημέρες	4 ημέρες	5 ημέρες	6 ημέρες	συνολικός αριθμός επεισοδίων	ποσοστό (%)
Χειμώνας	40	46	24	5	5	3	123	27,7
Ανοιξη	51	35	6	5	3	0	100	22,5
Καλοκαίρι	55	46	20	9	1	2	133	30,0
Φθινόπωρο	43	22	9	10	4	0	88	19,8
<b>Σύνολο</b>	<b>189</b>	<b>149</b>	<b>59</b>	<b>29</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>444</b>	<b>100</b>



**Σχήμα 2.10:** Εποχιακή κατανομή επεισοδίων Βαρδάρη ως προς τη διάρκειά τους



Κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο σημειώνονται τα περισσότερα επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια μεγαλύτερη της μιας ημέρας. Τα επεισόδια με τις μεγαλύτερες ακολουθίες ημερών επικρατούν κυρίως το χειμώνα. Το καλοκαίρι είναι συχνό το φαινόμενο της παύσης ενός βραχέως επεισοδίου Βαρδάρη και στη συνέχεια μετά την παρέλευση δύο-τριών ημερών, την έναρξη ενός νέου επεισοδίου.

Στην τελευταία στήλη του πίνακα 2.6 καταγράφονται τα ποσοστά όλων των επεισοδίων Βαρδάρη για κάθε εποχή χωριστά. Παρατηρώντας τα ποσοστά αυτά, προκύπτει ότι αυτά διαφοροποιούνται εν μέρει από τα εποχιακά ποσοστά των ημερών Βαρδάρη. Έτσι, το μέγιστο ποσοστό επεισοδίων Βαρδάρη σημειώνεται την καλοκαιρινή περίοδο (30%) και ακολουθεί με μικρή διαφορά το ποσοστό της χειμερινής περιόδου (27,7%). Όσον αφορά τις ενδιάμεσες εποχές του έτους, τα ποσοστά επεισοδίων Βαρδάρη διαφοροποιούνται, 22,5% την Άνοιξη και 19,8% το Φθινόπωρο. Η διαφοροποίηση αυτή στα ποσοστά δύναται να ερμηνευθεί πλήρως. Το χειμώνα δεν σημειώνεται το μέγιστο ποσοστό επεισοδίων Βαρδάρη αλλά το μέγιστο

ημερών Βαρδάρη. Αντίθετα το καλοκαίρι, σημειώνεται το μέγιστο ποσοστό των επεισοδίων. Αυτό σημαίνει ότι τη χειμερινή περίοδο τα επεισόδια Βαρδάρη έχουν μεγαλύτερη διάρκεια, ενώ αντίθετα την καλοκαιρινή περίοδο τα επεισόδια Βαρδάρη έχουν μικρότερη διάρκεια. Την Άνοιξη το ποσοστό επεισοδίων Βαρδάρη είναι μεγαλύτερο από του Φθινοπώρου, ενώ τα ποσοστά ημερών είναι ίσα. Αυτό σημαίνει ότι την Άνοιξη τα επεισόδια Βαρδάρη είναι πιο σύντομα σε διάρκεια ημερών συγκριτικά με αυτά του Φθινοπώρου ή διαφορετικά το Φθινόπωρο τα επεισόδια έχουν μεγαλύτερη διάρκεια.

## 2.5 Ταχύτητες του ανέμου Βαρδάρη

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια στατιστικής μελέτης των εντάσεων του ανέμου Βαρδάρη. Για το σκοπό αυτό ελήφθησαν οι ωριαίες ταχύτητες του ανέμου για τις 875 ημέρες Βαρδάρη που επιλέχθηκαν με υποκειμενική κατάταξη. Αρχικά, υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα του ανέμου καθώς και οι μέσες ωριαίες ταχύτητες του. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν εμπειριστατωμένα οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου Βαρδάρη, οι οποίες αποτέλεσαν αντικείμενο έντονου ενδιαφέροντος, καθώς ακραίες τιμές αυτών, έχουν προκαλέσει στο παρελθόν σημαντικές ζημιές σε δεντροφυτείες και καλλιέργειες.

### 2.5.1. Ανεμομετρική κλίμακα

Για μια ολοκληρωμένη μελέτη των ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη, κρίθηκε χρήσιμο να καταγραφεί η ανεμομετρική κλίμακα.

**Πίνακας 2.7:** Ανεμομετρική κλίμακα Beaufort (Κυριαζόπουλος και Λειβαδάς, 1980)

ταχύτητα (km/h)	χαρακτηρισμός ανέμου
12-19	ασθενής
20-28	μέτριος
29-38	λαμπρός
39-49	ισχυρός
50-61	σφοδρός
62-74	θυελλώδης
75-88	θύελλα
89-102	ισχυρή θύελλα

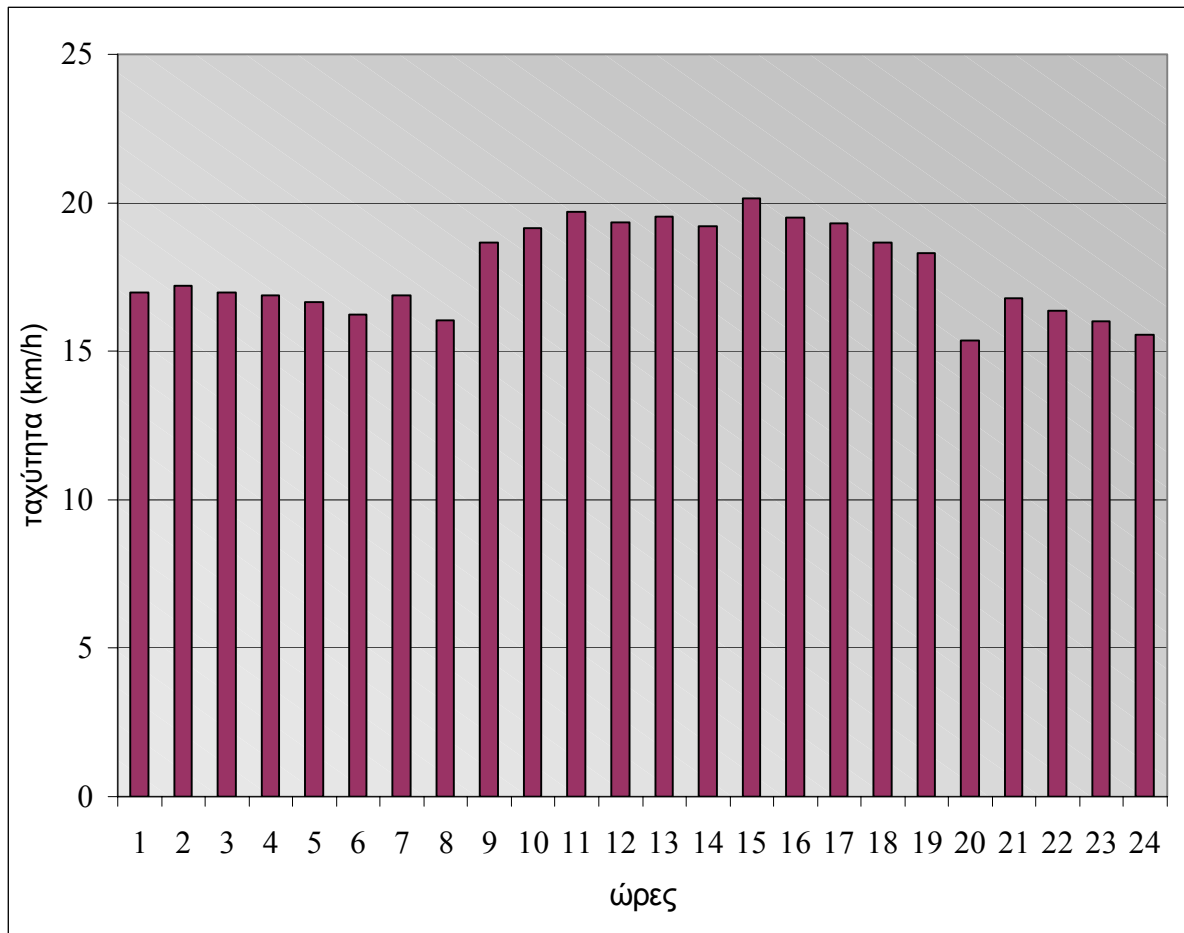


### 2.5.2. Μέσες ωριαίες τιμές ταχύτητας ανέμου Βαρδάρη

Ελήφθησαν οι ωριαίες τιμές των ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη και υπολογίσθηκε η μέση ταχύτητα του, ίση με 17,7 km/h. Στο επόμενο στάδιο της μελέτης, υπολογίσθηκαν οι μέσες ταχύτητες ανά ώρα (Πίνακας 2.8) και εξετάστηκε η πορεία των τιμών τους στο εικοσιτετράωρο (Σχήμα 2.10).

**Πίνακας 2.8:** Μέσες ωριαίες ταχύτητες ανέμου Βαρδάρη

ώρα	μέση ταχύτητα ανέμου Βαρδάρη (km/h)
1	17,0
2	17,2
3	17,0
4	16,9
5	16,7
6	16,2
7	16,9
8	16,0
9	18,7
10	19,2
11	19,7
12	19,3
13	19,5
14	19,2
15	20,2
16	19,5
17	19,3
18	18,7
19	18,3
20	15,4
21	16,8
22	16,4
23	16,0
24	15,5

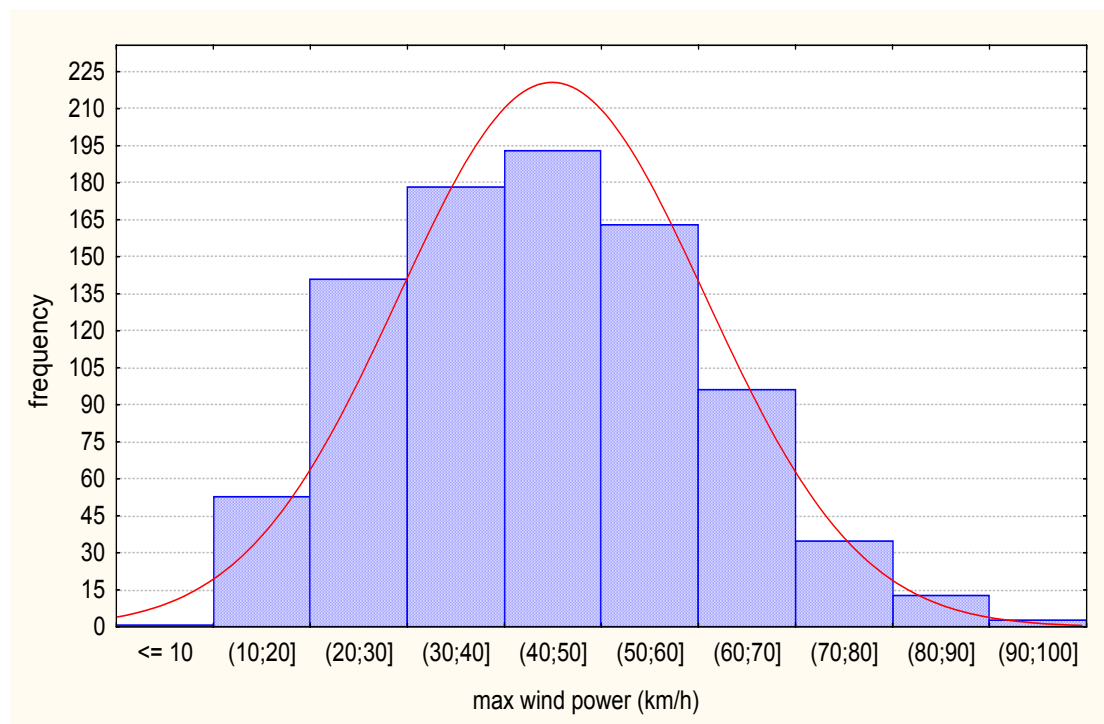


**Σχήμα 2.10:** Μέσες ωριαίες ταχύτητες του ανέμου Βαρδάρη σε km/h

- Οι μέσες ωριαίες ταχύτητες λαμβάνουν τιμές στο διάστημα μεταξύ 15 km/h και 21 km/h. Για το συγκεκριμένο φάσμα ταχυτήτων, με βάση την ανεμομετρική κλίμακα, χαρακτηρίζεται ο άνεμος, ως ασθενής έως μέτριος.
- Η μέγιστη τιμή μέσης ωριαίας ταχύτητας του ανέμου Βαρδάρη σημειώθηκε στις 15.00, ίση με 20,2 km/h.
- Παρατηρείται μια αύξηση στη μέση ωριαία ταχύτητα του ανέμου, της τάξεως του 16%, για το χρονικό διάστημα της ημέρας, μεταξύ 09.00 και 19.00. Για το προαναφερθέν διάστημα, οι μέσες ωριαίες ταχύτητες κυμαίνονται στα 19,2 km/h, ενώ για το υπόλοιπο της ημέρας στα 16,5 km/h.

### 2.5.3. Ιστόγραμμα συχνοτήτων των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη

Σε πρώτο στάδιο, με τη χρήση του στατιστικού πακέτου Statistica (edition 99), ομαδοποιείται το δείγμα των 875 μεγίστων ωριαίων τιμών ταχύτητας ανέμου Βαρδάρη σε 10 κλάσεις και προκύπτει το παρακάτω ιστόγραμμα συχνοτήτων.



**Σχήμα 2.11:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη.

Στο παραπάνω ιστόγραμμα, στον άξονα  $x$  καταγράφονται οι κλάσεις των μεγίστων ταχυτήτων και στον άξονα  $y$  η συχνότητα της κάθε κλάσης, δηλαδή ο αριθμός των παρατηρήσεων του δείγματος που ανήκουν στην κλάση αυτή. Η σχετική συχνότητα της κάθε κλάσης, ισούται με τη συχνότητα διαιρούμενη με το συνολικό αριθμό παρατηρήσεων του δείγματος, το οποίο στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ίσο με 875.

Η ελάχιστη τιμή της μέγιστης ταχύτητας ανέμου βρέθηκε ίση με 15 km/h ενώ η μέγιστη 95 km/h. Η μέση τιμή υπολογίστηκε ίση με 44,9 km/h. Για να ελεγχθεί κατά πόσο συμμετρική ή ασύμμετρη είναι η κατανομή των συχνοτήτων και αν είναι ασύμμετρη κατά πόσο κλίνει προς τα δεξιά ή τα αριστερά υπολογίζεται ο συντελεστής ή μέτρο λοξότητας (skewness) και ο συντελεστής ή μέτρο κύρτωσης (kurtosis). Όταν ο συντελεστής λοξότητας είναι θετικός, η επικρατούσα τιμή βρίσκεται αριστερά από τη μέση τιμή, ενώ αν είναι αρνητικός βρίσκεται δεξιά από τη

μέση τιμή. Όταν ο συντελεστής κύρτωσης είναι μικρότερος του 3 η καμπύλη λέγεται πλατύκυρτη ενώ όταν είναι μεγαλύτερος του 3 λέγεται λεπτόκυρτη. Στο ιστόγραμμα συχνοτήτων των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη, η τιμή του συντελεστή λοξότητας υπολογίσθηκε ίση με 0,31, άρα η καμπύλη των συχνοτήτων έχει θετική ασυμμετρία και η επικρατούσα τιμή είναι αριστερά της μέσης, που είναι ίση με 44 km/h. Η τιμή του συντελεστή κύρτωσης βρέθηκε ίση με  $-0,35$  και συνεπώς η καμπύλη είναι πλατύκυρτη.

#### 2.5.4. Μηνιαία Κατανομή μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφεται η μηνιαία κατανομή των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη σε κλάσεις.

Πίνακας 2.9: Μηνιαία κατανομή μεγίστων ταχυτήτων σε κλάσεις

κλάσεις ταχυτήτων	15-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-74	75-88	89-100
I	2	11	24	26	25	22	3	0
Φ	0	10	14	14	16	16	1	1
M	5	21	17	13	17	11	2	0
A	3	7	13	9	9	4	1	0
M	5	8	8	10	4	5	2	0
I	12	19	18	12	8	9	2	2
I	9	21	20	31	18	13	2	2
A	11	8	11	13	11	6	2	0
Σ	3	16	8	11	10	5	4	0
O	2	9	6	12	9	7	0	0
N	0	5	19	24	17	5	2	0
Δ	1	6	20	18	19	15	2	1
συχνότητα κλάσης	53	141	178	193	163	118	23	6
σχ.συχνότητα κλάσης (%)	6,1	16,1	20,3	22,1	18,6	13,5	2,6	0,7

Στον πίνακα 2.9 χρωματίστηκαν κόκκινες, οι μηνιαίες συχνότητες που είναι μεγαλύτερες του 12, για κλάσεις ταχυτήτων με τιμές μεγαλύτερες των 51 km/h. Από τον παραπάνω πίνακα προέκυψαν τα εξής:

- ο Το εύρος μεγίστων ταχυτήτων με την υψηλότερη σχετική συχνότητα τις ημέρες Βαρδάρη, ίση με 22,1% βρέθηκε μεταξύ 40-50 km/h.
- ο Τους μήνες της ψυχρής περιόδου σημειώνονται σε υψηλότερο ποσοστό μέγιστες ταχύτητες μεγαλύτερες της μέσης τιμής.
- ο Τους μήνες της θερμής περιόδου παρατηρούνται υψηλές συχνότητες στις κλάσεις μεγίστων ταχυτήτων με τιμές μικρότερες και ίσες της μέσης τιμής.
- ο Το ποσοστό των ακραίων τιμών των μεγίστων ταχυτήτων (>75 km/h) είναι χαμηλό, ίσο με το 3,3% των συνολικών ημερών Βαρδάρη και δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη μηνιαία κατανομή.

#### **2.5.5. Πορεία των μέσων ετήσιων τιμών των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η πορεία των μέσων ετησίων μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη. Για να υπάρχει συνεχής ακολουθία ετών στο χρονικό διάστημα μελέτης, αυτό χωρίστηκε σε δυο επιμέρους υποπεριόδους: τα έτη από το 1961 έως το 1986, και από το 1996 έως το 2002.

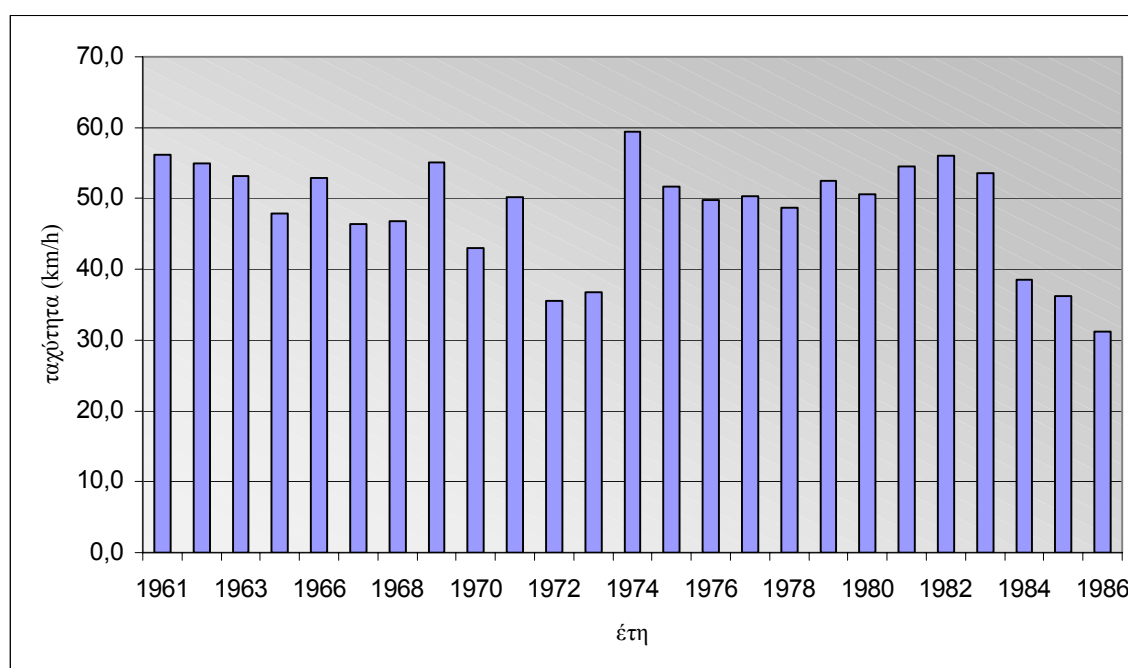
Για το διάστημα 1961-1985 υπολογίσθηκαν οι μέσες τιμές των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου και προέκυψε ο παρακάτω πίνακας.

**Πίνακας 2.10:** Μέση ετήσια μέγιστη ταχύτητα του ανέμου Βαρδάρη

Έτος	Μέση ετήσια μέγιστη ταχύτητα (km/h)
1961	56,2
1962	54,9
1963	53,2
1964	47,9
1966	52,9
1967	46,4
1968	46,9
1969	55,1
1970	43,0
1971	50,1
1972	35,5

1973	36,8
1974	59,5
1975	51,7
1976	49,8
1977	50,3
1978	48,7
1979	52,5
1980	50,6
1981	54,5
1982	56,1
1983	53,6
1984	38,5
1985	36,2
1986	31,2

Η πορεία των μέσων μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη ανά έτος για το διάστημα 1961-1986 απεικονίζεται γραφικά στο παρακάτω διάγραμμα.



**Σχήμα 2.12:** Η πορεία των μέσων μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη ανά έτος για το διάστημα 1961-1986.

Στο παραπάνω διάγραμμα διακρίνεται η υψηλότερη στήλη το έτος 1974, συνεπώς το έτος αυτό οι μέσες ετήσιες τιμές των μέγιστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη ήταν οι υψηλότερες (περίπου 60 km/h). Τα έτη 1961 και 1982 διακρίνονται δυο

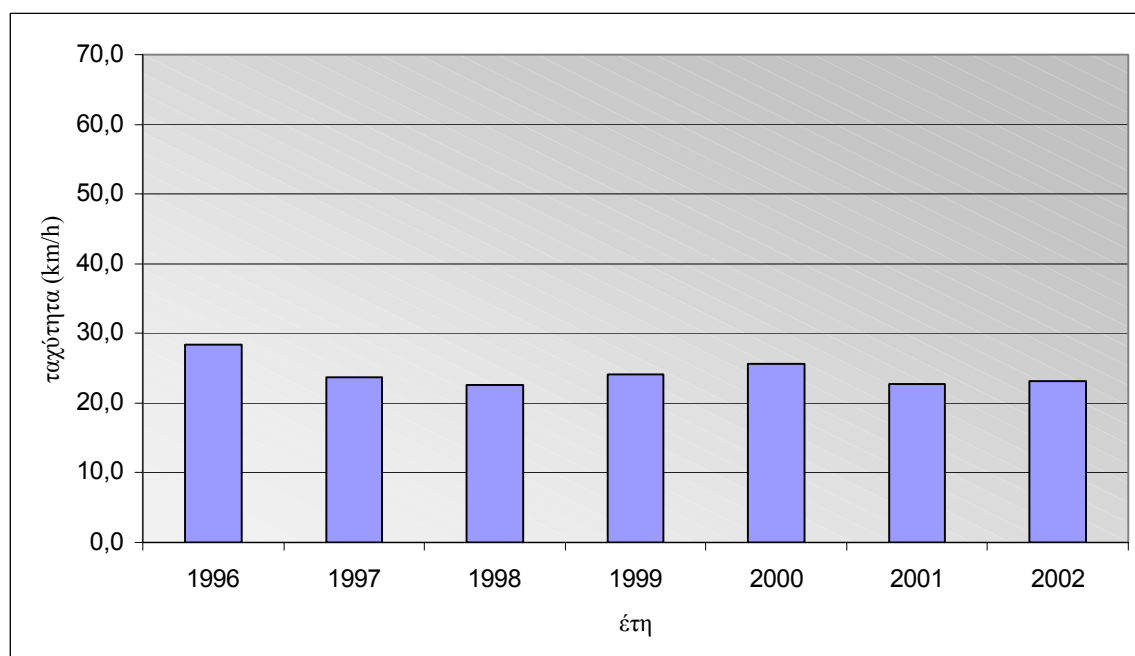
χαμηλότερες κορυφές με υψηλές μέσες τιμές μεγίστων ταχυτήτων, 56,2 και 56,1 km/h αντίστοιχα.

Η χαμηλότερη στήλη αντιστοιχεί στο έτος 1986 στο οποίο η μέση τιμή των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη υπολογίσθηκε ίση με 31,2 km/h. Από το 1984 έως το 1986 διακρίνεται μια πτωτική πορεία στις μέσες τιμές των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου που μπορεί όντως να υφίσταται ή να οφείλεται σε κακή λειτουργία ή αλλαγή του ανεμομετρικού οργάνου. Επιπλέον διακρίνονται οι χαμηλές τιμές μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη τα έτη 1972 και 1973.

Ομοίως για το διάστημα 1996-2002 υπολογίσθηκαν οι μέσες τιμές των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου και προέκυψε ο παρακάτω πίνακας.

**Πίνακας 2.11:** Μέση ετήσια μέγιστη ταχύτητα του ανέμου Βαρδάρη

<b>1996</b>	<b>28,3</b>
<b>1997</b>	<b>23,8</b>
<b>1998</b>	<b>22,6</b>
<b>1999</b>	<b>24,1</b>
<b>2000</b>	<b>25,6</b>
<b>2001</b>	<b>22,8</b>
<b>2002</b>	<b>23,2</b>

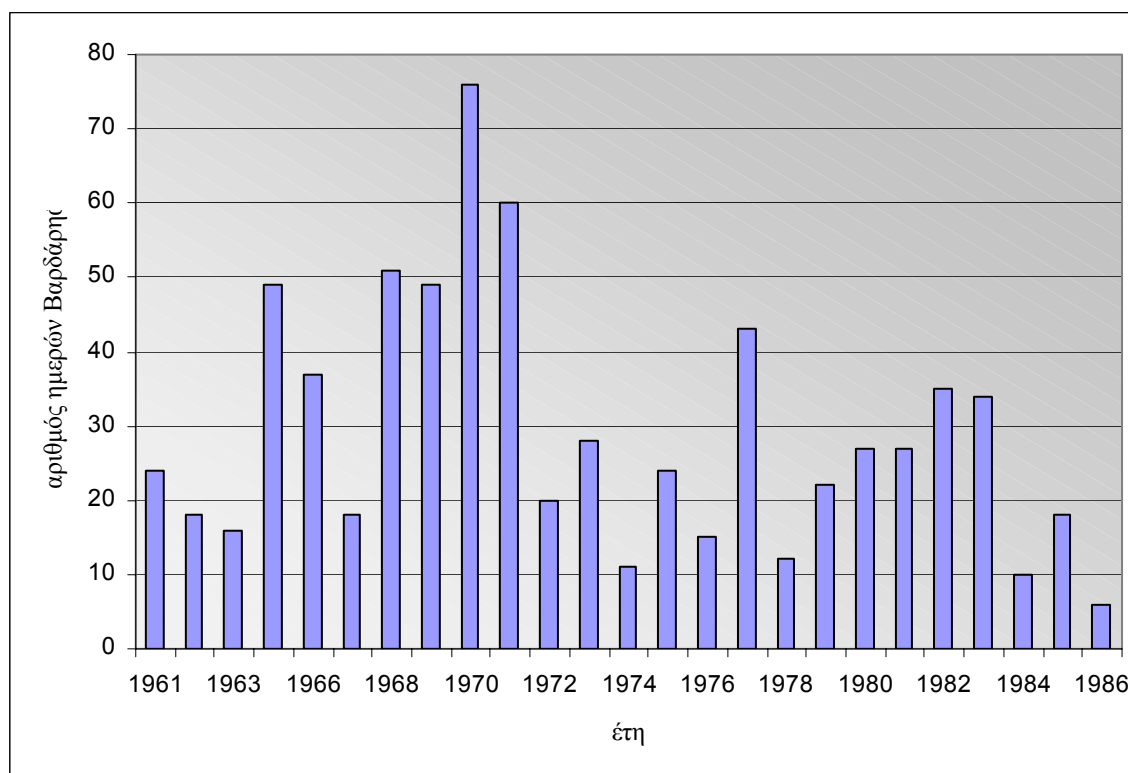


**Σχήμα 2.13:** Η πορεία των μέσων μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη ανά έτος για το διάστημα 1996-2002.

Η πορεία των μέσων μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη το διάστημα 1996-2002 δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη αυξομείωση κι έτσι δεν εντοπίζονται στο διάγραμμα 2.13 μέγιστα ή ελάχιστα κορυφών. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, είναι οι χαμηλές μέσες τιμές των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου που σημειώθηκαν το διάστημα 1996-2002 συγκριτικά με αυτές του χρονικού διαστήματος 1961-1986. Αυτό πιθανότατα οφείλεται α) στο φαινόμενο της αστικοποίησης σε συνδυασμό με την ανέγερση υψηλών κτιρίων μέσα στο χώρο του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου όπου βρίσκεται και ο Μετεωρολογικός Σταθμός, β) στην αλλαγή θέσης του οργάνου γ) στην αλλαγή του οργάνου.

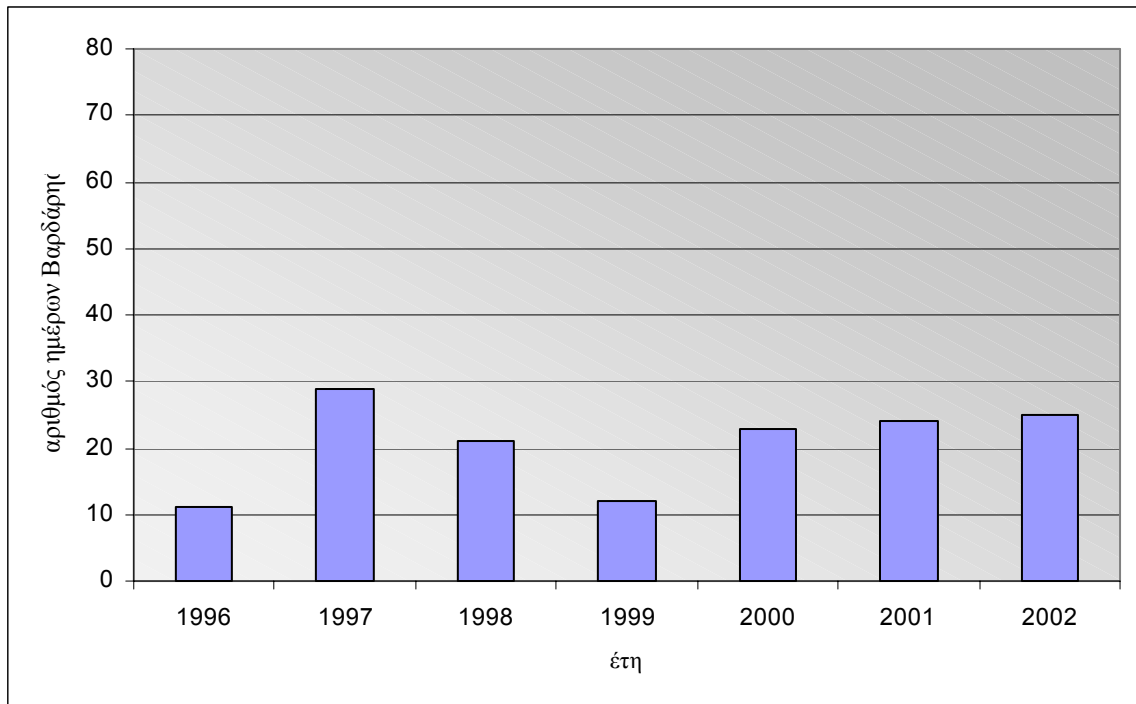
### 2.5.6. Μελέτη του αριθμού ημερών Βαρδάρη ανά έτος

Στο επόμενο στάδιο υπολογίστηκε ο αριθμός ημερών Βαρδάρη ανά έτος για το χρονικό διάστημα μελέτης και προέκυψαν τα διαγράμματα 2.14 και 2.15.



**Σχήμα 2.14:** Κατανομή των ημερών Βαρδάρη ανά έτος για το διάστημα 1961-1986.

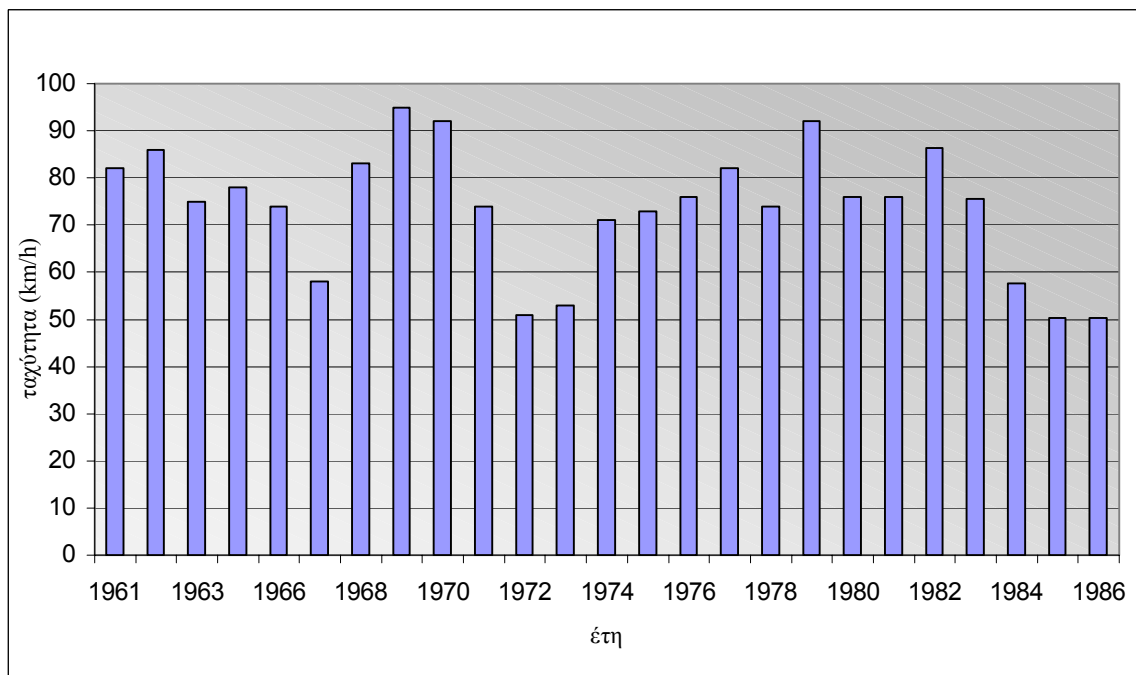




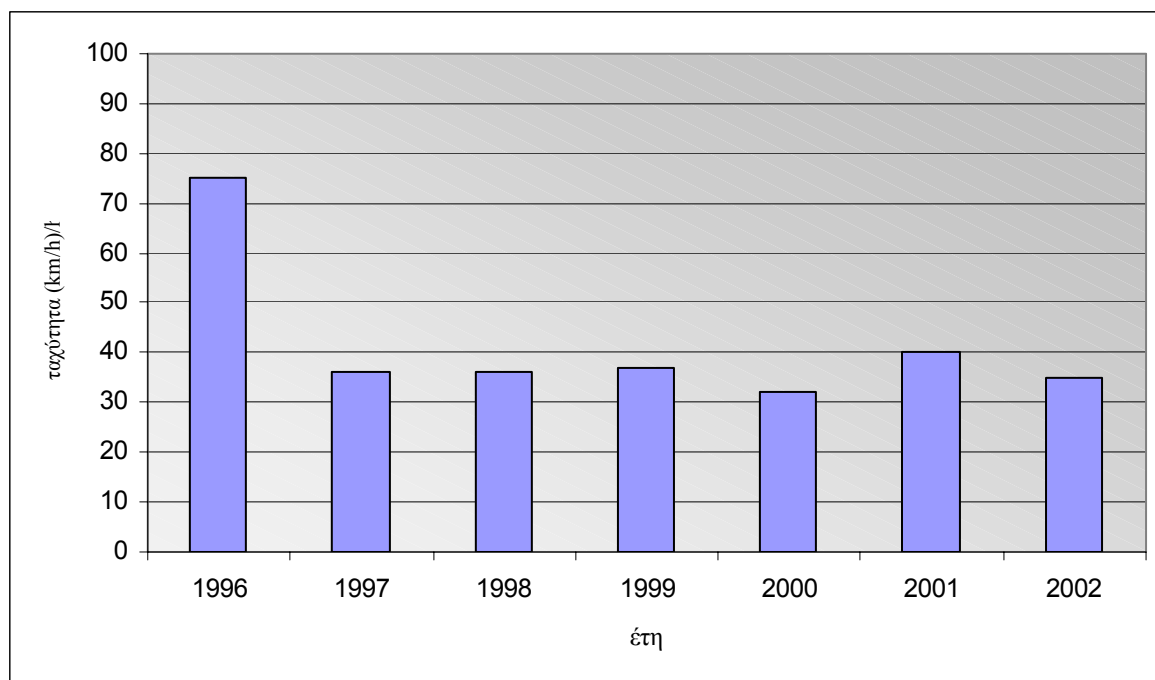
**Σχήμα 2.15:** Κατανομή των ημερών Βαρδάρη ανά έτος για το διάστημα 1996-2002.

### 2.5.7. Πορεία των ακραίων μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη

Στο τελευταίο στάδιο του παρόντος κεφαλαίου καταγράφηκαν οι ακραίες μέγιστες ταχύτητες του ανέμου Βαρδάρη ανά έτος, οι οποίες απεικονίζονται στα σχήματα 2.16 και 2.17.



**Σχήμα 2.16:** Ακραίες μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου Βαρδάρη ανά έτος για το χρονικό διάστημα 1961-1986.



**Σχήμα 2.17:** Ακραίες μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου Βαρδάρη ανά έτος για το χρονικό διάστημα 1996-2002.

Από τη στατιστική μελέτη που πραγματοποιήθηκε στις ημέρες Βαρδάρη ως προς τον αριθμό τους και την ταχύτητα του ανέμου ανά έτος αξίζει να σημειωθούν τα εξής:

- Το έτος 1970 σημειώθηκε ο μεγαλύτερος αριθμός ημερών με άνεμο Βαρδάρη, ίσος με 76. Το ίδιο έτος η υψηλότερη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου που καταγράφηκε είναι 92 km/h. Η μέση τιμή των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου υπολογίσθηκε ίση με 43 km/h.
- Το έτος 1974 ο αριθμός των ημερών Βαρδάρη που καταγράφηκαν ήταν σχετικά χαμηλός, ίσος με 11. Ωστόσο, το έτος αυτό σημειώθηκε η υψηλότερη μέση τιμή των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου, ίση με 59,5 km/h. Το ίδιο έτος, καταγράφηκε η ακραία μέγιστη τιμή της ταχύτητας ίση με 71 km/h.
- Η υψηλότερη ωριαία τιμή μέγιστης ταχύτητας ανέμου Βαρδάρη ίση με 95 km/h σημειώθηκε το έτος 1969. Το ίδιο έτος η μέση τιμή των μεγίστων ταχυτήτων υπολογίσθηκε 55,1 km/h.
- Όσον αφορά τον αριθμό των ημερών Βαρδάρη ανά έτος και τη μέση τιμή των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου αυτού, δεν εντοπίζεται πιθανή συσχέτιση.
- Η κατανομή των μέσων τιμών των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου ανά έτος (σχήματα 2.12 και 2.13) 'συμφωνεί' σε γενικές γραμμές με την κατανομή των ακραίων μεγίστων τιμών της ταχύτητας του (σχήματα 2.16 και 2.17).

- Το διάστημα 1984-1986 παρατηρείται μια απότομη πτώση στις μέσες τιμές των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη, η οποία συνεχίζεται εντονότερη το διάστημα 1996-2002.
- Μειωμένες τιμές ακραίων μεγίστων ταχυτήτων ανέμου Βαρδάρη σημειώνονται το χρονικό διάστημα 1997-2002, συγκριτικά με αυτές των προηγούμενων ετών.

## **2.6 Θερμοκρασία και σχετική υγρασία τις ημέρες Βαρδάρη**

Στο επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση του Βαρδάρη στον καιρό της Θεσσαλονίκης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η θερμοκρασία αέρα και η σχετική υγρασία στην περιοχή τις ημέρες Βαρδάρη λαμβάνοντας υπ' όψιν δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Όλες οι τιμές των θερμοκρασιών αέρα μετρήθηκαν σε ύψος 1,5 m πάνω από το έδαφος. Τα δεδομένα χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες όσες είναι και οι εποχές του έτους. Αρχικά, έγινε μια στατιστική μελέτη ως προς τις τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη για κάθε εποχή χωριστά. Στη συνέχεια, βρέθηκε η μέση ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας και υπολογίστηκε το μέσο ημερήσιο θερμομετρικό εύρος τις ημέρες Βαρδάρη ανά εποχή. Τέλος, απομονώθηκαν ορισμένα επεισόδια Βαρδάρη με διαφορετική διάρκεια, από μία έως έξι ημέρες και εξετάστηκε διεξοδικά η πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια των επεισοδίων.

Από τα δεδομένα του Μετεωρολογικού Σταθμού του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης ελήφθησαν οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας για τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη. Με τη χρήση του στατιστικού πακέτου Statistica (edition 99) υπολογίστηκαν στατιστικές παράμετροι των τιμών αυτών και στη συνέχεια προέκυψαν τα αντίστοιχα ιστογράμματα συχνότητας για κάθε εποχή χωριστά.

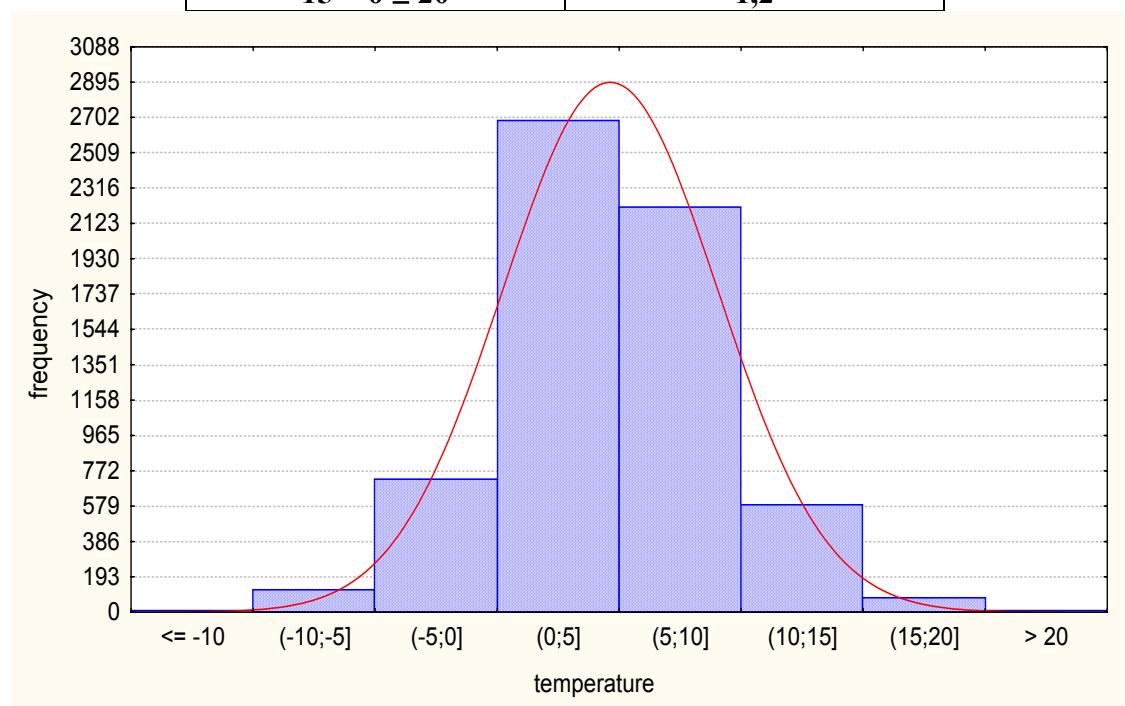
### **2.6.1. Χειμώνας**

Ελήφθησαν οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα για τις 267 ημέρες με άνεμο Βαρδάρη που σημειώθηκαν το χειμώνα, δηλαδή σύνολο 6408 τιμές θερμοκρασίας

αέρα. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα υπολογίστηκε ίση με  $4,6^{\circ}\text{C}$ . Η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε στο σύνολο των 267 ημερών Βαρδάρη το χειμώνα είναι  $-9,6^{\circ}\text{C}$  και η μέγιστη  $18^{\circ}\text{C}$ . Οι κλάσεις των θερμοκρασιών με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα 2.12 και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.18.

**Πίνακας 2.12:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη το χειμώνα.

Κλάσεις θερμοκρασιών ( $^{\circ}\text{C}$ )	συχνότητα (%)
$-10 < \theta \leq -5$	1,9
$-5 < \theta \leq 0$	11,3
$0 < \theta \leq 5$	41,9
$5 < \theta \leq 10$	34,5
$10 < \theta \leq 15$	9,2
$15 < \theta \leq 20$	1,2



**Σχήμα 2.18:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη το χειμώνα.

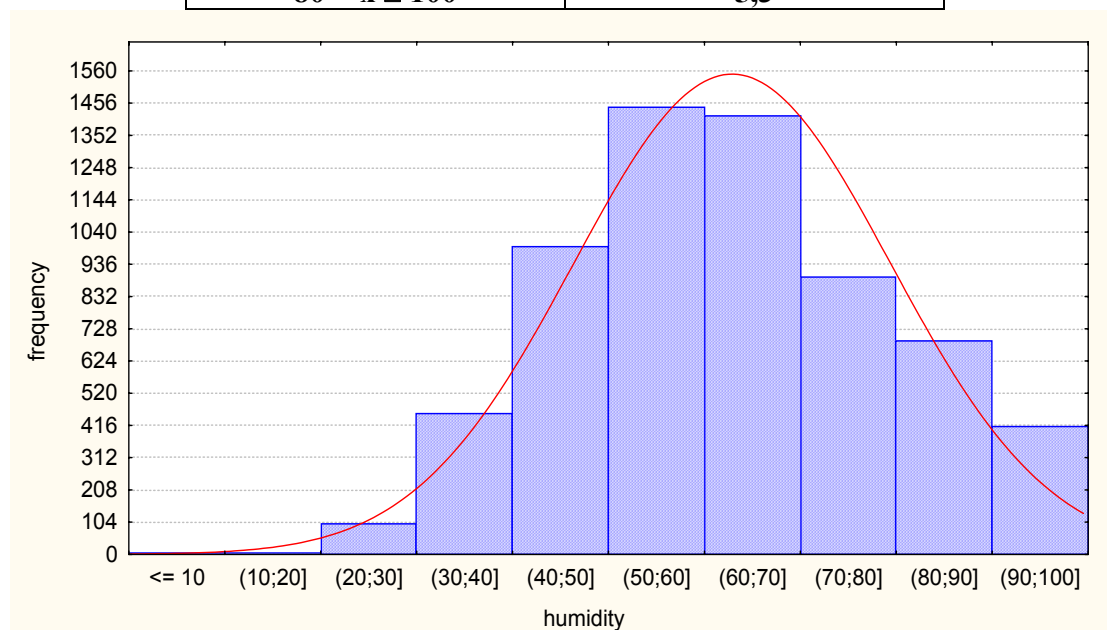
Η κλάση με τις θερμοκρασίες μεταξύ των τιμών  $0^{\circ}\text{C}$  και  $5^{\circ}\text{C}$  εμφανίζει την υψηλότερη συχνότητα τις ημέρες Βαρδάρη το χειμώνα, ίση με 41,9%. Ακολουθεί η κλάση με τιμές μεταξύ  $5^{\circ}\text{C}$  και  $10^{\circ}\text{C}$  και συχνότητα 34,5%. Τις ημέρες Βαρδάρη δεν σημειώνονται θερμοκρασίες χαμηλότερες των  $-10^{\circ}\text{C}$ , ενώ πολύ χαμηλό είναι και το ποσοστό εμφάνισης θερμοκρασιών χαμηλότερων των  $-5^{\circ}\text{C}$ . Ωστόσο, το χειμώνα

κατά τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη είναι ιδιαίτερα έντονο το αίσθημα του ψύχους στον άνθρωπο. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαμηλής αισθητής θερμοκρασίας που σχετίζεται με την ταχύτητα του ανέμου και τις χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας τις ημέρες αυτές.

Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη κατά τη χειμερινή περίοδο υπολογίσθηκε ίση με 62,8 %. Η ελάχιστη τιμή της σχετικής υγρασίας που καταγράφηκε στο σύνολο των 267 ημερών Βαρδάρη το χειμώνα είναι 15% και η μέγιστη 99%. Το ποσοστό υψηλών τιμών σχετικής υγρασίας (>90%) που καταγράφηκε τις ημέρες Βαρδάρη, πιθανότατα αντιστοιχεί σε ώρες πριν από την έναρξη του επεισοδίου Βαρδάρη την ίδια ημέρα. Οι κλάσεις των τιμών της σχετικής υγρασίας με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα 2.13 και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.19.

**Πίνακας 2.13:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων των τιμών σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη το χειμώνα.

Κλάσεις τιμών σχετικής υγρασίας (%)	συχνότητα (%)
$0 < x \leq 20$	0,4
$20 < x \leq 40$	29,7
$40 < x \leq 60$	47,0
$60 < x \leq 80$	17,6
$80 < x \leq 100$	5,3



**Σχήμα 2.19:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των τιμών της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη το χειμώνα.

Η κλάση με την υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης, ίση με 47% περιλαμβάνει τιμές σχετικής υγρασίας μεταξύ 40% έως 60%. Οι τιμές της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη είναι χαμηλές σχετικά μ' αυτές της χειμερινής περιόδου, λόγω του ξηρών ηπειρωτικών αερίων μαζών που μεταφέρονται, λόγω του ανέμου, πάνω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης.

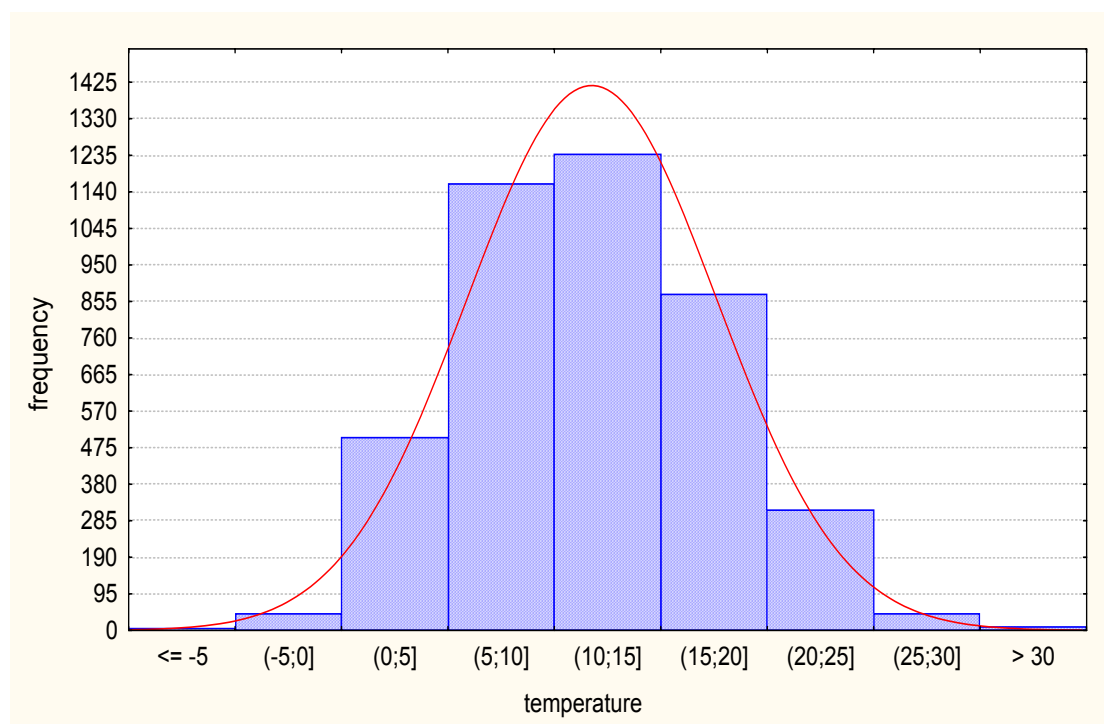
### 2.6.2. Άνοιξη

Ελήφθησαν οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα για τις 174 ημέρες με άνεμο Βαρδάρη που σημειώθηκαν την άνοιξη, δηλαδή σύνολο 4176 τιμές θερμοκρασίας αέρα. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη την Άνοιξη υπολογίστηκε ίση με  $11,7^{\circ}\text{C}$ . Η ελάχιστη ωριαία θερμοκρασία που καταγράφηκε στο σύνολο των 174 ημερών Βαρδάρη την Άνοιξη είναι  $-2,2^{\circ}\text{C}$  και η μέγιστη  $31,3^{\circ}\text{C}$ . Οι κλάσεις των θερμοκρασιών με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα 2.14 και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.20.

**Πίνακας 2.14:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη την Άνοιξη.

Κλάσεις θερμοκρασιών ( $^{\circ}\text{C}$ )	συχνότητα (%)
$-5 < x \leq 0$	1,0
$0 < x \leq 5$	12,0
$5 < x \leq 10$	27,8
$10 < x \leq 15$	29,6
$15 < x \leq 20$	21,0
$20 < x \leq 25$	7,5
$25 < x \leq 30$	1,0
$30 < x \leq 35$	0,2

Την Άνοιξη, οι θερμοκρασίες κατά τις ημέρες Βαρδάρη έχουν μεγάλο εύρος τιμών μεταξύ  $-5^{\circ}\text{C}$  και  $35^{\circ}\text{C}$ . Οι χαμηλές θερμοκρασίες καταγράφονται τους μήνες της ψυχρής περιόδου, Μάρτιο και Απρίλιο ενώ οι υψηλές κυρίως το Μάιο, το πρώτο μήνα της θερμής περιόδου. Στο διάστημα θερμοκρασιών μεταξύ  $0^{\circ}\text{C}$  και  $25^{\circ}\text{C}$  καταγράφεται συχνότητα ίση με 97,8 %. Θερμοκρασίες χαμηλότερες των  $0^{\circ}\text{C}$  και υψηλότερες των  $25^{\circ}\text{C}$  παρουσιάζουν σχεδόν μηδενικές συχνότητες και άρα συναντώνται πολύ σπάνια τις ημέρες Βαρδάρη, την Άνοιξη.

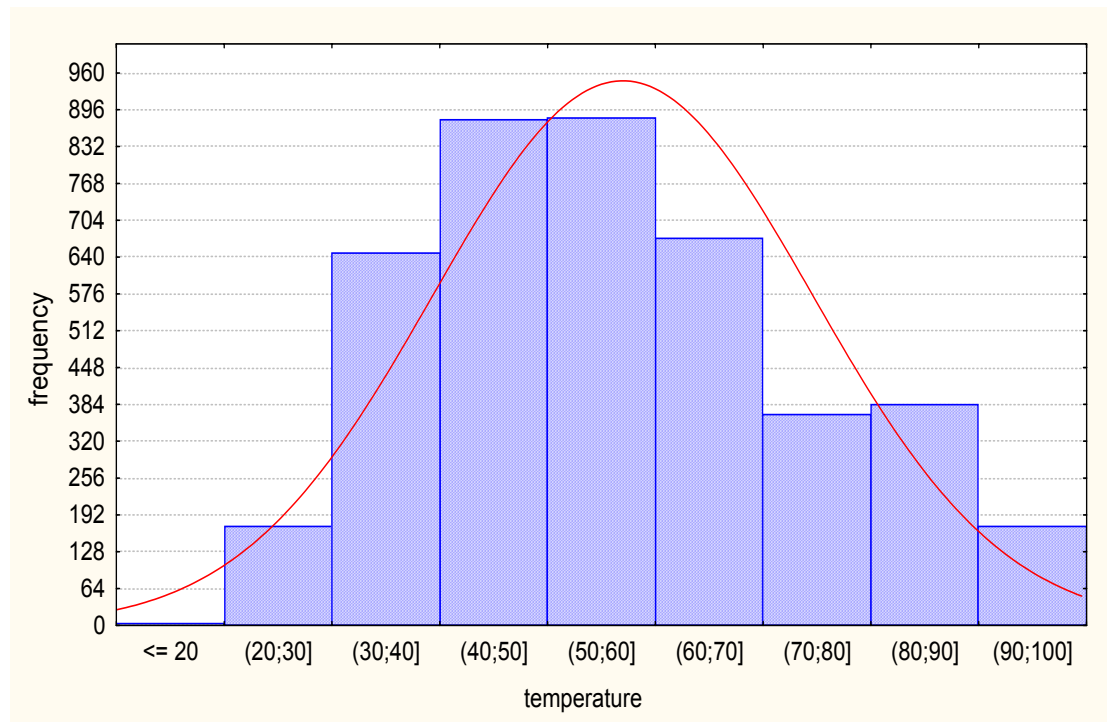


**Σχήμα 2.20:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη την Άνοιξη.

Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη την Άνοιξη υπολογίστηκε ίση με 57 %. Η ελάχιστη ωριαία τιμή της σχετικής υγρασίας που καταγράφηκε στο σύνολο των 174 ημερών Βαρδάρη την Άνοιξη είναι 22% και η μέγιστη 100%. Οι κλάσεις των τιμών της σχετικής υγρασίας με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα 2.15 και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.21.

**Πίνακας 2.15:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων των τιμών σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη την Άνοιξη.

Κλάσεις τιμών σχετικής υγρασίας (%)	συχνότητα (%)
$0 < x \leq 20$	4,1
$20 < x \leq 40$	15,5
$40 < x \leq 60$	21,1
$60 < x \leq 80$	21,1
$80 < x \leq 100$	16,1



**Σχήμα 2.21:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των τιμών της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη την Άνοιξη.

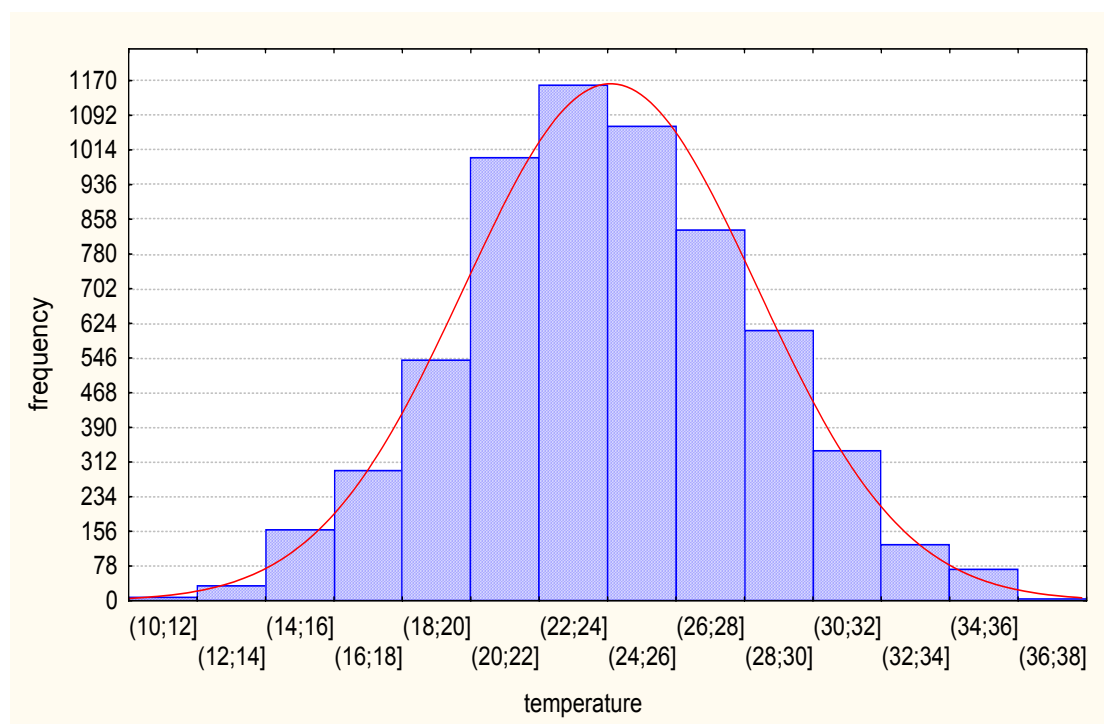
### 2.6.3. Καλοκαίρι

Ελήφθησαν οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα για τις 260 ημέρες με άνεμο Βαρδάρη που σημειώθηκαν το καλοκαίρι, δηλαδή σύνολο 6240 τιμές θερμοκρασίας αέρα. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη το καλοκαίρι υπολογίστηκε ίση με  $24^{\circ}\text{C}$ . Η ελάχιστη ωριαία θερμοκρασία που καταγράφηκε στο σύνολο των 260 ημερών Βαρδάρη το Καλοκαίρι είναι  $11,4^{\circ}\text{C}$  και η μέγιστη  $36,2^{\circ}\text{C}$ . Οι κλάσεις των θερμοκρασιών με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.22.

**Πίνακας 2.16:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη το καλοκαίρι.

Κλάσεις θερμοκρασιών ( $^{\circ}\text{C}$ )	συχνότητα (%)
$10 < x \leq 15$	1,8
$15 < x \leq 20$	14,9
$20 < x \leq 25$	43,4
$25 < x \leq 30$	31,4
$30 < x \leq 35$	8,1
$35 < x \leq 40$	0,5





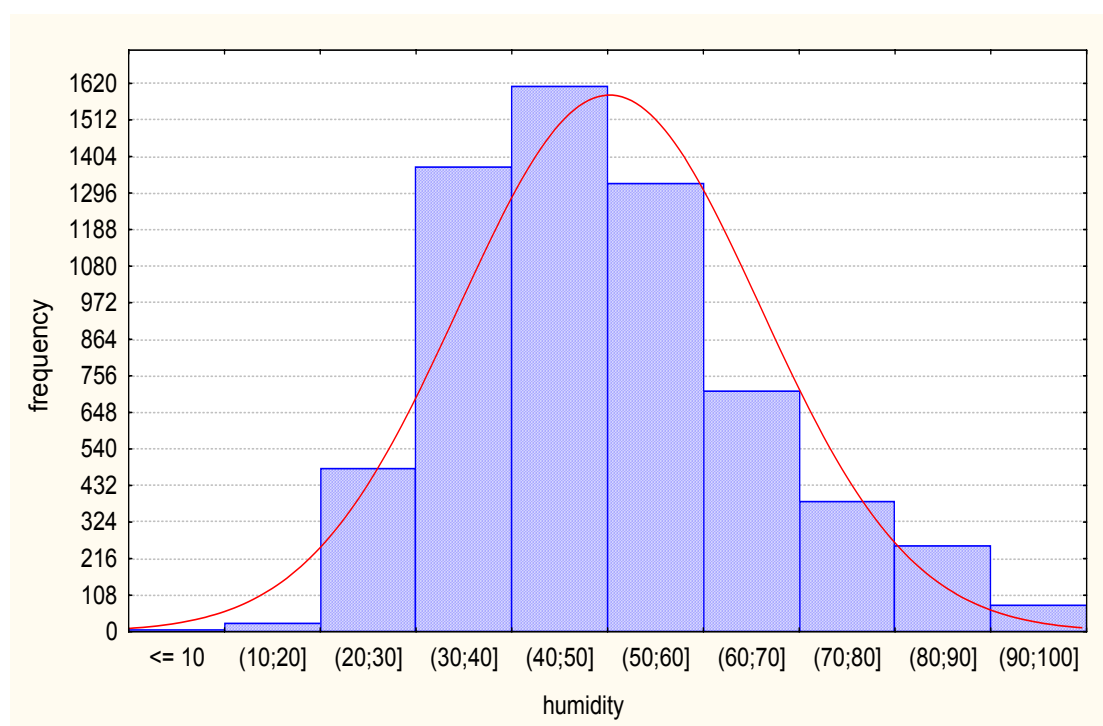
**Σχήμα 2.22:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη το Καλοκαίρι.

Την καλοκαιρινή περίοδο τις ημέρες Βαρδάρη οι θερμοκρασίες κυμαίνονται σε φυσιολογικές για την εποχή τιμές. Η κλάση που περιλαμβάνει τιμές θερμοκρασιών μεταξύ  $20^{\circ}\text{C}$  και  $30^{\circ}\text{C}$  εμφανίζεται στο 74,8% των συνολικών ημερών Βαρδάρη. Επιπλέον, μικρό είναι το ποσοστό της κλάσης με θερμοκρασίες μεταξύ  $30^{\circ}\text{C}$  και  $35^{\circ}\text{C}$  (8,1%), ενώ σχεδόν μηδενικό της κλάσης μεταξύ  $35^{\circ}\text{C}$  και  $40^{\circ}\text{C}$  (0,5%). Εν κατακλείδι, η επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη το καλοκαίρι στην περιοχή της Θεσσαλονίκης συνεπάγεται ημέρες με χαμηλές για την εποχή θερμοκρασίες.

Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη κατά την καλοκαιρινή περίοδο υπολογίσθηκε ίση με 50 %. Η ελάχιστη ωριαία τιμή της σχετικής υγρασίας που καταγράφηκε στο σύνολο των 260 ημερών Βαρδάρη το καλοκαίρι είναι 13% και η μέγιστη 100%. Το ποσοστό υψηλών τιμών σχετικής υγρασίας (>90) που καταγράφηκε τις ημέρες Βαρδάρη, πιθανότατα αντιστοιχεί σε ώρες πριν από την έναρξη του επεισοδίου Βαρδάρη την ίδια ημέρα. Οι κλάσεις των τιμών της σχετικής υγρασίας με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα 2.17 και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.23.

**Πίνακας 2.17:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων των τιμών σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη το καλοκαίρι.

Κλάσεις τιμών σχετικής υγρασίας (%)	συχνότητα (%)
$0 < x \leq 20$	4,1
$20 < x \leq 40$	15,5
$40 < x \leq 60$	21,1
$60 < x \leq 80$	21,1
$80 < x \leq 100$	16,1



**Σχήμα 2.23:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των τιμών της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη το Καλοκαίρι.

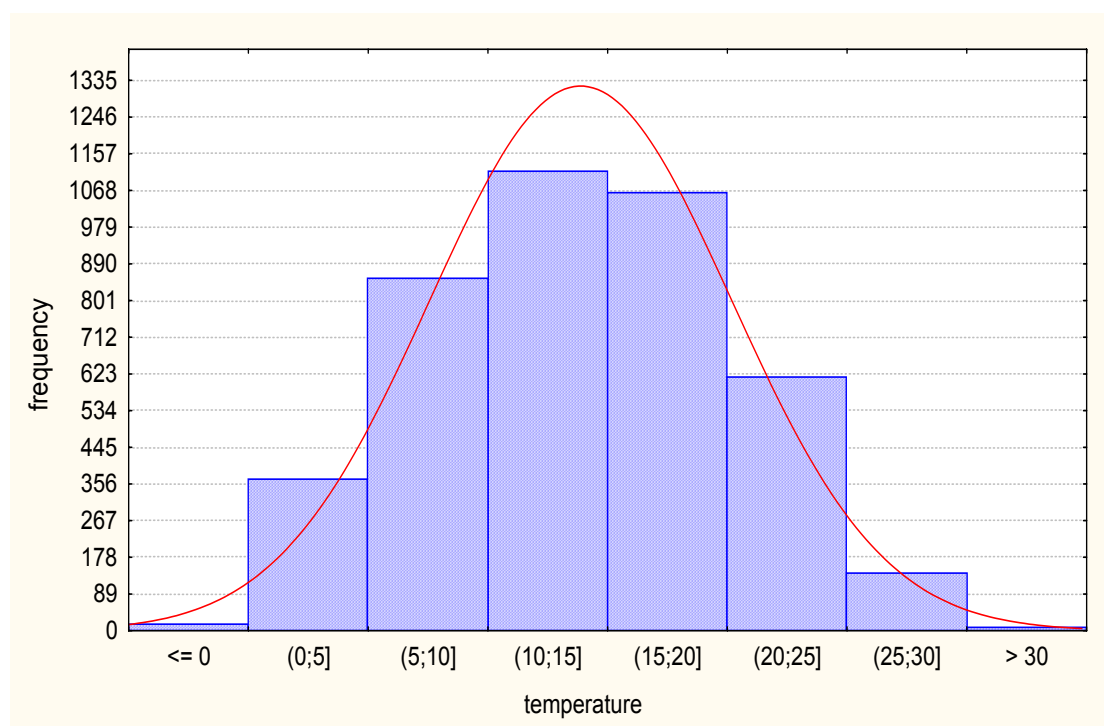
#### 2.6.4. Φθινόπωρο

Ελήφθησαν οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα για τις 174 ημέρες με άνεμο Βαρδάρη που σημειώθηκαν το φθινόπωρο, δηλαδή σύνολο 4176 τιμές θερμοκρασίας αέρα. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη το Φθινόπωρο υπολογίστηκε ίση με  $13,9^{\circ}\text{C}$ . Η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε στο σύνολο των 174 ημερών Βαρδάρη το φθινόπωρο είναι  $-1,6^{\circ}\text{C}$  και η μέγιστη  $31,5^{\circ}\text{C}$ . Η κατανομή των συχνοτήτων των θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη το φθινόπωρο είναι όμοια με αυτήν της Άνοιξης. Θερμοκρασίες μεταξύ των τιμών  $0^{\circ}\text{C}$  και  $25^{\circ}\text{C}$  συναντώνται σε ποσοστό ίσο με το  $86,6\%$  των συνολικών ωριαίων τιμών,

ενώ σχεδόν μηδενικά είναι τα ποσοστά θερμοκρασιών χαμηλότερων των  $0^{\circ}\text{C}$  και υψηλότερων των  $25^{\circ}\text{C}$ . Οι κλάσεις των θερμοκρασιών με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα 2.18 και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.24.

**Πίνακας 2.18:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη το Φθινόπωρο.

Κλάσεις θερμοκρασιών ( $^{\circ}\text{C}$ )	συχνότητα (%)
$-5 < x \leq 0$	0,4
$0 < x \leq 5$	8,8
$5 < x \leq 10$	20,5
$10 < x \leq 15$	26,7
$15 < x \leq 20$	25,4
$20 < x \leq 25$	14,7
$25 < x \leq 30$	3,4
$30 < x \leq 35$	0,2
$35 < x \leq 40$	0,4



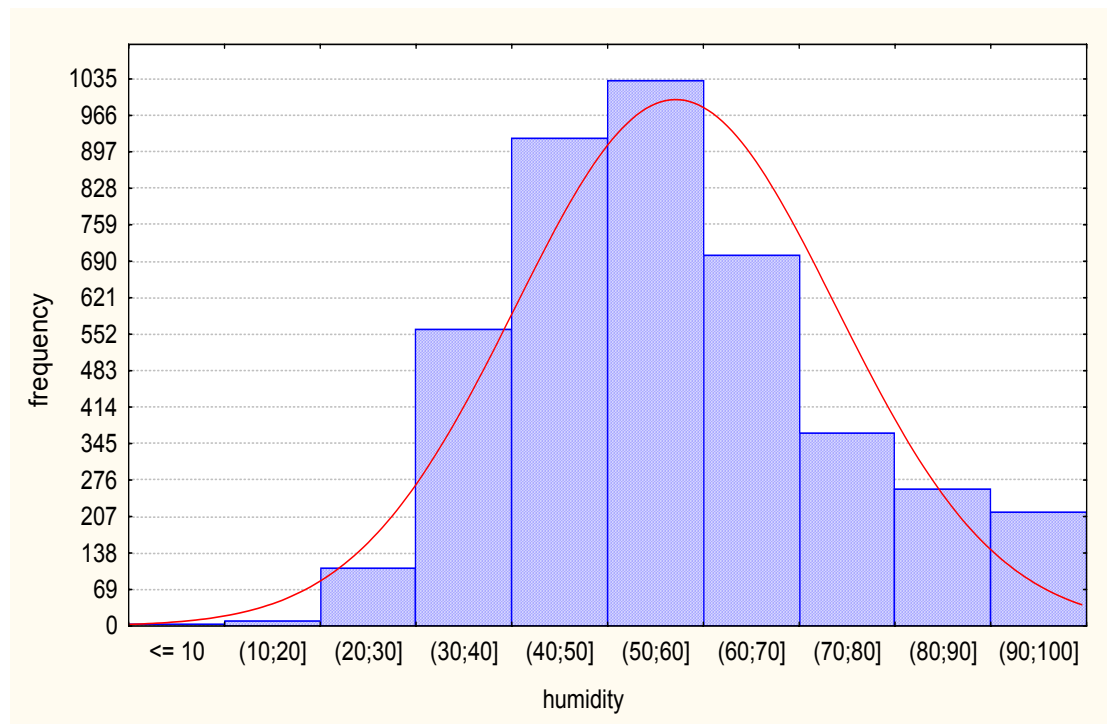
**Σχήμα 2.24:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των θερμοκρασιών τις ημέρες Βαρδάρη το Φθινόπωρο.

Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη το Φθινόπωρο υπολογίσθηκε ίση με 57 %. Η ελάχιστη τιμή της σχετικής υγρασίας που καταγράφηκε στο σύνολο των 174 ημερών Βαρδάρη το φθινόπωρο είναι 15% και η

μέγιστη 99%. Οι κλάσεις των τιμών της σχετικής υγρασίας με τις αντίστοιχες συχνότητες τους καταγράφονται στον πίνακα 2.19 και απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 2.25.

**Πίνακας 2.19:** Κατανομή συχνοτήτων των κλάσεων των τιμών σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη το φθινόπωρο.

Κλάσεις τιμών σχετικής υγρασίας (%)	συχνότητα (%)
$0 < x \leq 20$	0
$20 < x \leq 40$	16
$40 < x \leq 60$	47
$60 < x \leq 80$	26
$80 < x \leq 100$	11



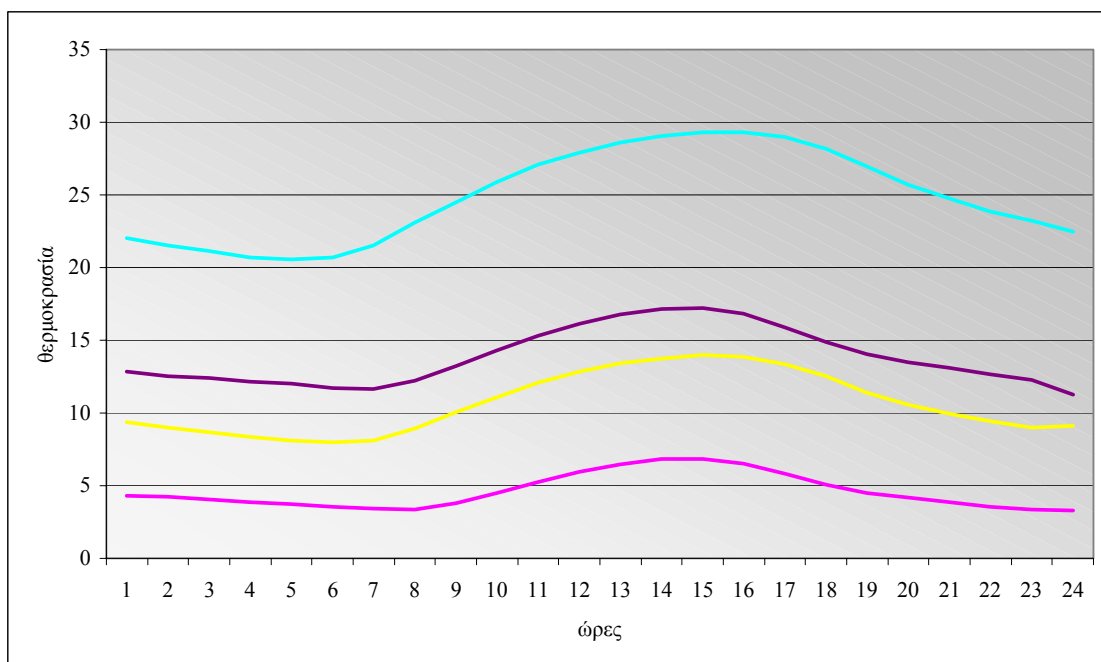
**Σχήμα 2.25:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων των τιμών της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη το Φθινόπωρο.

## 2.7 Ημερήσια πορεία της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας τις ημέρες Βαρδάρη

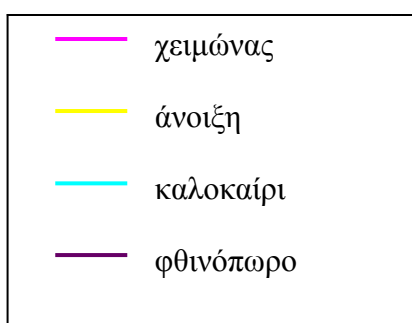
Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η πορεία της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας με άνεμο Βαρδάρη. Η μελέτη αυτή έγινε για κάθε εποχή του έτους, αφού πρώτα υπολογίσθηκαν ανά εποχή οι μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας αέρα τις ημέρες Βαρδάρη. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον πίνακα 2.20 και απεικονίζονται γραφικά οι πορείες των θερμοκρασιών στο σχήμα 2.26.

**Πίνακας 2.20:** Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα ανά εποχή τις ημέρες Βαρδάρη

ώρες	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
1	4,3	9,3	22,0	12,8
2	4,2	9,0	21,5	12,6
3	4,0	8,7	21,1	12,4
4	3,8	8,3	20,7	12,2
5	3,7	8,1	20,6	12,0
6	3,5	8,0	20,7	11,7
7	3,4	8,1	21,5	11,7
8	3,4	8,9	23,1	12,2
9	3,8	10,1	24,5	13,3
10	4,5	11,1	25,9	14,3
11	5,3	12,1	27,1	15,3
12	5,9	12,8	27,9	16,1
13	6,5	13,4	28,6	16,8
14	6,8	13,8	29,1	17,2
15	6,8	14,0	29,3	17,2
16	6,5	13,8	29,3	16,8
17	5,8	13,3	29,0	15,9
18	5,1	12,5	28,1	14,9
19	4,5	11,4	26,9	14,1
20	4,2	10,5	25,7	13,5
21	3,9	9,9	24,7	13,1
22	3,6	9,5	23,8	12,7
23	3,4	9,0	23,2	12,3
24	3,3	9,1	22,5	11,3



Σχήμα 2.26: Η πορεία της θερμοκρασίας αέρα τις ημέρες Βαρδάρη ανά εποχή



Επιπλέον, υπολογίστηκε το μέσο ημερήσιο θερμομετρικό εύρος ανά εποχή, μια σημαντική κλιματική παράμετρος που ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη κι ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας αέρα μέσα στο 24ωρο.

Πίνακας 2.21: Μέγιστες κι ελάχιστες ωριαίες θερμοκρασίες τις ημέρες Βαρδάρη ανά εποχή

	ώρα	χειμώνας	ώρα	άνοιξη	ώρα	καλοκαίρι	ώρα	φθινόπωρο
μέγιστη ωριαία θερμοκρασία (°C)	14:00	6,8	15:00	14,0	15:00	29,3	14:00	17,2
ελάχιστη ωριαία θερμοκρασία(°C)	24:00	3,3	06:00	8,0	05:00	20,6	24:00	11,3
μέσο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος (°C)		3,5		6,0		8,7		5,9

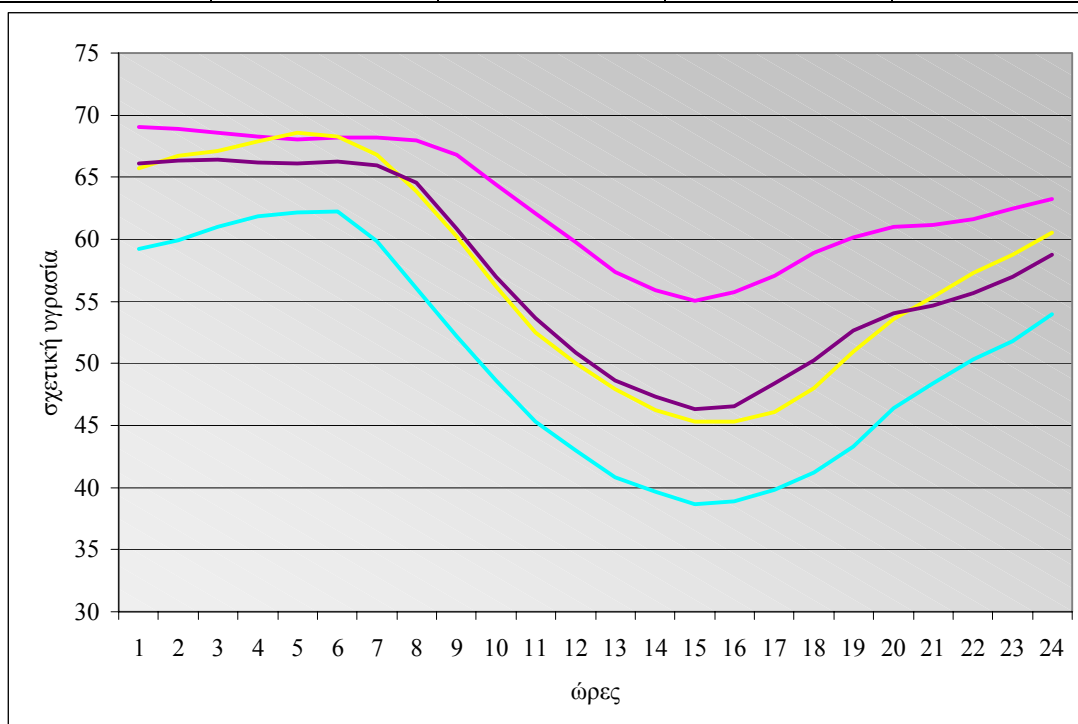
Στις ημέρες Βαρδάρη, το χειμώνα σημειώνεται το μικρότερο μέσο ημερήσιο θερμομετρικό εύρος, ίσο με 3,5 °C, ενώ το καλοκαίρι το μεγαλύτερο ίσο με 8,7 °C. Την περίοδο της άνοιξης και του φθινοπώρου οι τιμές του ημερήσιου θερμομετρικού εύρους είναι παραπλήσιες, ίσες με 6 °C και 5,9 °C αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μια από τις κύριες επιδράσεις του ανέμου Βαρδάρη είναι η έντονη νεφοδιάλυση και κατ' επέκταση η υψηλή ηλιοφάνεια στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η έρευνα έχει να επιδείξει ότι τις ηλιοφεγγείς ημέρες σημειώνονται υψηλές τιμές θερμομετρικού εύρους έως και 20 °C. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τη διάρκεια της ημέρας η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει άμεσα στο έδαφος με αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας. Κατά την αίθρια νύχτα εκπέμπεται έντονη ακτινοβολία από το έδαφος, γρήγορη ψύξη του αέρα και άρα έντονη πτώση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται τις ημέρες Βαρδάρη αφού οι τιμές του ημερήσιου θερμομετρικού εύρους είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Μια πιθανή ερμηνεία είναι ότι η ισχυρή πνοή του ανέμου Βαρδάρη αλλοιώνει το ρυθμό αύξησης και ελάττωσης της θερμοκρασίας αέρα καθώς και της θερμοκρασίας εδάφους. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες καταγράφονται το χειμώνα και το φθινόπωρο στις 24:00 τα μεσάνυχτα. Οι μέγιστες θερμοκρασίες την ίδια περίοδο σημειώνονται στις 14:00 το μεσημέρι. Το καλοκαίρι και την άνοιξη οι μέγιστες θερμοκρασίες σημειώνονται στις 15:00 το μεσημέρι ενώ οι ελάχιστες τις πρώτες πρωινές ώρες στις 05:00 και 06:00 αντίστοιχα.

## **2.8 Ημερήσια πορεία της μέσης ωριαίας τιμής της σχετικής υγρασίας**

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η πορεία της μέσης ωριαίας τιμής της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας με άνεμο Βαρδάρη. Η μελέτη αυτή έγινε για κάθε εποχή του έτους, αφού πρώτα υπολογίσθηκαν ανά εποχή οι μέσες ωριαίες τιμές της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον πίνακα 2.22 και η ημερήσια πορεία της σχετικής υγρασίας απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 2.27.

**Πίνακας 2.22:** Μέσες ωριαίες τιμές σχετικής υγρασίας (%) ανά εποχή τις ημέρες Βαρδάρη

ώρες	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
1	69,0	65,7	59,2	66,1
2	68,9	66,8	60,0	66,4
3	68,6	67,1	61,0	66,4
4	68,3	67,9	61,9	66,2
5	68,1	68,6	62,2	66,1
6	68,2	68,2	62,2	66,2
7	68,2	66,8	59,8	65,9
8	68,0	63,9	56,1	64,6
9	66,8	60,2	52,2	60,9
10	64,4	56,2	48,6	57,0
11	62,1	52,5	45,3	53,6
12	59,8	50,0	43,0	50,9
13	57,4	47,9	40,8	48,6
14	55,9	46,2	39,6	47,3
15	55,1	45,3	38,7	46,3
16	55,7	45,3	38,9	46,5
17	57,0	46,1	39,8	48,4
18	58,9	48,0	41,2	50,3
19	60,2	51,0	43,3	52,7
20	61,0	53,6	46,4	54,0
21	61,1	55,3	48,4	54,7
22	61,6	57,3	50,3	55,7
23	62,5	58,8	51,8	57,0
24	63,3	60,6	54,0	58,7



**Σχήμα 2.27:** Η μέση ημερήσια πορεία της σχετικής υγρασίας τις ημέρες Βαρδάρη ανά εποχή.





Τις ημέρες Βαρδάρη, οι μέσες ωριαίες τιμές της σχετικής υγρασίας είναι ιδιαίτερα χαμηλές σ' όλες τις εποχές και δε ξεπερνούν το 70%. Αυτό οφείλεται στην επικράτηση των ψυχρών και ξηρών αερίων μαζών πάνω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Οι χαμηλότερες τιμές της σχετικής υγρασίας σημειώνονται το καλοκαίρι, ακολουθεί η άνοιξη με το φθινόπωρο και τέλος ο χειμώνας. Όπως απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 2.27, η μέση ημερήσια πορεία της σχετικής υγρασίας είναι σχεδόν όμοια για το φθινόπωρο και το χειμώνα και αντίστοιχα για την άνοιξη και το καλοκαίρι.

## **2.9 Μεταβολή θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε επεισόδια Βαρδάρη με διαφορετική διάρκεια ημερών**

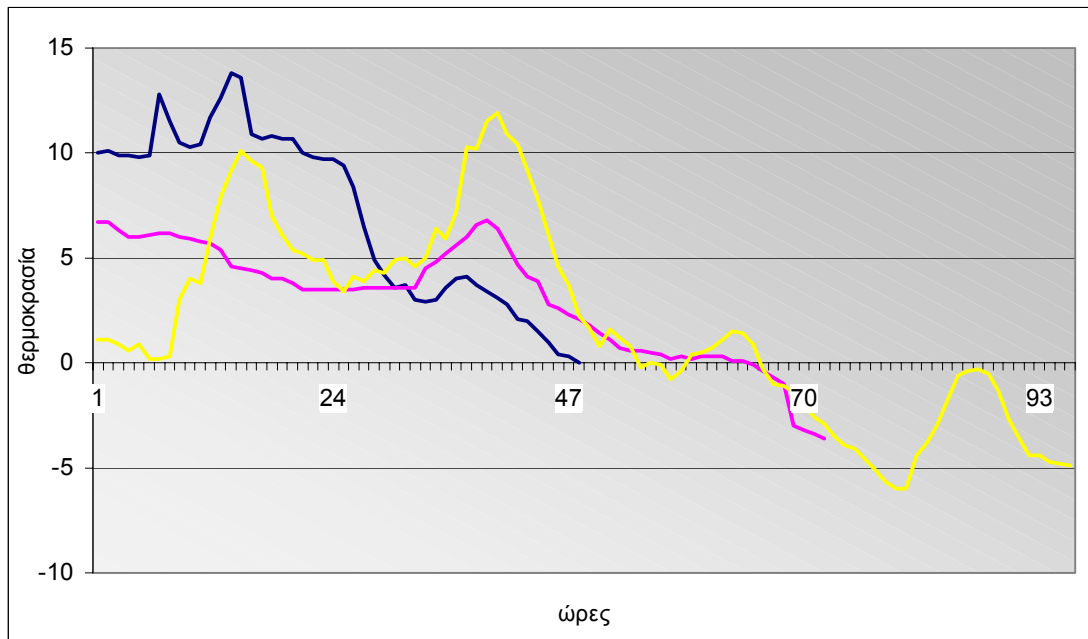
Στο επόμενο στάδιο του παρόντος κεφαλαίου, απομονώθηκαν επεισόδια Βαρδάρη με διαφορετική ακολουθία ημερών και εξετάστηκε η πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στη διάρκεια των επεισοδίων αυτών.

Κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν επεισόδια Βαρδάρη που σημειώθηκαν το χειμώνα και το καλοκαίρι, εποχές με τις υψηλότερες συχνότητες επικράτησης του ανέμου. Επιπλέον, για να μελετηθούν αναλυτικά οι μεταβολές των τιμών της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στα επεισόδια Βαρδάρη, ελήφθησαν υπόψη και οι τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας της προηγούμενης ημέρας από την έναρξη του επεισοδίων.

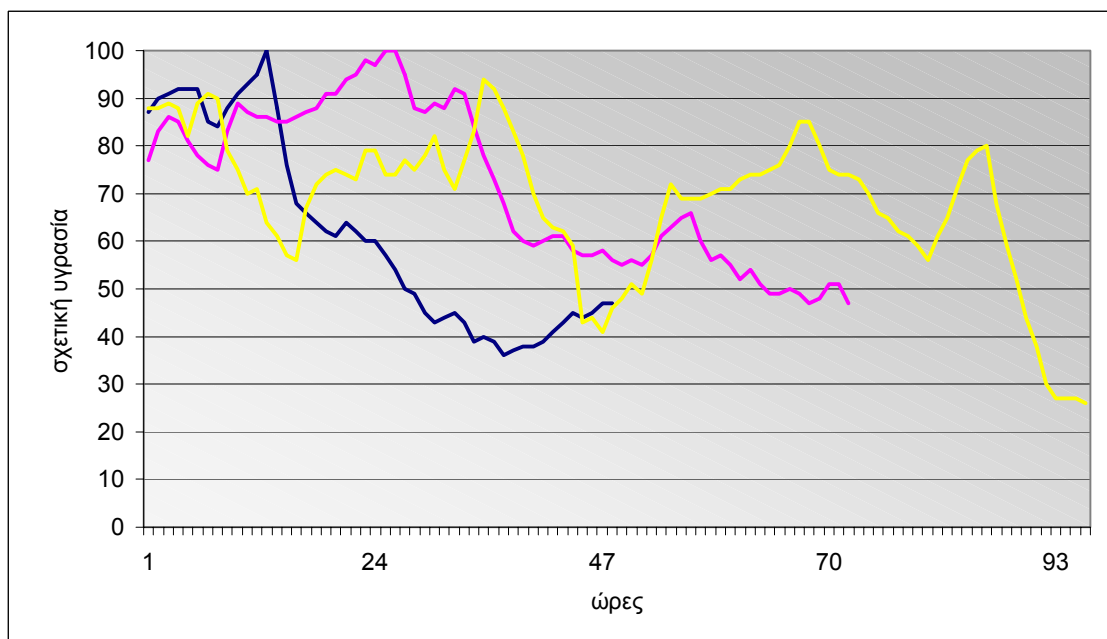
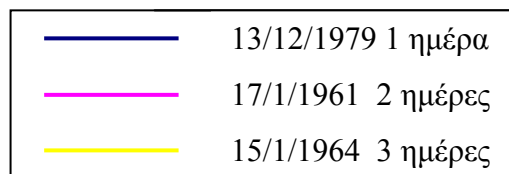
### **2.9.1 Χειμώνας**

Στο σχήμα 2.28 απεικονίζεται γραφικά η πορεία της θερμοκρασίας σε επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια μιας, δύο και τριών ημερών, ενώ στο σχήμα 2.29 παριστάνεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας για τα ίδια επεισόδια. Στα ίδια σχήματα, για κάθε επεισόδιο παριστάνονται τις πρώτες 24 ώρες οι πορείες της

θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, της προηγούμενης ημέρας από την έναρξη του επεισοδίου.



**Σχήμα 2.28:** Μεταβολή της θερμοκρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια έως τρεις ημέρες κατά το χειμώνα.



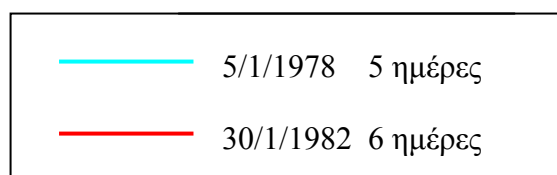
**Σχήμα 2.29:** Μεταβολή της σχετικής υγρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια έως τρεις ημέρες κατά το χειμώνα.

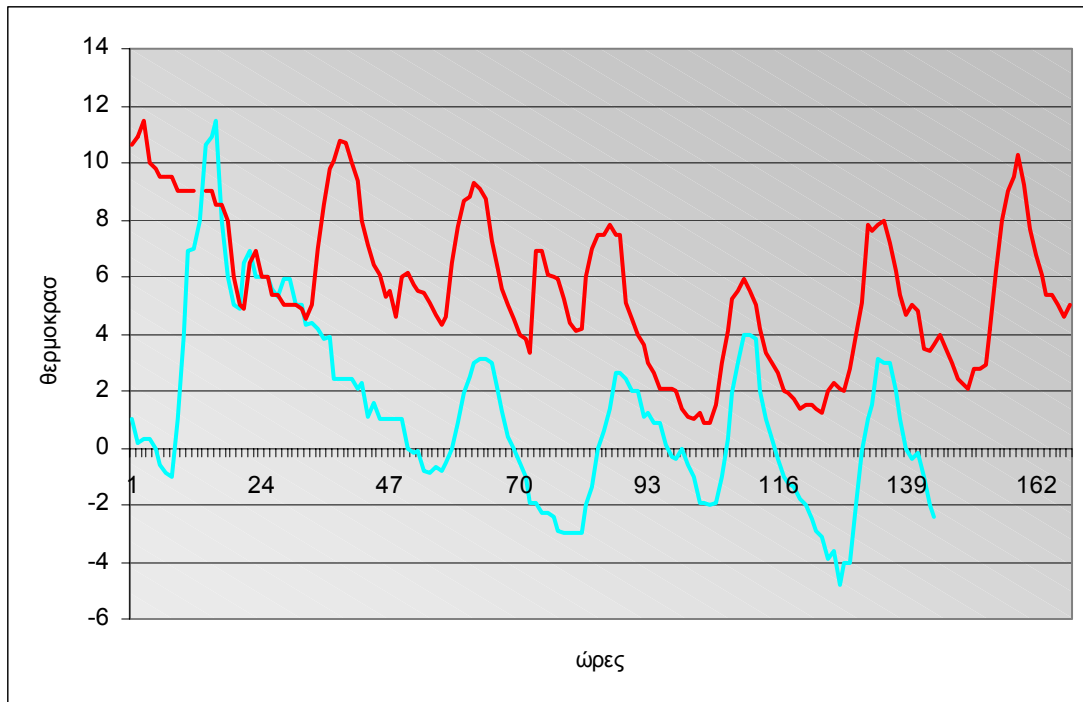
13/12/1979: Διάρκεια επεισοδίου, ένα εικοσιτετράωρο. Ώρα έναρξης πνοής του ανέμου Βαρδάρη, στις 12/12/1979, 13.00 τοπική ώρα. Σημειώθηκε σημαντική πτώση στη θερμοκρασία αέρα της τάξεως του 50%, η οποία ξεκίνησε δυο ώρες μετά την έναρξη πνοής του ανέμου, δηλαδή στις 15.00. Η μέγιστη ωριαία ταχύτητα ανέμου καταγράφηκε στις 13/12/1979, ώρα 14.00, ίση με 60 km/h ενώ οι ριπές του ανέμου έφθασαν τα 92 km/h. Επιπλέον, σημαντική πτώση σημειώθηκε και στη σχετική υγρασία, της τάξεως του 50% της αρχικής τιμής και η οποία ξεκίνησε ταυτόχρονα με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη.

17/1/1961: Διάρκεια επεισοδίου, δυο ημέρες. Ώρα έναρξης πνοής του ανέμου, στις 17/1/1961, ώρα 10.00. Η σημαντική πτώση στη θερμοκρασία ξεκίνησε στις 13.00, συνεχίστηκε καθ' όλη τη διάρκεια του επεισοδίου κι έφτασε τους 10°C. Την ίδια ώρα καταγράφηκε και η μέγιστη ωριαία ταχύτητα, ίση με 40 km/h. Τη δεύτερη ημέρα η ένταση του ανέμου αυξήθηκε, με μέγιστη ωριαία τιμή τα 50 km/h και ριπές έως τα 65 km/h. Η πτώση στη σχετική υγρασία ξεκίνησε ταυτόχρονα με την έναρξη πνοής του ανέμου Βαρδάρη, και συνεχίστηκε καθ' όλη τη διάρκεια του επεισοδίου, με τιμή γύρω στο 40%.

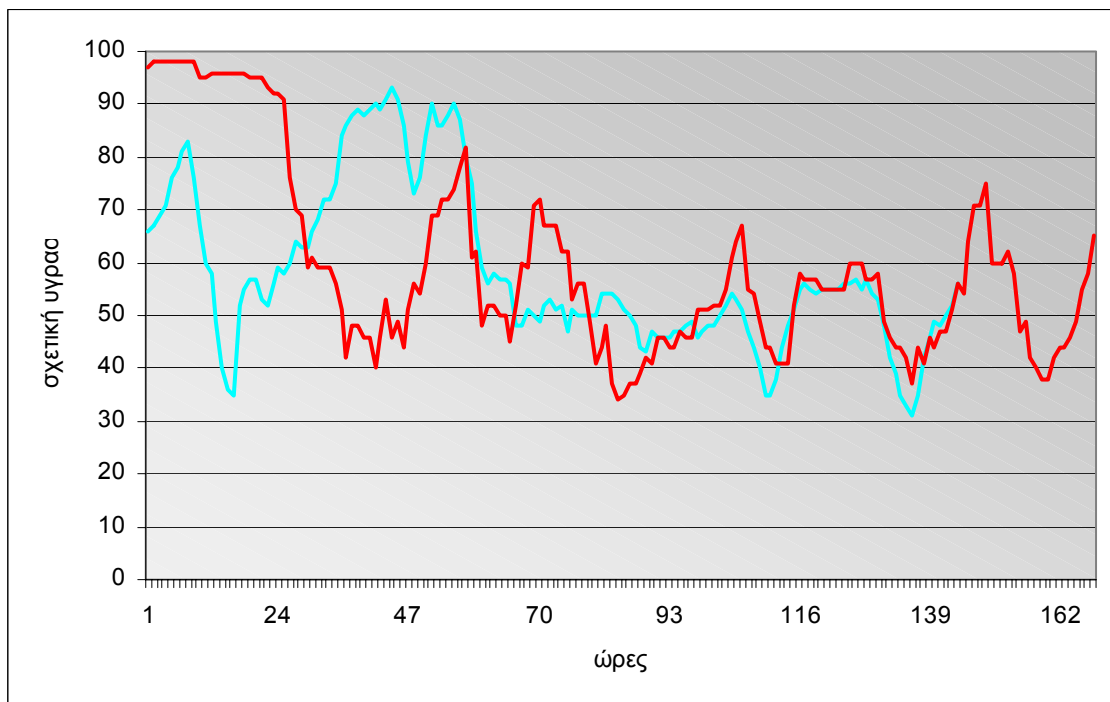
15/1/1964: Διάρκεια επεισοδίου, τρεις ημέρες. Ώρα έναρξης πνοής του ανέμου, στις 13.00. Οι ταχύτητες του ανέμου κυμάνθηκαν μεταξύ των τιμών 30 km/h και 50 km/h με ριπές που έφθασαν τα 70 km/h. Την πρώτη ημέρα, η θερμοκρασία ξεκίνησε να μειώνεται στις 15.00 περίπου και στο επόμενο εικοσιτετράωρο ελαττώθηκε κατά 13 °C. Η μείωση συνεχίστηκε και κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας, σε μικρότερο βαθμό, γύρω στους 5 °C. Η σχετική υγρασία άρχισε να ελαττώνεται ταυτόχρονα με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη. Σημείωσε την πρώτη ημέρα του επεισοδίου μείωση περίπου στο 50%, τη δεύτερη ημέρα παρουσίασε μικρή άνοδο, ενώ την τρίτη παρατηρήθηκε νέα ελάττωση της σχετικής υγρασίας περίπου στο 50%.

Στο σχήμα 2.30 παριστάνεται η πορεία της θερμοκρασίας σε επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια 5 και 6 ημερών και στο σχήμα 2.31 η αντίστοιχη, της σχετικής υγρασίας.





**Σχήμα 2.30:** Μεταβολή της θερμοκρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια πέντε και έξι ημέρες κατά το χειμώνα.



**Σχήμα 2.31:** Μεταβολή της σχετικής υγρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια πέντε και έξι ημέρες κατά το χειμώνα.




5/1/1978 : Διάρκεια επεισοδίου πέντε ημέρες. Ώρα έναρξης πνοής του ανέμου, στις 4/1/1978, ώρα 21.00, με ταχύτητες μεταξύ των τιμών 30 km/h και 50 km/h. Η μείωση που σημειώθηκε στη θερμοκρασία λόγω του ανέμου, ξεκίνησε δυο ώρες μετά την

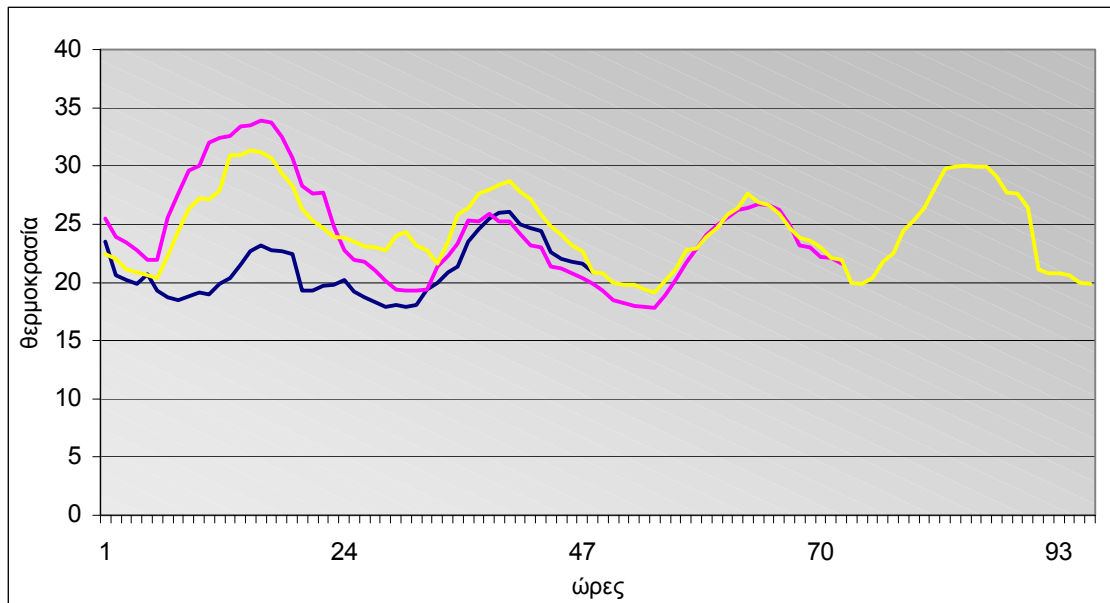
έναρξη πνοής του και διήρκεσε τα τρία πρώτα εικοσιτετράωρα. Με το τέλος της τρίτης ημέρας η θερμοκρασία είχε μειωθεί κατά 7 °C. Την τέταρτη και πέμπτη ημέρα η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε και άρχισε σταδιακά να αυξάνει. Η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας πιθανόν να οφείλεται στην υψηλή ηλιοφάνεια που υπάρχει, λόγω της έντονης νεφοδιάλυσης που προκαλεί ο άνεμος Βαρδάρης σε συνδυασμό με την επικράτηση των ξηρών αερίων ηπειρωτικών μαζών πάνω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η πτώση στη σχετική υγρασία ξεκίνησε κυρίως το δεύτερο εικοσιτετράωρο και συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του επεισοδίου. Η πτώση αυτή ενισχύεται κυρίως από την αύξηση της θερμοκρασίας που σημειώνεται μετά την τρίτη ημέρα.

30/1/1982: Διάρκεια επεισοδίου έξι ημέρες. Ώρα έναρξης επεισοδίου στις 29/1/1982, ώρα 23.00, με ταχύτητες ανέμου μεταξύ των τιμών 30 km/h και 60 km/h. Σημειώθηκε πτώση στη θερμοκρασία αέρα λόγω ανέμου, η οποία ξεκίνησε στις 13.00 και συνεχίστηκε τις τέσσερις πρώτες ημέρες του επεισοδίου, ενώ την πέμπτη κι έκτη ημέρα παρατηρήθηκε αύξηση. Η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας πιθανόν να οφείλεται στην υψηλή ηλιοφάνεια που υπάρχει, λόγω της έντονης νεφοδιάλυσης που προκαλεί ο άνεμος Βαρδάρης σε συνδυασμό με την επικράτηση των ξηρών αερίων ηπειρωτικών μαζών πάνω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η σχετική υγρασία ελαττώθηκε ραγδαία στη διάρκεια του πρώτου εικοσιτετράωρου, κατά 50%. Τις επόμενες ημέρες του επεισοδίου, οι τιμές της σχετικής υγρασίας ήταν ιδιαίτερα μειωμένες, κυρίως οι μέγιστες κι ελάχιστες τιμές αυτών, ανά εικοσιτετράωρο.

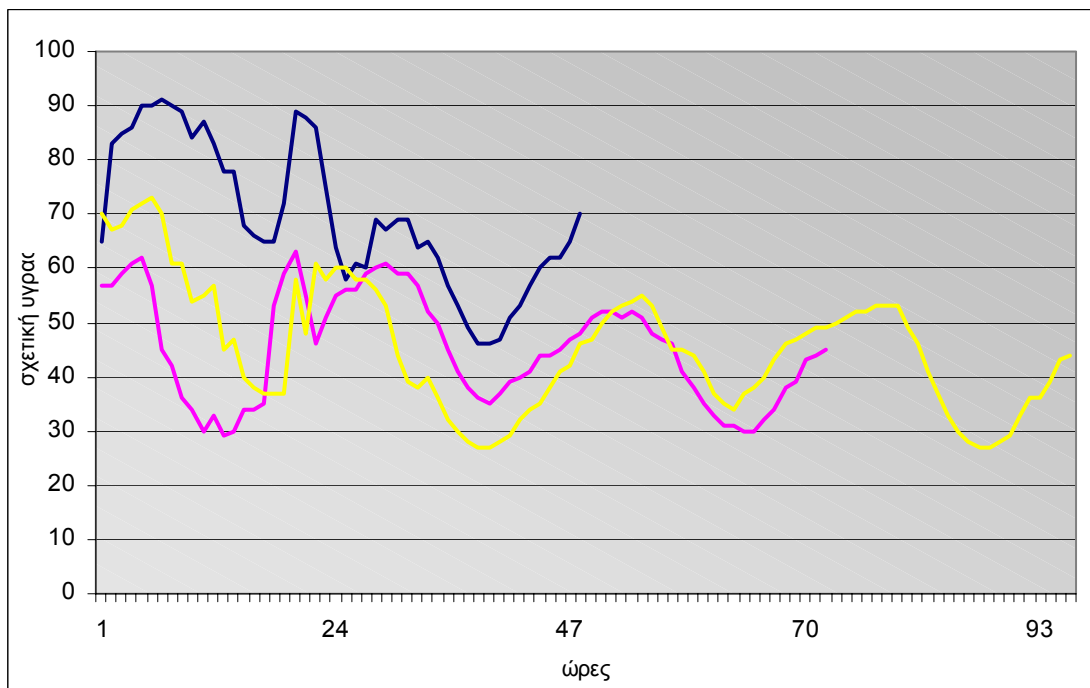
### 2.9.2. Καλοκαίρι

Στο σχήμα 2.32 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της θερμοκρασίας σε επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια μιας, δύο και τριών ημερών, ενώ στο σχήμα 2.33 παριστάνεται η μεταβολή της σχετικής υγρασίας για τα ίδια επεισόδια. Στα ίδια σχήματα, για κάθε επεισόδιο παριστάνονται τις πρώτες 24 ώρες οι πορείες της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, της προηγούμενης ημέρας από την έναρξη του επεισοδίου.

	21/8/1975 1 ημέρα
	21/7/1974 2 ημέρες
	12/8/1974 3 ημέρες



**Σχήμα 2.32:** Μεταβολή της θερμοκρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια έως τρεις ημέρες κατά το καλοκαίρι.



**Σχήμα 2.33:** Μεταβολή της σχετικής υγρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια έως τρεις ημέρες κατά το καλοκαίρι.

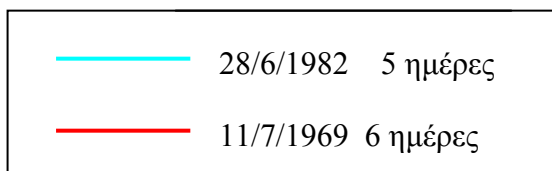
21/8/1975: Διάρκεια επεισοδίου μία ημέρα. Έναρξη πνοής του ανέμου Βαρδάρη στις 02.00, με ταυτόχρονη πτώση της θερμοκρασίας αέρα της τάξεως των 2 °C, έως τις πρώτες πρωινές ώρες. Στο υπόλοιπο της ημέρας, η θερμοκρασία ακολούθησε τη μέση ημερήσια πορεία της, με μειωμένες μέγιστες τιμές, κατά τις μεσημβρινές ώρες. Η σχετική υγρασία σημείωσε πτώση, της τάξης του 20%. Οι ταχύτητες του ανέμου

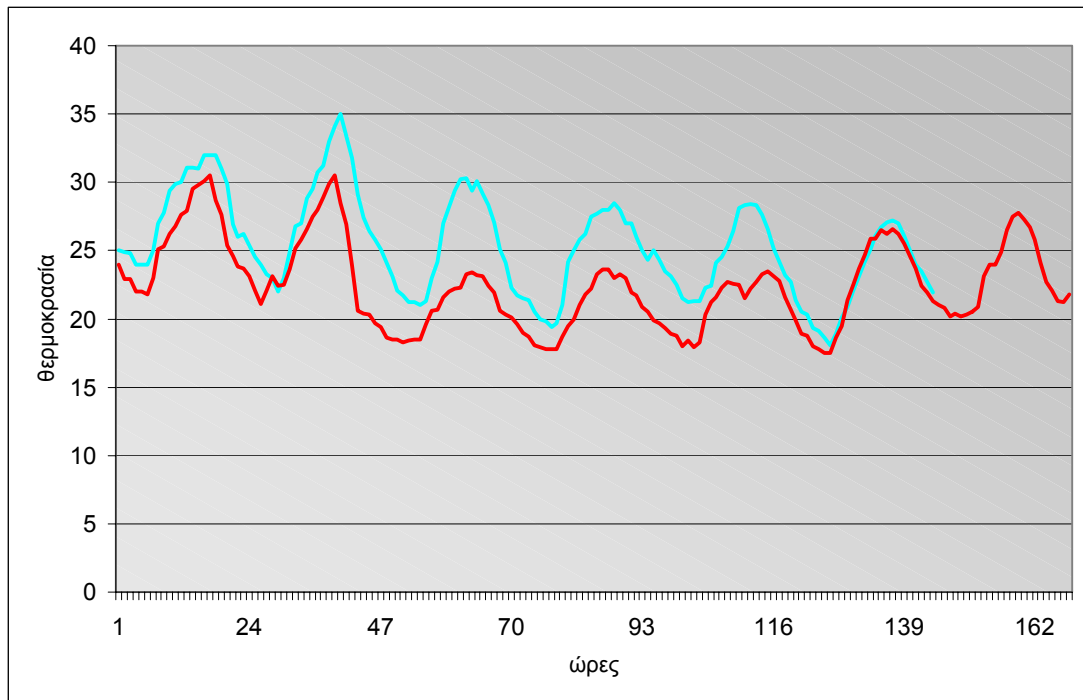
κυμάνθηκαν μεταξύ των τιμών 20 km/h και 40 km/h με ριπές που έφθασαν τα 60 km/h.

21/7/1974: Διάρκεια επεισοδίου δυο ημέρες. Έναρξη πνοής του ανέμου στη 01.00 τοπική ώρα, με ταυτόχρονη πτώση της θερμοκρασίας αέρα έως τις πρώτες πρωινές ώρες. Τη δεύτερη ημέρα του επεισοδίου δε σημειώθηκε επιπλέον πτώση, με τις θερμοκρασίες να διατηρούνται στα ίδια επίπεδα τιμών με τα αντίστοιχα μειωμένα της πρώτης ημέρας. Υψηλότερες τιμές έντασης ανέμου καταγράφηκαν την πρώτη ημέρα, μεταξύ 30 km/h και 40 km/h και ριπές έως τα 56 km/h.

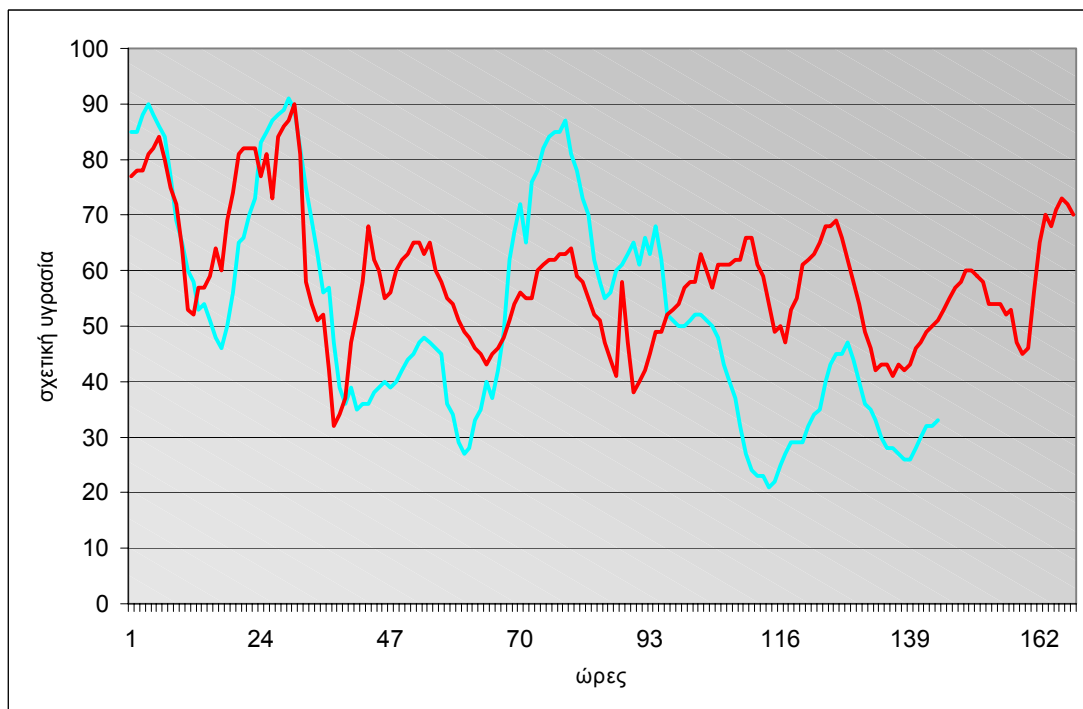
12/8/1974: Διάρκεια επεισοδίου τρεις ημέρες. Έναρξη πνοής του ανέμου στις 05.00 τοπική ώρα, με ταυτόχρονη πτώση της θερμοκρασίας αέρα της τάξεως των 2 °C, έως τις μεσημβρινές ώρες. Τη δεύτερη ημέρα δε σημειώθηκε επιπλέον πτώση στη θερμοκρασία, ενώ την τρίτη παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση. Η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας πιθανόν να οφείλεται στην υψηλή ηλιοφάνεια που υπάρχει, λόγω της έντονης νεφοδιάλυσης που προκαλεί ο άνεμος Βαρδάρης σε συνδυασμό με την επικράτηση των ξηρών αερίων ηπειρωτικών μαζών πάνω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η σχετική υγρασία σημείωσε πτώση, της τάξεως του 30%, μόνο την πρώτη ημέρα. Τη δεύτερη και τρίτη ημέρα, οι τιμές της ακολουθούν τον ημερήσιο κύκλο τους, έχοντας ίσες, τις μέγιστες κι ελάχιστες τιμές τους,

Στο σχήμα 2.34 παριστάνεται η πορεία της θερμοκρασίας σε επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια 5 και 6 ημερών και στο σχήμα 2.35 η αντίστοιχη της σχετικής υγρασίας.





**Σχήμα 2.34:** Μεταβολή της θερμοκρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια πέντε και έξι ημέρες κατά το καλοκαίρι.



**Σχήμα 2.35:** Μεταβολή της σχετικής υγρασίας των επεισοδίων Βαρδάρη με διάρκεια πέντε και έξι ημέρες κατά το καλοκαίρι.

28/6/1982: Διάρκεια επεισοδίου πέντε ημέρες. Η επικράτηση του ανέμου ξεκίνησε στις 16.00 τοπική ώρα, ενώ την ίδια χρονική στιγμή η θερμοκρασία άρχισε να



μειώνεται. Η βαθμιαία ελάττωση της θερμοκρασίας συνεχίστηκε έως τις πρώτες πρωινές ώρες της επόμενης ημέρας και έφτασε τους 5 °C. Τις επόμενες τέσσερις ημέρες, η θερμοκρασία ακολουθεί την ημερήσιο κύκλο της, με τις μέγιστες θερμοκρασίες να σημειώνουν πτώση 2 °C για κάθε επόμενη ημέρα του επεισοδίου. Η σχετική υγρασία μειώθηκε ραγδαία το πρώτο εικοσιτετράωρο του επεισοδίου, κατά 55% μέσα στο χρονικό διάστημα των δέκα ωρών. Τις επόμενες ημέρες σε κάθε ενίσχυση της έντασης του ανέμου σημειωνόταν ανάλογη πτώση.

11/7/1969: Διάρκεια επεισοδίου έξι ημέρες. Έναρξη πνοής του ανέμου στις 17.00, με ταυτόχρονη πτώση της θερμοκρασίας η οποία συνεχίστηκε μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες κι έφτασε τους 7 °C. Τις επόμενες τρεις ημέρες, οι τιμές των θερμοκρασιών ακολούθησαν τον ίδιο ημερήσιο κύκλο, με τις μέγιστες θερμοκρασίες σημαντικά μειωμένες. Τις τελευταίες δυο ημέρες του επεισοδίου παρατηρήθηκε σταδιακή άνοδος των θερμοκρασιών. Η σχετική υγρασία μειώθηκε ραγδαία το πρώτο εικοσιτετράωρο, κατά 55% μέσα στο χρονικό διάστημα των δέκα ωρών. Τις επόμενες ημέρες παρατηρήθηκε αυξομείωση των τιμών της, χωρίς ωστόσο να υπήρξε μεταβολή στις μέσες, μέγιστες κι ελάχιστες τιμές. Οι ταχύτητες του ανέμου κυμάνθηκαν μεταξύ των τιμών 30 km/h και 70 km/h με ριπές που έφθασαν τα 90 km/h.

Συνοπτικά, στα επεισόδια Βαρδάρη που μελετήθηκαν με διαφορετική διάρκεια ημερών παρατηρήθηκαν τα εξής:

#### Χειμώνας

- Παρατηρείται σημαντική πτώση της θερμοκρασίας αέρα, το μέγεθος της οποίας ποικίλλει ανάλογα με τη διάρκεια του επεισοδίου και της θερμοκρασίας των αέριων μαζών που εισβάλλουν στη ζώνη δράσης του ανέμου Βαρδάρη. Για διάρκεια έως τρεις ημέρες σημειώνεται έντονη ψύξη του αέρα που μπορεί να είναι της τάξης των 10 °C. Με την έναρξη της τέταρτης ημέρας επεισοδίου Βαρδάρη (σχήμα 2.30), η θερμοκρασία αρχίζει σταδιακά να σταθεροποιείται και στη συνέχεια να αυξάνεται. Η άνοδος της θερμοκρασίας πιθανόν να οφείλεται στην ισχυρή ηλιοφάνεια αλλά και στις ξηρές ηπειρωτικές αέριες μάζες που φθάνουν στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

- Κατά τη διάρκεια του επεισοδίου μειώνονται οι μέγιστες κι ελάχιστες θερμοκρασίες. Η πτώση αυτή παρατηρείται μόνο τις τρεις πρώτες ημέρες, ενώ τις επόμενες σταθεροποιούνται και στη συνέχεια αυξάνονται.
- Μείωση σημειώνεται και στην τιμή του ημερήσιου θερμομετρικού εύρους έως και την τρίτη ημέρα του επεισοδίου Βαρδάρη.
- Η πτώση της σχετικής υγρασίας είναι ραγδαία το πρώτο εικοσιτετράωρο και μπορεί να φτάσει το 50% της αρχικής τιμής. Τις επόμενες ημέρες ανάλογα με τις μεταφερόμενες αέριες μάζες και την ένταση του ανέμου Βαρδάρη, οι τιμές της σχετικής υγρασίας είτε ακολουθούν την αρχική πτωτική πορεία με βραδύτερο ρυθμό είτε σταθεροποιούνται έως το τέλος του επεισοδίου.

### Καλοκαίρι

- Κατά τη διάρκεια των επεισοδίων Βαρδάρη σημειώνεται πτώση στη θερμοκρασία αέρα το καλοκαίρι, της τάξεως των 4 °C. Η πτώση αυτή είναι ασθενέστερη σε σχέση με την αντίστοιχη που συμβαίνει το χειμώνα στα επεισόδια Βαρδάρη. Το καλοκαίρι, στα επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια έως τρεις ημέρες η πτώση στη θερμοκρασία σημειώνεται συνήθως το πρώτο εικοσιτετράωρο.
- Η πτώση της σχετικής υγρασίας στα επεισόδια Βαρδάρη είναι κατά μέσο όρο της τάξης του 20% και λαμβάνει χώρα στη διάρκεια του πρώτου εικοσιτετραώρου. Το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο του χειμώνα που φθάνει στο 50%. Ωστόσο είναι σημαντικό για τη θερινή περίοδο, λόγω των χαμηλών τιμών υγρασίας που γενικά επικρατούν την εποχή αυτή.
- Στα επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια μεγαλύτερη της μιας ημέρας δύναται να σημειωθεί επιπλέον μείωση στις τιμές της σχετικής υγρασίας, μετά το πρώτο εικοσιτετράωρο. Η συνεχόμενη πτώση πιθανόν να οφείλεται στη μεταφορά ξηρών ηπειρωτικών αέριων μαζών πάνω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας.

# *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3*

## *3 ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΒΑΡΔΑΡΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ*

---

Ο τοπικός άνεμος Βαρδάρης, αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο του κλίματος της Θεσσαλονίκης, με τις θετικές αλλά και τις αρνητικές του επιδράσεις στην πόλη αυτή. Παρ' ότι οι συνοπτικές καταστάσεις που προκαλούν την επικράτηση του ανέμου είναι πλέον γνωστές και περιγράφηκαν αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, ωστόσο αναπάντητο παραμένει το ερώτημα του πότε πρέπει να αναμένουμε την εμφάνιση του ανέμου Βαρδάρη. Μια τέτοια προσπάθεια-δοκιμή για την απάντηση του ερωτήματος γίνεται στο παρόν κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η ακρίβεια με την οποία ένα νευρωνικό δίκτυο που τροφοδοτείται με ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα προηγούμενων ημερών, μπορεί να προβλέψει την εμφάνιση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Λίγες είναι οι μελέτες που έχουν γίνει με αντικείμενο τη βραχυχρόνια πρόγνωση του ανέμου χρησιμοποιώντας μη στατιστικές μεθόδους. Οι συνήθεις προγνωστικές μέθοδοι παρουσιάζουν δυσκολίες οι οποίες σχετίζονται τόσο με την εμπειρία του επιστήμονα Μετεωρολόγου όσο και με τη συλλογή των κατάλληλων δεδομένων από διάφορους γειτονικούς σταθμούς και για μεγάλες χρονοσειρές. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι διάφορες στατιστικές μέθοδοι τείνουν να βελτιώσουν οι νέες σύγχρονες αριθμητικές μέθοδοι αναγνώρισης προτύπων, όπως είναι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.

*Οι πρόσφατες πρόοδοι που σημειώθηκαν στη μεθοδολογία των Νευρωνικών Δικτύων για τη μοντελοποίηση μη γραμμικών, δυναμικών φαινομένων (Bishop, 1996; Hertz, et al., 1991; Masters, 1993; Muller and Reinhardt, 1991; Ripley, 1996; Warner and Misra, 1996), σε συνδυασμό με τις εντυπωσιακές επιτυχίες τους σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, μας οδήγησαν στο να ερευνήσουμε τις εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων στην πρόγνωση ατμοσφαιρικών φαινομένων (Marzban and Stumpf, 1996, Marzban et al., 1997).*

Οι Marzban και Stumpf (1996) δημιούργησαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με στόχο να μπορεί να προβλέπει την εμφάνιση επικίνδυνου ανέμου-σίφωνα, με ριπές μεγαλύτερες των 25 m/sec, στην Πολιτεία της Οκλαχόμα. Το δίκτυο εκπαιδεύτηκε στο να βρίσκει τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών ταχύτητας ανέμου από ραντάρ και της επικράτησης ή όχι του σίφωνα στη γη, βάση των επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων. Δυο χρόνια αργότερα, οι Marzban και Stumpf (1998) κατασκεύασαν ένα καινούριο νευρωνικό δίκτυο το οποίο εκπαιδεύτηκε στο να προβλέπει την εμφάνιση του σίφωνα με βάση τις επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας της ανώτερης ατμόσφαιρας.

Οι Pérez-Liera et al., (2002), κατασκεύασαν ένα νευρωνικό δίκτυο με στόχο τη βραχυχρόνια πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου στο λιμάνι της Gijon, της Ισπανίας. Στο δίκτυο εισήχθησαν ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, ατμοσφαιρικής πίεσης παρελθόντος χρόνου, με στόχο το δίκτυο να προβλέπει την ταχύτητα του ανέμου για μετά από 20 λεπτά.

Οι Kalogirou et al., (1999), εκπαίδευσαν διάφορες δομές νευρωνικών δικτύων με στόχο την πρόγνωση της μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου, ώστε να καλύψουν υπάρχοντα

κενά στις χρονοσειρές δεδομένων από σταθμούς σε περιοχές της Κύπρου, που θεωρούνται κατάλληλες για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Στην παρούσα έρευνα, δοκιμάζονται για εκπαίδευση διάφορες δομές δικτύων, με κύριο σκοπό την πρόγνωση του ανέμου Βαρδάρη της επόμενης ημέρας, γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά της προηγούμενης, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για μια δωδεκαετία

### **3.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα**

#### **3.1.1. Αναγνώριση Προτύπων**

Αναγνώριση προτύπων (Pattern Recognition) καλείται ο επιστημονικός κλάδος ο οποίος ασχολείται με την εύρεση μεθόδων για την ταξινόμηση (classification) των προτύπων σε κατηγορίες. Ως πρότυπο θεωρείται οτιδήποτε έχει συγκεκριμένη ταυτότητα ή χαρακτηριστικά, βάσει των οποίων ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα ή εντάσσεται σε μια κατηγορία ομοειδών του. Έτσι πρότυπο μπορεί να είναι ο άνθρωπος, τα ζώα, τα φυτά, η εικόνα, ένα μετεωρολογικό φαινόμενο και η αναγνώριση σχετίζεται με την εύρεση της ταυτότητάς του. Οι επιμέρους κατηγορίες ονομάζονται κλάσεις ή τάξεις και ο αλγόριθμος που αναγνωρίζει τα πρότυπα λέγεται ταξινομητής (classifier). Υπάρχουν ταξινομητές που βασίζονται σε γνωστές ιδιότητες και ταξινομητές που εκπαιδεύονται να βρίσκουν κρυμμένες ιδιότητες. Για παράδειγμα, η ταξινόμηση ενός πλήθους αριθμών σε άρτιους και περιττούς, γίνεται βάση γνωστής ιδιότητας και δεν απαιτεί εκπαίδευση. Σε πιο σύνθετα προβλήματα όμως, η εκπαίδευση του ταξινομητή είναι απαραίτητη ώστε να εντοπίζονται οι κρυμμένες ιδιότητες και με βάση αυτές να γίνεται η ταξινόμηση. Κατά την εκπαίδευση προσδιορίζονται οι κλάσεις των προτύπων και ρυθμίζονται οι παράμετροι του συστήματος ταξινόμησης με βάση τις οποίες θα είναι αυτό ικανό να ταξινομήσει σωστά τα πρότυπα. Με την ταξινόμηση αποδίδεται ένα πρότυπο σε μια κλάση ή σε μια συγκέντρωση. Εναλλακτικά, η εκπαίδευση μπορεί να ξεκινήσει με μια ανακριβή ταξινόμηση, που βασίζεται σε προηγούμενη εμπειρία ή πληροφορία, μέχρι ο αλγόριθμος εκπαίδευσης στην πορεία του να καταλήξει στη σωστή, με βάση κάποιο κριτήριο ορθότητας.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του ταξινομητή αποτελούν το σύνολο εκπαίδευσης (training set). Η διαδικασία της εκπαίδευσης μπορεί να γίνει με δυο διαφορετικούς τρόπους: Με επίβλεψη και χωρίς επίβλεψη.

- Στην εκπαίδευση με επίβλεψη (supervised learning), είναι γνωστή η κλάση στην οποία ανήκει το κάθε πρότυπο του συνόλου εκπαίδευσης και στόχος είναι ο προσδιορισμός των κλάσεων.
- Στην εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) δεν είναι γνωστή η κλάση στην οποία ανήκει το κάθε πρότυπο και ουσιαστικά ζητείται να βρεθεί (clustering).

Το ζητούμενο σε μια ταξινόμηση ή αλλιώς σε μια αναγνώριση προτύπων είναι η αυτόματη εκμάθηση των παραμέτρων ενός συστήματος, έτσι ώστε να επιτευχθεί η εύρεση των διαχωριστικών γραμμών με τη χρήση ενός επαναληπτικού αλγορίθμου. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks), δηλαδή ομάδων κόμβων που βασίζονται στη λειτουργία των νευρωνικών κυττάρων του ανθρώπινου εγκεφάλου.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν σήμερα ένα ισχυρό εργαλείο μοντελοποίησης σύνθετων προβλημάτων πρόβλεψης με μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών και πολλές αλληλεπιδράσεις. Η έρευνα σχετικά με τα νευρωνικά δίκτυα είναι εμπνευσμένη από τη δομή και τη λειτουργία του εγκεφάλου. Βασικό δομικό στοιχείο του εγκεφάλου είναι οι νευρώνες, δηλαδή τα νευρικά κύτταρα τα οποία δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ τους. Κίνητρο για τη μελέτη του νευρώνα και των νευρωνικών δικτύων ήταν η ελπίδα ανακάλυψης ενός νέου υπολογιστικού μοντέλου βασισμένου σε μια δικτυακή δομή παρόμοια με αυτή του εγκεφάλου. Αυτή η υπολογιστική πλατφόρμα-γνωστή ως Connectionist Model-είναι η πιο κατάλληλη για την ανάπτυξη ευφυών αλγορίθμων και γενικότερα διαδικασιών σχετιζόμενων με τη νοημοσύνη, όπως η μάθηση, η μνήμη, η γενίκευση, η ομαδοποίηση προτύπων, κλπ. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα επινοήθηκαν το 1943 από τον Αμερικάνο Νευροφυσιολόγο W. McCulloch και το μαθηματικό W. Pitts.

Τα συνήθη Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) χρησιμοποιούν απλοποιημένα μοντέλα νευρώνων, τέτοια ώστε να διατηρούν μόνο τα πολύ αδρά χαρακτηριστικά των

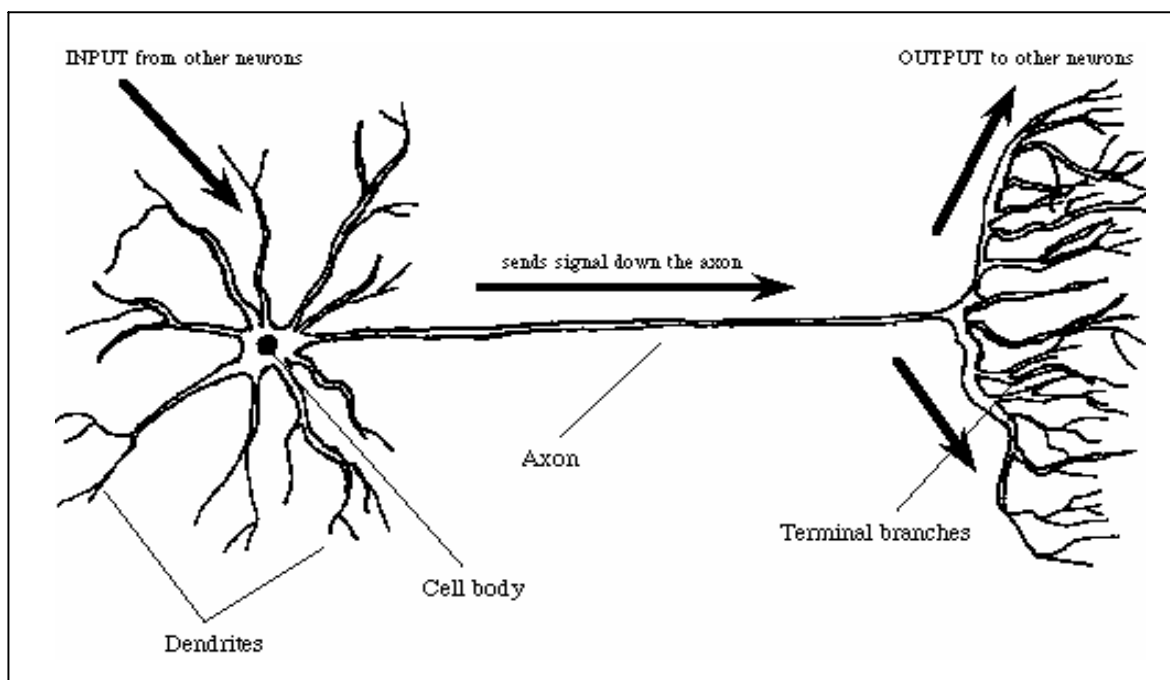
μοντέλων που χρησιμοποιούνται στη Νευρολογία. Στην πράξη τα συνήθη τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν ελάχιστη σχέση με τα αντίστοιχα βιολογικά.

Τα απλά μοντέλα νευρώνων μπορούν να δημιουργήσουν ιδιαίτερος ενδιαφέροντα δίκτυα αρκεί να πληρούν δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- (1) Οι νευρώνες να έχουν ρυθμιζόμενες παραμέτρους ώστε να είναι δυνατή η διαδικασία της εκπαίδευσης-ιδιότητα γνωστή ως πλαστικότητα των νευρώνων.
- (2) Το δίκτυο να αποτελείται από το κατάλληλο πλήθος νευρώνων ώστε να επιτυγχάνεται παραλληλισμός της επεξεργασίας και κατανομή της πληροφορίας.

### 3.1.2. Ο Νευρώνας

Το νευρικό κύτταρο ή νευρώνας, όπως προαναφέρθηκε, είναι το βασικό δομικό στοιχείο του εγκεφάλου τόσο στον άνθρωπο όσο και στα ζώα. Ο νευρώνας είναι ένα μεγάλο σε μέγεθος κύτταρο το οποίο ανατομικά, αποτελείται από τα εξής τμήματα: (α) το σώμα (β) τους δενδρίτες (γ) τον άξονα και (δ) τις συνάψεις που συνδέουν τις διακλαδώσεις του άξονα με τους δενδρίτες άλλων νευρώνων δημιουργώντας έτσι ένα νευρωνικό δίκτυο.



Σχήμα 3.1: Ο φυσικός νευρώνας (www.northeastern.edu)

Το κάθε τμήμα του νευρώνα έχει το δικό του λειτουργικό ρόλο:

(α) Οι δενδρίτες είναι οι πύλες εισόδου του νευρώνα και δέχονται ηλεκτρικά σήματα από άλλους νευρώνες.

(β) Ο άξονας είναι η πύλη εξόδου του νευρώνα και στέλνει σήματα προς άλλους νευρώνες υπό μορφή ηλεκτρικών παλμών σταθερού πλάτους αλλά μεταβλητής συχνότητας.

(γ) Οι συνάψεις είναι τα σημεία ένωσης μεταξύ διακλαδώσεων του άξονα ενός νευρώνα και των δενδριτών από άλλους νευρώνες. Το ποσοστό της ηλεκτρικής δραστηριότητας που μεταδίδεται στον κάθε δενδρίτη ονομάζεται συναπτικό βάρος.

Όπως συμβαίνει και στη φύση, η λειτουργία του νευρωνικού δικτύου προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους τα επιμέρους στοιχεία του.

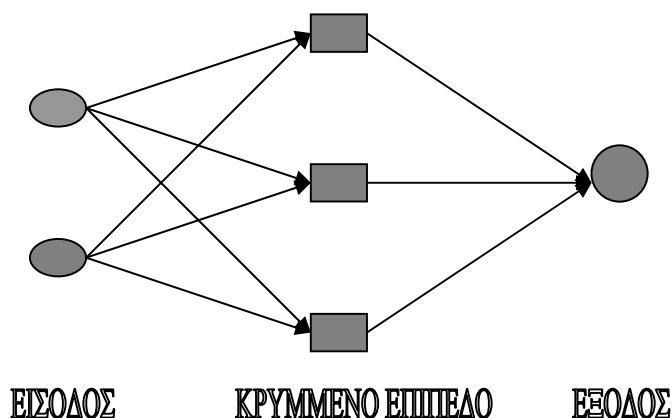
Η γενική αρχιτεκτονική των τεχνητών νευρωνικών δικτύων χαρακτηρίζεται από ένα γράφημα, του οποίου οι κόμβοι κατανέμονται σε:

α) ένα επίπεδο εισόδου (input layer)

β) ένα επίπεδο εξόδου (output layer)

γ) ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα κρυμμένα επίπεδα (hidden layers).

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ένα απλό νευρωνικό δίκτυο τριών επιπέδων με δύο στοιχεία εισόδου, ένα κρυμμένο επίπεδο με τρεις νευρώνες και μια έξοδο.



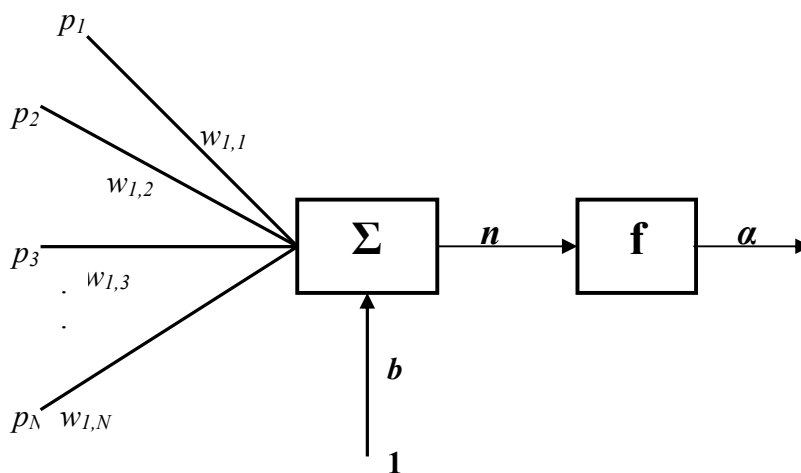
**Σχήμα 3.2:** Νευρωνικό Δίκτυο με δύο εισόδους, ένα κρυμμένο επίπεδο και μια έξοδο



Κάθε ένας από τους κόμβους εισόδου αναπαριστά και μια ανεξάρτητη μεταβλητή εισόδου (διάνυσμα εισόδου). Κάθε κόμβος εισόδου συνδέεται με όλους τους κόμβους στο πρώτο κρυμμένο επίπεδο. Οι κόμβοι του πρώτου κρυμμένου επιπέδου συνδέονται με τους κόμβους ενός άλλου κρυμμένου επιπέδου ή με κόμβους στο επίπεδο εξόδου. Οι κόμβοι του δικτύου είναι οι νευρώνες (neurons), ενώ οι δεσμοί μεταξύ των νευρώνων λέγονται συνάψεις (synapses). Σε κάθε σύναψη αντιστοιχεί ένα βάρος, που ονομάζεται συναπτικό βάρος (synaptic weight).

Η αρχιτεκτονική ή τοπολογία ενός νευρωνικού δικτύου προσδιορίζεται από τον αριθμό των νευρώνων, τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων και τον τρόπο με τον οποίο οι νευρώνες συνδέονται μεταξύ τους. Ο αριθμός των κρυμμένων επιπέδων, των νευρώνων και ενδεχομένως τα όρια μέσα στα οποία θα κυμαίνονται τα συναπτικά βάρη είναι στοιχεία που προσδιορίζονται στη φάση του σχεδιασμού του δικτύου. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για να προσδιοριστούν αυτά τα χαρακτηριστικά, είναι η δοκιμή. Δοκιμάζονται δηλαδή διάφορες δομές δικτύων σε ελεγχόμενα δεδομένα και η μελέτη επικεντρώνεται σε αυτές που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα (τα λιγότερα σφάλματα ή τις περισσότερες επιτυχίες).

Στη γενική περίπτωση, όπου ένας νευρώνας δέχεται  $N$  εισόδους, πραγματοποιείται η διαδικασία που απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.



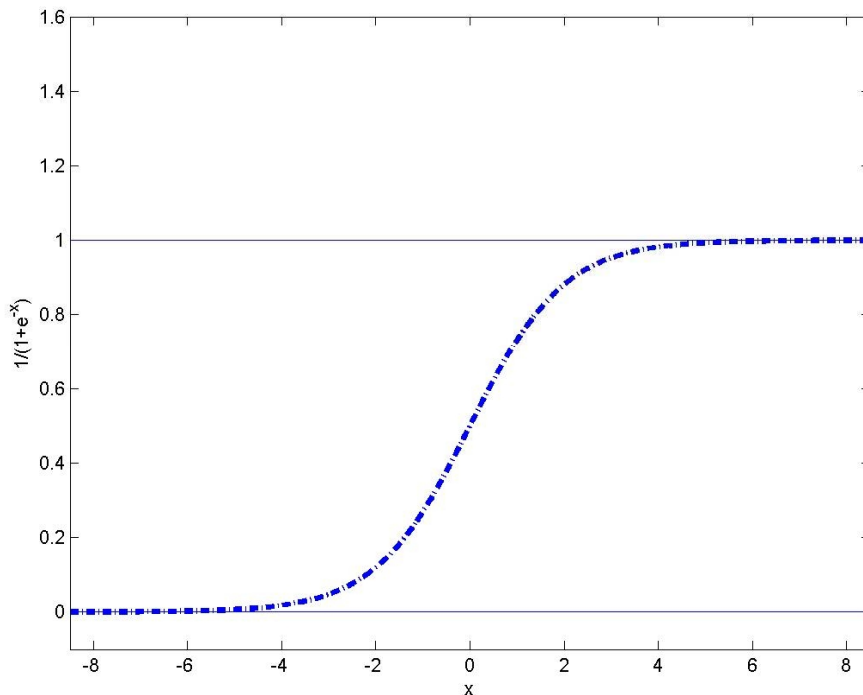
**Σχήμα 3.3:** Νευρώνας με διανυσματική είσοδο

Το διάνυσμα  $\mathbf{P}=(p_1, p_2, p_3, \dots, p_N)$  των τιμών εισόδου πολλαπλασιάζεται με το διάνυσμα των συναπτικών βαρών  $\mathbf{W}=(w_1, w_2, w_3, \dots, w_N)$ . Το εσωτερικό γινόμενο των δυο διανυσμάτων αθροίζεται με την τάση  $b$  (αν υπάρχει) για να παράγει το όρισμα  $n$  της συνάρτησης μεταβίβασης, και στη συνέχεια μέσω της συνάρτησης αυτής την τιμή εξόδου του νευρώνα,  $\alpha$ :

$$n = \mathbf{W} \cdot \mathbf{P} + b = w_{11} \cdot p_1 + w_{12} \cdot p_2 + w_{13} \cdot p_3 + \dots + w_{1N} \cdot p_N + b = w_{10} \cdot p_0 + w_{11} \cdot p_1 + w_{12} \cdot p_2 + w_{13} \cdot p_3 + \dots + w_{1N} \cdot p_N \quad (1)$$

$$\alpha = f(n) = f(\mathbf{W} \cdot \mathbf{P} + b) \quad (2)$$

Η τάση  $b$  μπορεί να εκληφθεί ως ένα ιδιότυπο συναπτικό βάρος μιας εισόδου που έχει πάντα σταθερή τιμή 1. Η συνάρτηση μεταβίβασης που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή ειδικεύσης είναι η σιγμοειδής (sigmoid transfer function):  $f(u) = 1/(1 + e^{-u})$ . Η συγκεκριμένη συνάρτηση δέχεται ως όρισμα μια οποιαδήποτε πραγματική τιμή και δίνει στην έξοδο του νευρώνα μια τιμή στο διάστημα  $[0,1]$ .



**Σχήμα 3.4:** Η γραφική απεικόνιση της σιγμοειδούς συνάρτησης

### 3.1.3. Η Εκπαίδευση ενός Νευρωνικού Δικτύου

Η προσαρμογή των συναπτικών βαρών που θα επιτρέψει το δίκτυο να επιτελέσει μια συγκεκριμένη λειτουργία ονομάζεται εκπαίδευση του δικτύου. Τα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται (προσαρμόζονται) κατά τέτοιο τρόπο ώστε μια συγκεκριμένη είσοδος (ένα συγκεκριμένο διάνυσμα εισόδου) να δίνει μια συγκεκριμένη (επιθυμητή) τιμή στην έξοδο (target output). Η τιμή εξόδου που επιτυγχάνεται από το δίκτυο για ένα καθορισμένο διάνυσμα εισόδου συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή εξόδου. Αν οι τιμές διαφέρουν, τότε τα συναπτικά βάρη του δικτύου αλλάζουν με βάση τη διαφορά της εκτιμώμενης εξόδου από την πραγματική. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων μέχρι να σταθεροποιηθούν τα συναπτικά βάρη. Ο τρόπος αυτός εκπαίδευσης ονομάζεται *επιβλεπόμενη μάθηση* (supervised learning) και για την πραγματοποίησή του χρησιμοποιούνται πολλά ζεύγη εισόδου-εξόδου.

Η προαναφερθείσα διαδικασία παριστάνεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.5 :** Τα στάδια εκπαίδευσης ενός νευρωνικού δικτύου

Γενικά, ένα νευρωνικό δίκτυο συνιστά μια μη γραμμική απεικόνιση ενός διανύσματος εισόδου σε ένα διάνυσμα εξόδου. Ως εκ τούτου, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με κατάλληλη ερμηνεία της εξόδου, ως μη γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης σε προβλήματα ταξινόμησης. Μια τέτοια προσπάθεια γίνεται και στην

παρούσα διατριβή ειδίκευσης. Στόχος της είναι η εκπαίδευση του κατάλληλου νευρωνικού δικτύου που θα αναγνωρίζει τις ημέρες που φύσηξε ο άνεμος Βαρδάρης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Ως μεταβλητές εισόδου στο δίκτυο λαμβάνονται ωριαίες τιμές μετεωρολογικών μεγεθών, της διεύθυνσης κι έντασης ανέμου, της θερμοκρασίας αέρα και της σχετικής υγρασίας από το Μετεωρολογικό Σταθμό του Α.Π.Θ. .

Η εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων έγινε με τον *αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης (Back-Propagation)*.

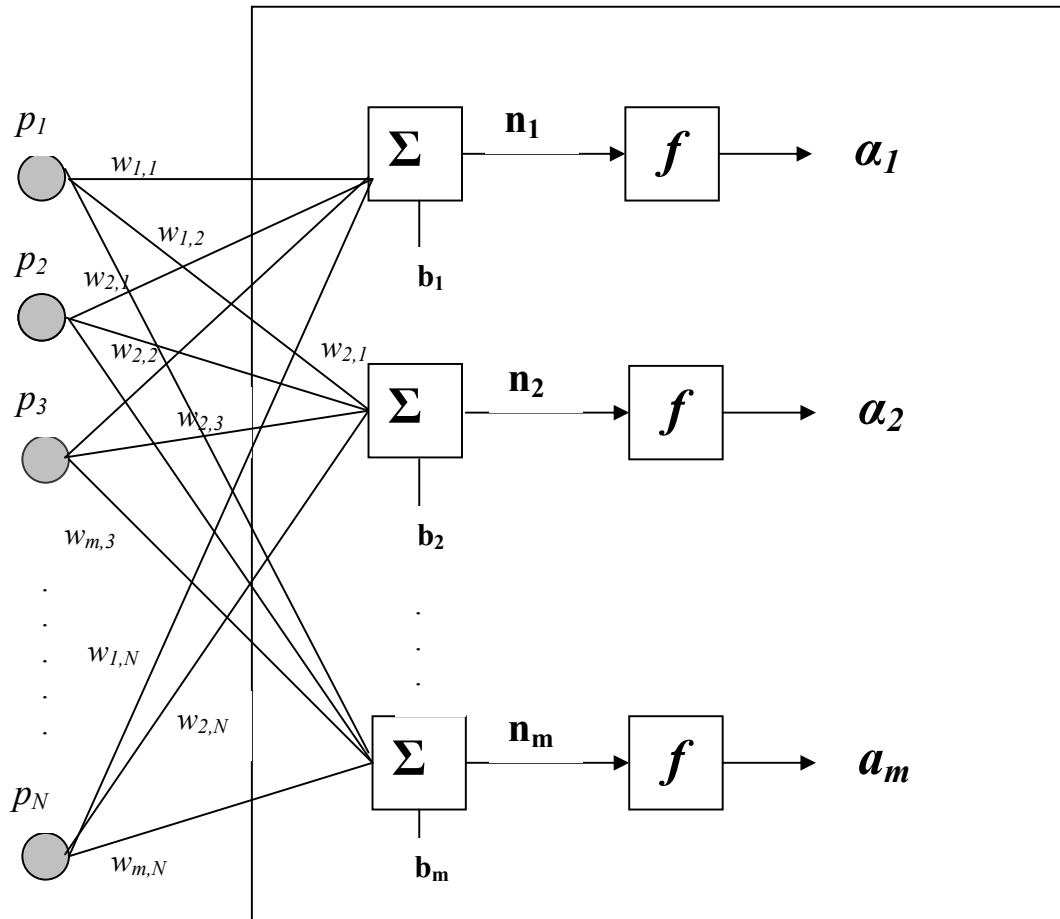
### **3.1.4. Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης λάθους (Back-Propagation Error)**

Το νευρωνικό δίκτυο, όπως προαναφέρθηκε είναι ένας εκτενής παράλληλος επεξεργαστής που έχει ως σκοπό την αποθήκευση εμπειρικών πληροφοριών και με βάση αυτές, την απόκτηση της δυνατότητας πρόβλεψης. Η εκπαίδευση του δικτύου γίνεται με συστηματική τροποποίηση των συναπτικών βαρών μέχρι να ληφθεί η επιθυμητή έξοδος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιδιώκεται το δίκτυο να μπορεί να ταξινομεί τις ημέρες, σε αυτές με άνεμο Βαρδάρη και αυτές χωρίς άνεμο Βαρδάρη.

Ο αλγόριθμος Back-Propagation error είναι ο πλέον διαδεδομένος για την εκπαίδευση των ΝΔ κι έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών από διάφορες επιστημονικές περιοχές. Προτάθηκε από τον Paul Werbos στη δεκαετία του 1970 στα πλαίσια της ανάλυσης μοντέλων οικονομικής και πολιτικής πρόβλεψης. Πολύ αργότερα, κατά τη δεκαετία του 1980, έγινε αντιληπτό ότι η μέθοδος μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων πολλών στρωμάτων.

Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η ύπαρξη στόχων. Το ζητούμενο είναι για μια σειρά από  $y$  διανύσματα εισόδου οι έξοδοι να επιτύχουν τιμές που δίνονται από αντίστοιχα  $y$  διανύσματα στόχων. Θα ήταν ιδανικό να επιτευχθεί τέλεια ταύτιση εξόδων και στόχων, ωστόσο αυτό συνήθως δεν είναι απόλυτα εφικτό οπότε επιζητείται η βέλτιστη προσέγγιση της επιθυμητής κατάστασης, εισάγοντας μια συνάρτηση σφάλματος. Η απόσταση της εκτιμώμενης εξόδου από το στόχο καλείται σφάλμα εκτίμησης. Επιχειρείται η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση σφάλματος, η οποία συνήθως ελαχιστοποιείται. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης τα βάρη αλλάζουν προς την κατεύθυνση κατά την οποία εμφανίζεται η μεγαλύτερη μείωση στην τιμή της συνάρτησης σφάλματος  $E$  που δίνεται παρακάτω

(σχέση 8). Στο παρακάτω σχήμα 3.6 απεικονίζεται γραφικά ένα κρυφό στρώμα που αποτελείται από  $m$  νευρώνες.



**Σχήμα 3.6:** Η αρχιτεκτονική ενός κρυφού επιπέδου που αποτελείται από  $m$  νευρώνες

Συνοπτικά, τα βασικά στάδια της εκπαίδευσης με οπισθοδιάδοση λάθους είναι τα εξής:

- ✓ Τα βάρη παίρνουν αρχικές τιμές. Η διαδικασία αυτή γίνεται συνήθως από κάποιο μηχανισμό παραγωγής τυχαίων αριθμών.
- ✓ Τα γνωστά διανύσματα εισόδου εισάγονται στο δίκτυο. Υπολογίζονται τα διανύσματα εξόδου.
- ✓ Υπολογίζεται το σφάλμα εκτίμησης και αναπροσαρμόζονται τα συναπτικά βάρη.
- ✓ Με κατεύθυνση από το επίπεδο εξόδου προς το επίπεδο εισόδου, για κάθε εσωτερικό νευρώνα υπολογίζεται η συμμετοχή του στο σφάλμα εκτίμησης και

γίνεται η αλλαγή των βαρών στην είσοδό του. Η συμμετοχή ενός νευρώνα στα σφάλματα των νευρώνων του επόμενου επιπέδου είναι ανάλογη της τρέχουσας εισόδου του και των συντελεστών βαρύτητας που τον συνδέουν με τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου.

Σε ένα νευρωνικό δίκτυο το οποίο υφίσταται εκπαίδευση με οπισθοδιάδοση λάθους υπολογίζονται δύο σφάλματα. Αρχικά υπολογίζονται τα σφάλματα εκτίμησης, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των σφαλμάτων κρυφών επιπέδων.

Έστω  $k$  ένας νευρώνας του επιπέδου εξόδου,  $a_k$  η έξοδος του νευρώνα  $k$  για ένα συγκεκριμένο παράδειγμα εισόδου και  $b_k$  η επιθυμητή έξοδος για το ίδιο παράδειγμα. Το σφάλμα στην περίπτωση αυτή για το νευρώνα  $k$  είναι:  $e_k = a_k - b_k$  (3)

Το πραγματικό σφάλμα στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται επί την παράγωγο της συνάρτησης ενεργοποίησης  $f(n_k)$ , όπου  $n_k$  το όρισμά της για το νευρώνα  $k$  και προκύπτει το σφάλμα εκτίμησης:  $\delta_k = e_k \cdot f'(n_k)$  (4)

Για τη σιγμοειδή συνάρτηση η παράγωγος είναι:  $f'(n_k) = f(n_k) \cdot (1 - f(n_k))$  (5)

Η εισαγωγή της παραγώγου συνάρτησης ενεργοποίησης στον τύπο του σφάλματος επιφέρει ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα.

- Όταν η έξοδος του νευρώνα  $f(n_k)$  τείνει στις τιμές 0 ή 1 (σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης), τότε η παράγωγος  $f'(n_k)$  έχει πολύ μικρή τιμή και άρα από τη σχέση (2) προκύπτει ότι και η βαρύτητα του σφάλματος είναι πολύ μειωμένη έως και μηδαμινή.

Στο επόμενο στάδιο υπολογίζονται τα σφάλματα των νευρώνων των κρυφών επιπέδων από τα σφάλματα των νευρώνων του αμέσως επόμενου επιπέδου σύμφωνα με τη σχέση:

$$\delta_i = f'(n_i) \cdot \sum_{k=1}^k w_{ik} \delta_k \quad (6)$$

όπου,  $i$  ένας νευρώνας του κρυφού επιπέδου και  $\sum$  το άθροισμα όλων των νευρώνων  $k$  του επόμενου επιπέδου με τους οποίους ο νευρώνας  $i$  συνδέεται με βάρη  $w_{ik}$ . Με τον παραπάνω τρόπο υπολογίζονται τα σφάλματα για όλους τους νευρώνες του δικτύου, μέχρι και το επίπεδο εισόδου.

Έχοντας υπολογίσει για κάθε νευρώνα  $i$  το σφάλμα  $\delta_i$ , η αλλαγή στα βάρη εισόδου σε όλους τους νευρώνες γίνεται ως εξής:  $\Delta w_{ji} = -l \cdot \delta_i \cdot \alpha_j$  (7)

όπου  $l$  η σταθερά εκπαίδευσης (learning rate) και  $\alpha_j$  η έξοδος του νευρώνα  $j$ .

Δηλαδή, η αλλαγή στο βάρος από το νευρώνα  $j$  στο νευρώνα  $i$  εξαρτάται από το σφάλμα στο νευρώνα  $i$ , την έξοδο του νευρώνα  $j$  και τη σταθερά εκπαίδευσης  $l$ . Η σταθερά εκπαίδευσης  $l$  καθορίζει το μέγεθος της αλλαγής της τιμής του συναπτικού βάρους σε κάθε βήμα. Μεγάλες τιμές οδηγούν σε γρήγορα, όχι όμως ακριβή αποτελέσματα, ενώ πολύ μικρές τιμές καθυστερούν την διαδικασία της εκπαίδευσης με ταυτόχρονο κίνδυνο προσκόλλησης του δικτύου σε ένα μικρό εύρος τιμών για τα βάρη. Κάθε φορά που εισάγεται ένα ζεύγος εισόδου-εξόδου γίνεται και μια μικρή αλλαγή των συναπτικών βαρών. Οι τιμές που λαμβάνουν τα βάρη κυμαίνονται συνήθως από 0 έως 1. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του βάρους τόσο περισσότερο το συγκεκριμένο στοιχείο εισόδου  $p$  επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Το πέρασμα όλων των δεδομένων μια φορά σ' ένα δίκτυο ονομάζεται εποχή εκπαίδευσης (epoch). Συνήθως πραγματοποιείται μεγάλος αριθμός εποχών εκπαίδευσης και η διαδικασία τερματίζεται όταν το συνολικό σφάλμα μιας εποχής γίνει μικρότερο από μια συγκεκριμένη τιμή ή μετά από προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Το συνολικό σφάλμα ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων των νευρώνων εξόδου:

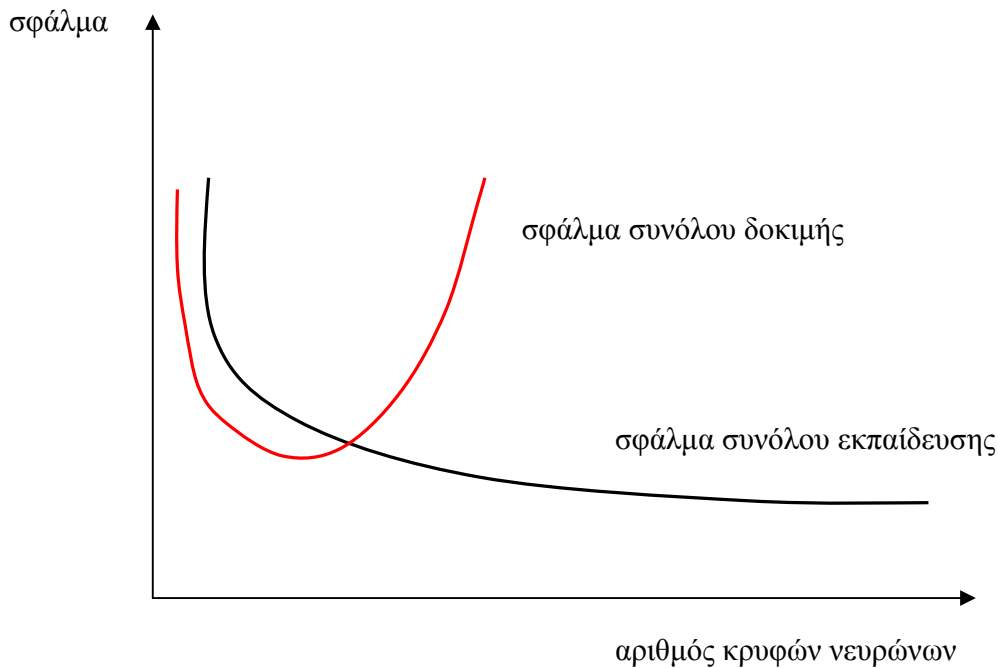
$$E = \frac{1}{P \cdot K} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \delta_{k,p}^2 \quad (8)$$

όπου  $P$  είναι ο αριθμός των ζευγών εισόδου-εξόδου και  $K$  είναι ο αριθμός συνιστωσών των διανυσμάτων εξόδου.

Το σφάλμα σταδιακά μειώνεται όσο ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνει. Η συνάρτηση του τετραγωνικού σφάλματος συνήθως εμπεριέχει αρκετά τοπικά ελάχιστα στα οποία είναι δυνατόν να καταλήξει ο αλγόριθμος (σχήμα 3.7). Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι θα κατορθώσουμε να βρούμε το δίκτυο που αντιστοιχεί στο ολικό ελάχιστο, η διαδικασία εκπαίδευσης επαναλαμβάνεται πολλές φορές, με νέες αρχικές τιμές στα βάρη κάθε φορά. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η πιθανότητα να βρεθεί το βέλτιστο δίκτυο, χωρίς όμως αυτό να μπορεί να εξασφαλιστεί απόλυτα.





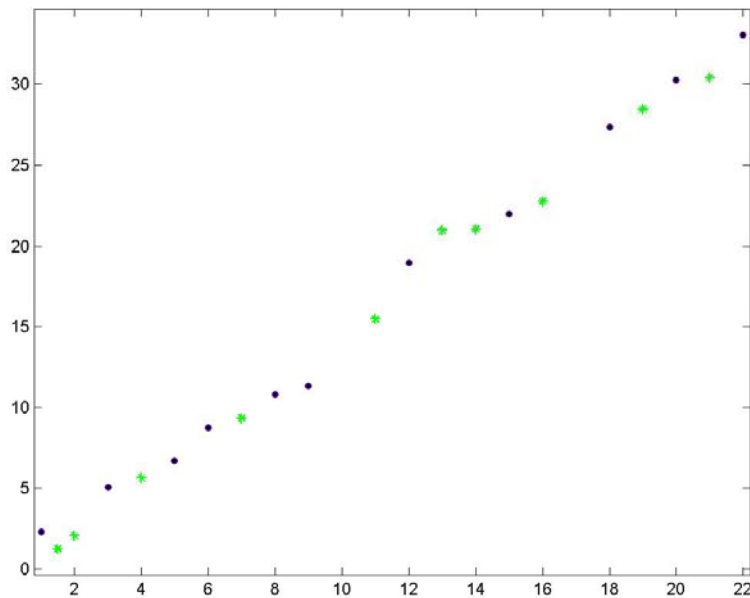


**Σχήμα 3.8:** Γραφικές απεικονίσεις μεταβολής των δυο σφαλμάτων κατά την υπερεκπαίδευση του δικτύου.

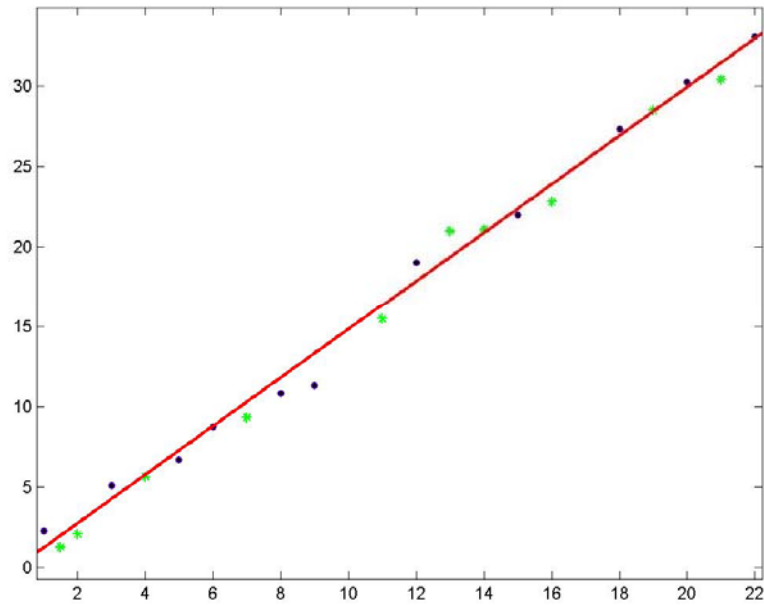
Κατά την υπερεκπαίδευση ενός δικτύου ένα φαινόμενο προσεγγίζεται με πιο σύνθετο δίκτυο απ' ότι χρειάζεται. Αν για παράδειγμα, προσεγγιστεί μια γραμμική συνάρτηση με πολυωνμική συνάρτηση υψηλότερου βαθμού, τότε επιτυγχάνεται η μείωση στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά αυξάνεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στα δεδομένα ελέγχου.

Έστω ότι για ένα σύνολο δεδομένων το οποίο χωρίζεται σε δεδομένα εκπαίδευσης και δεδομένα ελέγχου, ζητείται να βρεθεί η συνάρτηση αγνώστου βαθμού που θα προσεγγίζει το σύνολο αυτό. Τα δεδομένα παριστάνονται γραφικά στο σχήμα 3.9, με μαύρο χρώμα τα δεδομένα εκπαίδευσης και με πράσινο τα δεδομένα ελέγχου. Δεν βρίσκονται σε ευθεία, αλλά έχουνε κάποιο 'θόρυβο'. Στο σχήμα 3.10 εφαρμόζεται μια γραμμική συνάρτηση παλινδρόμησης, από την καμπύλη της οποίας διέρχονται τόσο τα σημεία που παριστάνουν δεδομένα εκπαίδευσης όσο και εκείνα του ελέγχου. Στο σχήμα 3.11, τα δεδομένα προσομοιάζονται με πολυωνμική συνάρτηση μεγαλύτερου βαθμού και παρατηρείται από την καμπύλη της ότι αυτή ταυτίζεται σχεδόν με τα δεδομένα

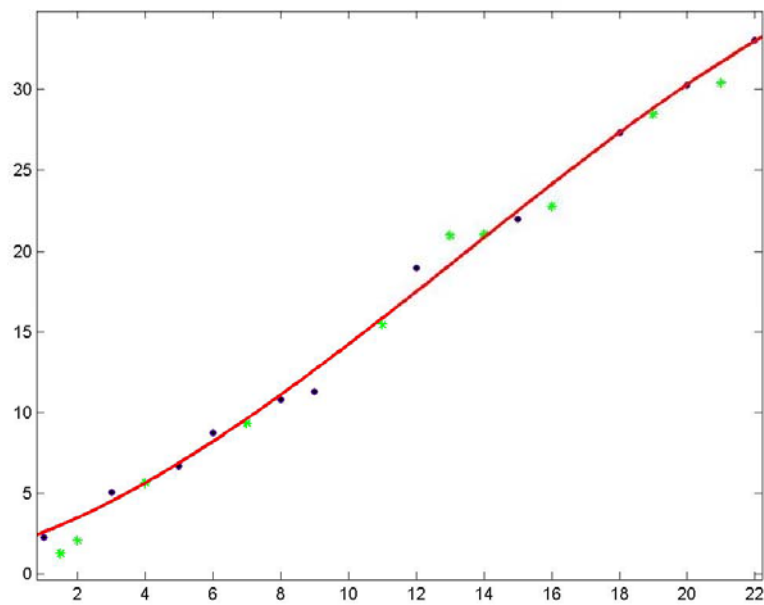
εκπαίδευσης, ενώ συγχρόνως απομακρύνεται από τα δεδομένα ελέγχου. Το ίδιο φαινόμενο γίνεται πιο χαρακτηριστικό στο σχήμα 3.12, στο οποίο εισάγεται συνάρτηση ακόμη μεγαλύτερου βαθμού. Τα σημεία που παριστούν τα δεδομένα ελέγχου απομακρύνονται από την καμπύλη της συνάρτησης, ενώ τα σημεία για τα δεδομένα ελέγχου διέρχονται όλα από αυτήν. Συνεπώς, μια συνάρτηση μεγαλύτερου βαθμού περιγράφει ικανοποιητικά τα δεδομένα εκπαίδευσης, όχι όμως και τα δεδομένα ελέγχου. Αυτή είναι μια απλή περίπτωση υπερεκπαίδευσης. Η συνάρτηση μεγαλύτερου βαθμού-πολυπλοκότερη μεταφράζεται σε ένα δίκτυο συνθετότερο-με μεγάλο αριθμό νευρώνων στο κρυφό επίπεδο το οποίο υπερεκπαιδεύεται.



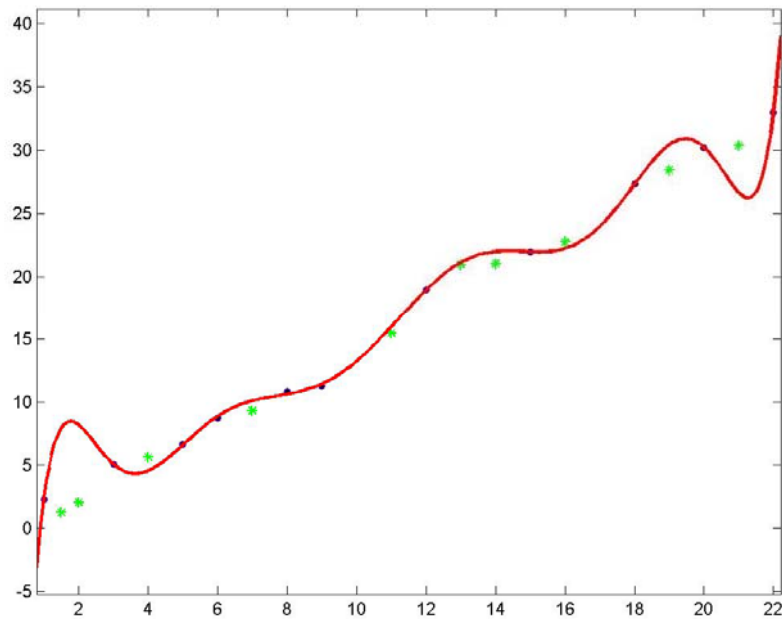
**Σχήμα 3.9:** Γραφική απεικόνιση δεδομένων εκπαίδευσης κι ελέγχου, με μαύρο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.10: Προσέγγιση των δεδομένων με μια γραμμική συνάρτηση παλινδρόμησης.



Σχήμα 3.11: Προσέγγιση των δεδομένων με μια πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού.



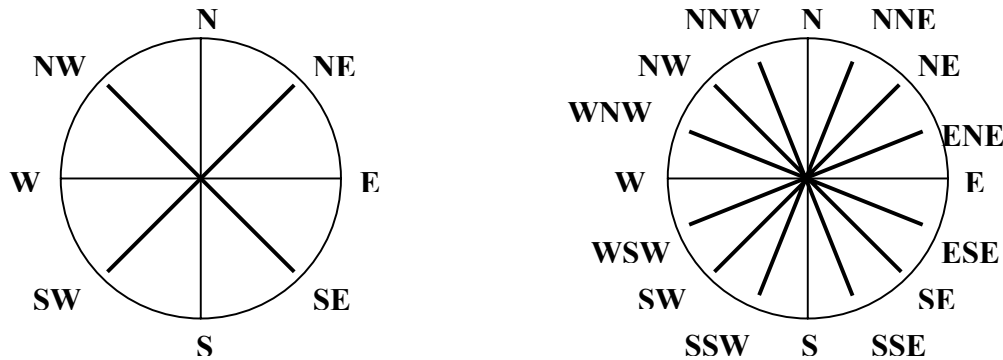
**Σχήμα 3.12:** Προσέγγιση των δεδομένων με μια πολυωνυμική συνάρτηση ενάτου βαθμού.

### 3.2 Δεδομένα-Μεθοδολογία

Ο άνεμος ενός τόπου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα Μετεωρολογικά και Κλιματικά στοιχεία, με κύρια χαρακτηριστικά του, τη διεύθυνση της κίνησής του καθώς και την ένταση ή διαφορετικά την ταχύτητά του. Λόγω της διαφάνειας και της ρευστότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, ο άμεσος προσδιορισμός των παραπάνω στοιχείων του παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο είναι ωριαίες τιμές διεύθυνσης κι έντασης ανέμου, θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας για τα έτη 1982-1986 και 1996-2002.

Τα δεδομένα καταγράφονται σε ένα πίνακα 96 στηλών και 4384 γραμμών (Πίνακας Α). Οι πρώτες 24 στήλες περιγράφουν τις ωριαίες διευθύνσεις του ανέμου οι οποίες συμβολίζονται με λατινικά γράμματα. Στις επόμενες 24 καταγράφονται οι ωριαίες τιμές έντασης του ανέμου σε km/h. Όσον αφορά τις διευθύνσεις του ανέμου είναι 8 για τα έτη 1996 έως το 2002, και 16 για τα έτη από το 1982 έως το 1986 (σχήμα 3.13). Στον

πίνακα ακολουθούν οι ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας αέρα σε βαθμούς Κελσίου και οι τελευταίες 24 στήλες είναι οι ωριαίες τιμές της σχετικής υγρασίας του αέρα σε ποσοστό επί τοις εκατό.



**Σχήμα 3.13:** Οι οκτώ και οι δεκαέξι βασικές διευθύνσεις του ανέμου.

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η ακρίβεια με την οποία ένα νευρωνικό δίκτυο που τροφοδοτείται με ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα προηγούμενων ημερών μπορεί να προβλέψει την εμφάνιση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η διαδικασία κατά την οποία ένα δίκτυο κατασκευάζεται και παράγει αποτέλεσμα μπορεί να χωριστεί σε ένα αριθμό βημάτων, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια και αποτέλεσαν το μεθοδολογικό πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας.

- Καθορίστηκε η μορφή με την οποία τα δεδομένα εισάγονται-κωδικοποιούνται στο νευρωνικό δίκτυο.

Όπως προαναφέρθηκε τα δεδομένα έχουν καταγραφεί στον πίνακα Α διαστάσεων,  $4384 \times 96$ . Όλα τα δεδομένα εισάγονται στο νευρωνικό δίκτυο με τη μορφή διανυσμάτων. Για το λόγο αυτό οι διευθύνσεις του ανέμου που συμβολίζονται με γράμματα του λατινικού αλφαβήτου υπέστησαν μετατροπή σε πίνακες διαστάσεων  $1 \times 4$ . Για παράδειγμα, η βόρεια διεύθυνση N του ανέμου εισάγεται στο δίκτυο ως διάνυσμα που παριστάνεται με πίνακα-γραμμή  $[1,0,0,0]$ , η W διεύθυνση ως  $[0,0,0,1]$ , η NW ως  $[1,0,0,1]/2$ , ενώ η NNW ως  $[2,0,0,1]/4$ . Ομοίως, η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για

κάθε μια από τις επιμέρους διευθύνσεις του ανέμου. Η κατάσταση της άπνοιας εισάγεται με το διάνυσμα  $[0,0,0,0]$ . Τα υπόλοιπα δεδομένα της έντασης ανέμου, της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας είναι αριθμητικά, οπότε δεν χρειάστηκε περαιτέρω μετατροπή αυτών, αλλά εισάγονται αυτόματα ως διανύσματα. Μετά τις μετατροπές που έγιναν στα δεδομένα εισόδου ο νέος πίνακας που προέκυψε (Πίνακας Β) έχει 168 στήλες και 4384 γραμμές.

- *Καθορίστηκε η μορφή των διανυσμάτων-στόχων στο δίκτυο*

Για το χρονικό διάστημα μελέτης επιλέχθηκαν με υποκειμενική κατάταξη οι ημέρες με άνεμο Βαρδάρη. Καταγράφηκε ένας πίνακας στήλη  $4384 \times 1$ , ο οποίος περιέχει τα επιθυμητά διανύσματα-στόχοι  $d$ . Ο πίνακας αυτός περιέχει τις τιμές 1 και 0, οι οποίες αντιστοιχούν σε ημέρες με άνεμο Βαρδάρη και ημέρες χωρίς άνεμο, αντίστοιχα. Σε ένα ιδανικά εκπαιδευμένο δίκτυο θα πρέπει το προκύπτον διάνυσμα εξόδου του να ταυτίζεται κάθε φορά με το επιθυμητό διάνυσμα-στόχος. Πιο απλά, θα πρέπει το δίκτυο να προβλέπει πάντα τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη (η τιμή εξόδου να είναι ίση με 1) αλλά και αυτές χωρίς άνεμο Βαρδάρη (η τιμή εξόδου να είναι ίση με 0). Στην παρούσα έρευνα επιδιώκεται η βέλτιστη προσέγγιση του φαινομένου, η μέγιστη πιθανότητα με την οποία ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να προβλέψει αν την επόμενη ημέρα θα φυσήξει ή όχι ο άνεμος Βαρδάρης.

- *Πραγματοποιήθηκε η κατάλληλη επεξεργασία στα δεδομένα εκπαίδευσης*

Όπως προέκυψε στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, οι ημέρες με άνεμο Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης αντιπροσωπεύουν ένα μικρό ποσοστό των ημερών του έτους, περίπου το 7%. Έτσι, ένα δίκτυο το οποίο εκπαιδεύεται για να εξάγει μόνο ‘ημέρες χωρίς βαρδάρη’ θα έχει τιμή σφάλματος ίση με 7%. Αυτό το ποσοστό σφάλματος είναι πολύ μικρό και το δίκτυο έχει την τάση να οδηγείται προς αυτήν την κατάσταση. Πρωτεύοντας στόχος όμως της παρούσας έρευνας είναι η εκπαίδευση ενός δικτύου που θα αναγνωρίζει τις ‘ημέρες βαρδάρη’. Αυτή η κατάσταση συνήθως αντιμετωπίζεται με δύο τεχνάσματα:

α) Πολλαπλασιάζονται τα διανύσματα στόχοι με ένα συντελεστή βάρους οπότε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα - το κόστος σφάλματος που υπολογίζεται στη σχέση (8) επιβαρύνεται περισσότερο όταν το νευρωνικό δίκτυο δεν αναγνωρίζει σωστά τις ημέρες. Όταν δηλαδή το νευρωνικό δίκτυο δεν αναγνωρίζει τις ημέρες βαρδάρη ενώ υπάρχουν ή όταν αναγνωρίζει ημέρες βαρδάρη οι οποίες στην πραγματικότητα δεν υφίστανται. Έτσι, αντί για 1 και 0 που συμβολίζονται οι ημέρες με βαρδάρη και χωρίς βαρδάρη αντίστοιχα, θα μπορούσαν για παράδειγμα να δοθούν οι τιμές 5 και 0, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο το δίκτυο αναζητώντας το ελάχιστο κόστος προσπαθεί να πετύχει συνολικά όλες τις ημέρες στόχους και όχι μόνο τις ημέρες με έξοδο 0.

β) Αντιγράφονται τα διανύσματα εισόδου των ημερών βαρδάρη πολλές φορές μέχρι το ποσοστό των ημερών αυτών προς τις ημέρες χωρίς βαρδάρη να αποκτήσει μια ικανοποιητική τιμή. Στην παρούσα μελέτη το ποσοστό ημερών βαρδάρη προς τις ημέρες χωρίς βαρδάρη τέθηκε ίσο με 0.75/1. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η μετατροπή αυτή έγινε μόνο στα δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και όχι στα δεδομένα ελέγχου των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος (β).

- Λόγω του μεγάλου αριθμού διανυσμάτων εισόδου στα αρχικά δεδομένα, εφαρμόστηκε η μέθοδος ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (PCA).

Η μέθοδος ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (PCA) χρησιμοποιείται για να ομαδοποιήσει μεταβλητές ή να συνθέσει τις αρχικές μεταβλητές δίνοντας ως αποτέλεσμα νέες παραμέτρους. Για να εξετάσει κανείς τις σχέσεις που συνδέουν  $p$  συσχετισμένες μεταβλητές, είναι χρήσιμο να μετασχηματιστεί το σύνολο των αρχικών μεταβλητών σε ένα σύνολο μη συσχετισμένων μεταβλητών που ονομάζονται κύριες συνιστώσες. Αυτές οι καινούριες μεταβλητές είναι γραμμικοί συνδυασμοί των αρχικών μεταβλητών και παράγονται σε φθίνουσα διάταξη ανάλογα με την αντιπροσωπευτικότητά τους. Αντικειμενικός σκοπός της ανάλυσης είναι να ελεγχθεί αν οι πρώτοι παράγοντες είναι υπόλογοι για μεγάλο ποσοστό της πληροφορίας των αρχικών δεδομένων. Αν συμβαίνει αυτό τότε μπορεί να ειπωθεί ότι η πραγματική διάσταση του προβλήματος είναι μικρότερη από  $p$ . Αν τα αρχικά δεδομένα έχουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους τότε αναμένεται οι πρώτες  $m$  συνιστώσες ( $m < p$ ) να δίνουν ικανοποιητική ανάλυση των δεδομένων. Κάθε κύρια συνιστώσα προέρχεται από την επίλυση του αρχικού πίνακα κι

αντιστοιχεί η κάθε μια σε μια συγκεκριμένη χαρακτηριστική τιμή (ιδιοτιμή). Όσο μεγαλύτερη η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί σε μια κύρια συνιστώσα τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντιπροσωπευτικότητά της συνιστώσας αυτής. Στη μελέτη αυτή έγινε εφαρμογή της μεθόδου, τα στάδια της προαναφερθείσας διαδικασίας έγιναν μέσω υπολογιστή με τη χρήση του μαθηματικού πακέτου Matlab και προέκυψαν 23 κύριες συνιστώσες. Το σύνολο των 23 κυρίων συνιστωσών αντιπροσωπεύουν ποσοστό μεγαλύτερο του 95% της συνολικής πληροφορίας.

Στη συνέχεια, το σύνολο των δεδομένων χωρίστηκε σε δυο μέρη: Το 80% χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου (training set), ενώ το υπόλοιπο 20% για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων (evaluation set).

- Καθορίστηκαν τα γενικά χαρακτηριστικά και η αρχιτεκτονική των δικτύων προς εκπαίδευση.

Όπως προαναφέρθηκε, εκπαιδεύτηκαν δίκτυα με ένα κρυφό στρώμα και η συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στο κρυφό στρώμα είναι η σιγμοειδής. Η συνάρτηση αυτή είναι συνεχής, δέχεται ως όρισμα μια οποιαδήποτε πραγματική τιμή και δίνει ως έξοδο μια οποιαδήποτε πραγματική τιμή στο διάστημα  $[0,1]$ . Με στόχο η έξοδος του δικτύου  $\alpha$  να παίρνει τις διακριτές τιμές  $0$  και  $1$ , στο στρώμα εξόδου εισάγεται μια συνάρτηση κατωφλίου (threshold function):

$$\Phi(\alpha) \begin{cases} 1, \text{ αν } \alpha \geq \theta \\ 0, \text{ αν } \alpha < \theta \end{cases} \quad (9)$$

Δοκιμάστηκε ένα πυκνό πλέγμα κατωφλίων  $\theta$  στο διάστημα  $[0,1]$  με βήμα  $0,005$ ,  $0:0.005:1$ .



### 3.3 Δοκιμές-Πειράματα

Με στόχο την εύρεση και εκπαίδευση του κατάλληλου νευρωνικού δικτύου που θα προβλέπει τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη έγιναν πολλές δοκιμές. Το δίκτυο τροφοδοτήθηκε με ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα παρελθόντος για βάθος χρόνου, μιας, δύο, τριών και τεσσάρων ημερών. Στα δεδομένα εκπαιδεύτηκαν νευρωνικά δίκτυα με ένα κρυφό στρώμα και με διαφορετικό αριθμό νευρώνων σε κάθε πείραμα. Δοκιμάστηκαν δίκτυα με 2 έως 20 νευρώνες στο κρυφό στρώμα.

Αρχικά, στο δίκτυο εισήχθησαν μετεωρολογικά δεδομένα μιας ημέρας, της προηγούμενης από αυτήν για την οποία εξετάζεται αν θα φυσήξει ο άνεμος Βαρδάρης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Οι συνιστώσες του διανύσματος εισόδου είναι οι 23 συνιστώσες που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (PCA) και αναφέρονται πάντα στα μετεωρολογικά δεδομένα της προηγούμενης ημέρας ( $t-1$ ), από αυτήν για την οποία ζητείται η πρόβλεψη για την επικράτηση ή όχι του ανέμου Βαρδάρη ( $t$  ημέρα). Στη συνέχεια, ακολουθούν τα διανύσματα-στόχοι, τα οποία αναφέρονται στην εμφάνιση ή όχι, του ανέμου για τη ζητούμενη ημέρα, βάσει της υποκειμενικής κατάταξης που έχει πραγματοποιηθεί. Πριν το σύνολο των δεδομένων εισαχθεί στο μηχανισμό εκπαίδευσης, τα δεδομένα αναμείχθηκαν με τυχαίο τρόπο έτσι ώστε να μεταβάλλεται κάθε φορά η σειρά τους. Αυτό έγινε για να μην εκπαιδεύεται κάθε φορά το δίκτυο με τον ίδιο τρόπο. Σε μια επανάληψη (epoch), όλα τα ζεύγη ημερών περνάνε μια φορά από το δίκτυο. Για κάθε πείραμα-δοκιμή πραγματοποιήθηκαν 5000 επαναλήψεις.

Για το κάθε ζεύγος ημερών υπολογίστηκε η έξοδος του δικτύου (σχέση 9) και στη συνέχεια συγκρίθηκε η τιμή της με την αντίστοιχη του διανύσματος-στόχου. Από τη σύγκριση αυτή δύναται να προκύψει ένα από τα τέσσερα πιθανά αποτελέσματα:

1. **Σωστή πρόβλεψη (true negative):** Το δίκτυο με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα της προηγούμενης ημέρας προέβλεψε σωστά ότι την επόμενη ημέρα δε θα φυσήξει άνεμος Βαρδάρης.  $\Phi(a)=0$  με  $a<\theta$  και  $d=0$ .
2. **Σωστή πρόβλεψη (true positive):** Το δίκτυο με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα της προηγούμενης ημέρας προέβλεψε σωστά ότι την επόμενη ημέρα θα φυσήξει άνεμος Βαρδάρης.  $\Phi(a)=1$  με  $a>\theta$  και  $d=1$ .

3. **Λανθασμένη πρόβλεψη (false positive)**: Το δίκτυο με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα της προηγούμενης ημέρας προέβλεψε λανθασμένα ότι την επόμενη ημέρα θα φυσήξει άνεμος Βαρδάρης.  $\Phi(\alpha)=1$  με  $\alpha>\theta$  και  $d=0$ .
4. **Λανθασμένη πρόβλεψη (false negative)**: Το δίκτυο με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα της προηγούμενης ημέρας προέβλεψε λανθασμένα ότι την επόμενη ημέρα δεν θα φυσήξει άνεμος Βαρδάρης.  $\Phi(\alpha)=0$  με  $\alpha<\theta$  και  $d=1$ .

Η διαδικασία της σύγκρισης πραγματοποιήθηκε για όλα τα ζεύγη ημερών των δεδομένων εκπαίδευσης και υπολογίσθηκαν στη συνέχεια, το σύνολο των σωστών προβλέψεων, true positive, true negative, καθώς και των λανθασμένων, false positive και false negative. Χρησιμοποιώντας αυτά τα στοιχεία ελέγχεται η ποιότητα εκτίμησης του δικτύου υπολογίζοντας δυο πιθανότητες: Την πιθανότητα με την οποία το δίκτυο προέβλεψε σωστά τις ημέρες με άνεμο Βαρδάρη (detection probability).

$$\text{detection probability} = \text{true positive} / (\text{true positive} + \text{false negative}) \quad (10)$$

πιθανότητα σωστής πρόβλεψης ημερών Βαρδάρη = ο αριθμός ημερών Βαρδάρη που προέβλεψε το δίκτυο / ο συνολικός αριθμός ημερών Βαρδάρη.

Την πιθανότητα λανθασμένης πρόβλεψης ημερών με άνεμο Βαρδάρη, για το σύνολο των ζευγών ημερών:

$$\text{false alarm probability} = \text{false positive} / (\text{false positive} + \text{true negative}) \quad (11)$$

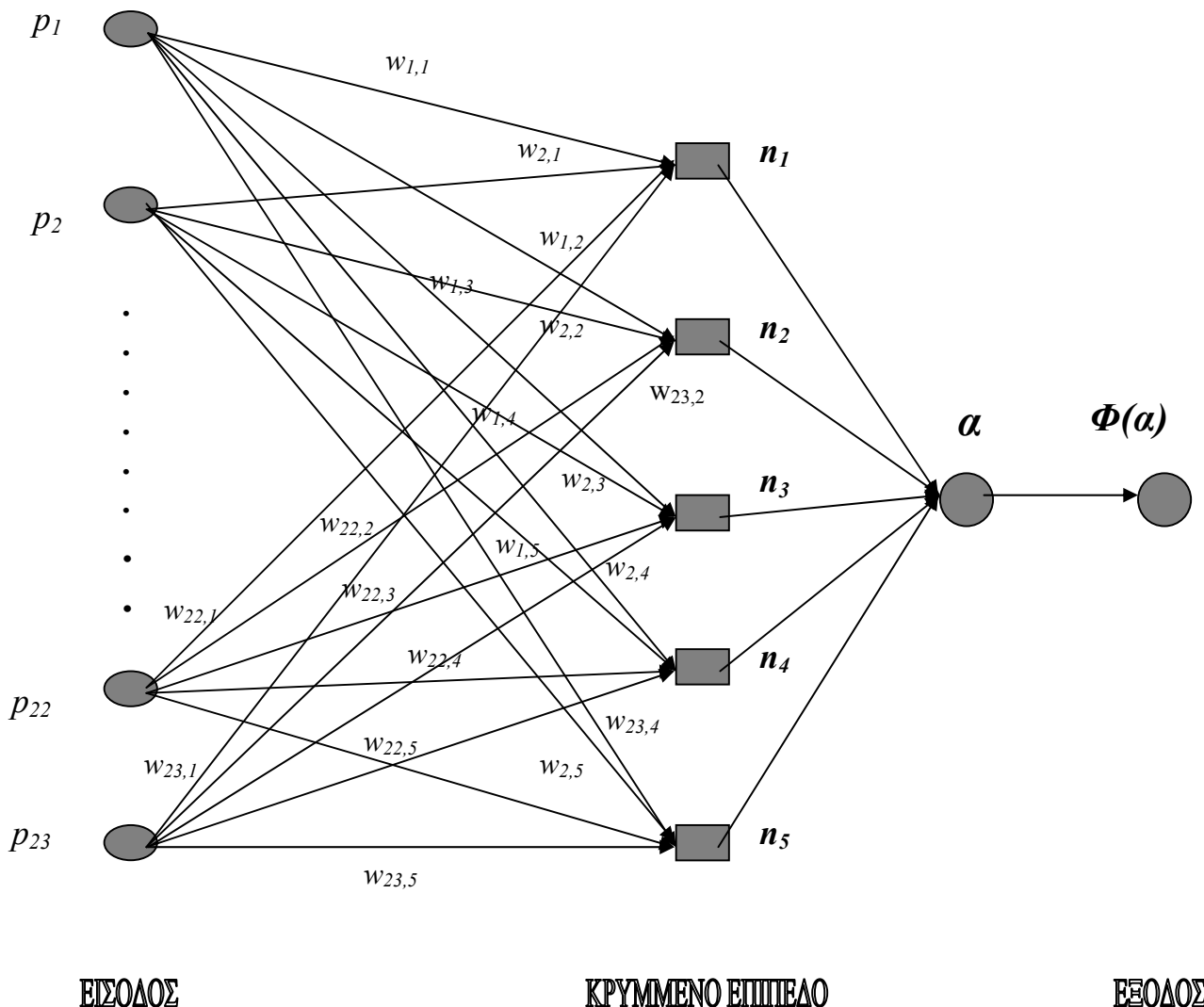
πιθανότητα λανθασμένης πρόβλεψης ημερών Βαρδάρη = ο αριθμός ημερών που προέβλεψε λάθος το δίκτυο ως ημέρες Βαρδάρη / ο συνολικός αριθμός μη ημερών Βαρδάρη.

Στο στάδιο της εκπαίδευσης δοκιμάστηκαν κάθε φορά διαφορετικά αρχικά συναπτικά βάρη και διαφορετικές τιμές κατωφλίου έτσι ώστε να επιτευχθεί **μεγιστοποίηση** της τιμής του **'detection probability'** και ταυτόχρονη **ελαχιστοποίηση** της τιμής του **'false alarm probability'**. Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου αποτελούν το 80% του συνόλου.

Στο τελικό στάδιο ελέγχου των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το διαμορφωμένο νευρωνικό δίκτυο, με τις τιμές του κατωφλίου και των συναπτικών βαρών που προέκυψαν από το στάδιο της εκπαίδευσης. Στο δίκτυο αυτό εισήχθησαν τα νέα δεδομένα ελέγχου και προέκυψαν οι πιθανότητες των ‘detection probability’ και ‘false alarm probability’. Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης δημιουργήθηκε κι εκτελέστηκε σε γλώσσα προγραμματισμού και λογισμικού εφαρμογών Matlab 6.

### 3.4 Αποτελέσματα Δοκιμών

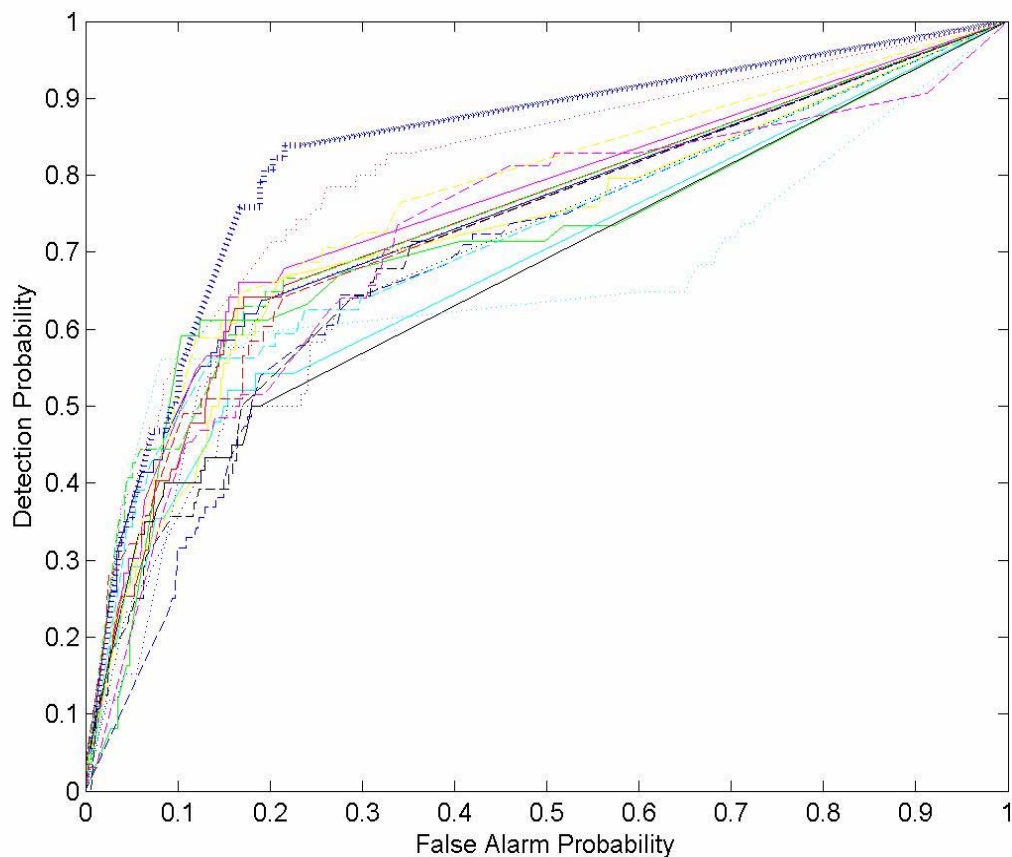
#### 3.4.1. Δίκτυο με πέντε νευρώνες στο κρυφό στρώμα



Σχήμα 3.14: Νευρωνικό δίκτυο με 5 νευρώνες στο κρυφό στρώμα

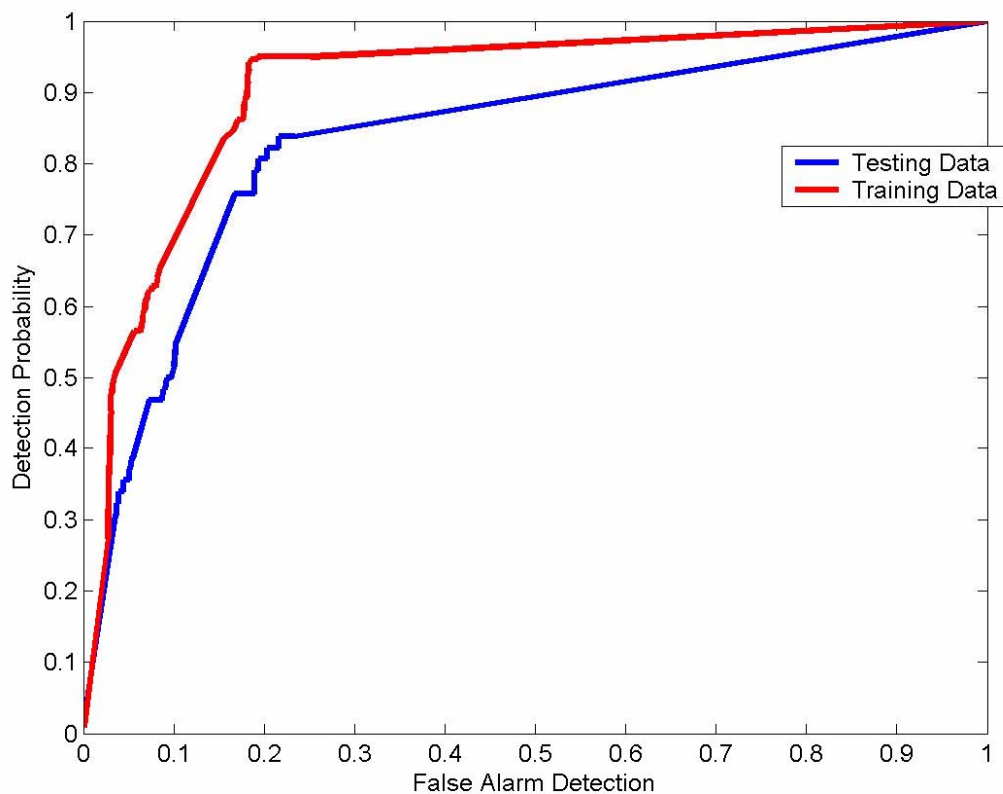
### 3.4.1.1. Παρελθόν μιας ημέρας

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων προέκυψε ότι το δίκτυο με 5 νευρώνες στο κρυφό στρώμα (σχήμα 3.14) έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα πρόβλεψης ημερών Βαρδάρη (σχήμα 3.15 και 3.16). Το δίκτυο αυτό ορίζεται ως δίκτυο δύο στρωμάτων: το στρώμα εισόδου (μηδενικό στρώμα), το κρυφό στρώμα (πρώτο στρώμα) που αποτελείται από 5 νευρώνες και το στρώμα εξόδου (δεύτερο στρώμα). Στο σχήμα 3.15 απεικονίζονται γραφικά οι πιθανότητες σωστής και λανθασμένης πρόβλεψης ημερών Βαρδάρη που προέκυψαν μετά τη δοκιμή του δικτύου στα δεδομένα ελέγχου. Κάθε γραμμή στο διάγραμμα παριστάνει κι ένα διαφορετικό πείραμα. Σε κάθε πείραμα τα δεδομένα ελέγχου (τα ζεύγη ημερών) εισάγονται στο δίκτυο με διαφορετική σειρά.



**Σχήμα 3.15:** Πιθανότητες πρόβλεψης ανέμου Βαρδάρη της επόμενης ημέρας εκπαιδευοντας δίκτυο με 5 νευρώνες στο κρυφό στρώμα.

Το πείραμα που παριστάνεται με τη μπλε τεθλασμένη γραμμή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη. Το πείραμα αυτό απεικονίζεται γραφικά και στο σχήμα 3.16. Με την κόκκινη γραμμή παριστάνεται η μεταβολή του ‘detection probability’ και του ‘false alarm probability’ για τα δεδομένα εκπαίδευσης ενώ με την μπλε γραμμή για τα δεδομένα ελέγχου. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι πιθανότητες σωστής πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη είναι μεγαλύτερες στα δεδομένα στα οποία το δίκτυο εκπαιδεύτηκε (training data) σε σχέση με τα δεδομένα στα οποία ελέγχθηκε η εκπαίδευση του δικτύου (testing data).



**Σχήμα 3.16:** Γραφική απεικόνιση της βέλτιστης πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη για την επόμενη ημέρα εκπαιδεύοντας δίκτυο με 5 νευρώνες στο κρυφό στρώμα.

Ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση της πιθανότητας σωστής πρόβλεψης Βαρδάρη (το *detection probability* να τείνει στο 1) με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εσφαλμένης πρόβλεψης στα δεδομένα ελέγχου (το *false alarm probability* να τείνει στο

0). Για την εκπαίδευση του δικτύου με τους πέντε νευρώνες στο κρυφό στρώμα, χρησιμοποιήθηκαν τιμές κατωφλίου στο διάστημα  $[0.045, 0.54]$ .

1) Μέγιστη πιθανότητα σωστής πρόβλεψης ανέμου Βαρδάρη **82%** με πιθανότητα λάθους **20%**.

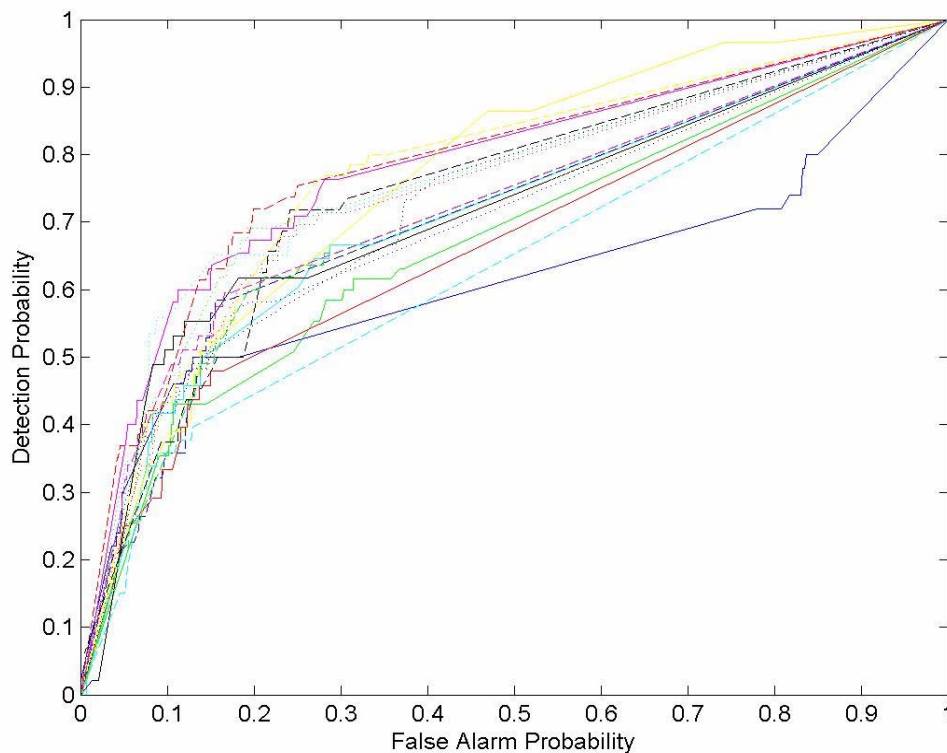
*detection probability=0,82* , *false alarm probability=0,2* με τιμή κατωφλίου  $\alpha=0,18$ .

2) Πιθανότητα σωστής πρόβλεψης ανέμου Βαρδάρη **80 %** με πιθανότητα λάθους **19%**.

*detection probability=0,80* , *false alarm probability=0,19* με τιμή κατωφλίου  $\alpha=0,44$ .

### 3.4.1.2 Παρελθόν δυο ημερών

Στο επόμενο στάδιο της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου μετεωρολογικά δεδομένα των δυο προηγούμενων ημερών. Έτσι δημιουργήθηκαν ομάδες των τριών ημερών και δοκιμάστηκε το δίκτυο με πέντε νευρώνες στο κρυφό στρώμα, το οποίο έδωσε τα καλύτερα ποσοστά πρόβλεψης στο προηγούμενο μέρος της έρευνας.

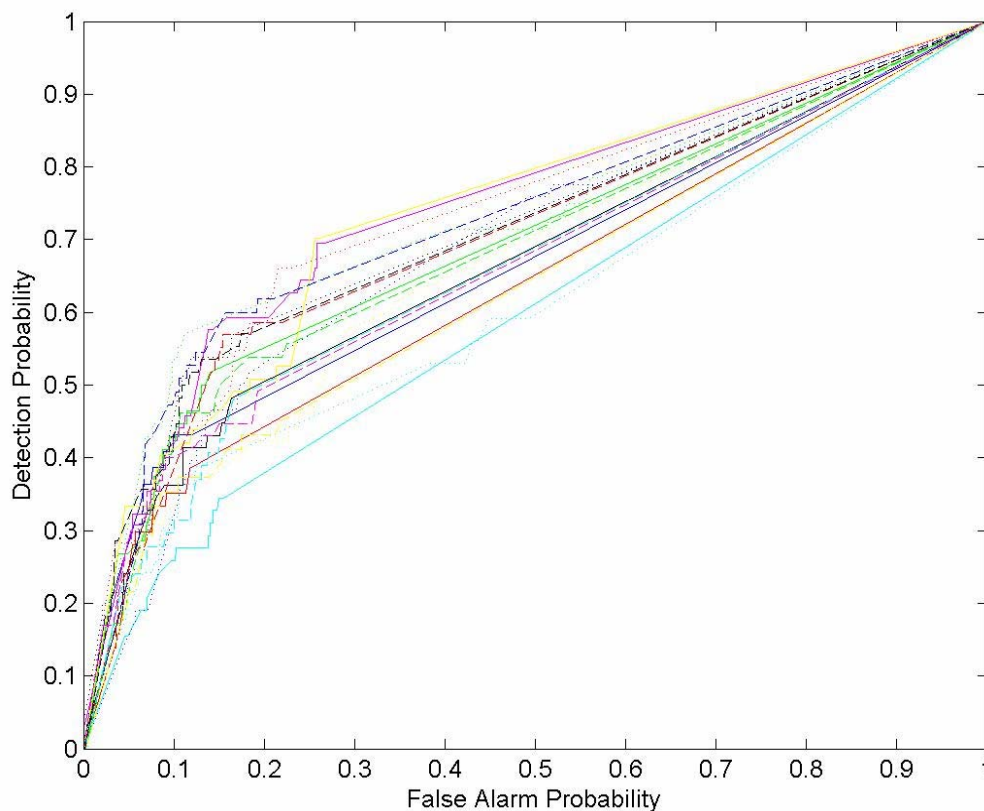


**Σχήμα 3.17:** Πιθανότητες σωστής και λανθασμένης πρόβλεψης ανέμου Βαρδάρη της επόμενης ημέρας χρησιμοποιώντας δεδομένα δυο προηγούμενων ημερών.

Ομοίως, πραγματοποιήθηκε αρχικά η διαδικασία της εκπαίδευσης και στη συνέχεια η διαδικασία εκτίμησης των αποτελεσμάτων, η απεικόνιση των οποίων δίνεται στο σχήμα 3.17. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα δεδομένα ελέγχου δεν ήταν ικανοποιητικά αφού τα ποσοστά σωστής πρόβλεψης ήταν σχετικά χαμηλά ενώ ταυτόχρονα τα αντίστοιχα της λανθασμένης αυξάνονταν ραγδαία.

### 3.4.1.3. Παρελθόν τριών ημερών

Στη συνέχεια στο ίδιο δίκτυο των πέντε νευρώνων, δοκιμάστηκαν ως δεδομένα εισόδου, μετεωρολογικά δεδομένα τριών προηγούμενων ημερών και υπολογίστηκε η πιθανότητα πρόβλεψης του Βαρδάρη για την επόμενη.

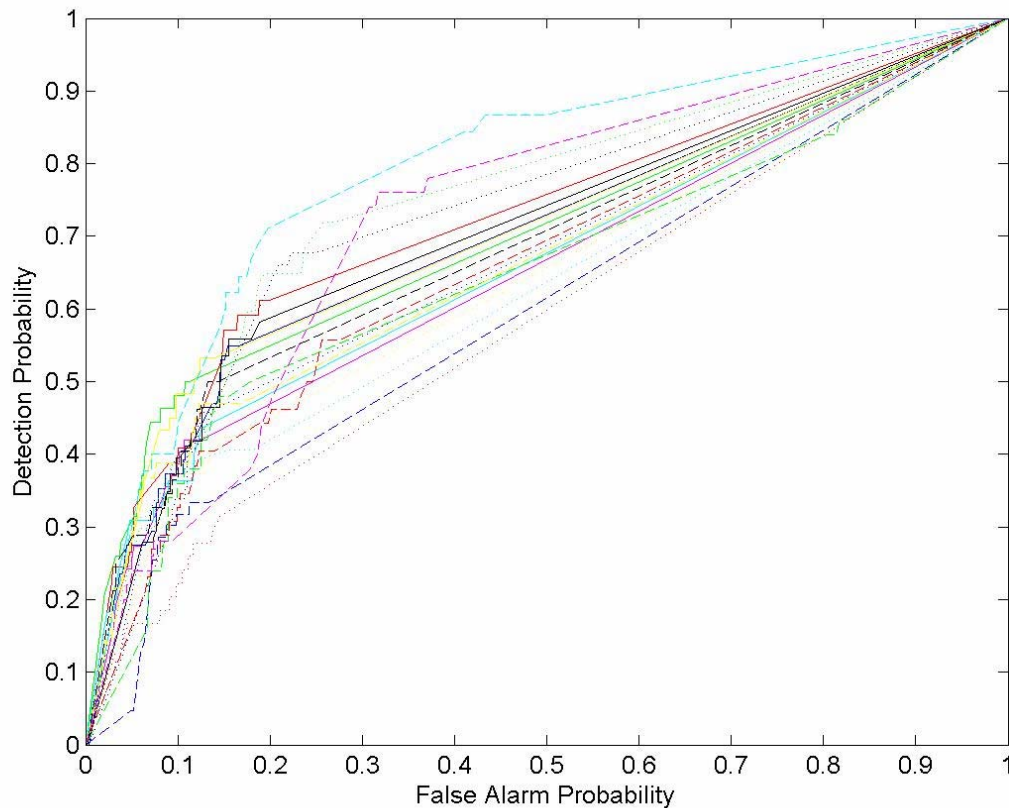


**Σχήμα 3.18:** Πιθανότητες σωστής και λανθασμένης πρόβλεψης ανέμου Βαρδάρη της επόμενης ημέρας χρησιμοποιώντας δεδομένα τριών προηγούμενων ημερών.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα δεδομένα ελέγχου δεν ήταν ικανοποιητικά αφού τα ποσοστά σωστής πρόβλεψης ήταν σχετικά χαμηλά ενώ ταυτόχρονα τα αντίστοιχα της λανθασμένης αυξάνονταν ραγδαία.

#### 3.4.1.4. Παρελθόν τεσσάρων ημερών

Στο τελευταίο στάδιο των πειραμάτων, δοκιμάστηκαν ως δεδομένα εισόδου, μετεωρολογικά δεδομένα τεσσάρων προηγούμενων ημερών και υπολογίστηκε η πιθανότητα πρόβλεψης του Βαρδάρη για την επόμενη. Τα αποτελέσματα παριστάνονται γραφικά στο σχήμα 3.19.



**Σχήμα 3.19:** Πιθανότητες σωστής και λανθασμένης πρόβλεψης ανέμου Βαρδάρη της επόμενης ημέρας χρησιμοποιώντας δεδομένα τεσσάρων προηγούμενων ημερών.

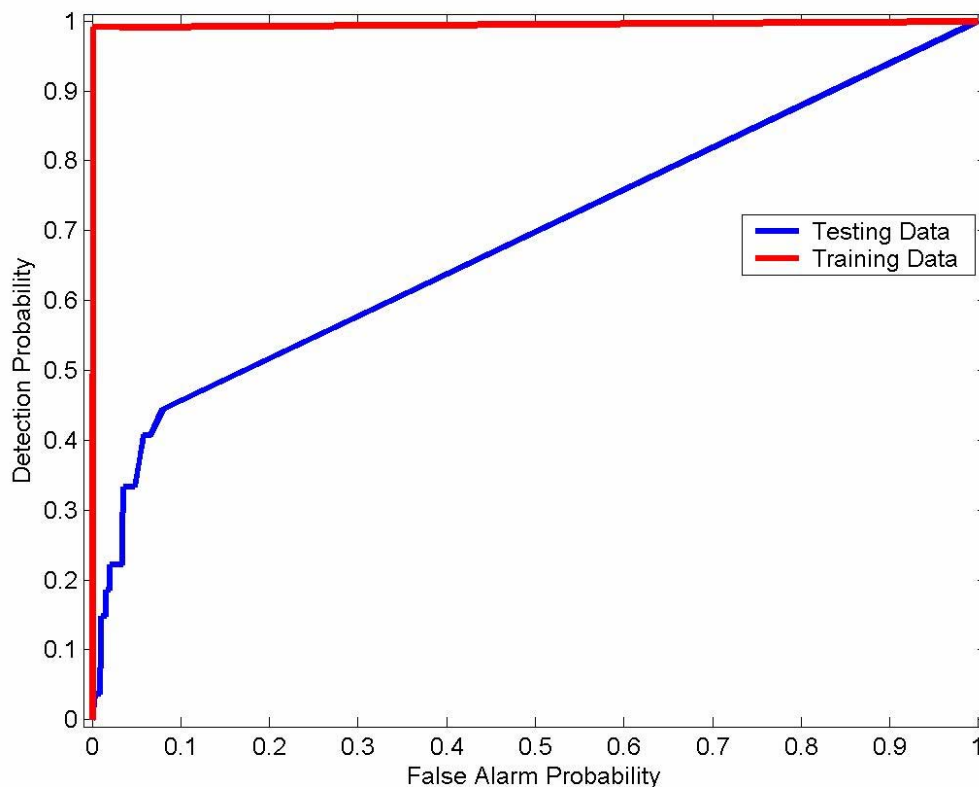
Εξετάζοντας τα σχήματα 3.17, 3.18 και 3.19, για μια σταθερή τιμή σωστής πρόβλεψης (detection probability) παρατηρείται μια σημαντική αύξηση του ποσοστού λανθασμένης



πρόβλεψης (false alarm probability). Συνεπώς, τα αποτελέσματα που προέκυψαν, σε δοκιμές εκπαίδευσης, με παρελθόν χρόνου μεγαλύτερο της μιας ημέρας δεν ήταν ικανοποιητικά. Μάλιστα, διαπιστώθηκε ότι όσο το παρελθόν των προηγούμενων ημερών αυξάνει τόσο και τα ποσοστά λανθασμένης πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη αυξάνονται.

### 3.4.2. Υπερεκπαίδευση Δικτύου

Στα δίκτυα με αριθμό νευρώνων στο κρυφό στρώμα μεγαλύτερο από πέντε και για παρελθόν μιας ημέρας παρατηρήθηκε μια βέλτιστη πρόβλεψη του ανέμου Βαρδάρη της επόμενης ημέρας στα δεδομένα εκπαίδευσης. Ωστόσο παρόμοια κατάσταση δε σημειώθηκε και στα δεδομένα ελέγχου. Στο σχήμα 3.20 απεικονίζονται γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από ένα δίκτυο με 7 νευρώνες στο κρυφό στρώμα.



**Σχήμα 3.20:** Γραφική απεικόνιση της υπερεκπαίδευσης δικτύου με 7 νευρώνες στο κρυφό στρώμα.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 3.20, στην κόκκινη γραμμή που προσεγγίζει τα δεδομένα εκπαίδευσης, η πιθανότητα της σωστής πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη είναι κοντά στο 100% με την αντίστοιχη της λανθασμένης πρόβλεψης να πλησιάζει στο 0%. Η μπλε γραμμή που προσεγγίζει τα δεδομένα ελέγχου και καθορίζει την αξιοπιστία του δικτύου, σημειώνει μέγιστη πιθανότητα σωστής πρόβλεψης ανέμου 45% με ποσοστό λανθασμένης 10%. Το φαινόμενο της άριστης προσέγγισης των δεδομένων εκπαίδευσης από το δίκτυο και της μη ικανοποιητικής των δεδομένων ελέγχου καλείται υπερεκπαίδευση δικτύου και συμβαίνει όταν χρησιμοποιείται για την προσέγγιση του συστήματος πιο σύνθετο δίκτυο από αυτό που απαιτείται.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## 4 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στο πρώτο στάδιο της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε στατιστική μελέτη του ανέμου Βαρδάρη για τις περιόδους 1961-1986 και 1996-2002. Με στόχο τον προσδιορισμό των συνοπτικών καταστάσεων που σχετίζονται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης έγινε η κατανομή των ημερών Βαρδάρη στους τύπους κυκλοφορίας (Maheras et al., 2000).

Από τη μελέτη προέκυψε ότι τρεις από τους είκοσι τύπους κυκλοφορίας, ο μικτός (Mt1), ο κυκλωνικός με το κέντρο του να βρίσκεται στα βορειοανατολικά της Ελληνικής περιοχής (Cne) και ο αντικυκλωνικός (A1) εμφανίζονται σε ποσοστό ίσο με το 60,2% των συνολικών ημερών Βαρδάρη. Το μέγιστο συχνοτήτων παρατηρείται στο μικτό συνοπτικό τύπο 1 (Mt1), με ποσοστό ίσο με το 26,8% των συνολικών ημερών Βαρδάρη. Ο τύπος κυκλοφορίας-Mt1 θεωρείται ως η κυριότερη συνοπτική

κατάσταση που σχετίζεται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Ακολουθεί ο κυκλωνικός (Cne) και ο αντικυκλωνικός (A1) με ποσοστά 21,2% και 12,2% αντίστοιχα.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η μοναδική αντικυκλωνική κατάσταση που συνδέεται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη είναι αυτή του τύπου κυκλοφορίας A1 καθώς οι υπόλοιποι πέντε αντικυκλωνικοί τύποι σημείωσαν σχεδόν μηδενικές συχνότητες ως προς τις ημέρες Βαρδάρη. Σχετικά με τους κυκλωνικούς τύπους, παρατηρείται ένα μέγιστο εμφάνισης ημερών Βαρδάρη στον τύπο κυκλοφορίας (Cne) ίσο με 21,2%, ακολουθεί ο C με ποσοστό 7,4% και τέλος ο Cse με ποσοστό 4,5%. Οι υπόλοιποι πέντε κυκλωνικοί τύποι παρουσιάζουν πολύ μικρά-έως μηδενικά ποσοστά.

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι στους δώδεκα από τους είκοσι τύπους κυκλοφορίας η συχνότητα εμφάνισης ημερών Βαρδάρη για κάθε τύπο είναι μικρότερη του 3%, κι επιπλέον στους τέσσερις από τους δώδεκα είναι ίση με μηδέν. Επίσης οι υπόλοιποι οκτώ τύποι κυκλοφορίας παρουσιάζουν ποσοστό εμφάνισης που ξεπερνά το 90% των συνολικών ημερών Βαρδάρη. Αυτό πιθανόν να επιβεβαιώνει ότι τα γενεσιουργά αίτια της επικράτησης ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι κυρίως συνοπτικά.

Από τη μελέτη προέκυψε επίσης ότι ο τύπος κυκλοφορίας με τη μέγιστη συχνότητα ημερών Βαρδάρη, ο Mt1, εμφανίζει τον υψηλότερο αριθμό ημερών Βαρδάρη το μήνα Ιούλιο. Πρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι κυρίως ο A1 τύπος της ψυχρής περιόδου (Οκτώβριος έως Μάιος) σχετίζεται με την επικράτηση ανέμου Βαρδάρη στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η ίδια περίπτωση παρατηρήθηκε και για τον κυκλωνικό τύπο C και μάλιστα σε πιο διακριτό βαθμό. Τους μήνες της ψυχρής περιόδου σημειώνεται το 95% των συνολικών ημερών Βαρδάρη του κυκλωνικού τύπου κυκλοφορίας C.

Από τη στατιστική μελέτη της εποχιακής κατανομής των ημερών Βαρδάρη προέκυψε ότι το χειμώνα και το καλοκαίρι παρατηρούνται τα υψηλότερα ποσοστά ημερών Βαρδάρη, 30,5% και 29,7% αντίστοιχα. Έπονται η άνοιξη και το φθινόπωρο με συχνότητα 19,9% και οι δύο εποχές. Όσον αφορά τη μηνιαία κατανομή, το μέγιστο συχνοτήτων ημερών Βαρδάρη σημειώνεται το μήνα Ιούλιο (13,3%) και ακολουθούν οι μήνες Ιανουάριος (12,9%), Μάρτιος (9,8%) και Ιούνιος (9,4%). Οι διαφορές οι οποίες παρατηρούνται στα ποσοστά των ημερών Βαρδάρη, οφείλονται

στις διαφορετικές συνοπτικές καταστάσεις που επικρατούν συχνότερα ανά εποχή και οι οποίες συνδέονται με την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη.

Από τη στατιστική επεξεργασία προέκυψε ότι τα επεισόδια Βαρδάρη με διάρκεια μιας ημέρας έχουν την υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης, ίση με 42,6%, και όσο η διάρκεια σε ημέρες των επεισοδίων αυξάνει, τόσο η συχνότητα αυτή σταδιακά μειώνεται. Τα επεισόδια με τις μεγαλύτερες ακολουθίες ημερών παρατηρούνται κυρίως το χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι είναι συχνό το φαινόμενο της παύσης ενός βραχέως επεισοδίου Βαρδάρη και στη συνέχεια μετά την παρέλευση δύο-τριών ημερών, της έναρξης ενός νέου επεισοδίου.

Υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα του ανέμου, η οποία είναι ίση με 17,7 km/h. Σ' ένα επόμενο στάδιο, υπολογίστηκαν οι μέσες ωριαίες ταχύτητές του, στο εικοσιτετράωρο και προέκυψε μια αύξηση της τάξεως του 16% στις ταχύτητες κατά το χρονικό διάστημα της ημέρας, μεταξύ 09.00 και 19.00.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε το φάσμα των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη. Το εύρος ταχυτήτων με την υψηλότερη συχνότητα, ίση με 22,1% βρέθηκε μεταξύ των τιμών 40 έως 50 km/h. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι κατά τους μήνες της ψυχρής περιόδου σημειώνονται σε υψηλότερο ποσοστό μέγιστες ταχύτητες, μεγαλύτερες της μέσης τιμής. Ακραίες τιμές μεγίστων ταχυτήτων (>75 km/h) «συναντώνται» μόλις στο 3,3% των συνολικών ημερών Βαρδάρη χωρίς να παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη μηνιαία κατανομή.

Σχετικά με τις ημέρες Βαρδάρη κατά τις περιόδους 1961-1986 και 1996-2002, βρέθηκε ότι το έτος 1970 σημειώθηκε ο μεγαλύτερος αριθμός των ημερών αυτών, ίσος με 76. Το ίδιο έτος η υψηλότερη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου που καταγράφηκε ήταν 92 km/h ενώ η μέση ετήσια μέγιστη ήταν 43 km/h. Η υψηλότερη ωριαία τιμή μέγιστης ταχύτητας ανέμου Βαρδάρη ίση με 95 km/h σημειώθηκε το έτος 1969. Κατά το ίδιο έτος η μέση τιμή των μεγίστων ταχυτήτων υπολογίστηκε 55,1 km/h. Στο διάστημα 1984-1986 παρατηρείται μια απότομη πτώση στις μέσες τιμές των μεγίστων ταχυτήτων του ανέμου Βαρδάρη, η οποία συνεχίζεται εντονότερη το διάστημα 1996-2002. Η πτωτική πορεία πιθανόν να οφείλεται στο φαινόμενο της αστικοποίησης, στην ανέγερση των υψηλών κτιρίων μέσα στο χώρο του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου όπου βρίσκεται και ο Μετεωρολογικός Σταθμός, σε αλλαγή της θέσης του οργάνου ή σε αλλαγή του ίδιου του οργάνου.

Εξετάστηκε σε εποχιακή κλίμακα η μεταβολή δυο βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων, της θερμοκρασίας αέρα και της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια

των ημερών Βαρδάρη. Παρατηρήθηκε πτώση τόσο στις τιμές της θερμοκρασίας αέρα όσο και στις τιμές της σχετικής υγρασίας, η οποία ήταν πιο έντονη την περίοδο του χειμώνα. Επιπλέον, βρέθηκε η μέση ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας ανά εποχή και υπολογίστηκε αντίστοιχα το μέσο ημερήσιο θερμομετρικό εύρος. Για όλες τις εποχές του έτους, παρατηρήθηκαν μικρές τιμές μέσου ημερήσιου θερμομετρικού εύρους τις ημέρες Βαρδάρη, με την ελάχιστη το χειμώνα και τη μέγιστη το καλοκαίρι.

Στα επεισόδια Βαρδάρη με διαφορετική ακολουθία ημερών εξετάστηκε η πορεία της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στη διάρκεια των επεισοδίων αυτών. Κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν επεισόδια Βαρδάρη που σημειώθηκαν το χειμώνα και το καλοκαίρι, εποχές με τις υψηλότερες συχνότητες επικράτησης του ανέμου. Στα επεισόδια που σημειώθηκαν την περίοδο του χειμώνα, παρατηρήθηκε έντονη πτώση στη θερμοκρασία αέρα, το μέγεθος της οποίας ποικίλλει ανάλογα με τη διάρκεια του επεισοδίου και της θερμοκρασίας των αέριων μαζών που εισβάλλουν στη ζώνη δράσης του ανέμου Βαρδάρη και δύναται να φτάσει τους 10 °C. Πρόσθετα, διαπιστώθηκε έντονη πτώση της σχετικής υγρασίας, κατά τη διάρκεια του πρώτου εικοσιτετραώρου, της τάξεως του 50% σε σχέση με την αρχική τιμή. Η πτώση που παρατηρείται στη θερμοκρασία, το καλοκαίρι είναι ασθενέστερη, της τάξης των 4 °C και πραγματοποιείται συνήθως το πρώτο εικοσιτετράωρο. Μειωμένη είναι και η πτώση που παρατηρείται στη σχετική υγρασία, της τάξης του 20%.

Σ' ένα μεγάλο μέρος της εργασίας, δοκιμάζεται μια νέα σύγχρονη αριθμητική μέθοδος αναγνώρισης προτύπων, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα με στόχο τη βραχυχρόνια πρόγνωση του ανέμου Βαρδάρη. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η ακρίβεια με την οποία ένα νευρωνικό δίκτυο που τροφοδοτείται με ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα προηγούμενων ημερών μπορεί να προβλέψει την εμφάνιση του ανέμου Βαρδάρη.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της έρευνας, είναι η διεύθυνση και η ένταση του ανέμου, η θερμοκρασία αέρα και η σχετική υγρασία για τα διαστήματα 1982-1986 και 1996-2002. Τα δεδομένα, αφού συμπιέστηκε ο όγκος τους χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες, χωρίστηκαν σε δυο μέρη. Το 80% επί του συνόλου χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των παραμέτρων του νευρωνικού δικτύου και το υπόλοιπο 20% για τον έλεγχο της ποιότητας της εκτίμησης ή της αξιοπιστίας του δικτύου. Η εκπαίδευση του δικτύου έγινε με τη μέθοδο Back-Propagation. Οι δομές που δοκιμάστηκαν είχαν

ένα κρυφό στρώμα, που περιείχε από 2 έως 20 νευρώνες. Το δίκτυο τροφοδοτήθηκε με ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα παρελθόντος για βάθος χρόνου, μιας, δύο, τριών και τεσσάρων ημερών. Κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκε πολλές φορές, με διαφορετικά κάθε φορά αρχικά συναπτικά βάρη, ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα να καταλήξει το δίκτυο στη βέλτιστη απόδοση.

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, προέκυψε ότι το δίκτυο με 5 νευρώνες στο κρυφό στρώμα και για δεδομένα εισόδου μιας ημέρας, της προηγούμενης, έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα στα δεδομένα ελέγχου. Το μέγιστο ποσοστό, με το οποίο το δίκτυο αυτό προβλέπει σωστά, ότι την επόμενη ημέρα θα επικρατήσει ο άνεμος Βαρδάρης, βρέθηκε ίσο με 82%. Το αντίστοιχο ποσοστό εσφαλμένης πρόβλεψης (το ποσοστό με το οποίο το δίκτυο προβλέπει λανθασμένα ότι την επόμενη ημέρα θα επικρατήσει Βαρδάρης) βρέθηκε ίσο με 20%. Αυτό σημαίνει ότι αν εισαχθούν στο δίκτυο τα ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα της σημερινής ημέρας, το δίκτυο θα προγνώσει σωστά, την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη, κατά την αυριανή ημέρα, με πιθανότητα 82%.

Στα δίκτυα με αριθμό νευρώνων μεγαλύτερο από πέντε, παρατηρήθηκε το φαινόμενο της υπερεκπαίδευσης. Σημειώθηκε μια άριστη προσέγγιση του δικτύου στα δεδομένα εκπαίδευσης, με πιθανότητα σωστής πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη να τείνει στο 100%. Ωστόσο, η προσέγγιση του δικτύου στα δεδομένα ελέγχου δεν ήταν ικανοποιητική. Το φαινόμενο της υπερεκπαίδευσης δικτύου συμβαίνει όταν ένα σύστημα προσεγγίζεται με πιο σύνθετο δίκτυο απ' ότι αυτό χρειάζεται.

Το βέλτιστο αποτέλεσμα εκπαίδευσης του δικτύου, με ποσοστό σωστής πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη, ίσο με 82%, δύναται να θεωρηθεί ικανοποιητικό για την παρούσα έρευνα λαμβάνοντας υπ' όψιν τα εξής: α) Ότι λόγω της ρευστότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, ο άμεσος προσδιορισμός της διεύθυνσης και της ταχύτητας κίνησης του, παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες. Επιπλέον, από τη φύση τους τα δεδομένα του ανέμου εμφανίζουν δυσχέρεια στην επεξεργασία τους. β) Ότι η χρονική περίοδος μελέτης δεν ήταν συνεχής. Αυτός ήταν ένας αναπόφευκτος ανασταλτικός παράγοντας καθώς για το χρονικό διάστημα 1987-1995, διαπιστώθηκε μη σωστή λειτουργία του ανεμογράφου, οπότε θεωρήθηκε σκόπιμο το διάστημα αυτό να παραλειφθεί από την έρευνα. Ωστόσο, σε μια εμπειριστατωμένη έρευνα θα πρέπει να επιζητούνται τα 'τέλεια' αποτελέσματα. Όταν αυτά δε δύναται να επιτευχθούν, θα πρέπει να αναφέρονται οι 'πιθανές ατέλειες της έρευνας' και να προτείνονται εναλλακτικές μέθοδοι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Αυτό θα αποτελέσει

σημαντικό βοήθημα για κάθε επιστήμονα που θα θελήσει στο μέλλον, να ασχοληθεί με το ίδιο ή παρόμοιο αντικείμενο της έρευνας αυτής.

Το ποσοστό σωστής πρόβλεψης του ανέμου Βαρδάρη πιθανόν να ήταν καλύτερο, αν χρησιμοποιούσαμε μετεωρολογικά δεδομένα και από άλλο σταθμό εκτός από αυτόν του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πνοή του ανέμου Βαρδάρη ξεκινά από την περιοχή των Σκοπίων και στη συνέχεια ενισχυμένη λόγω καναλισμού φθάνει στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Συνεπώς, ανάμεσα στην έναρξη πνοής του ανέμου στην περιοχή των Σκοπίων και στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, θα πρέπει να υπάρχει μια χρονική υστέρηση. Αν για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιούνταν μετεωρολογικά δεδομένα και από το σταθμό των Σκοπίων, λαμβάνοντας υπόψη στη δομή του δικτύου και τον παράγοντα της χρονικής υστέρησης, πιθανόν το δίκτυο να έδινε πιθανότητα σωστής πρόβλεψης ημερών Βαρδάρη υψηλότερη του 82%. Επιπλέον, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου στο δίκτυο, οι τιμές του κλάσματος ηλιοφάνειας, της εξάτμισης καθώς και της ορατότητας. Είναι γνωστό και από προηγούμενες εργασίες ότι κατά την επικράτηση του ανέμου Βαρδάρη σημειώνεται στην περιοχή της Θεσσαλονίκης: 1) αύξηση του κλάσματος της ηλιοφάνειας, 2) αύξηση της εξάτμισης του ύδατος και 3) υψηλή έως εξαιρετική ορατότητα.

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα αποτελούν σήμερα ένα ισχυρό εργαλείο μοντελοποίησης σύνθετων προβλημάτων πρόβλεψης με σημαντικές προόδους σε πολλούς κλάδους του επιστημονικού πεδίου. Ωστόσο, παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως είναι το υψηλό υπολογιστικό τους κόστος. Για την εκπαίδευση των δικτύων απαιτούνται επεξεργαστές με υψηλή συχνότητα, από την οποία εξαρτάται και ο χρόνος ολοκλήρωσης της εκπαίδευσής τους. Στην παρούσα έρευνα, ο αλγόριθμος εκπαίδευσης των δικτύων εκτελέστηκε σε επεξεργαστή συχνότητας 2,7 GHz, και διήρκεσε για το κάθε δίκτυο από οκτώ έως και είκοσι ώρες. Είναι προφανές ότι, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της εκπαίδευσης για όλα τα δίκτυα, απαιτείται υπολογιστής σύγχρονης τεχνολογίας καθώς και πολύς χρόνος, με τον υπολογιστή να βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία.



**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Angouridakis, Vl., Ch. Balafoutis et P. Maheras, 1981: 'Les vents de NW et Vardaris à Thessalonique. Essai statistique'. Eaux et Climats. Mélanges offerts en hommage à Ch. PEGUY. p.p.85-95, Grenoble.
- Ahmad, A. M., C. Chuan, F. Mohamad, 2002: 'Weather Prediction Using Artificial Networks'. CD-rom Proceedings of the International Conference on circuits/systems computers and communications, Phuket, Thailand.
- Αρσένη-Παπαδημητρίου, Α., 1984: 'Συμβολή στη Μελέτη του Προβλήματος των Ετησίων'. Διδακτορική Διατριβή. Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ149.
- Αρσένη-Παπαδημητρίου, Α., Χρ. Μπαλαφούτης και Π. Μαχαίρας, 1985: 'Επίδραση του Βαρδάρη στον καιρό της Θεσσαλονίκης'. Πρακτ. Συν., Περιβάλλον και Ποιότητα ζωής στη Θεσσαλονίκη, 355-358.
- Αρσένη-Παπαδημητρίου, Α., και Π. Μαχαίρας, 1985: 'Τα χαρακτηριστικά των ηλιοφεγγών ημερών στη Θεσσαλονίκη κατά την ψυχρή περίοδο'. Πρακτ. 2<sup>ου</sup> Εθν.Συν. Ήπιων Μορφών Ενέργειας, τομ. Α, 1-8.
- Arseni-Papadimitriou, A., P. Maheras et J. Papadimitriou, 1980: 'Les conditions géographiques, synoptiques et aérologiques propices à l'apparition du phénomène: visibilité exceptionnelle à Thessalonique'. XVI<sup>eme</sup> Congrès Inter. de Met. Alpine, pp. 125-129.
- Arseni-Papadimitriou, A. and P. Maheras, 1985: 'The influence of the wind Vardaris on the diurnal variation of the meteorological elements in the area of Thessaloniki', Proc. 12<sup>th</sup> Inter. Conf. of Carp. Met., 192-194.
- Arseni-Papadimitriou, A., P. Maheras, and B. Giles, 1988 : 'Contribution to the Study of the Strong North Winds on Aegean Sea, in the Warm Season'. Riv. Meteor. Aeron. V. XLIII, N. 3-4, 131-138.
- Arseni-Papadimitriou, A., P. Maheras, and Ph. Cuniac, 1998: 'The Urban Effect on the the Daily min Temperature in Thessaloniki'. Proc.of 3<sup>rd</sup> Congres: Urban Climate and Bioclimate, Lodz, Poland.
- Bishop, C. M., 1995: 'Neural Networks for Pattern Recognition'. Clarendon Press, Oxford.

- Diamantaras K. I. and Sun-Yuan Kung, 1996 : ‘Principal Component Neural Networks: Theory and Applications’, John Wiley.
- Escudero Lázaro, J. A., Lahoz Arnedo, D., 2003: ‘Physical-Mathematical Wind Prediction Model’. *Monografias del. Semin. Matem. Garcia de Galdeano.* 27 : 249-258.
- Hayashi, M., B. Kermanshahi, 2001: ‘Application of Artificial Neural Network for Wind Speed Prediction and Determination of wind Power Generation Output’. *International Conference on Engineering Education ICEE, Xian, 22-26 Jul.*
- Haykin S., 1998: ‘Neural Networks: A Comprehensive Foundation’ (2nd Ed.), Prentice Hall.
- Hertz, J., A. Krogh, and R. G. Palmer, 1991: ‘Introduction to the Theory of Neural Computation’. Addison-Wesley, 414 pp.
- Kalogirou, S., C. Neocleous, S. Pashiardis and Ch. Schizas, 1999: ‘Wind Speed Prediction Using Artificial Neural Networks’. *Proceedings of the European Symposium on Intelligent Techniques ESIT, Crete, Greece.*
- Kretschmar, R., P. Eckert, D. Cattani and F. Eggimann, 2004: ‘Neural Network Classifiers for Local Wind Prediction’. *Journal of Applied Meteorology: Vol. 43, No. 5, pp. 727–738.*
- Κυριαζόπουλος, Β.Δ., 1939.: ‘Το κλίμα της Ελληνικής Κεντρικής Μακεδονίας’. *Δημ.Εργ.Γεωργ.Φυσ. και Κλιματ., αρ. 14, 362.*
- Κυριαζόπουλος, Β. και Γ. Λειβαδάς, 1980: ‘Πρακτική Μετεωρολογία’. Εκδ. Α.Π.Θ.
- Livadas, G. C. and Ch. S. Sahsamanoglou, 1973: ‘Wind in Thessaloniki-Greece’. *Meteorologika, No 35, 411-443.*
- Μαχαίρας Π., 1982: ‘Συνοπτικές καταστάσεις και πολυδιάστατη ανάλυση του καιρού στη Θεσσαλονίκη’. *Μονογραφία, Δημοσίευση αριθμ. 15, Εργαστήριο Κλιματολογίας Πανεπιστημίου Αθηνών, σελ. 185.*
- Maheras, P.: ‘Le problème des Etésiens’, 1980. *Méditerranée, No 4, 57-65.*
- Maheras, P., A. Arseni-Papadimitriou et Ch. Balafoutis, 1982: ‘Effets de canalisation des masses d’air le long de la vallée du Vardar sur le temps de Thessalonique’. *An. de Meteor. Nr. 119, pp. 169-171.*
- Maheras, P., A. Flocas et Th. Karakostas, 1984: ‘La structure de la basse troposphère pendant le vent Vardaris, à Thessalonique’, *Zbornik 10, pp. 241-243.*

- Maheras, P., I. Patrikas, Th. Karakostas, and Chr. Anagnostopoulou, 2000: 'Automatic classification of circulation types in Greece: methodology, description, frequency, variability and trend analysis', *Theor. Appl. Climatol.* 67, 205-223.
- Marzban, C. and G. Stumpf, 1998: 'A Neural Network for Damaging Wind Prediction'. *Weather and Forecasting*, vol. 13, p.151-163.
- Mihalakakou, G., H. Floca, M. Santamouris, and C. Helmis, 2002: 'Application of Neural Networks to the Simulation of the Heat Island over Athens, Greece, Using Synoptic Types as a Predictor'. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 41, No. 5, pp. 519–527.
- Μιχαηλίδης, Σ., Χ. Σχίζας, Φ. Λιασίδου, Κ. Νεοκλέους, 2000: 'Καθορισμός Συνοπτικών Προτύπων στον Ευρωπαϊκό χώρο με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα'. 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μετεωρολογίας- Κλιματολογίας- Φυσικής της Ατμόσφαιρας, σελ 603.
- Παπαδημητρίου Γ., 1994: 'Μέθοδοι Ανάλυσης Δεδομένων'. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Μακεδονίας.
- Pérez-Liera, C., M.C. Fernández-Baizan, J.L. Feito and V. González del Valle, 2002: 'Local Short-Term Prediction of Wind Speed: A Neural Network Analysis'. Congress of Integrated Assessment and Decision Support, IEMSs 2002, Lugano, Switzerland, 24-27 June 2002, 124-129.
- Pinson, P., T., Ranchin and G. Kariniotakis, 2004: 'Short-term Wind Power Prediction for Offshore Wind Farms-Evaluation of Fuzzy-Neural Network Based Models'. CD-rom Proceedings of the Global Wind Power Conf., Chicago, 28-31 March.
- Ripley, B. D., 1996: 'Pattern Recognition and Neural Networks'. Cambridge: University Press.
- Safa, B., A. Khalili, M. Teshnehab, A. Liaghat, 2004: 'Artificial Neural Networks Application to Predict Wheat Yield Using Climatic Data'. 20<sup>th</sup> International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology, 10-15 Jan. P1.39.
- Wiberg, B., Kjellberg, J., 2001: 'Artificial Neural Networks in Weather Prediction'.

**ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

- 1) <http://aetos.it.teithe.gr>
- 2) <http://bwiberg.dyndns.org/>
- 3) <http://dsslab.cs.unipi.gr/>
- 4) <http://meteogiornale.it/>
- 5) <http://platon.teipir.gr>
- 6) <http://prlab.ceid.upatras.gr/>
- 7) <http://setimes.com>
- 8) <http://www.atlas.idx.gr>
- 9) <http://www.northeastern.edu/>
- 10) <http://www.physics.utua.gr/>
- 11) <http://www.teiser.gr>
- 12) <http://www.uom.gr/>