



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ  
ΜΕ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ:  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ  
ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

*Ινώ Δ. Παπαγεωργάκη*

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2012**

**Επιβλέπων: Ι. Ναλμπάντης, Επίκ. Καθηγητής**



## *Κεριά*

*Του μέλλοντος οι μέρες στέκοντ' εμπροστά μας  
σα μιά σειρά κεράκια αναμένα -  
χρυσά, ζεστά, και ζωηρά κεράκια.*

*Οι περασμένες μέρες πίσω μένουν,  
μια θλιβερή γραμμή κεριών σβησμένων·  
τα πιο κοντά βγάζουν καπνόν ακόμη,  
κρύα κεριά, λιωμένα, και κυρτά.*

*Δεν θέλω να τα βλέπω· με λυπεί η μορφή των,  
και με λυπεί το πρώτο φως των να θυμούμαι.  
Εμπρός κυττάζω τ' αναμένα μου κεριά.*

*Δεν θέλω να γυρίσω να μη δω και φρίζω  
τι γρήγορα που η σκοτεινή γραμμή μακραίνει,  
τι γρήγορα που τα σβυστά κεριά πληθαίνουν.*

Κωνσταντίνος Π. Καβάφης





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>vi</b>
<b>Ευρετήριο Εικόνων</b>	<b>viii</b>
<b>Ευρετήριο Πινάκων</b>	<b>x</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>xii</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>xiv</b>
<b>Κατάλογος συμβόλων - συντομεύσεων</b>	<b>xx</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος .....	1
1.2 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας .....	2
1.3 Πρωτότυπα σημεία .....	3
<b>2 Ταξινόμηση γήινων επιφανειών</b>	<b>5</b>
2.1 Γενικά .....	5
2.1.1 Απορροή .....	7
2.1.2 Κλίση Εδάφους .....	9
2.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση Υδρολογικής Ταξινόμησης .....	10
2.3 Μεθοδολογία ταξινόμησης .....	16
2.3.1 Ασαφής Λογική .....	18
2.3.2 Κριτήρια .....	20
2.3.3 HAND, ένα υδρολογικό κριτήριο ταξινόμησης .....	21
2.3.4 Κλάσεις .....	22
2.4 Παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται ο δείκτης HAND .....	23
2.4.1 Υδατόρευμα .....	23
2.4.2 Εξομάλυνση ΨΜΕ .....	24
<b>3 Περιοχές Μελέτης</b>	<b>27</b>
3.1 Γενικά .....	27
3.2 Κριτήρια επιλογής .....	27
3.3 Δεδομένα .....	28
3.3.1 Φωτογραμμετρικά Δεδομένα .....	28
3.3.2 Δεδομένα Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους .....	30
3.3.3 Μέτρηση δείγματος σημείων με GPS .....	33

3.4	Γενικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά λεκανών.....	34
3.4.1	Λεκάνη π. Ερασίνου.....	34
3.4.2	Λεκάνη π. Σαρανταπόταμου .....	37
<b>4</b>	<b>Μεθοδολογία ταξινόμησης που εφαρμόστηκε</b>	<b>41</b>
4.1	Γενικά.....	41
4.2	Υπολογισμός υδρολογικών κριτηρίων .....	41
4.3	Ασαφής Ταξινόμηση .....	43
4.4	Νευρωνικά Δίκτυα.....	44
4.5	Κλάσεις Ταξινόμησης.....	46
4.6	Εύρος κλάσεων .....	47
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>49</b>
5.1	Εφαρμογή στη λεκάνη του π. Ερασίνου.....	49
5.1.1	Προετοιμασία.....	49
5.1.2	Αποτελέσματα Ταξινόμησης.....	54
5.2	Εφαρμογή στη λεκάνη του ποταμού Σαρανταπόταμου.....	65
5.2.1	Προετοιμασία.....	65
5.2.2	Αποτελέσματα Ταξινόμησης.....	71
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>81</b>
	<b>Αναφορές</b>	<b>85</b>
	Στην ελληνική γλώσσα .....	85
	Ξενόγλωσσες .....	85
	<b>Παράρτημα</b>	<b>89</b>

## Ευχαριστίες

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Ναλμπάντη για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, ερευνητικού χαρακτήρα, την καθοδήγηση και την άμεση, διαρκή και ουσιαστική συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια των δύο τελευταίων ετών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ πολύ τον αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη για τις συνεχείς, εύστοχες υποδείξεις, παρατηρήσεις και ιδέες του καθώς και για την πολύωρη παρουσία του στο εργαστήριο, η οποία υπήρξε πολύτιμη.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον αδερφό μου Χρήστο Παπαγεωργάκη για τις τεχνικές γνώσεις, τον χρόνο που μου αφιέρωσε, την άριστη συνεργασία, και την αμέριστη συμπαράσταση. Ευχαριστώ πολύ γιατί χωρίς εσένα σίγουρα δεν θα «έτρεχε» τίποτα...

Τέλος όλους τους συμφοιτητές και φίλους για τις εποικοδομητικές συζητήσεις και την ανιδιοτελή υποστήριξη.

Αθήνα Οκτώβριος 2012,

Ινώ Παπαγεωργάκη



## Ευρετήριο Εικόνων

---

Figure 1-1: Results of FCM algorithm.	xvi
Εικόνα 2-1: Η διαδικασία της ταξινόμησης (Coleman. 2008).	5
Εικόνα 2-2: Ο Υδρολογικός κύκλος (πηγή: <a href="http://www.lifewateragenda.org/html/cycle-gr.html">http://www.lifewateragenda.org/html/cycle-gr.html</a> )	7
Εικόνα 2-3: Παρουσίαση των διαφορετικών προελεύσεων της επιφανειακής απορροής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).	8
Εικόνα 2-4: Επίγεια ροή Horton – Υπόθεση Horton (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).	9
Εικόνα 2-5 Η θεμελιώδης υδρολογική μονάδα (Landscape unit) (Winter, 2001).	11
Εικόνα 2-6. Χαρακτηριστικά ορεινού εδάφους (Winter, 2001).	12
Εικόνα 2-7. Χαρακτηριστικά λεκανών σε υψίπεδα (Winter, 2001).	12
Εικόνα 2-8. Χαρακτηριστικά λεκανών με μεγάλο μέσο υψόμετρο (Winter, 2001).	13
Εικόνα 2-9. Χαρακτηριστικά παραποτάμιων κοιλάδων (Winter, 2001).	13
Εικόνα 2-10. Χαρακτηριστικά παράκτιων περιοχών (Winter, 2001).	14
Εικόνα 2-11. Χαρακτηριστικά περιοχών με παγετώνες ή ερήμους (Winter, 2001).	14
Εικόνα 2-12: Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μοντέλων ταξινόμησης τμήματος περιοχής παραπόταμου του π. Wark (Gharari et al., 2011).	16
Εικόνα 2-13: Υπολογισμός "υδρολογικής" απόστασης (Renno et al., 2008).	20
Εικόνα 2-14: Μέθοδος υπολογισμού HAND (Renno et al., 2008).	22
Εικόνα 2-15: Παραγόμενο υδρογραφικό δίκτυο, εξαρτώμενο από την τιμή του κατωφλίου (Renno et al., 2008).	24
Εικόνα 3-1 Διαφορά μεταξύ του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου και του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.	28
Εικόνα 3-2: Κατανομή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους υπό μορφή κανονικοποιημένου κανάβου.	29
Εικόνα 3-3: Απόσπασμα ΨΜΕ (αριστερά) και κανάβου κλίσεων (δεξιά), δεδομένα από Κτηματολόγιο Α.Ε.	31
Εικόνα 3-4: Απόσπασμα ΨΜΕ (αριστερά) και κανάβου κλίσεων (δεξιά), δεδομένα από ΟΚΧΕ.	32
Εικόνα 3-5: Βάθρο ΓΥΣ, δέκτης Base.	33
Εικόνα 3-6: Οι βάσεις των σημείων πεδίου.	34
Εικόνα 3-7: Σχετική θέση λεκάνης π. Ερασίνου στον Ελλαδικό χώρο.	35
Εικόνα 3-8: Σχετική Θέση λεκάνης π. Ερασίνου στο ν. Αττικής.	36
Εικόνα 3-9. Σχετική θέση λεκάνης π. Σαρανταπόταμου στον ελλαδικό χώρο.	38
Εικόνα 3-10. Σχετική θέση λεκάνης π. Σαρανταπόταμου στο ν. Αττικής.	38
Εικόνα 3-11. Ευρύτερη περιοχή Θριάσιου Πεδίου (Κουτσογιάννης και Μαμάσης, 2001).	39
Εικόνα 4-1: Βασικό μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου.	45
Εικόνα 5-1: Περιοχή ορυχείου.	50
Εικόνα 5-2: Κανάβος Διεύθυνσης Απορροής, λεκάνης π. Ερασίνου.	50
Εικόνα 5-3: Κανάβος Συγκεντρωτικής απορροής λεκάνης π. Ερασίνου.	51
Εικόνα 5-4: Ομαλοποιημένο ΨΜΕ λεκάνης π. Ερασίνου.	53
Εικόνα 5-5: Υπολογισμός κλίσεων από το ΨΜΕ (πηγή: ESRI, 2010).	54
Εικόνα 5-6: Τα κεντροειδή σημεία των πέντε κλάσεων για δύο κριτήρια.	55
Εικόνα 5-7: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με δύο κριτήρια.	56
Εικόνα 5-8 Η διάταξη των κεντροειδών σημείων ως προς τους άξονες των τριών κριτηρίων της ασαφούς ταξινόμησης.	58

Εικόνα 5-9: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με τρία κριτήρια.	58
Εικόνα 5-10: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.	60
Εικόνα 5-11: Λεπτομέρεια διεύρυνσης των παρόχθιων περιοχών (υπολεκάνη Αγ. Γεωργίου, λεκάνη π. Ερασίνου).	61
Εικόνα 5-12: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.	62
Εικόνα 5-13: Κατανομή σημείων ελέγχου στην λεκάνη π. Ερασίνου.	63
Εικόνα 5-14: Γραφική αναπαράσταση της επιτυχίας κάθε ταξινόμησης ανά κλάση, αποτελέσματα λεκάνης Ερασίνου.	64
Εικόνα 5-15: Κατανομή σημείων μετρημένων με GPS, εξ αρχής οριστικά ταξινομημένων σε δύο κλάσεις.	64
Εικόνα 5-16: ΨΜΕ[2] της λεκάνης π. Σαρανταπόταμου.	66
Εικόνα 5-17: Περιοχές μηδενικού υψομέτρου. λεκάνης π. Σαρανταπόταμου	67
Εικόνα 5-18: Λεπτομέρεια διόρθωσης ΨΜΕ με την εντολή Fill (λεκάνη π. Σαρανταπόταμου).	68
Εικόνα 5-19: Κάναβος Διεύθυνσης Απορροής, λεκάνης στη Δυτική Αττική.	69
Εικόνα 5-20: Κάναβος Συγκεντρωτικής Απορροής, λεκάνης στη Δυτική Αττική.	69
Εικόνα 5-21: Κάναβος Κλίσεων.	71
Εικόνα 5-22: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με δύο κριτήρια.	72
Εικόνα 5-23: Τα κεντροειδή σημεία των κλάσεων για δύο κριτήρια.	73
Εικόνα 5-24: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με τρία κριτήρια.	74
Εικόνα 5-25: Τα κεντροειδή σημεία των κλάσεων για τρία κριτήρια.	75
Εικόνα 5-26: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.	77
Εικόνα 5-27: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.	79
Εικόνα 5-28: Κατανομή του δείγματος σημείων στη λεκάνη μελέτης του π. Σαρανταπόταμου.	79
Εικόνα 5-29: Γραφική αναπαράσταση της επιτυχίας κάθε ταξινόμησης ανά κλάση, αποτελέσματα δυτικής λεκάνης (π. Σαρανταπόταμου).	80
Εικόνα Π-1: Απόδοση Αναγλύφου λεκάνης π. Ερασίνου.	90

## Ευρετήριο Πινάκων

---

Πίνακας 3-1: Βασικά χαρακτηριστικά του ψηφιακού μοντέλου (Κτηματολόγιο Α.Ε.).	30
Πίνακας 5-1: Στατιστικά στοιχεία κανάβου Διεύθυνσης Απορροής.	51
Πίνακας 5-2: Στατιστικά στοιχεία ομαλοποιημένου κανάβου Διεύθυνσης Απορροής.	51
Πίνακας 5-3: Ποσοστά κάλυψης, μέσω ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των δύο κριτηρίων.	54
Πίνακας 5-4: Ποσοστά κάλυψης, μέσω ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των τριών κριτηρίων.	54
Πίνακας 5-5: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων ως προς τους άξονες των δύο κριτηρίων της ασαφούς ταξινόμησης.	55
Πίνακας 5-6: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.	56
Πίνακας 5-7: Το εύρος τιμών κλίσεων για κάθε κλάση.	56
Πίνακας 5-8: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων ως προς τους άξονες των τριών κριτηρίων της ασαφούς ταξινόμησης.	57
Πίνακας 5-9: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.	59
Πίνακας 5-10: Το εύρος τιμών των κλίσεων για κάθε κλάση.	59
Πίνακας 5-11: Το εύρος τιμών των αποστάσεων για κάθε κλάση.	59
Πίνακας 5-12: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.	59
Πίνακας 5-13: Καθοριστική τιμή του δείκτη HAND για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.	61
Πίνακας 5-14: Καθοριστική τιμή της κλίσης του εδάφους για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.	61
Πίνακας 5-15: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα, χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.	62
Πίνακας 5-16: Ποσοστά επιτυχίας ταξινομήσεων ανά κλάση, για την λεκάνη Ερασίνου.	63
Πίνακας 5-17: Ποσοστά επιτυχίας των τεσσάρων ταξινομήσεων σε σχέση με τα μετρημένα σημεία με GPS.	65
Πίνακας 5-18: Στατιστικά στοιχεία κανάβου Διεύθυνσης Απορροής, Δυτικής λεκάνης απορροής.	70
Πίνακας 5-19: Στατιστικά στοιχεία ομαλοποιημένου κανάβου Διεύθυνσης Απορροής, Δυτικής λεκάνης απορροής.	70
Πίνακας 5-20: Αποτελέσματα Ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των δύο κριτηρίων.	72
Πίνακας 5-21: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων, ως προς του άξονες των δύο κριτηρίων.	72
Πίνακας 5-22: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.	73
Πίνακας 5-23: Το εύρος τιμών κλίσεων για κάθε κλάση.	73
Πίνακας 5-24: Αποτελέσματα Ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των τριών κριτηρίων.	74
Πίνακας 5-25: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων, ως προς του άξονες των τριών κριτηρίων.	74
Πίνακας 5-26: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.	75
Πίνακας 5-27: Το εύρος τιμών των κλίσεων για κάθε κλάση.	75
Πίνακας 5-28: Το εύρος τιμών των αποστάσεων για κάθε κλάση.	75
Πίνακας 5-29: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.	76
Πίνακας 5-30: Καθοριστική τιμή του δείκτη HAND για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.	77

Πίνακας 5-31: Καθοριστική τιμή της κλίσης του εδάφους για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.....	77
Πίνακας 5-32: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα, χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.....	78
Πίνακας 5-33: Ποσοστά επιτυχίας ταξινομήσεων ανά κλάση, για την λεκάνη Σαρανταπόταμου. ....	80



## Περίληψη

---

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η βέλτιστη ταξινόμηση των γήινων επιφανειών δύο λεκανών απορροής με τη χρήση υδρολογικών κριτηρίων. Τα κριτήρια της διαδικασίας ταξινόμησης είναι υδρολογικού χαρακτήρα και υπολογίζονται από υψομετρικά δεδομένα από Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ). Στο πλαίσιο αυτό επιλέγονται τρία κριτήρια: ο δείκτης HAND (Height Above the Nearest Drainage), η κλίση του εδάφους και η «υδρολογική» απόσταση κάθε γήινης επιφάνειας από το πλησιέστερο κλάδο υδρογραφικού δικτύου. Εφαρμόζονται δύο ταξινομήσεις με βάση συνδυασμούς των κριτηρίων: η πρώτη με βάση το δείκτη HAND και την κλίση του εδάφους και η δεύτερη με το σύνολο των κριτηρίων. Χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι ταξινόμησης: η πρώτη με ασαφή λογική και η δεύτερη με βάση τα νευρωνικά δίκτυα. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για όλους τους συνδυασμούς και αυτά συγκρίνονται για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η κατάταξη του συνόλου της έκτασης των λεκανών απορροής σε κλάσεις και ο προσδιορισμός του εύρους των τιμών κάθε κριτηρίου ανάλογα με την κλάση. Για το σκοπό αυτό, ορίζονται πέντε κλάσεις και εξετάζεται η επιτυχία του αποτελέσματος κάθε ταξινόμησης.

Αναλυτικότερα, η περιοχή μελέτη αποτελείται από δύο υδρολογικές λεκάνες του νομού Αττικής, τη λεκάνη του ποταμού Ερασίνου στην Ανατολική Αττική και τη λεκάνη του ποταμού Σαρανταπόταμου, στη Δυτική Αττική. Τα δεδομένα για τη μελέτη των λεκανών, είναι από ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης και δείγμα σημείων από ορθοφωτομωσαϊκό χαρακτηρισμένων και καταχωρημένων στις πέντε κλάσεις.

Ο δείκτης HAND υπολογίζεται ως η υψομετρική διαφορά που έχει κάθε στοιχείο της λεκάνης με το κοντινότερο σε αυτό στοιχείο που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο, ακολουθώντας τη διεύθυνση ροής των υδάτων. Όμοια γίνεται και ο υπολογισμός της απόστασης, από το κοντινότερο κελί που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο, ακολουθώντας τη διεύθυνση απορροής.

Αρχικά, επιχειρείται η βέλτιστη ταξινόμηση με τη μέθοδο της ασαφούς λογικής, Fuzzy c-means (FCM) λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο συνδυασμούς ως προς τα κριτήρια (δύο κριτηρίων και τριών κριτηρίων), που αναφέρθηκαν προηγουμένα. Στη συνέχεια, εξετάζεται η εφαρμογή των τεχνητών Νευρωνικών δικτύων για τους δύο αντίστοιχους συνδυασμούς κριτηρίων αντίστοιχα. Στη δεύτερη μέθοδο, το δείγμα των χαρακτηρισμένων σημείων που εξ αρχής κατατάχθηκε στις κλάσεις, αποτελεί τα δεδομένα εκπαίδευσης του συστήματος του Νευρωνικού Δικτύου

Ακολούθως, επιτακτικής ανάγκης θέμα είναι ο ορισμός των κλάσεων στις οποίες ταξινομήθηκαν οι υδρολογικές λεκάνες. Στόχος του ορισμού των κλάσεων είναι αφενός η σαφής απόδοση της κατάστασης που επικρατεί στην πραγματικότητα σε κλίμακα λεκάνης απορροής και αφετέρου η μετέπειτα ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων (αριθμητικά και ποιοτικά), ως προς τα χαρακτηριστικά (δείκτης HAND, κλίση, «υδρολογική» απόσταση) της κάθε κλάσης.

Οι κλάσεις είναι πέντε και χαρακτηρίζουν τις περιοχές που αντιστοιχούν στην πραγματικότητα στις παρόχθιες εκτάσεις, πεδινές εκτάσεις, πλαγιές ήπιας κλίσης, πλαγιές

απότομης κλίσης και οροπέδια. Τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης, αποτελούν τα όρια και τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε κριτηρίου για τον χαρακτηρισμό μιας γήινης επιφάνειας στην αντίστοιχη κλάση.

Ως προς την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, η βέλτιστη ταξινόμηση υλοποιείται με χρήση του συνδυασμού δύο κριτηρίων και εφαρμογή της μεθοδολογίας των νευρωνικών δικτύων. Η κατάταξη με βάση αυτή την ταξινόμηση αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πραγματικότητα. Αντίθετα, η ελευθερία ως προς τη διαδικασία της ταξινόμησης, των κριτηρίων που προσφέρει η ασαφής ταξινόμηση, δεν βοήθησε προς την κατεύθυνση της επίτευξη της βέλτιστης ταξινόμησης καθόσον οι αντίστοιχες κλάσεις παρουσιάζουν δυσκολία ως προς την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

# Extended Abstract

---

## Introduction

The development of hydrological landscape units constitutes an interesting framework for scientists in the last decade. The concept of hydrological landscape units is based on the idea that the whole hydrological system interacts with a single and simple physiographic feature, as well as that this feature represents the basic building block of all hydrological landscape types. The drainage basin is the fundamental hydrologic unit for studying the flow of rivers, surface runoff, ground water flow, precipitation and, finally, predominant runoff regimes.

Digital Terrain Models (DTMs) allow us to make calculations in order to describe, understand and predict water storage and movement on Earth. To study hydrological landscape units the DTMs should be represented as grids. The quantitative analysis of DTMs has led to the development of a number of hydrologically relevant numerical descriptors of landscapes. Every landscape unit contains a plethora of these descriptors, and fields such as elevation, surface slope, flow direction, flow accumulation and qualitative characteristics.

A number of previous studies investigate relationships between topography and hydrological behavior in order to identify hydrologically different functional landscape units and better characterize the model structure, model parameter sets as well as metrics of catchment similarity.

Based on this concept, this thesis presents a landscape classification based on hydrological criteria. Topography, land use and geology have also been used to directly infer classes according to predominant runoff processes. Regarding to the classification of the above hydrological units, three major criteria are taken into account: HAND (Height Above the Nearest Drainage), surface slope and «hydrological» distance.

HAND is a new terrain model than normalizes DTMs according to distributed vertical distances relative to the drainage channels. HAND can be easily calculated from the DTM for each cell of the catchment, as the vertical difference from the nearest cell characterized as drainage network, following the flow direction path. Very similar to the determination of HAND, is the calculation of the «hydrological» distance.

## Study catchments

The main objective of the present thesis is the optimum classification of the hydrological landscape units of two study catchments located in Attica, Greece.

During the DTM processing of each catchment, the morphological characteristics are calculated and displayed.

The first study area is the Erasinos Catchment located in eastern Attica. The drainage basin covers nearly 202 km<sup>2</sup>, the elevation ranges from 0 to more than 1017 m, with an average of 150 m. The slope varies from 0 to 86.9°, with an average of 8.4°. The predominant land uses are urban and cultivated areas; so, the catchment is composed of flat areas with low elevation. In spite of the flat areas, a variety of landscape units can be shown from lowlands to uplands. A 10 m cell size DTM was used to calculate the HAND index. Ground truth data were collected, in order to check the validity of the classification results. A number of 98 points

were measured by using a Global Positioning System (GPS). Additionally, a total number of 6500 points were collected from an orthomosaic, which was produced through photogrammetric procedures. The point sample is used as the training sample and test sample in the artificial network analysis. Also, this sample provides check points for fuzzy classification. An orthomosaic is an image composed of many single orthophotos. An orthophoto is an aerial photograph geometrically corrected ("orthorectified") so that the scale is uniform: the photo has the same lack of distortion as a conventional map. It is thus ideally suited as a background image for overlaying other information of interest, e.g. GIS vector data.

The second catchment is the Sarantapotamos Catchment located in western Attica. The drainage basin has an area of 328.5 km<sup>2</sup>, while its ground elevation varies from 0 to 1314 m, with an average of 415 m. The slope varies from 0 to 88.7 °. The predominant land uses are urban and cultivated areas; so the catchment is composed of flat areas with low elevation. In spite of the presence of hilly areas, a variety of landscape units can be shown from lowlands to uplands. A 5 m cell size DTM was used. A total number of 7000 points were measured from the orthomosaic.

### **Classes of hydrological landscape units**

A typical but mandatory step for precisely defining the predominant regime is producing a finite number of classes as indicators for the characterizations of the study catchments. After studying the terrain morphology, it is noted that Greek catchments contain very mountainous areas, agricultural areas, hills, and steep slopes/ All these types of terrain are considered as the predominantly representative landscapes in Greece.

Five landscape classes are distinguished which are described next.

In the first category the studied regions are classified as riparian areas (riparian) and represent areas that are very close to the river network and have gentle slopes. The slopes are not related to the banks of rivers, but rather to flat areas designated as wetlands or delta of rivers. The indicator HAND, in these fields is too small as the altitude of the river almost coincides with the altitude of the above regions.

The regions defined by the second category can be considered as the extensions of the regions described in the first category, where the terrain can be considered smooth. These areas can hereafter be termed as "lowlands". Even though these regions are theoretically flat areas, their average slope value is slightly higher than that of the first category.

Within Greek territory, the regions which surround mountains cover a very large area, due to the intensely mountainous terrain. As is natural, these areas form a separation barrier between the lowland regions and the mountainous regions. These areas are thus classified in the third category and labeled "gentle slope" regions. As would be expected, the HAND indicator is higher in this case than in the previous two categories. This is caused by the fact that a slope augmentation brings about an increase in the altitude of these regions, relative to the altitude of the hydrographical network, from which the indicator is calculated.

The high slope regions are classified in the fourth category. These regions are the commonly identifiable element of the plethora of predominant mountainous areas in Greek territory. Their higher terrain slope creates conditions that are favorable to runoff formation. The flow which occurs in this category is responsible for the highest percentage of floods in Greece.

The fifth and last category represents plateaus and is titled accordingly. The appearance of plateaus is not common within Greek hydrological basins.

### Fuzzy C-Means Classification

One of the most widely used fuzzy clustering algorithms is the Fuzzy C-Means (FCM) algorithm (Bezdek, 1981). The FCM algorithm attempts to classify a finite collection of  $n$  elements  $X = \{x_1, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R}^p$ , into a collection of  $c$  fuzzy clusters with respect to some

given criterion. Given a finite set of data, the algorithm returns a list of  $c$  cluster centers  $c \in \{2, \dots, n - 1\}$  and a partition matrix  $U$ , where each element  $u_{ij}$  indicates the degree of

membership, which means that element  $x_i$  belongs to cluster  $c_j$ . Like the k-means algorithm, the FCM aims to minimize an objective function of the form

$$J_{FCM}(M, C) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m ||X_k - v_i||^2 \quad (2.1)$$

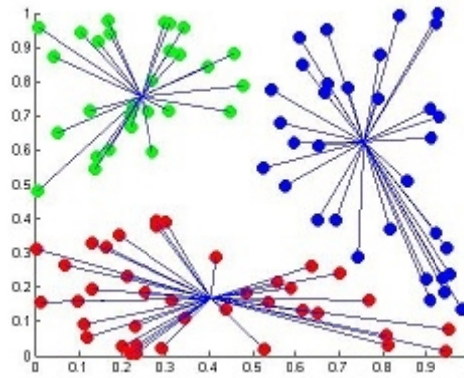


Figure 1-1: Results of FCM algorithm.

### Artificial Neural Network Classification

An Artificial Neural Network (ANN) is an adaptive mathematical model or a computational structure that is designed to simulate a system of biological neurons to transfer information from its input to output in a desired way. ANN Classification is the process where the ANN learns how to separate samples into different classes by finding common features between samples of known classes. Because of clustering unknown samples, the point sample is often used as a means of testing the ANN classifier.

It is widely used for hydrological landscape classification, as it easily recognizes landscape patterns.

### Conclusions

With regard to data used for hydrological landscape classification the following general conclusions can be drawn:

1. The HAND indicator was applied to two selected Greek catchments, in order to find a reliable correlation between predominant conditions of water flow and terrain characteristics. The necessary condition is that the density of the hydrographic network is maintained, corresponding to real conditions in wet or dry periods.

2. The fact that the DTM grid was initially used as an input data for the calculation of the HAND indicator, does not permit an accurate determination of the classification. The results proved to be more adequate, after normalizing the DTM grid and iterating the calculation of the HAND indicator regarding the closest areas. As a result an improved classification was obtained. The normalized grid has a maximum altitude diminished by 10 m and the number of cells which contribute to the flow at the exit point of the catchment is slightly smaller.
3. Accurate in situ measurements need to be used for the validation of the input data so that the results of the classification be reliable. A coarse DTM grid can easily lead to limited information in terms of the exact values of slope in riparian areas. The selection of adequate data is highly related to the results, nevertheless taking into account the cost effectiveness factor. Creating DTM grid on the basis of maps is the usual method, although it is proved to be less accurate, owing to the errors in contours, the inadequate distribution of points and the errors in digitization. .
4. Contrary to the usual method, the use of in-situ surveying methods (with the aid of a total station or GPS) are highly accurate but the number of observation points is restricted. Photogrammetric procedures, whether semi-automatic or fully automatic, produce DTMs of accuracy that is analogous to that of the input data. Thewse overcome problems of previous methods that are mentioned earlier.
5. Of course, other methods to produce DTM could be use such as LiDAR and SAR especially when high resolution is sought. .
6. Geographical Information Systems can manage data from different sources and their main advantage seems to be the study of complicated relations between the data, displaying them though in an understandable way.

With regard to the studied watersheds the following conclusions can be drawn:

1. As evidenced by the success rates, the optimal classification of the eastern study basin was obtained through the use of neural networks by combining two criteria, HAND indicator and slope. This adjustment has an average success rate of 65.8% containing all classes.
2. Based on the success rates, the optimal classification of the western study basin achieved also through using neural networks and a combination of two criteria, HAND indicator and slope. This adjustment has a success average up to 54% containing all classes.
3. Concerning fuzzy classification, although this has not shown high success rate, it is certain that it allowed to classify data without constraining factors. Moreover, even if the display seems to follow a logical spatial allocation in relation to the hydrographic network, this logic does not hold for the characteristics of each class.
4. Fuzzy classification allowed to obtain locally optimal classes that maximize the use of the initial information and minimize errors due to subsequent interventions based on external information. Besides, this method has an important disadvantage: the difficulty of visualization (due to overlapping) and its validation.
5. To define the limits of the criteria that ultimately characterize each class, a useful approach is to calculate the mean and standard deviation of the features for points in each specific class. The comparison of these values with the corresponding values for

the sample of points that are used for training shows the degree of "coercion" that puts the system as a prerequisite in the process of classification.





## Κατάλογος συμβόλων - συντομεύσεων

---

### Σύμβολα

$C$	πίνακας με τα κέντρα κάθε κλάσης
$f$	διαθετική ικανότητα του εδάφους
$c$	κλάση
$k$	δείγμα
$m$	βαθμός ασάφειας
$M$	πίνακας συμμετοχής
$n$	ο αριθμός των σημείων, που αποτελούν τα δεδομένα
$Q_o$	επίγεια ροή
$Q_p$	άμεσα κατακρημνίσματα στο υδατόρευμα
$Q_t$	υποδερμική ροή, υπεδάφια ροή
$Q_g$	υπόγεια ροή
$P$	ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις
$u_{ik}^m$	ο βαθμός συμμετοχής του δείγματος $k$ στην κλάση $i$
$\lambda_0$	κεντρικός μεσημβρινός
$k$	συντελεστή κλίμακας
$k_0$	συντελεστής κλίμακας στον $\lambda_0$
$\varphi_0$	πλάτος αναφοράς
$X_0$	προσθετική σταθερά στο $X$
$Y_0$	προσθετική σταθερά στο $Y$

### Συντομεύσεις

A/Φ	Αεροφωτογραφία
ΓΥΣ	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
ΕΓΣΑ '87	Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς 1987
ΘΥΓΜ	Θεμελιώδης Υδρολογική Γήινη Μονάδα
λεκ.	υδρολογική λεκάνη
ΝΔ	Νευρωνικά Δίκτυα
ΟΚΧΕ	Οργανισμός Κτηματογραφήσεων και Χαρτογραφήσεων Ελλάδος
π.	ποταμός
ΨΜΕ	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

ART	Adaptive Resonance Theory network
DEM	Digital Elevation Model
FCM	Fuzzy C-means
FHLU	Fundamental Hydrologic Landscape Unit
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
H	Hillslopes
HAND	Height Above the Nearest Drainage
MLC	Maximum Likelihood Classifier
MLP	Multi-Layer Perceptron network
RBF	Radial Basis Function network
W	Wetlands
$W_{\text{Flat}}$	Flat Wetlands
$W_{\text{Slopped}}$	Slopped Wetlands

# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Από τις διεργασίες που παρατηρούνται σε μία λεκάνη απορροής σπουδαιότερη είναι η δημιουργία της απορροής. Η διεργασία της απορροής είναι άμεσα επηρεασμένη από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και επομένως η πλήρης κατανόηση και μελέτη αυτών των διεργασιών επιτυγχάνεται με τη διατύπωση σχέσεων μεταξύ των δύο κατηγοριών παραγόντων (Τσακίρης, 1995).

Η σχέση που αναφέρθηκε, διευκολύνει την κατανόηση, τη μελέτη, την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση διαφόρων υδρολογικών γεγονότων που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συσχέτιση των μορφολογικών χαρακτηριστικών κάθε περιοχής της λεκάνης με το καθεστώς απορροής στις περιοχές αυτές. Η λεκάνη απορροής κατακερματίζεται σε στοιχεία (κελιά) για το καθένα των οποίων διατίθενται οι απαραίτητες πληροφορίες για τη ολοκλήρωση της μελέτης υπό τη μορφή επιθεμάτων (layers).

Μεγάλο μέρος της βασικής ιδέας για τον ορισμό αυτού του διαχωρισμού σε στοιχεία, από τα οποία μετέπειτα το καθένα ονομάζεται Θεμελιώδης Υδρολογική Γήινη Μονάδα (ΘΥΓΜ) (Winter, 2001) εμπεριέχεται στο γεγονός ότι κάθε στοιχείο ανεξάρτητα της έκτασης του συνοδεύεται με χαρακτηριστικά του αναγλύφου, όπως υψόμετρο, κλίση, διεύθυνση απορροής και επιπλέον ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως το αν αποτελεί υδρογραφικό δίκτυο ή όχι. Το σύνολο των πληροφοριών εξάγεται από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ή Επιφάνειας), αναφερόμενο στο εξής ως ΨΜΕ, μετά από κατάλληλους μαθηματικούς υπολογισμούς.

Εμπλουτίζοντας τα πεδία των επιθεμάτων με πληροφορίες που σχετίζονται με το ΨΜΕ, την επιφανειακή απορροή, το γεωλογικό υπόβαθρο ή τις κλιματικές – ατμοσφαιρικές συνθήκες, που αντιστοιχούν σε κάθε στοιχείο, παρέχεται η δυνατότητα ακριβέστερης προσέγγισης των υδρολογικών διεργασιών. Με βάση αυτές τις απαιτήσεις, μια περιοχή ή μια λεκάνη απορροής είναι δυνατό να υποδιαιρείται σε μονάδες (ανεξαρτήτως μεγέθους), των οποίων η καθεμία αποδίδει τα διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Καθοριστικό μέγεθος για τη διαδικασία της ταξινόμησης, εκτός των προαναφερθέντων, είναι ο δείκτης HAND (Height Above the Nearest Drainage) (Renno et al., 2008). Ο δείκτης HAND υπολογίζεται ως η υψομετρική διαφορά που έχει κάθε στοιχείο της λεκάνης με το κοντινότερο σε αυτό στοιχείο που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο, ακολουθώντας τη διεύθυνση ροής των υδάτων. Το HAND αποτελεί ένα “υδρολογικού χαρακτήρα” ψηφιακό μοντέλο εδάφους, αν και ουσιαστικά ομαλοποιεί το ΨΜΕ σύμφωνα με το υδρογραφικό δίκτυο.

Η μελέτη της περιοχής ενδιαφέροντος, η οποία στην παρούσα περίπτωση είναι η λεκάνη απορροής, ολοκληρώνεται μέσα από την αριθμητική έκφραση των υψομέτρων και των κλίσεων του εδάφους, τον προσδιορισμό του υδρογραφικού δικτύου, της συσχέτισης κάθε στοιχείου της λεκάνης με το υδρογραφικό δίκτυο, υπολογίζοντας την απόστασή του από τον κοντινότερο σε αυτό κλάδο του δικτύου και, τέλος, τον υπολογισμό του δείκτη HAND.

Η ταξινόμηση των στοιχείων και, κατ'επέκταση, του συνόλου της λεκάνης απορροής με βάση το δείκτη HAND, τις κλίσεις και την απόσταση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κλάσεων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Για τη βέλτιστη ταξινόμηση των στοιχείων εφαρμόζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη βασίζεται στη θεωρία της ασαφούς λογικής και στην εφαρμογή του αλγόριθμου Fuzzy C-means (FCM), ο οποίος δεν απαιτεί γνώση ως προς τις παραμέτρους και τα όρια το κλάσεων. Έτσι, η διαδικασία χαρακτηρίζεται από ελευθερία και ευελιξία. Η τελική κατανομή του κάθε στοιχείου στην αντίστοιχη κλάση γίνεται με την εφαρμογή της διαδικασίας της απασαφοποίησης. Στη δεύτερη προσέγγιση, εφαρμόζονται τα νευρωνικά δίκτυα. Σε αυτά χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα σημείων ήδη ταξινομημένων σε κλάσεις για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και, στη συνέχεια, με το εκπαιδευμένο πλέον νευρωνικό δίκτυο ταξινομήθηκε το σύνολο των στοιχείων της λεκάνης στις αρχικά ορισμένες κλάσεις.

Η χρήση των συγκεκριμένων κριτηρίων είναι κατάλληλη και έχει ως στόχο τη διευκόλυνση εξαγωγής συμπερασμάτων ως προς το κυρίαρχο υδρολογικό καθεστώς κάθε κλάσης.

Η εφαρμογή της ταξινόμησης εκτελείται και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, για δύο επιλεγμένες ελληνικές λεκάνες στο νομό Αττικής, στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ερασίνου (ανατολικά) και στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σαραντατόταμου (δυτικά). Η ελεγχόμενη διεύρυνση των αποτελεσμάτων έχει ως στόχο τον ευρύτερο προσδιορισμό του κυρίαρχου υδρολογικού καθεστώτος σε λεκάνες με παρόμοια χαρακτηριστικά, γεγονός που θα οδηγήσει σε συμπεράσματα για τις διεργασίες της βροχής – απορροής, που λαμβάνουν χώρα στις ιδιαίτερες μορφολογικά λεκάνες απορροής της Ελλάδος.

## **1.2 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας**

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά ο στόχος της μεταπτυχιακής εργασίας, οι βασικές διαδικασίες από τις οποίες αποτελούνται τα στάδια της μελέτης και η βασική μεθοδολογία που πρόκειται να ακολουθηθεί. Υποδεικνύονται οι λεκάνες εφαρμογής και δίνεται μια πρώτη ιδέα για την μετέπειτα εφαρμογή των συμπερασμάτων της συγκεκριμένης έρευνας σε ευρύτερο πλαίσιο. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση των κεφαλαίων της εργασίας και το κεφάλαιο κλείνει με την αναφορά των πρωτότυπων ερευνητικών περιοχών, οι οποίες εξετάζονται.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύεται το θεωρητικό πλαίσιο της ταξινόμησης του εδάφους, παρουσιάζονται βιβλιογραφικές μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν στον τομέα της ταξινόμησης των εδαφών από υδρολογικής άποψης, η μεθοδολογία που ακολουθείται και τα δεδομένα που υπήρχαν σε κάθε εφαρμογή. Παρουσιάζονται επίσης: η θεωρία της ασαφούς λογικής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, με τρόπο τέτοιο ώστε να παρέχει στον αναγνώστη ένα υποτυπώδες γνωστικό υπόβαθρο (σε καμία περίπτωση δεν αναλύει πλήρως τη θεωρία της ασαφούς λογικής). Στο τέλος του δευτέρου κεφαλαίου, παρουσιάζονται τα κριτήρια στα οποία βασίζεται η ταξινόμηση, η σχετική βιβλιογραφία στην οποία χρησιμοποιήθηκε το «υδρολογικό» Ψηφιακό Μοντέλο HAND και οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται το μοντέλο HAND και κατ' επέκταση και τα αποτελέσματα της ταξινόμησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η θέση των λεκανών εφαρμογής, τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες λεκάνες, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το σύνολο της εργασίας. Το κεφάλαιο κλείνει με την παράθεση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών για κάθε λεκάνη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων της ταξινόμησης, που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν. Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας του υπολογισμού των απαραίτητων μεγεθών με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων. Δίνεται ο ορισμός των κλάσεων στις οποίες πρόκειται να ταξινομηθεί το σύνολο των λεκανών μελέτης και αιτιολογείται η συγκεκριμένη παραμετροποίηση των τιμών των κριτηρίων.

Ακολουθούν στο πέμπτο κεφάλαιο τα στάδια της εφαρμόσιμης διαδικασίας σε κάθε λεκάνη καθώς και οι ιδιαιτερότητες που εμφανίστηκαν κατά την εφαρμογή. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της εφαρμογής για κάθε λεκάνη μελέτης.

Καταληκτικά, στο έκτο κεφάλαιο, που είναι και το τελευταίο, ερμηνεύονται τα συμπεράσματα των διαδικασιών που εφαρμόστηκαν.

### **1.3 Πρωτότυπα σημεία**

Το θέμα της ταξινόμησης των γήινων επιφανειών, προέκυψε ως η ανάγκη για κατανόηση των εσωτερικών σχέσεων μεταξύ των δεδομένων και των φυσικών διεργασιών. Η εφαρμογή της ταξινόμησης σε μεγάλης έκτασης χωρικές περιοχές, παρουσιάζει πλήθος προκλήσεων. Η διαθεσιμότητα, η ποικιλία, η ανομοιογένεια, οι φυσικές διεργασίες, τα όμοια χαρακτηριστικά, οι σχέσεις που μπορούν να αναδυθούν υπό τη μορφή των αποτελεσμάτων της διαδικασίας της ταξινόμησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της προσομοίωσης και κατ' επέκταση στη βελτίωση των υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης. Η αξιολόγηση και η ανάλυση των χωρικών και χρονικών προτύπων των γήινων επιφανειών, μπορεί να προσφέρει γνώση στην κατανόηση των σύνθετων υδρολογικών διαδικασιών. Η ανάπτυξη του τομέα της γεωπληροφορικής συνεισφέρει στην ανακάλυψη προτύπων των γήινων επιφανειών, που πιθανά είναι άνισα χωρικά κατανομημένα και ανόμοια διαθέσιμα ως προς το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η ανάπτυξη γεωχωρικών διαδικασιών προσέγγισης της ταξινόμησης των γήινων επιφανειών χρησιμοποιώντας υδρολογικά κριτήρια. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ταξινόμησης, πλήθος συμπερασμάτων προκύπτουν για τη συμπεριφορά των κλάσεων ως προς τις υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις αντίστοιχες περιοχές. Επιπλέον, επιτρέπεται η υιοθέτηση συγκεκριμένου τρόπου επεξεργασίας και αξιοποίησης της ποικιλίας και της πολυπλοκότητας των χωρικών δεδομένων και η επέκταση των συμπερασμάτων σε περιοχές που παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Μέσω των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους δίνεται η δυνατότητα υπολογισμών με στόχο την περιγραφή, κατανόηση και πρόβλεψη των εδαφικών υδρολογικών συνθηκών, όπως π.χ., το μέγεθος της εδαφικής υγρασίας.



## 2 Ταξινόμηση γήινων επιφανειών

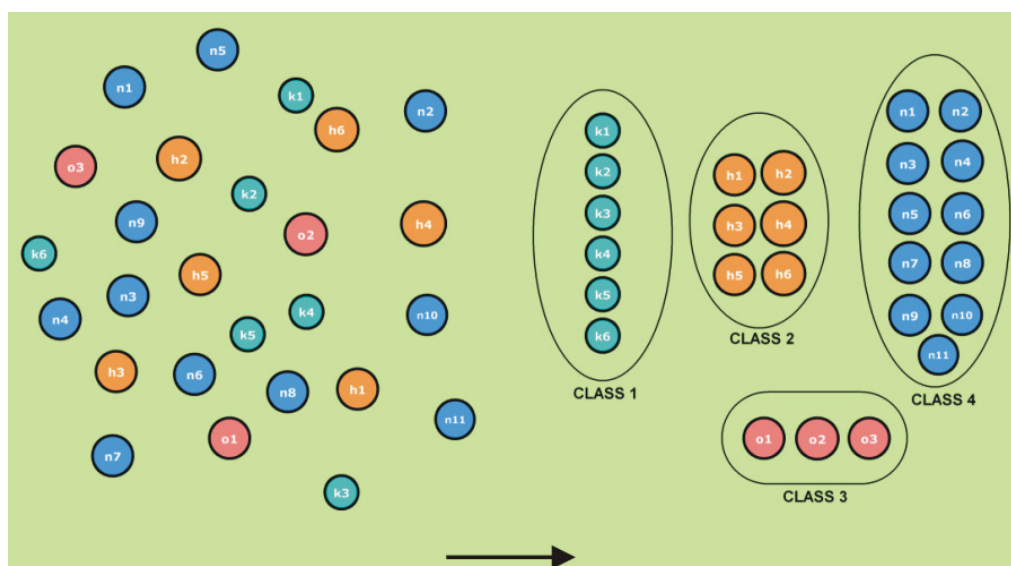
### 2.1 Γενικά

Ουσιαστικά ταξινόμηση είναι η διαδικασία διαχωρισμού των δεδομένων σε κατηγορίες βάσει μιας ή περισσοτέρων ιδιοτήτων τους ή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων τους (Εικόνα 2-1).

Πληθώρα χωρικών και χρονικών διαδικασιών έχουν σχέση αιτίου-αιτιατού και συνδέονται, συσχετίζονται, ή επηρεάζονται από εδαφικές μονάδες πρότυπα. Οι εδαφικές μονάδες πρότυπα μπορούν να προσδιοριστούν μέσα από διαδικασίες παρατήρησης διαφόρων κάθε φορά και ανά περίπτωση, παραγόντων, βιοτικών ή αβιοτικών. Επιπλέον, οι εδαφικές μονάδες πρότυπα επηρεάζουν και επηρεάζονται από υδρολογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα, σε δεδομένες χρονικές στιγμές ή που αποτελούν μόνιμο καθεστώς. Η έννοια της ταξινόμησης των εδαφικών μονάδων αποτέλεσε και αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημονικών κλάδων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι κλάδοι της οικολογίας, της γεωγραφίας και της διαχείρισης υδάτινων πόρων.

Ανάλογα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής ποικίλουν και οι μέθοδοι ταξινόμησης, καθώς αποτελούν το μέσο κάλυψης διεπιστημονικών αναγκών, ενσωμάτωσης συγκεκριμένων απαιτήσεων ή παραμέτρων.

Συμπερασματικά, από τη φύση της η διαδικασία της ταξινόμησης αποτελεί δύσκολο έργο με ασαφή χαρακτήρα λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικών διεργασιών, των ορίων, των κλιμάκων, της ποιότητας των δεδομένων εισαγωγής και της πολυπλοκότητας των δεδομένων αυτών καθ' αυτών. Τέλος, ανεξάρτητα από το σκοπό της ταξινόμησης, ο στόχος είναι η μείωση της πολυπλοκότητας, η ομαδοποίηση των παρόμοιων στοιχείων και φυσικά η ελεγχόμενη αφαίρεση πλήθους παρατηρήσεων του αρχικού δείγματος.



Εικόνα 2-1: Η διαδικασία της ταξινόμησης (Coleman, 2008).

Η πιο συνήθης από τις μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις που χρησιμοποιείται είναι η στατιστική, αν και όπως προαναφέρθηκε, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, συχνά εφαρμόζονται μη στατιστικές μέθοδοι, τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και ασαφής λογική. Στην περίπτωση των μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων, τα χαρακτηριστικά κάθε

κλάσης ορίζονται εκ των προτέρων, επομένως εφαρμόζεται η ταξινόμηση και η εισαγωγή κάθε στοιχείου στην αντίστοιχη κλάση γίνεται βάσει των ορίων των κλάσεων που τέθηκαν εξ αρχής. Επιγραμματικά αναφέρονται εφαρμογές με τη χρήση κάθε μεθόδου.

Ως μη στατιστική μέθοδος θεωρείται από τον Coleman (2008), η διαδικασία που ακολουθούν τα συστήματα GIS, όπου η περιοχή μελέτης υποδιαιρείται σε στοιχεία - κελιά, και καθένα από αυτά χαρακτηρίζεται με μια τιμή, η οποία αποτελεί την κωδικοποιημένη μορφή της ιδιότητας, που φέρει κάθε φατνίο. Αναλυτικότερα, λόγω της εμφάνισης των ψηφιακών χωρικών δεδομένων και το συνδυασμό αυτών με τεχνολογίες GIS ήρθε στο προσκήνιο ο συνδυασμός, αλληλεπίθεση απλών, πολύπλοκων ή σταθμισμένων συστημάτων δεδομένων με επακόλουθο την ανάδειξη ενός άλλου τρόπου διαχείρισης της πληροφορίας.

Χρησιμοποιώντας, ένα κανονικοποιημένο μοντέλο δεδομένων (raster data model) ή έναν πίνακα με μονάδα βάσης το κελί, σε κάθε κελί αντιστοιχεί μια τιμή παραμέτρου και μια θέση στο χώρο. Η ταυτόχρονη χρήση πολλών παραμέτρων δίνει τη δυνατότητα συνδυασμού αυτών, και μπορεί να οδηγήσει σε ταξινόμηση με βάση τις τιμές των παραμέτρων. Η νέα αυτή προσέγγιση, ήταν η αρχή της χρήσης των υπολογιστικών μεθόδων με τη χρήση υπολογιστή, που ανέδειξαν την πολυπλοκότητα του φυσικού περιβάλλοντος (Coleman, 2008). Το γεγονός της αυτοματοποίησης κάποιων διαδικασιών δεν συνεπάγεται και την παντελή έλλειψη της επέμβασης του χρήστη σε θέματα αποφάσεων. Η οριοθέτηση, η επιλογή της μεθόδου, η ερμηνεία και η αποδοχή των αποτελεσμάτων είναι θέματα που εξαρτώνται από τις ανθρώπινες αποφάσεις.

Οι στατιστικές τεχνικές ταξινόμησης αποτελούν εδώ και δύο δεκαετίες μια κοινή διαδικασία ταξινόμησης, που εφαρμόζονται χωρίς περίπλοκες διαδικασίες σε ψηφιακά χωρικά δεδομένα. Το βασικό πλεονέκτημα των στατιστικών μεθόδων, έγκειται στο ότι παρέχουν ταξινόμηση με ικανές σταθερές βάσεις, ποσοτική ανάλυση με σεβασμό στην ερμηνεία των αρχικών δεδομένων βαθμονόμησης, ιεραρχημένες κλάσεις και ομαδοποίηση με ή χωρίς τη χρήση σταθμισμένων τεχνικών (Michie et al., 1994). Σε αντιδιαστολή, ως μειονεκτήματα των στατιστικών μεθόδων ταξινόμησης, παρουσιάζεται η αδυναμία τους να διαχειριστούν δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές κλίμακες. Ακόμη και αν η κλίμακα είναι κοινή, θα πρέπει τα δεδομένα να ανήκουν σε ισοδύναμη περιοχή τιμών. Τα αποτελέσματα είναι εξαρτώμενα από την περιοχή μελέτης συνολικά, και έτσι χάνονται τοπικά πρότυπα (Χατζηχρήστος και Καλλίτσα, 2006). Στα μειονεκτήματα εντάσσεται και το γεγονός ότι κάθε σημείο είναι μονοσήμαντα ομαδοποιημένο με τα μέλη της δικής του ομάδας και δεν έχει εμφανή ομοιότητα με μέλη άλλων ομάδων. Πρόβλημα στη διαδικασία είναι πιθανό να παρουσιαστεί στην περίπτωση παρουσίας σημείων που δεν ομαδοποιούνται εύκολα ή βρίσκονται εκτός κλάσεων. ή στην περίπτωση τοπικού μεγίστου ή ελαχίστου, αν και τα δεδομένα θεωρητικά ακολουθούν την κανονική κατανομή. Καταληκτικά, στη στατιστική ταξινόμηση ο κάθε κλάση έχει το ίδιο βάρος, τα δεδομένα έχουν την ίδια αξιοπιστία και ακρίβεια, και η μορφολογία των τάξεων στον N-δισδιάστατο χώρο ακολουθεί υπερσφαιροειδή μορφή (Openshaw, 1978, 1994).

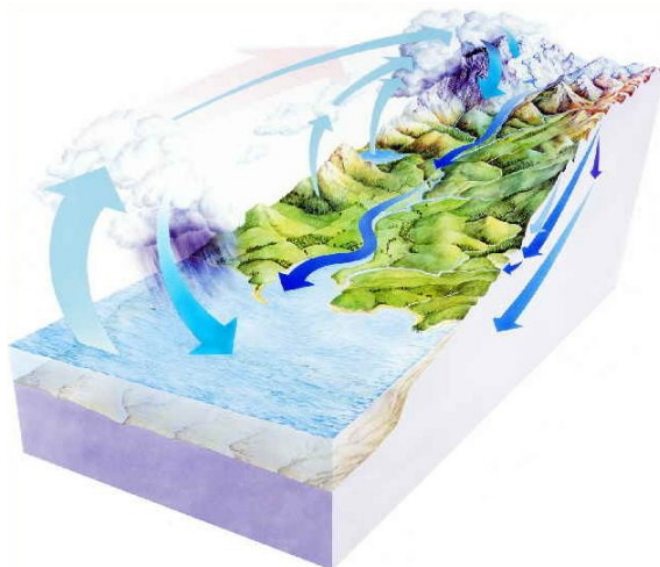
Ο συνδυασμός των νευρωνικών δικτύων με τα ασαφή συστήματα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των νευρο-ασαφών συστημάτων (neuro – fuzzy systems). Σκοπός αυτού του συνδυασμού είναι η δημιουργία συστημάτων τα οποία να είναι εύκολα αντιληπτά από τον άνθρωπο παράλληλα όμως να μπορούν να εκπαιδεύονται και να βελτιώνουν την απόδοσή τους. Έτσι, στα νευρο-ασαφή συστήματα δημιουργείται μια αρχική κατανοητή δομή και στη συνέχεια εκπαιδεύεται με σκοπό να βελτιωθεί η απόδοσή της (Πετρίδης, 2004). . Φυσικά, κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης ενδέχεται το σύστημα να τροποποιηθεί και να μην είναι τόσο κατανοητό όσο στην αρχή, σε καμία περίπτωση όμως δεν συμπεριφέρεται σαν σύστημα μαύρου κουτιού. Υπάρχει, δηλαδή, μια ισορροπία ανάμεσα στην ευκολία κατανόησης και στην απόδοση του συστήματος (Jang et al., 1997).



Τα νεύρο-ασαφή συστήματα έχουν πληθώρα εφαρμογών, εκ των οποίων και στην ταξινόμηση (classification). Στην περίπτωση της ταξινόμησης, το νεύρο-ασαφές σύστημα πρέπει να εκπαιδευτεί να αναγνωρίζει τις κλάσεις, στις οποίες ανήκουν τα δεδομένα εισόδου. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται δίνοντας στο σύστημα κάποια χαρακτηριστικά διαχωρισμού των κλάσεων. Αρκετά είναι τα νεύρο-ασαφή συστήματα τα οποία στηρίζονται στη δομή ενός νευρωνικού δικτύου για να υλοποιήσουν ένα ασαφές σύστημα. Κάθε κόμβος του δικτύου υλοποιεί και μια λειτουργία του ασαφούς συστήματος. Υπάρχουν όμως ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα όπως η έλλειψη δυνατότητας να διαμορφώσουν τη δομή τους ανάλογα με τα δεδομένα. Έτσι, πρέπει να δοκιμαστούν διάφορες δομές μέχρι να αποφασιστεί ποια είναι η κατάλληλη αρχική δομή. Επιπλέον, όσο αυξάνει ο αριθμός των εισόδων, γεγονός που αντιστοιχεί στην αύξηση των διαστάσεων, δημιουργούνται όλο και περισσότεροι ασαφείς κανόνες με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων δικτύων με πολλές παραμέτρους (Πετρίδης, 2004).

### 2.1.1 Απορροή

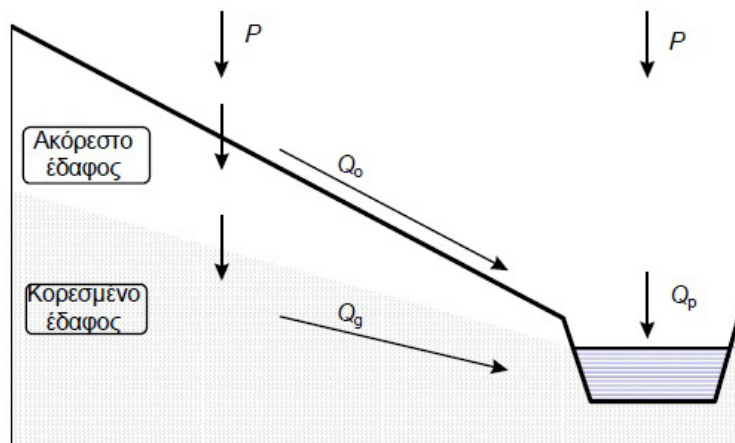
Με τον όρο επιφανειακή απορροή αποδίδεται η φυσική κίνηση, του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας κατά μήκος των υδάτινων διαδρομών που ονομάζονται υδατορεύματα (Ward and Robinson, 2000), τα οποία λόγω κλίμακας υπόκεινται σε περαιτέρω υποδιαίρεση σε ποτάμια, ρέματα, κανάλια, ανάλογα με το μέγεθος, την παροχή, τα χαρακτηριστικά τους. Η θεμελιώδης σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής περιγράφεται με την επαναλαμβανόμενη κυκλική διαδικασία του υδρολογικού κύκλου (Εικόνα 2-2). Σε αυτή τη διαδικασία και για τις απλούστερες περιπτώσεις, οι τοπογραφικές και οι υπόγειες λεκάνες συμπίπτουν και κάθε υδατόρευμα λαμβάνει νερό, το οποίο απορρέει μόνο στη δική του λεκάνη απορροής. Κάθε υδρολογική λεκάνη θεωρείται ως το σύστημα μετασχηματισμού που αποτελεί τον φυσικό υποδοχέα των δεδομένων εισόδου δηλαδή των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων  $P$  και τα μετασχηματίζει σε δεδομένο εξόδου την απορροή.



Εικόνα 2-2: Ο Υδρολογικός κύκλος (πηγή: <http://www.lifewateragenda.org/html/cycle-gr.html>)

Αν και ο όρος επιφανειακή απορροή αναφέρεται στη ροή του νερού που κυκλοφορεί στη διατομή των υδατορευμάτων, πλήθος μικρότερων κλάδων σχηματίζεται με στόχο αυτοί να οδηγήσουν το νερό στο υδατόρευμα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν διάφορες πηγές προέλευσης της επιφανειακής απορροής, με απευθείας κατακρήμνιση του νερού στην επιφάνεια του υδατορεύματος  $Q_p$ , με την επίγεια ροή  $Q_o$  (overland flow), με την υποδερμική ροή  $Q_i$  (shallow subsurface flow, throughflow, interflow) και με την υπόγεια ροή  $Q_g$  (deep subsurface flow, groundwater flow).

Αναλυτικότερα, η επίγεια ροή (surface runoff) είναι μέρος της συνολικής απορροής (total runoff), η οποία φτάνει στην έξοδο της λεκάνης απορροής δια μέσου της επιφανειακής απορροής (overland flow) (Εικόνα 2-3) και των υδατορευμάτων, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις στη συνολική απορροή περιλαμβάνεται και η υπεδάφια ροή (throughflow), η οποία αποτελεί εκφόρτιση του υπόγειου υδροφόρου σε κάποια απόσταση από το υδατόρευμα (Ward and Robinson, 2000).



Εικόνα 2-3: Παρουσίαση των διαφορετικών προελεύσεων της επιφανειακής απορροής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Ο όρος **επίγεια ροή** (overland flow) αναφέρεται στη δισδιάστατη ροή που πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους, είναι σαφής όταν πρόκειται για τελείως αδιαπερατή επιφάνεια, αλλά έχει ενδιαφέρον η μελέτη όταν λαμβάνει χώρα σε διαπερατό φυσικό έδαφος. Στη δεύτερη επιφάνεια, διακρίνονται δύο περιπτώσεις επίγειας ροής, που προκαλούνται από διαφορετικούς μηχανισμούς η κάθε μία: η επίγεια ροή Horton (Hortonian overland flow) και η επίγεια ροή λόγω κορεσμού (saturation overland flow) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Η βασική αιτία δημιουργίας της επίγειας ροής, είναι η ανικανότητα του εδάφους να απορροφήσει το επιφανειακό νερό που ουσιαστικά αποτελεί το αποτέλεσμα δύο πρότερων καταστάσεων: της υψηλής έντασης των κατακρημνίσεων και/ή της μικρής τιμής της αποθηκευτικότητας του εδάφους (infiltration capacity).

Η γνώση του μηχανισμού σχηματισμού της επίγειας ροής και ο συνδυασμός αυτής με τα χαρακτηριστικά των περιοχών όπου λαμβάνει χώρα, αποτελούν τα βασικά εργαλεία για τη μετέπειτα ταξινόμηση των περιοχών σε υδρολογικές κλάσεις κυρίαρχου υδρολογικού καθεστώτος. Ιδανικές συνθήκες για την εμφάνιση (ή, μη εμφάνιση) της επίγειας ροής αποτελούν άγονες ή ημι-άνυδρες περιοχές με μέτριες έως απότομες κλίσεις, όπου η βλάστηση είναι αραιή ή ανύπαρκτη με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους να εκτίθεται στο φαινόμενο των βροχοπτώσεων. Επακόλουθο αυτού είναι η εμφάνιση της απορροής υπό τη μορφή επίγειας ροής. Αντίθετα, σε υγρές περιοχές όπου η φυτοκάλυψη είναι παχύτερη και εκτεταμένη η επίγεια ροή παρατηρείται σπάνια, καθώς είναι λογικό η διήθηση (infiltration) να είναι αυξημένη, καθότι οι περιοχές αυτές αποτελούν καλλιεργήσιμες εκτάσεις και η διήθηση είναι απολύτως απαραίτητη. Ενδιάμεση των δύο παραπάνω είναι η περίπτωση πολλών υγρών και ύφυγων περιοχών, όπου η επίδραση της τοπογραφίας και η φύση του εδάφους διευκολύνουν την αύξηση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα σε περιόδους βροχοπτώσεων και την εμφάνιση φαινομένων υπεδάφιας ροής (Ward and Robinson, 2000).

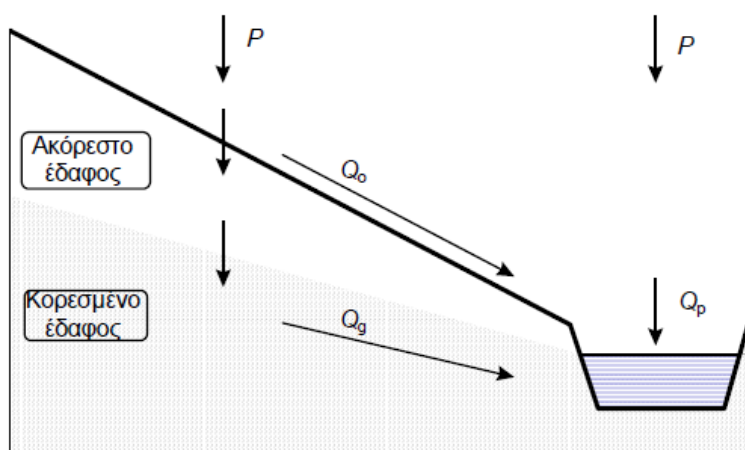
Για λόγους πληρότητας, συνοπτικά αναφέρονται οι παρακάτω τύποι ροής:

Η υπεδάφια ροή είναι ουσιαστικά το άθροισμα της υποδερμικής (throughflow) και της της υπόγειας ροής (groundwater flow) και κανονικά ισούται με τη συνολική απορροή που φτάνει

στα υδατορέματα ως υπεδάφια ροή στον πυθμένα του υδατορεύματος και στις όχθες του (saturated flow).

Η άμεση απορροή (quickflow, direct runoff), είναι το άθροισμα της κατακρήμνισης που καταλήγει στα κανάλια, της επιφανειακής απορροής (surface runoff) και της ταχθείας υπεδάφιας απορροής (quick throughflow).

Ο Horton, τη δεκαετία του 1930, μετά από συστηματικές έρευνες στη διήθηση των εδαφών κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, όταν η ένταση της βροχόπτωσης υπερβεί τη διαθετική ικανότητα του εδάφους  $f$ , δημιουργούνται συνθήκες κατάκλισης του εδάφους, υπό την προϋπόθεση πως το έδαφος έχει μη μηδενική κλίση και εμφανίζεται η επίγεια ροή. Οι συνθήκες κατάκλισης συμβαδίζουν με τον κορεσμό του επιφανειακού εδαφικού καλύμματος και μόνο, ενώ τα βαθύτερα στρώματα εδάφους παραμένουν ακόρεστα. Σύμφωνα με την υπόθεση Horton, ένα τμήμα των κατακρημνίσεων  $P$  διηθείται τροφοδοτώντας τους υπόγειους υδροφορείς  $Q_g$ , ενώ το υπόλοιπο τμήμα αυτών άμεσα απορρέει επίγεια  $Q_o$  (Εικόνα 2-4). Παράλληλα, οι υπόγειοι υδροφορείς τροφοδοτούν με τη σειρά τους την επιφανειακή απορροή μέσω της υπόγεια ροής, αλλά με πολύ βραδύτερο ρυθμό. Αν και φαίνεται εύλογη υπόθεση, παρ' όλα αυτά, δεν παρατηρείται σε περιοχές με αυξημένη φυτοκάλυψη λόγω του ότι το επιφανειακό εδαφικό κάλυμμα έχει μεγάλη διαπερατότητα, η οποία υπερβαίνει την ένταση βροχής, ακόμα και σε εκτεταμένα επεισόδια. Εφαρμόσιμη αποδεικνύεται κυρίως σε περιοχές με πολύ αραιή βλάστηση και άρα άνυδρα κλίματα (Ward and Robinson, 2000).



Εικόνα 2-4: Επίγεια ροή Horton – Υπόθεση Horton (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

### 2.1.2 Κλίση Εδάφους

Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι: κλιματικοί (ένταση βροχοπτώσεων, υγρασία αέρα, άνεμοι, εξάτμιση), γεωμορφολογικοί (κλίση λεκάνης απορροής, υδρογραφική πυκνότητα), λιθολογικοί (είδος πετρωμάτων, περατότητα), καθώς και το είδος της φυτοκάλυψης.

Η κλίση του ανάγλυφου του εδάφους της λεκάνης απορροής, αποτελεί το δεύτερο κριτήριο για την ταξινόμηση των εδαφικών μονάδων. Ουσιαστικά, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης, με αποτέλεσμα το εύρος τιμών του κριτηρίου να δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων εκ των προτέρων για το προϊόν της ταξινόμησης.

Ως προς το χαρακτηρισμό των εδαφών – περιοχών ανάλογα με την κλίση, τα εύρη των τιμών των πεδίων των τάξεων δεν είναι σαφώς προσδιορισμένα, με αποτέλεσμα να μην ακολουθείται κάποια προκαθορισμένη διαδικασία ταξινόμησης ως προς αυτό το κριτήριο. Με βάση το Αριθ. 100006/4861/22.12.1977 –ΦΕΚ 23/Β/23.1.1998, για τον καθορισμός

αμοιβών μελετητών εκπονήσεως μελετών δασικών μεταφορικών εγκαταστάσεων αναλύεται ο συντελεστής αμοιβών εξαρτώμενος από τις εδαφικές συνθήκες όπως παρακάτω:

- Για έδαφος πεδινό (κλίσεις 0-5%)
- Για έδαφος λοφώδες (κλίσεις 5-20%)
- Για έδαφος ορεινό (κλίσεις 20-50%)
- Για έδαφος εξόχως ορεινό (κλίσεις 50% και άνω).

Ο Demek, ω(1972) πρότεινε μια ταξινόμηση των κλίσεων κάθε λεκάνης, με τη χρήση της οποίας χαρακτηρίζει τις περιοχές με το αντίστοιχο εύρος κλίσης. Η ταξινόμηση αυτή ακολουθείται επίσης από την International Geographical Union και χωρίζει τις τιμές της μέσης κλίσης του ανάγλυφου σε 6 ομάδες κλίσεων χαρακτηρίζει το είδος των επιφανειών και τον τρόπο διάβρωσης ως εξής:

- Για έδαφος επίπεδο έως ελαφρώς κεκλιμένου αναγλύφου (κλίσεις 0-2°)
- Για έδαφος ελαφρώς κεκλιμένου αναγλύφου (κλίσεις 2°-5°)
- Για έδαφος ισχυρώς κεκλιμένου αναγλύφου (κλίσεις 5°-15°)
- Για έδαφος απότομο έως εξαιρετικά απότομου αναγλύφου (κλίσεις 15°-30°)
- Για έδαφος απόκρημνου αναγλύφου (κλίσεις 30°-55°)
- Για έδαφος κάθετου αναγλύφου (κλίσεις >55°).

## 2.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση Υδρολογικής Ταξινόμησης

Η χρήση της ταξινόμησης και η εφαρμογή όλων των πληροφοριών που διατίθενται για κάθε μεμονωμένο στοιχείο του υδρολογικού συστήματος, επιτρέπει την εξαγωγή της γνώσης και των συνθηκών που οδηγούν στην κατανόηση του πολύπλοκου φυσικού υδρολογικού συστήματος, που συνήθως μελετάται σε τάξη μεγέθους την λεκάνη απορροής.

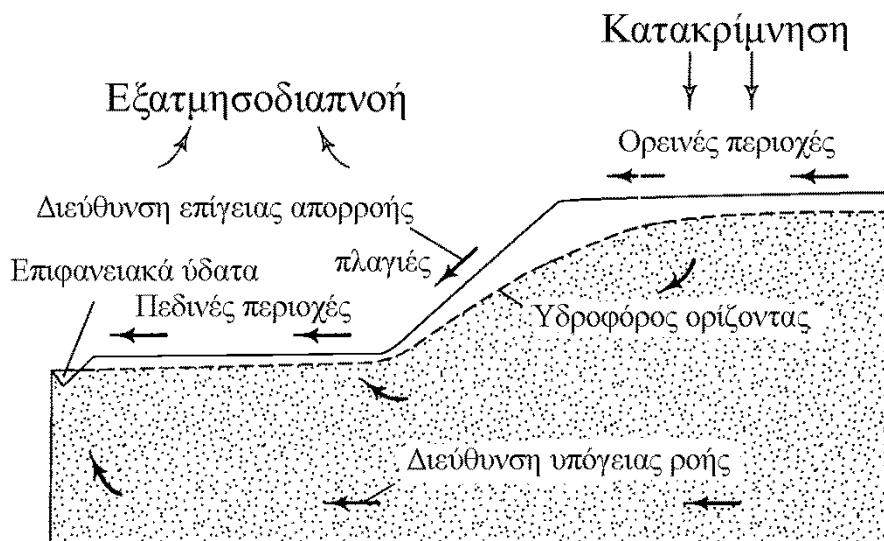
Το ζήτημα της υδρολογικής ταξινόμησης απασχολεί πολλούς ερευνητές εδώ και δεκαετίες με αποτέλεσμα να παρατηρείται πολυμορφία ως προς τον τρόπο, τη μεθοδολογία, τα δεδομένα, τα εργαλεία προσέγγισης του θέματος. Ανάλογη ποικιλία παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά των κλάσεων, τα αριθμητικά και ποιοτικά αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και φυσικά οι ίδιες οι κλάσεις.

Κατά τον Winter (2001), το αποτέλεσμα της υδρολογικής ταξινόμησης είναι οι ευρύτερες υδρολογικές περιοχές (hydrologic landscapes), οι οποίες αποτελούν συνδυασμό της ποικιλίας των θεμελιωδών υδρολογικών μονάδων (fundamental hydrologic landscape unit, FHLU). Τα χαρακτηριστικά της FHLU προκύπτουν κατά τον διαχωρισμό σε υποπεριοχές μιας ευρύτερης περιοχής που να αποτελείται από πεδινά εδάφη έως ορεινά εδάφη, στα οποία ενδιάμεσα παρεμβάλλονται έντονες κλίσεις.

Η συμβολή του όρου FHLU βασίζεται στην ιδέα της αλληλεπίδρασης ενός ολοκληρωμένου υδρολογικού συστήματος με ένα μοναδιαίο, μορφολογικό, φυσιογραφικό στοιχείο, με συνέπεια το στοιχείο αυτό να γίνεται το βασικό «δομικό» στοιχείο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ταξινόμησης των γήινων επιφανειών. Το στοιχείο αυτό ορίζεται ως FHLU και προσδιορίζεται με βάση:

- το ανάγλυφο της περιοχής
- το γεωλογικό υπόβαθρο
- τα κλιματικά στοιχεία και

- την υδρολογική συνθήκη η οποία συνίσταται ανάλογα με την κίνηση (i) του επιφανειακού νερού, που καθορίζεται από τις κλίσεις και τη διαπερατότητα κάθε γήινη μονάδας, (ii) του υπόγειου νερού, που ελέγχεται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά κάθε γεωλογικής γήινης μονάδας και (iii) από το ατμοσφαιρικό νερό, που αποτελεί την ανταλλαγή νερού μέσω της γήινης μονάδας που ελέγχεται από τα κλιματικά χαρακτηριστικά αυτής (Winter, 2001).



Εικόνα 2-5 Η θεμελιώδης υδρολογική μονάδα (Landscape unit) (Winter, 2001).

Όπως είναι λογικό, κατά τη διαδικασία της επιφανειακής απορροής το νερό θα κινηθεί γρηγορότερα στις εδαφικές μονάδες που έχουν μεγάλη κλίση και αργότερα σε εκείνες με μικρή κλίση. Η ποσότητα και το ποσοστό της διήθησης εξαρτάται από τη διαπερατότητα των επιφανειακών γεωλογικών υλικών (και αντίστοιχα των μονάδων). Όλα τα παραπάνω έχουν αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά της επιφανειακής ροής και στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων, καθώς όσο πιο ήπια (κοντά στο μηδέν) είναι η κλίση των FHLU τόσο περισσότερο χρόνο θα χρειαστεί το νερό για να απορρεύσει, δίνοντας την ευκαιρία στη έναρξη της διαδικασίας του εμποτισμού, με την προϋπόθεση ότι τα εδάφη είναι διαπερατά. Στην αντίθετη περίπτωση, σχηματίζονται λιμνάζοντα ύδατα και παρουσιάζεται μια μορφή υγρότοπου.

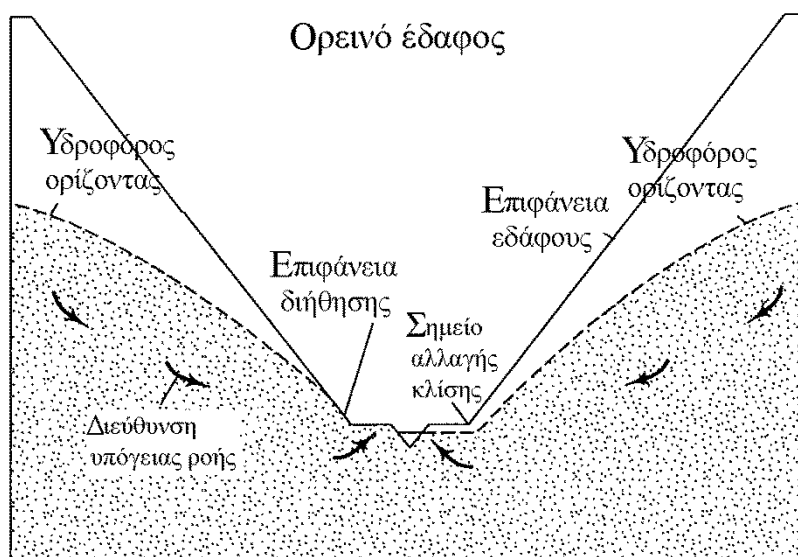
Για λόγους πληρότητας, αναφέρεται πως τα γεωλογικά χαρακτηριστικά κάθε FHLU επηρεάζουν την κίνηση του υπόγειου νερού. Τέλος, εκτός από την επίδραση του αναγλύφου και της γεωλογίας στα επιφανειακά πεδία ροής του νερού, η συμβολή του ατμοσφαιρικού νερού επηρεάζει περαιτέρω τη επίγεια κίνηση των υδάτων.

Κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, μεταξύ των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων εμφανίζεται μια παλινδρομική κίνηση νερού από τον πυθμένα του υδατορεύματος έως τις όχθες σε πολλά είδη FHLU. Η παραπάνω πρόταση έχει αποδειχθεί τόσο για υψηλής κλίσης περιοχές (Triska et al., 1993) όπως οι παρόχθιες περιοχές, όσο και για περιοχές με ηπιότερες κλίσεις (Duff et al., 1997).

Οι ευρύτεροι υδρολογικοί τύποι εδαφών μπορούν να οριστούν ως παραλλαγές των FHLU. Για παράδειγμα, ανάλογα με:

- το πλάτος της περιοχής, ανεξαρτήτως αν αυτή είναι πεδινή, επικλινή, ή ορεινή, που καταλαμβάνει λεκτικό εύρος από στενό (μικρό πλάτος) έως πλατύ
- τις κλίσεις των τριών αντίστοιχων περιοχών, που μπορεί να ποικίλουν

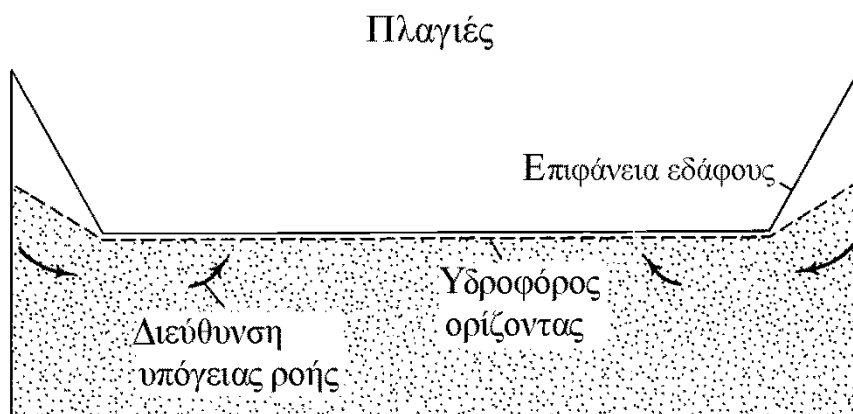
- το τοπογραφικό ανάγλυφο μεταξύ της πεδινής και της ορεινής περιοχής, που μπορεί να κυμαίνεται από ήπιο έως απότομο, και, τέλος,
- τις "μικρότερες" FHLU, που πιθανότατα εμπεριέχονται σε κάποιες ή σε όλες τις ευρύτερες περιοχές (ευρύτερης κλίμακας θεμελιώδης υδρολογική μονάδα).



Εικόνα 2-6. Χαρακτηριστικά ορεινού εδάφους (Winter, 2001).

Ο συνδυασμός των FHLU προσφέρει αξιόλογα αποτελέσματα, καθώς μπορεί να καθορίσει (παρουσιάσει) γενικούς τύπους εδάφους που περιγράφουν σημαντικά φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του γήινου αναγλύφου. Μια ευρύτερη υδρολογική περιοχή που αποτελείται από στενές πεδιάδες και ορεινές περιοχές μεταξύ των οποίων μεσολαβούν ψηλές και απότομες επικλινείς πλαγιές είναι χαρακτηριστικό του ορεινού εδάφους (Εικόνα 2-6), το οποίο αποτελεί ευρύτερης κλίμακας θεμελιώδη υδρολογική μονάδα. Η γενική αυτή διάταξη μπορεί να εμπεριέχεται σε διαφορετικών τάξεων λεκάνες ως προς την έκταση, σε περιοχές με ορεινό ανάγλυφο, σε πολύ ορεινές λεκάνες και σε περιοχές με μεγαλύτερες κοιλάδες εντός ενός συγκροτήματος οροσειρών. Η εμφάνιση περιοχών με τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι συνήθης στις ελληνικές ορεινές λεκάνες.

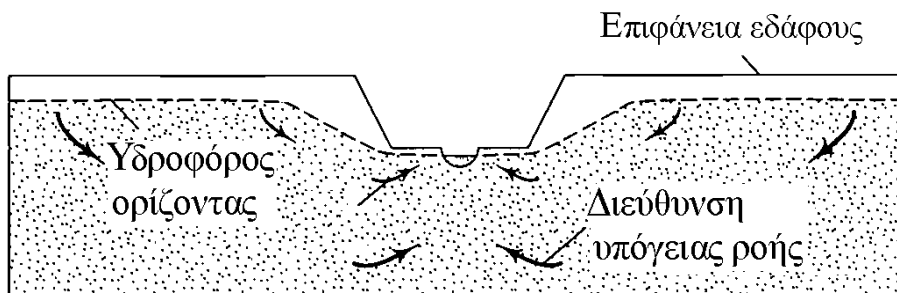
Στη συνέχεια, αναλύεται η περίπτωση των playas, όπου αποτελούνται από την ευρύτερη υδρολογική περιοχή που χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη πεδιάδα που διαχωρίζεται από τα υψίπεδα με πολύ απότομες πλαγιές.



Εικόνα 2-7. Χαρακτηριστικά λεκανών σε υψίπεδα (Winter, 2001).

Η περιοχή αυτή είναι χαρακτηριστικό λεκανών, με διαβαθμισμένη μορφολογία ή με εσωτερικό δίκτυο απορροής που συνήθως περιέχουν πλαγιές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-7.

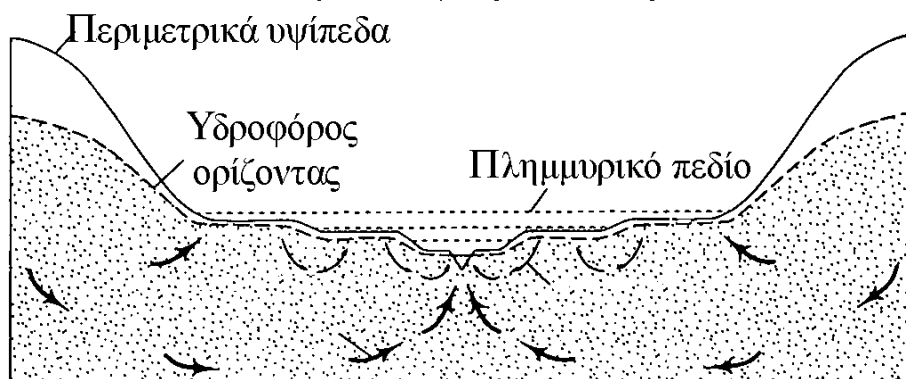
### Οροπέδια και υψίπεδα



Εικόνα 2-8. Χαρακτηριστικά λεκανών με μεγάλο μέσο υψόμετρο (Winter, 2001).

Σε αυτόν τον τύπο εδάφους, τα υψίπεδα εκτείνονται σχετικά υψηλότερα σε σχέση με τις πεδινές περιοχές. Η αντίστοιχη ευρύτερη υδρολογική περιοχή αποτελείται από στενές πεδιάδες (μικρού πλάτους) που διαχωρίζονται από τα υψίπεδα με πλευρές πρανών των οποίων η κλίση και το ύψος ποικίλει, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2-8. Η συγκεκριμένη περιγραφή είναι χαρακτηριστικό των οροπεδίων και των λεκανών με μεγάλη τιμή μέσου υψόμετρου.

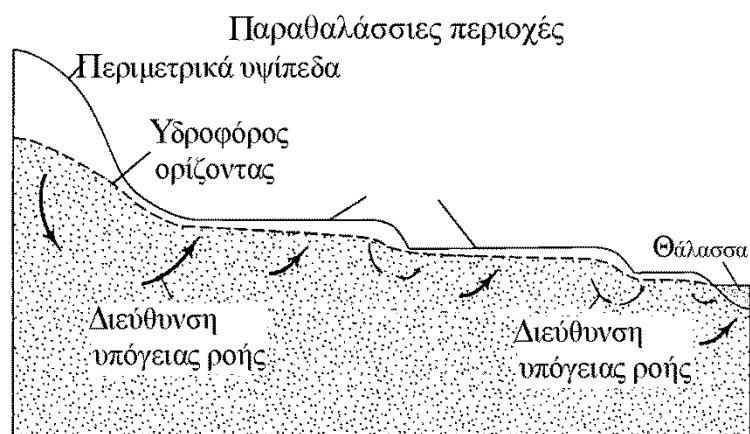
### Παραποτάμιες κοιλάδες



Εικόνα 2-9. Χαρακτηριστικά παραποτάμιων κοιλάδων (Winter, 2001).

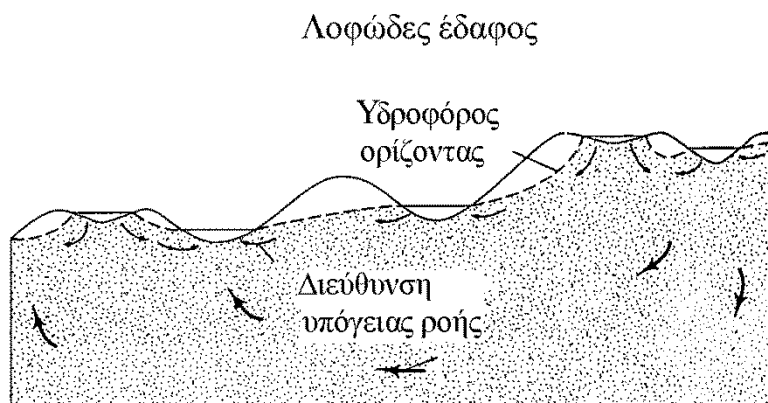
Μια ευρύτερη υδρολογική περιοχή που αποτελείται από μία ή περισσότερες «μικρότερες» FHLU ενσωματωμένες σε μια μεγαλύτερης έκτασης σχετικά πεδινή περιοχή αποτελεί χαρακτηριστικό των παραποτάμιων κοιλάδων (Εικόνα 2-9) ή αντίστοιχα των παράκτιων περιοχών (Εικόνα 2-10). Όπως φαίνεται στις εικόνες, οι περιοχές αυτές μορφολογικά μοιάζουν, αν και βρίσκονται σε διαφορετικό περιβάλλον.





Εικόνα 2-10. Χαρακτηριστικά παράκτιων περιοχών (Winter, 2001).

Τέλος μια υδρολογική περιοχή, που αποτελείται από πολυάριθμες «μικρότερες» FHLU ως συμπληρωματικά και αλληλοσυνδεδεμένα τμήματα ορεινών και πεδινών περιοχών χαρακτηρίζει εδάφη με παγετώνες ή αμμόλοφους και κατ'επέκταση, η ένωση όλων αυτών δημιουργεί μια ακόμα FHLU (Εικόνα 2-11).



Εικόνα 2-11. Χαρακτηριστικά περιοχών με παγετώνες ή ερήμους (Winter, 2001).

Μελέτη για την εφαρμογή υδρολογικής ταξινόμησης του εδάφους, βασισμένη στον κυρίαρχο μηχανισμό απορροής παρουσιάζουν οι Gharari et al. (2011). Βασισμένοι σε παραμέτρους όπως η κλίση του εδάφους, ο δείκτης HAND (Height Above the Nearest Drainage) και η απόσταση από το πλησιέστερο υδατόρευμα, που εύκολα μπορούν να υπολογιστούν και να εξαχθούν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) της λεκάνης απορροής, χωρίζει την περιοχή μελέτης σε τρεις κλάσεις. Οι τρεις κατηγορίες αντιστοιχούν στα τρία κυρίαρχα υδρολογικά καθεστάτα, την άμεση επιφανειακή απορροή (saturation excess overland flow), την ταχεία υπεδάφια (storage excess sub-surface flow) και την κατείσδυση (deep percolation).

Ο δείκτης HAND ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ κάθε κελιού της λεκάνης και του κοντινότερου σε αυτό κελιού που χαρακτηρίζεται ως υδατόρευμα. Σκοπός παρόμοιων μελετών παλαιότερα ήταν η συσχέτιση της τοπογραφίας με την υδρολογική συμπεριφορά του εδάφους και η εξαγωγή συμπερασμάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση των δομών των μοντέλων, τον ορισμό των παραμέτρων και, τέλος, ως προς την ομοιομορφία των λεκανών. Η εφαρμογή της μελέτης έγινε στη λεκάνη του ποταμού Wark στο Λουξεμβούργο, έκτασης 80 km<sup>2</sup>, μέγιστο υψόμετρο 532 m, μέσο υψόμετρο 380 m και ελάχιστο 195 m. Βασικό δεδομένο αποτελεί το ΨΜΕ της λεκάνης, διάστασης κανάβου 5 m και υψομετρικής ανάλυσης 0.01 m. Η ταξινόμηση της λεκάνης έγινε σε τρεις κλάσεις (υγρότοποι, επικλινείς



πλαγιές, οροπέδια - υψίπεδα), τα ονόματα των οποίων δεν συνοδεύονται από τις ιδιότητες των επιστημονικών κλάδων από τους οποίους προέρχονται και, στην ουσία, ορίζονται εκ νέου.

Οι υγράτοποι (wetlands, W), είναι περιοχές στις οποίες η στάθμη του νερού αναμένεται να είναι σε υψηλό επίπεδο σε σχέση τις άλλες δύο κατηγορίες που ορίζονται. Στον κλάδο της οικολογίας, είναι η κορεσμένη περιοχή με νερό, το οποίο, ως κυρίαρχο στοιχείο, επηρεάζει το είδος της χλωρίδας και της πανίδας που θα ευδοκιμήσει (Cowardin et al., 1979). Από υδρολογικής άποψης, οι υγράτοποι αποτελούν ένα ευρύτερο είδος των τοπίων στους οποίους συμπεριλαμβάνονται η παρόχθια ζώνη και η ποτάμια κοιλάδα. Λόγω του μικρού βάθους του υδροφόρου ορίζοντα, μπορούν να θεωρηθούν ως οι περιοχές οι οποίες έχουν περιορισμένη εναπομένουσα χωρητικότητα αποθήκευσης και ως εκ τούτου, επιδεικνύουν γρήγορη απόκριση, ανεξάρτητα από τη θέση τους στη λεκάνη απορροής. Το μικρό βάθος του υδροφόρου ορίζοντα σημαίνει ότι στην υγρή περίοδο ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους.

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η υποδιαίρεση της κατηγορίας αυτής σε επίπεδους υγροτόπους ( $W_{Flat}$ ), η οποία χαρακτηρίζεται από ήπιες έως μέτριες κλίσεις και σε επικλινείς υγροτόπους ( $W_{slopped}$ ), όπως, για παράδειγμα, τα πρανή των παρόχθιων περιοχών, όπου παρατηρείται αισθητά κεκλιμένο έδαφος κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής του ρεύματος. Αποτέλεσμα του διαχωρισμού αυτού είναι το γεγονός πως καθώς και οι δύο κατηγορίες έχουν χαμηλή τιμή HAND, διακρίνονται, όμως, από διαφορετικές τιμές κλίσης. Κυρίαρχο καθεστώς ροής στην κατηγορία αυτή αποτελεί η κορεσμένη επίγεια ροή (saturation overland flow).

Οι επικλινείς πλαγιές (hillslopes, H), είναι οι ενδιάμεσες περιοχές που συνδέουν κοίλες και κυρτές περιοχές αναγλύφου (Chorley et al., 1984). Επιλέχθηκαν λόγω της ευρέως διαδεδομένης αντίληψης ότι οι πλημμύρες δημιουργούνται κυρίως στις περιοχές αυτές, και επομένως αποτελούν ύψιστης σημασίας υδρολογική γήινη επιφάνεια. Στην εδαφική αυτή μονάδα, η άμεση υπεδάφια απορροή (rapid subsurface flow) αποτελεί το κυρίαρχο υδρολογικό καθεστώς, που την επηρεάζει άμεσα καθώς πληροί τις δύο απαραίτητες προϋποθέσεις των εδαφών που αντιστοιχούν σε αυτό τον τύπο: την αποστράγγιση και τη συγκράτηση της εδαφικής υγρασίας (moisture retention).

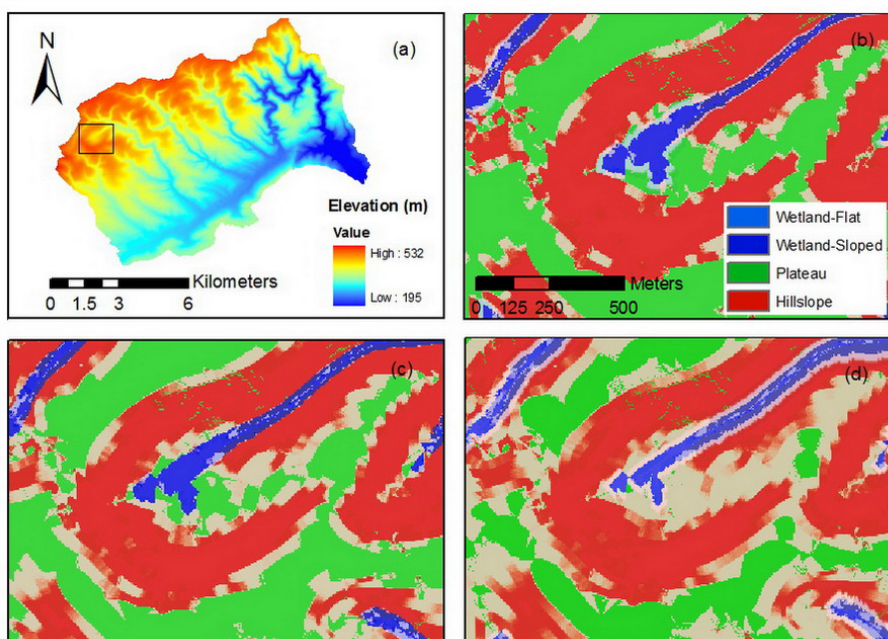
Ως τελευταία κατηγορία ορίζονται τα υψίπεδα ή οροπέδια (plateaux), ως περιοχές επίπεδες ή με μικρές υψομετρικές διακυμάνσεις, που απαντώνται σε υψηλότερα υψόμετρα σε σχέση με τα ρέματα. Λόγω των χαμηλών τιμών των κλίσεων και με το συγκριτικά χαμηλό επίπεδο των υπογείων υδάτων, στα οροπέδια λαμβάνουν χώρα λειτουργίες αποθήκευσης και εξάτμισης, με κυρίως κάθετες διαδικασίες ροής και συγκεκριμένα βαθιά διήθηση (deep percolation) (Savenije, 2010).

Από την ανάλυση των δεδομένων, προέκυψε το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του π. Wark και το υδρολογικό χαρακτήρα ψηφιακό μοντέλο HAND. Λόγω του ότι το μοντέλο HAND εξαρτάται από το υδρογραφικό δίκτυο, το παραγόμενο υδρογραφικό δίκτυο συγκρίθηκε με το χαρτογραφημένο δίκτυο, το οποίο μετρήθηκε με GPS (Global Positioning System). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπαίθρου, συλλέχθηκε πληροφορία για πλήθος σημείων, η οποία ταξινομήθηκε μετά από επιτόπου οπτικές παρατηρήσεις στις τρεις κλάσεις. Στόχος της παραπάνω διαδικασίας ήταν η εκ των υστέρων αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης των μοντέλων σε σχέση με την «επίγεια αλήθεια» και η απόκτηση, καταγραφή όλου του εύρους των τιμών του HAND κατά μήκος του ποταμού από την περιοχή χαμηλών υψομέτρων έως την ορεινή περιοχή.

Στη συνέχεια, με γνωστά τα χαρακτηριστικά εκ των προτέρων που θα κατατάξουν κάθε σημείο της λεκάνης στην αντίστοιχη κλάση, εφαρμόστηκαν αυστηρές τιμές σε κατώφλια, ώστε κάθε κριτήριο (HAND, κλίση, απόσταση) να διαχωριστεί σε υψηλές και χαμηλές τιμές. Η μετάβαση από τη μία κλάση στην άλλη ουσιαστικά καθορίζεται μέσω ασαφών ορίων

(συνόλων). Το γεγονός της μη αυστηρής μετάβασης μεταξύ των κλάσεων, παρουσιάζει ομοιότητες με τη θεωρία της ασαφούς λογικής.

Στην Εικόνα 2-12 παρουσιάζονται τα διαφορετικά αποτελέσματα της ταξινόμησης για καθέναν από τους συνδυασμούς των κριτηρίων. Στην Εικόνα 2-12a απεικονίζεται το ΨΜΕ της λεκάνης του π. Wark, στην Εικόνα 2-12b, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ταξινόμησης μιας μικρότερης περιοχής της λεκάνης πλησίον παραποτάμου, όπου ως κριτήρια στο μοντέλο ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν ο δείκτης HAND και οι κλίσεις, στην Εικόνα 2-12c τα κριτήρια ταξινόμησης είναι η απόσταση του κελιού από το πλησιέστερο κελί που χαρακτηρίζεται ως κλάδος απορροής του δικτύου και οι κλίσεις, και τέλος στην Εικόνα 2-12d η ταξινόμηση όπου συνεισφέρουν και τα τρία κριτήρια. Παρατηρώντας τις εικόνες υπάρχουν κελιά της λεκάνης που παραμένουν λευκά, τα κελιά αυτά αντιστοιχούν σε περιοχές όπου ταξινομήθηκαν σε παραπάνω από μια κλάσεις και επομένως η αβεβαιότητα καταχώρησης είναι υψηλή.



Εικόνα 2-12: Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μοντέλων ταξινόμησης τμήματος περιοχής παραπόταμου του π. Wark (Gharari et al., 2011).

### 2.3 Μεθοδολογία ταξινόμησης

Γενικά, η ταξινόμηση των γήινων επιφανειών μέσω της οποίας γίνεται ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων της γεωχωρικής ανάλυσης δεδομένων σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών αποτελεί την προτεινόμενη μέθοδο για την μείωση της πολυπλοκότητας των σχέσεων μεταξύ των δεδομένων. Μια τέτοιου είδους ταξινόμηση, είναι προφανές ότι εμπλέκει τις παρατηρήσεις και τις ερμηνείες των χαρακτηριστικών των εδαφικών προτύπων (Bailey, 2004). Στόχος της ομαδοποίησης ετερογενών γήινων επιφανειών είναι η δυνατότητα, που προκύπτει μέσα από την διαδικασία, της κατανόησης μιας, λίγων ή πολλές φορές περισσότερων παραμέτρων, μεταβλητών που συσχετίζονται με τις φυσικές διεργασίες.

Στην συνέχεια, περιγράφονται οι διαδικασίες ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται ευρέως και σημειώνονται στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Στόχος της περιγραφής δεν είναι η σύγκριση των μεθόδων, αφενός γιατί αυτή περιγράφεται σε άλλες εργασίες και αφετέρου γιατί η εφαρμογή κάθε μεθοδολογίας ταξινόμησης εξαρτάται από το είδος της μελέτης.

Οι κλασσικές μέθοδοι ταξινόμησης γήινων επιφανειών περιέχουν μη στατιστικές μεθόδους αλλά και στατιστικά μοντέλα. Οι κυριότερες μέθοδοι μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, είναι:

- η στατιστική ταξινόμηση,
- τα νευρωνικά δίκτυα,
- η ασαφής ταξινόμηση.

Η πιο συνήθης από τις μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις που χρησιμοποιείται είναι η στατιστική. Η στατιστική ταξινόμηση έχει αρκετά μειονεκτήματα, όπως είναι η αδυναμία της να διαχειριστεί δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές κλίμακες. Ακόμη όμως και αν η κλίμακα είναι κοινή, θα πρέπει τα δεδομένα να ανήκουν σε ισοδύναμη περιοχή τιμών (Χατζηχρήστος και Καλλίτσα, 2006).

Τα αποτελέσματα είναι εξαρτώμενα από την περιοχή μελέτης συνολικά και, έτσι, χάνονται τοπικά πρότυπα. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα στους στατιστικούς αλγόριθμους ταξινόμησης, είναι ότι κάθε σημείο είναι μονοσήμαντα ομαδοποιημένο με τα μέλη της δικής του ομάδας και δεν έχει εμφανή ομοιότητα με μέλη άλλων ομάδων. Επίσης, μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα η παρουσία σημείων που δεν μπορούν εύκολα να ομαδοποιηθούν ή βρίσκονται εκτός ομάδων. Ένα άλλο μειονέκτημα των στατιστικών αλγόριθμων είναι ότι μπορεί να «κολλήσουν» σε ένα τοπικό μέγιστο ή ελάχιστο, ενώ τα δεδομένα υποτίθεται ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επίσης, ο κάθε κάναβος έχει το ίδιο βάρος, τα δεδομένα έχουν την ίδια αξιοπιστία και ακρίβεια, και η μορφολογία των τάξεων στο N-δισδιάστατο χώρο έχει υπερσφαιροειδή μορφή (Openshaw, 1978, 1994).

Στις στατιστικές μεθόδους συγκαταλέγεται και η παραμετρική μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Classifier, MLC) που συνήθως χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις δεδομένων πολλών μεταβλητών, όπως, για παράδειγμα, τα πολυφασματικά τηλεπισκοπικά δεδομένα. Θεωρείται συνήθης μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης και χρησιμοποιείται ευρέως, λόγω της αξιοπιστίας και τη απλότητάς της (Yuras, 1996). Η βασική μεθοδολογία της ταξινόμησης, απαιτεί να είναι εκ των προτέρων γνωστά τα χαρακτηριστικά κάθε τελικής τάξης (αξιοποίηση μετρήσεων πεδίου), να αναγνωριστούν αυτές οι περιοχές και να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, οι φασματικές υπογραφές τους ως δεδομένα εκπαίδευσης του συστήματος με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί σχέση μεταξύ των δεδομένων (πολυφασματικές περιοχές) και των γνωστών κλάσεων. Τέλος, ακολουθεί η ταξινόμηση των υπόλοιπων δεδομένων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της φαίνονται λογικά σε πολλές περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά, όμως, διέπεται από περιορισμούς. Αρχικά, στα δεδομένα εκπαίδευσης: αυτά πρέπει να ακολουθούν την κατανομή Gauss, σηματοδοτώντας ένα βαθμό ομοιογένειας στα δεδομένα. Επιπλέον, ως επιβλεπόμενη ταξινόμηση απαιτεί δεδομένα εκπαίδευσης, με αποτέλεσμα η εκ των προτέρων γνώση να είναι απαραίτητη. Τέλος, όπως συνήθως συμβαίνει με τις στατιστικές μεθόδους, όσο περισσότερα δεδομένα εκπαίδευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τόσο ακριβέστερα είναι τα αποτελέσματα της ταξινόμησης.

Επιγραμματικά, στις στατιστικές μεθόδους ανήκουν ακόμα ο αλγόριθμος k-means, η πολυδιάστατη παλινδρόμηση και η ιεραρχική μέθοδος ταξινόμησης κατά Ward, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην ταξινόμηση των γήινων επιφανειών (Bolliger, 2005; Bolliger and Mladenoff, 2005; Lin and Chen, 2005; Lin and Chen, 2006; Wardrop et al., 2005).

Μια άλλη μέθοδος ταξινόμησης είναι τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία εντάσσονται στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Ως μέθοδος ταξινόμησης τα νευρωνικά δίκτυα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως το ότι χρησιμοποιούν μη γραμμικές σχέσεις, διαχειρίζονται τον θόρυβο και έχουν υψηλή αυτοματοποίηση (Neufeld, 1998). Επιπλέον, χρησιμοποιούνται στην ταξινόμηση των γήινων επιφανειών (Bacao et al., 2005; Bryan, 2006; Ehsani, 2007; Hilbert and Ostendorf, 2001; Hsieh and Jourdan, 2006; Joy and Death, 2004; Lenz and Peters, 2006; Park et al., 2001) αν και εφαρμόζονται σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τις προαναφερόμενες τεχνικές.

Πιθανοί λόγοι της περιορισμένης χρήσης τους ενδέχεται να είναι η πολυπλοκότητα της διαδικασίας, ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων που ο χρήστης πρέπει να ορίσει για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, η πληθώρα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (τύποι αυτών), σχετικές δημοσιεύσεις στις οποίες διερευνάται το γεγονός της χρησιμότητας τους. Παρ' όλα αυτά, τα νευρωνικά δίκτυα επιδεικνύουν τη δύναμη και την ευελιξία τους, καθώς χειρίζονται σύνθετα, μη γραμμικά, πολλών διαστάσεων δεδομένα, τα οποία δεν είναι απαραίτητο να ακολουθούν κάποια κατανομή, όπως συμβαίνει στα στατιστικά μοντέλα. Από τη μεγάλη ποικιλία των τύπων των νευρωνικών δικτύων, που αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες τα δημοφιλέστερα είναι Multi-Layer Perceptron (MLP) network, the Radial Basis Function (RBF) network, the Recurrent Neural Network (RNN), and the Adaptive Resonance Theory (ART) network.

Τέλος, ο συνδυασμός ασαφούς ταξινόμησης και νευρωνικών δικτύων είναι μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή για τη διαδικασία της ταξινόμησης (Bezdek et al., 1984). Η μέθοδος αυτή υλοποιείται μέσω του αλγόριθμου Fuzzy Kohonen, που είναι ένας συνδυασμός του αλγόριθμου Fuzzy C-means της ασαφούς ταξινόμησης και του νευρωνικού δικτύου Kohonen (Bezdek et al., 1994).

### 2.3.1 Ασαφής Λογική

Η αβεβαιότητα στο φυσικό κόσμο έχει ως αποτέλεσμα η διαδικασία της προσομοίωσης ενός φυσικού συστήματος με στόχο τη λήψη μιας απόφασης να επηρεάζεται σημαντικά από την εμπειρία του ερευνητή και τις πληροφορίες που διατίθενται και μπορούν να αξιολογηθούν. Η τελική απόφαση είναι ορθή ή αληθής κατά κάποιο βαθμό βεβαιότητας. Τα πάντα είναι θέμα βαθμού αληθείας (Zadeh, 1965).

Στην προσέγγιση του πραγματικού κόσμου με την κλασσική Αριστοτελική λογική, κάθε πρόταση μπορεί να είναι είτε αληθής είτε ψευδής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα ενδιάμεσα ενδεχόμενα όπως, περίπου αληθές ή μερικώς ψευδές.

Η έννοια του ασαφούς συνόλου εισήχθη από τον Zadeh (1965) και δημιούργησε πραγματική επανάσταση στο χώρο των Μαθηματικών. Η βασική ιδέα για τον ορισμό των ασαφών συνόλων ήταν η γενίκευση της χαρακτηριστικής συνάρτησης ενός συνόλου  $A$ . Ως γνωστόν, κάθε υποσύνολο  $A$  ενός κλασσικού (μη ασαφούς) συνόλου  $X$  μπορεί να ταυτιστεί με τη χαρακτηριστική του συνάρτηση  $I_A : X \rightarrow \{0, 1\}$  συνεπώς ένα σύνολο  $A$  μπορεί να οριστεί και από τη χαρακτηριστική του συνάρτηση. Η τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης ενός υποσυνόλου  $A$  του  $X$  για κάθε  $x$  του  $X$  εκφράζει το βαθμό (0 ή 1) με τον οποίον το στοιχείο  $x$  ανήκει στο σύνολο  $A$ .

Η ασαφής λογική δίνει πλέον τη δυνατότητα απάντησης ερωτημάτων όπως αυτού του παράδοξου του σωρού άμμου του Ευκλείδη: «πόσοι κόκκοι άμμου αποτελούν ένα σωρό;». Στόχος είναι η μοντελοποίηση εννοιών και χαρακτηριστικών με μια αίσθηση βαθμιαίας αλήθειας, που ακολουθεί την αβεβαιότητα της πραγματικότητας. Η αβεβαιότητα στις υδρολογικές διεργασίες απορρέει από την φυσική πολυπλοκότητα των υδρολογικών παραμέτρων και την μεταβλητότητα στη χωρο-χρονική κλίμακα των υδρολογικών φαινομένων, καθώς επίσης και από την "ανεπάρκεια" της δικιάς μας γνώσης (Kundzewicz et al., 2007).

Ο Bernier και οι συνεργάτες του (1987) διακρίνουν τη σύνδεση της φυσικής αβεβαιότητας με την τυχαιότητα των φυσικών διαδικασιών των υδρολογικών διεργασιών και την τεχνολογική αβεβαιότητα συμπεριλαμβανομένων δειγματοληπτικών σφαλμάτων και τις αβεβαιότητες κατά τη μοντελοποίηση.

Οι Beck και Straten (1983) προσδιορίζει την αβεβαιότητα και «το σφάλμα» στο στάδιο συλλογής δεδομένων, στην έλλειψη μετρήσεων, στην αβεβαιότητα μεταξύ των υδρολογικών μεταβλητών και στην αβεβαιότητα εκτίμησης των παραμέτρων κατά την μοντελοποίηση.

Όλα τα παραπάνω συνηγορούν στην υλοποίηση μεθόδων και τεχνικών που να προσαρμόζονται στην πραγματικότητα. Ο τομέας της ταξινόμησης των γήινων επιφανειών αποτελεί ενδεικτική περίπτωση εφαρμογής της ασαφούς λογικής.

Η χρήση της ασαφούς λογικής κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης των γήινων επιφανειών, επιτρέπει τα όρια των κλάσεων να μην είναι αυστηρά προκαθορισμένα και η μετάβαση από τη μία κλάση στην άλλη να γίνεται ομαλότερα. Κατ' επέκταση, ένα στοιχείο μπορεί να ανήκει σε περισσότερες από μία κλάσεις. Η έκφραση αυτή για κάθε στοιχείο αντικατοπτρίζεται στην τιμή της συνάρτησης συμμετοχής (membership function) για κάθε μία από τις κλάσεις, το άθροισμα των οποίων ισούται με τη μονάδα.

Ο Bezdek και οι συνεργάτες του (1984) υλοποίησαν μια εξαιρετικά ισχυρή μέθοδο ταξινόμησης, για τη διαχείριση ασαφών δεδομένων. Ο αλγόριθμος υλοποίησης είναι μια προέκταση του γνωστού c-means, ή hard c-means που χρησιμοποιούνται στην κλασική ταξινόμηση (crisp classification) (Ross, 1995). Ο αλγόριθμος απαιτεί ως στοιχεία εισόδου τον αριθμό  $c$  των ομάδων - περιφερειών στις οποίες θα ομαδοποιηθούν τα δεδομένα, την απόσταση που θα χρησιμοποιηθεί (συνήθως είναι η ευκλείδεια) καθώς και τον βαθμό ασάφειας  $m$ , που αποδίδει ουσιαστικά την επικάλυψη των ομάδων – περιφερειών (Bezdek et al., 1984).

Οι μέθοδοι ταξινόμησης γενικότερα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη φύση του αντικειμένου, σε αυστηρές αν κάτι ανήκει αυστηρά σε κάποια κλάση και σε ευέλικτες – ασαφείς αν το αντικείμενο ανήκει σε παραπάνω από μια κλάσεις με κάποιο βαθμό συμμετοχής. Όλοι οι αλγόριθμοι ταξινόμησης στηρίζονται στη θεωρία των ασαφών συνόλων και αρκετοί στον αλγόριθμο Fuzzy c-means (FCM) που αρχικά προτάθηκε από τον Dunn (1974) και βελτιώθηκε από τον Bezdek (1981). Ο πυρήνας της θεωρίας των ασαφών συνόλων είναι η συνάρτηση συμμετοχής, η οποία παρουσιάζει το βαθμό συμμετοχής ενός αντικείμενου σε κάποιο σύνολο με αριθμητικό τρόπο.

Ο αλγόριθμος FCM ταξινομεί ένα σύνολο στοιχείων  $X = \{x_1, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R}^p$ , σε  $c \in \{2, \dots, n-1\}$  επικαλυπτόμενες ή ασαφείς κλάσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από τα κέντρα τους. Η απόδοση των στοιχείων στις ασαφείς κλάσεις επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση της παρακάτω συνάρτησης στόχου (objective function) χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία:

$$J_{FCM}(M, C) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \|X_k - v_i\|^2 \quad (2.1)$$

Στην παραπάνω εξίσωση,  $M$  είναι ο πίνακας συμμετοχής,  $C$  είναι ο πίνακας με τα κέντρα κάθε κλάσης,  $c$  είναι ο αριθμός των κλάσεων,  $n$  είναι ο αριθμός των σημείων, που αποτελούν τα δεδομένα και  $u_{ik}^m$  είναι ο βαθμός συμμετοχής του δείγματος  $k$  στην κλάση  $i$ . Στην περίπτωση που η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του επιπέδου  $X_k$  και το κέντρου της κλάσης  $v_i$  είναι μεγάλη, η  $J_{FCM}$  ελαχιστοποιείται. Στην περίπτωση, όπου η απόσταση είναι μικρή, η συνάρτηση συμμετοχής προσεγγίζει τη μονάδα. Η παράμετρος  $m \in (1, \infty)$  ελέγχει το βαθμό ασάφειας ή αλλιώς το βαθμό επικάλυψης του αποτελέσματος της ταξινόμησης, στην περίπτωση. Αν  $m = 1$ , το αποτέλεσμα είναι η Αριστοτελική ταξινόμηση όπου τα στοιχεία θα ανήκουν ή όχι στην κλάση, ενώ στην περίπτωση που η παράμετρος  $m$  πλησιάζει το άπειρο, το αποτέλεσμα της ταξινόμησης προσεγγίζει το μέγιστο βαθμό ασάφειας. Ένα λογικό εύρος τιμών, για το δείκτη  $m$  θεωρείται από  $1.7 < m < 2.3$ .

Βασικό πλεονέκτημα της ασαφούς ταξινόμησης είναι το ότι επιτρέπεται η διαδικασία της γενίκευσης σε περιπτώσεις πολλών δεδομένων και η εξαγωγή βασικών προτύπων. Από την άλλη πλευρά, λόγω του μικρού αριθμού παραμέτρων εισαγωγής, οι παράμετροι αυτές ( $c, m$ ) αποτελούν κομβικό σημείο της διαδικασίας και, ως εκ τούτου, υπάρχει πληθώρα αλγορίθμων για τον προσδιορισμό τους. Καταληκτικά, στα αποτελέσματα της ταξινόμησης FCM, λόγω



του πίνακα των τιμών της συνάρτησης συμμετοχής, εξαλείφεται η έννοια του αυστηρού ορίου και παρέχεται η δυνατότητα εξέτασης και ερμηνείας της επικάλυψης των κλάσεων (μερική συμμετοχή), που πιθανά να περιέχει χρήσιμες πληροφορίες (π.χ. υδρολογικές, χωρικές, γεωλογικές) (Güler et al., 2012).

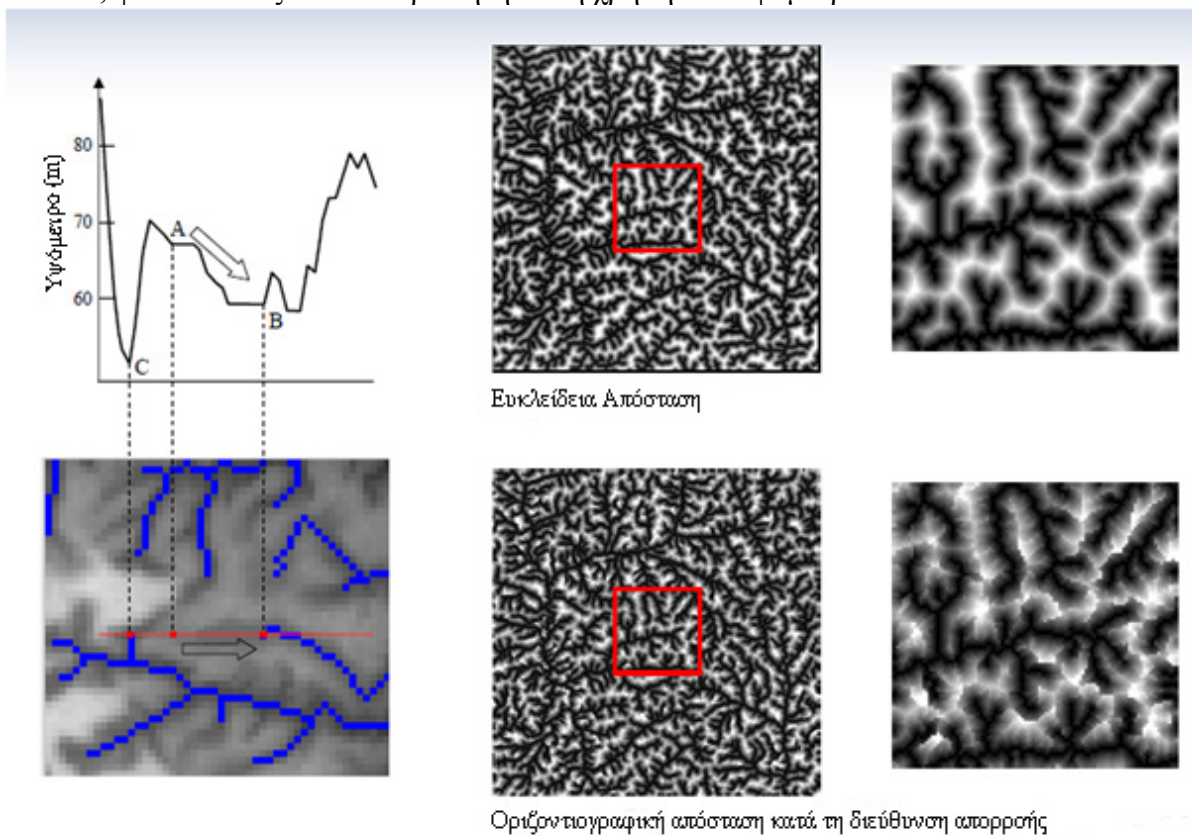
### 2.3.2 Κριτήρια

Σε θέματα ταξινόμησης η γνώση της συμπεριφοράς του προς μελέτη αντικειμένου και η ορθή επιλογή των χαρακτηριστικών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια για την εισαγωγή παρόμοιων αντικειμένων στην ίδια κλάση είναι σημαντική. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη τη διεξοδική μελέτη των χαρακτηριστικών εκ των προτέρων με στόχο την ανάλυση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης.

Η γνώση των κριτηρίων είναι ανεξάρτητη με τη μέθοδο της ταξινόμησης η οποία τελικά θα επιλεγεί. Σε περιπτώσεις που εφαρμόζεται για παράδειγμα ασαφής ταξινόμηση, αν και η ευκολία της διαδικασίας οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρήστης αποφασίζει για δύο μόνο παραμέτρους (το πλήθος των κλάσεων και το βαθμό ασάφειας), πρέπει να είναι σε θέση να αναλύσει, εκτιμήσει, αποφασίσει αν θα δεχθεί το αποτέλεσμα ή όχι.

Ως προς την ταξινόμηση των γήινων υδρολογικών επιφανειών, στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιούνται τα κριτήρια της κλίσης του εδάφους, της απόστασης κάθε σημείου της λεκάνης από τον κοντινότερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου και του ψηφιακού μοντέλου και του HAND.

Στην Εικόνα 2-13 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δύο διαφορετικών υπολογισμών της απόστασης ως προς το αποτέλεσμα. Στο πάνω αριστερά τμήμα της εικόνας, φαίνεται πως η χρήση της ευκλείδειας απόστασης δίνει ομαλότερο αποτέλεσμα σε σχέση με τον οριζοντιογραφικό υπολογισμό αυτής. Επομένως εκτός από τη θέση του υδρογραφικού δικτύου, φαίνεται πως είναι απαραίτητη και η χρήση του υψομέτρου.



Εικόνα 2-13: Υπολογισμός "υδρολογικής" απόστασης (Renno et al., 2008).

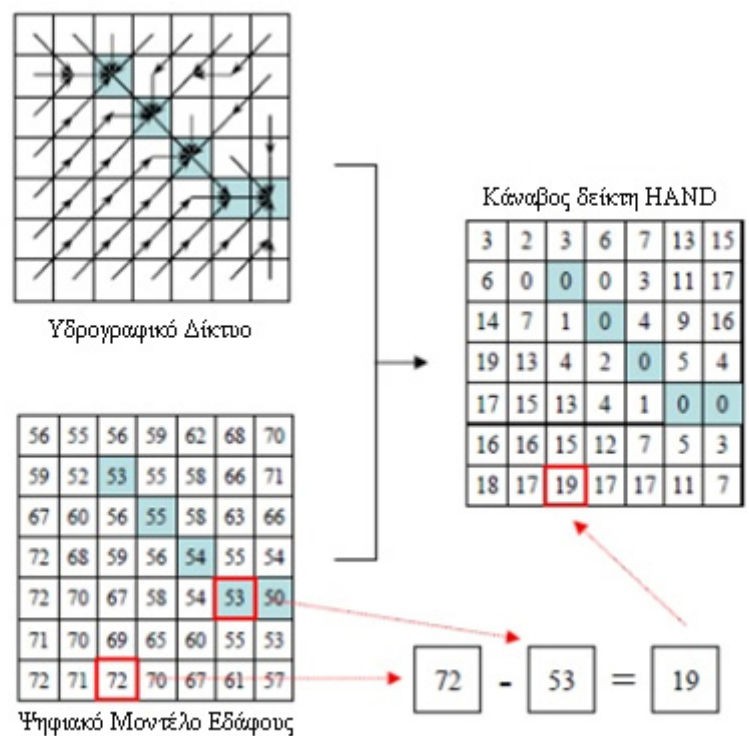
Πολλές φορές για την ολοκληρωμένη ταξινόμηση των γήινων επιφανειών, εκτός από τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου, χρειάζεται και η γνώση της κίνησης των υπόγειων υδάτων. Είναι σημαντικό επομένως να υπάρχει μια γενική κατανόηση της κίνησης του υπόγειου ύδατος, (Toth, 1963). Επιπλέον, χρειάζεται η γνώση του γεωλογικού υπόβαθρου, το οποίο σε συνδυασμό με την κίνηση των υπόγειων υδάτων, παρουσιάζει την πλήρη υδρολογική υπόγεια εικόνα της λεκάνης απορροής.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα γίνει μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής ως προς τα κριτήρια HAND και κλίσεις του εδάφους. Επικουρικά και για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων εκτελείται ταξινόμηση και με την προσθήκη του τρίτου κριτηρίου της απόστασης από τον κοντινότερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου.

### **2.3.3 HAND, ένα υδρολογικό κριτήριο ταξινόμησης**

Για την υδρολογική ταξινόμηση των γήινων επιφανειών βασικός παράγοντας καθορισμού του αποτελέσματος είναι το υδρολογικό χαρακτήρα ψηφιακό μοντέλο εδάφους HAND (Height Above the Nearest Drainage). Ο όρος εισάγεται από τους Renno et al. (2008), είναι ουσιαστικά, ένας δείκτης που ομαλοποιεί το ανάγλυφο της περιοχής, σύμφωνα με τα σχετικά υψόμετρα που υπολογίζονται κατά μήκος του δικτύου αποστράγγισης. Με τον τρόπο αυτό, παρουσιάζεται η τοπογραφία της περιοχής μελέτης, ως προς το τοπικό δυναμικό αποστράγγισης. Το τροποποιημένο ψηφιακό μοντέλο μπορεί να ταξινομηθεί σύμφωνα με τις τιμές των σχετικών κατακόρυφων αποστάσεων, που υπολογίζονται μεταξύ κάθε στοιχείο της λεκάνης και του κοντινότερου κλάδου του υδρογραφικού δικτύου, κατά μήκος των γραμμών ροής. Τα όρια των κλάσεων καθορίζουν τις κατηγορίες των υδάτινων εδαφικών περιβαλλόντων. Σαν αρχική εκτίμηση, ως προς την ποσότητα του εδαφικού νερού, το ψηφιακό μοντέλο HAND εξερευνά τη συνέργεια μεταξύ των ψηφιακών δεδομένων που αναφέρονται στην τοπογραφία της περιοχής μελέτης, ως προς το τοπικό υδρογραφικό δίκτυο και των μοντέλων ανάγλυφου, δίνοντας την ευκαιρία επίλυσης δύσκολων υδρολογικών προβλημάτων. Ουσιαστικά, το ψηφιακό μοντέλο HAND επιτρέπει την πραγματοποίηση υπολογισμών για την περιγραφή, την κατανόηση και την πρόβλεψη της αποθήκευσης του νερού και των κινήσεων αυτού στην επιφάνεια του εδάφους (Moore et al., 1991).

Το μοντέλο HAND ομαλοποιεί την τοπογραφία της περιοχής, λαμβάνοντας υπ' όψιν το δίκτυο αποστράγγισης. Η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται σε δύο στάδια. Αρχικά, εκτελείται μια σειρά από υπολογισμούς ώστε να δημιουργηθεί ένα ορθό υδρολογικά ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (ΨΜΕ). Κατά τη παραπάνω διαδικασία, ορίζονται οι γραμμές ροής και προσδιορίζεται το υδρολογικό δίκτυο (δίκτυο αποστράγγισης). Στη συνέχεια, συνδυάζεται η πληροφορία του δικτύου αποστράγγισης με αυτήν του ΨΜΕ και ολοκληρώνεται ο υπολογισμός του δείκτη HAND (Εικόνα 2-14).



Εικόνα 2-14: Μέθοδος υπολογισμού HAND (Renno et al., 2008).

Σημειώνεται ότι ο ορθός ορισμός του υδρογραφικού δικτύου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον υπολογισμό του HAND, καθώς κάθε κλάδος του υδρολογικού δικτύου συμβάλλει στον υπολογισμό των τροποποιημένων υψομέτρων του ανάγλυφου, δηλαδή των τιμών του δείκτη HAND. Επιπλέον, το υδρογραφικό δίκτυο που είναι προϊόν της διαδικασίας διόρθωσης ως προς την υδρολογική συνέπεια του αρχικού μοντέλου ανάγλυφου, παράγεται ή προσαρμόζεται και αντανακλά στα αρχικά δεδομένα της περιοχής. Η προσαρμογή του παραγόμενου υδρογραφικού δικτύου πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός κατωφλίου προσδιορισμού του ψηφιακού υδρογραφικού δικτύου.

Το δεύτερο και ουσιαστικό μέρος της διαδικασίας χρησιμοποιεί τις τοπικές διευθύνσεις αποστράγγισης και το υδρογραφικό δίκτυο για την δημιουργία του τροποποιημένου αποστραγγιστικού χάρτη, ο οποίος τελικά θα χρησιμοποιηθεί από τον αλγόριθμο υπολογισμού του HAND.

Ο διαχωρισμός των κλάσεων γίνεται με εύρος των υψομετρικών διαφορών από το κοντινότερο υδατόρευμα, που χρησιμοποιείται ως επίπεδο αναφοράς που φέρει ομοιόμορφο υδρολογικό ενδιαφέρον.

#### 2.3.4 Κλάσεις

Το γήινο ανάγλυφο αποτελεί τον αντικατοπτρισμό της αλληλένδετης δράσης των τεκτονικών δυνάμεων (δυνάμεις στο φλοιό της γης) και των εξωγενών διεργασιών (λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών και της διαβρωτικής επενέργειάς τους). Λόγω της μορφολογίας του ανάγλυφου και της ύπαρξης του υδρογραφικού δικτύου, η παρουσία συγκεκριμένων τύπων εδάφους είναι άμεσα συνυφασμένη με την τοπογραφία, όπως, για παράδειγμα, η ύπαρξη κοιλάδων.

Επιτακτική ανάγκη είναι ο λόγος του ορισμού των κλάσεων στις οποίες πρόκειται να ταξινομηθούν οι υδρολογικές λεκάνες. Στόχος του ορισμού των κλάσεων είναι αφενός η σαφής απόδοση της κατάστασης που επικρατεί στην πραγματικότητα σε κλίμακα λεκάνης απορροής και αφετέρου η μετέπειτα παρουσίαση των χαρακτηριστικών (αριθμητικών και



ποιοτικών) της κάθε κλάσης δίνοντας τη δυνατότητα βέλτιστης προσομοίωσης αυτής σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Το πλήθος και το είδος των κλάσεων για κάθε ευρύτερη περιοχή μελέτης μπορεί να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα και να περιορίζεται από τις συνθήκες της ευρύτερης περιοχής. Ένα ακραίο παράδειγμα αποτελεί ο καθορισμός κλάσης με έντονη κλίση σε περιοχές όπου είναι κυρίως πεδινές ή ο καθορισμός κλάσης με τα χαρακτηριστικά του υδροτόπου σε περιβάλλον ερήμου.

Η εφαρμογή του δείκτη HAND σε μια μεγάλης έκτασης λεκάνη απορροής, στην Κεντρική Αμαζονία, είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση τεσσάρων ειδών εδαφικών κατηγοριών:

- Περιοχές κοντά στο ποτάμι, όπου το έδαφος είναι κορεσμένο από νερό, γεγονός που αποδεικνύει πως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι κοντά στην επιφάνεια, ή, πολλές φορές, ταυτίζεται με αυτήν, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας μόνιμος βάλτος,
- Απομακρυσμένες από το ποτάμι περιοχές, όπου η επιφάνεια του εδάφους είναι μόνιμα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, ορίζοντας μια ζώνη μετάβασης που ονομάζεται οικότοπος, όπου η ακόρεστη ζώνη εκτείνεται σε βάθος 2 m,
- Μακρινές περιοχές από το ποτάμι, όπου το ανάγλυφο είναι έντονο, σχηματίζοντας απότομη πλαγιά, όπου σταδιακά η ακόρεστη ζώνη μετατρέπεται σε κυρίαρχο εδαφικό περιβάλλον, και
- Πολύ μακρινές από το ποτάμι περιοχές, ή, περιοχές κατά μήκος του υδροκρίτη όπου η εδαφική κλάση μετονομάζεται σε οροπέδιο και η ακόρεστη ζώνη είναι πλέον παχύτερη από 30 m.

## **2.4 Παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται ο δείκτης HAND**

### **2.4.1 Υδατόρευμα**

Στη βιβλιογραφία, υπάρχει πληθώρα αλγορίθμων οι οποίοι υπολογίζουν το υδρογραφικό δίκτυο των λεκανών απορροής, στηριζόμενοι σε διαφορετικά θεωρητικά υπόβαθρα και χρησιμοποιώντας ως δεδομένο το ΨΜΕ. Ο Soille et al. (2003) ομαδοποίησε τους παραπάνω αλγόριθμους σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ο αλγόριθμος στηρίζεται στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης ενώ στη δεύτερη κατηγορία, αυτός στηρίζεται στα υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

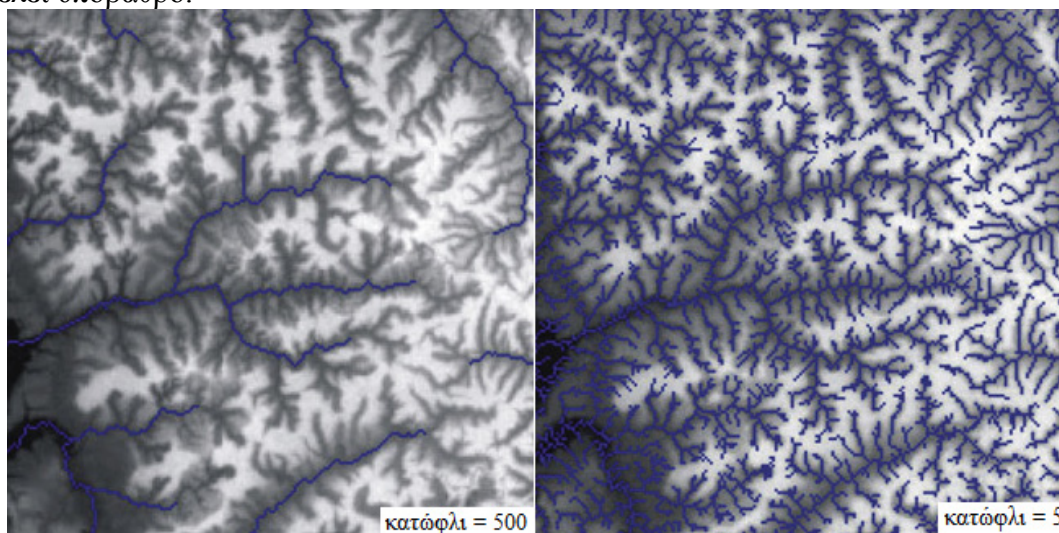
Το θέμα του ορισμού του ορίου από το οποίο θα πρέπει να χαρακτηρίζεται κάποιο κελί ως υδρογραφικό δίκτυο, και κατ' επέκταση, του ορισμού του σημείου της λεκάνης απορροής από όπου θα ξεκινάει το υδρογραφικό δίκτυο απασχόλησε και συζητήθηκε από τους Montgomery and Dietrich (1988).

Στον υπολογισμό του υδρολογικού χαρακτήρα ψηφιακού μοντέλου HAND, η ύπαρξη του υδρογραφικού δικτύου είναι καθοριστικής σημασίας. Βάσει των παραπάνω, ο δείκτης HAND είναι ευαίσθητος στην τιμή του ορίου (κατώφλι) με την οποία δημιουργείται το υδρογραφικό δίκτυο.

Η τιμή του κατώφλιου ορίζεται διαφορετικά ανάλογα με το είδος της περιοχής ενδιαφέροντος, Οι Renno et al. (2008) διαπίστωσε πως αλλαγή του ορίου μεταξύ των τιμών 47 και 92 δεν προκάλεσε καμία διαφορά στην ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου, γεγονός που επαλήθευσε και με παρατηρήσεις υπαίθρου. Γενικότερα, μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές κατώφλιου παράγουν μεγαλύτερης ή μικρότερης ιεράρχησης υδρογραφικό δίκτυο (Renno et al., 2008). Η Εικόνα 2-15 παρουσιάζει την επίδραση στο ψηφιακό μοντέλο

HAND, των δύο ακραίων τιμών. Αν το παραγόμενο υδρογραφικό δίκτυο, αντιστοιχεί στο πραγματικό, τότε ο δείκτης HAND έχει αντίστοιχα καλή προσαρμογή (Renno et al., 2008).

Σε προγράμματα όπως το ArcGIS, το υδρογραφικό δίκτυο παράγεται ανάλογα με το πλήθος των κελιών που απορρέουν σε κάθε κελί. Θεωρητικά, στο κελί που αποτελεί την έξοδο της λεκάνης, απορρέει το σύνολο των κελιών της λεκάνης απορροής μειούμενο κατά ένα. Αν επομένως η τιμή για το κελί το οποίο ελέγχεται είναι μεγαλύτερη από την τιμή του κατωφλίου τότε το κελί χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο, σε άλλη περίπτωση αποτελεί υπόβαθρο.



Εικόνα 2-15: Παραγόμενο υδρογραφικό δίκτυο, εξαρτώμενο από την τιμή του κατωφλίου (Renno et al., 2008).

Λόγω του ορισμού του δείκτη HAND, είναι αναμενόμενο σε περιοχές με πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, οι τιμές του HAND να είναι μικρότερες σε σχέση με τις τιμές των περιοχών έντονου μορφολογικού αναγλύφου.

#### 2.4.2 Εξομάλυνση ΨΜΕ

Η ακρίβεια υπολογισμού του δείκτη HAND, εξαρτάται από με την υψομετρική ακρίβεια των αρχικών δεδομένων. Αντίθετα, με τη χρήση των ΨΜΕ, όπου επιδιώκεται η βέλτιστη υψομετρική πληροφορία, στην περίπτωση της ταξινόμησης με τη χρήση του HAND, η ακρίβεια αυτή είναι υπεύθυνη για την εισαγωγή σφαλμάτων. Επομένως, κελιά τα οποία αποτελούν, αμελητέες υδρολογικά τοπικές εξάρσεις του αναγλύφου, όπως περιοχές απότομης αλλαγής κλίσεων, ταξινομούνται λανθασμένα. Για την μείωση της εμφάνισης του παραπάνω προβλήματος χρησιμοποιούνται φίλτρα εξομάλυνσης.

Η επιλογή κάθε φορά της συνάρτησης με την οποία θα πραγματοποιηθεί η εξομάλυνση εξαρτάται από το είδος των δεδομένων. Τα δεδομένα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αυτά που περιγράφουν φαινόμενα που εξελίσσονται παράλληλα με το χρόνο και παρουσιάζονται υπό μορφή χρονοσειρών και στα στατικά, όπως οι εικόνες.

Η εξομάλυνση δεδομένων της δεύτερης κατηγορίας, γίνεται με φίλτρα, συνηθέστερα είναι αυτά που ακολουθούν την κατανομή Gauss. Σε αυτή την περίπτωση, εφαρμόζεται ένα κινούμενο χωρικό παράθυρο εξομάλυνσης, διαφοροποιούμενου μεγέθους ανάλογα με την περίπτωση, με μέση τιμή ίση με μηδέν και τυπική απόκλιση ανάλογη της ακρίβειας των δεδομένων, επιτρέποντας την αφαίρεση των εξάρσεων ("υδρολογικός θόρυβος") του αναγλύφου, διατηρώντας την υψηλή ανάλυση (Gharari et al., 2011).

Στην περίπτωση όπου επιλεγεί ένας πίνακας  $3 \times 3$ , σε κάθε κελί εκχωρείται η σταθμισμένη τιμή του υψομέτρου των οχτώ γειτονικών κελιών με βάση την κατανομή Gauss. Για ψηφιακά ΨΜΕ με χαμηλή ανάλυση (50 m, 100 m μέγεθος κελιού) δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή

της διαδικασίας της εξομάλυνσης, καθώς αυτή δεν βελτιώνει αισθητά τα αποτελέσματα της ταξινόμησης (Gharati et al., 2011). Η ασυμμετρία στην κατανομή των τιμών του ψηφιακού μοντέλου HAND, είναι ανάλογη της ομαλότητας του δείκτη, με αποτέλεσμα η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης σε μικρές τιμές HAND, να αντιστοιχεί σε ομαλότερο ανάγλυφο του HAND, που συνεπάγεται χαμηλή ικανότητα να διακρίνει τοπικά φαινόμενα (Renno et al., 2008).



## 3 Περιοχές Μελέτης

---

### 3.1 Γενικά

Οι μορφολογικοί τύποι που εμφανίζονται σε μία περιοχή έχουν άμεση σχέση τόσο με την γεωλογικο-τεκτονική δομή της όσο και με τη δράση των παραγόντων αποσάθρωσης και διάβρωσης. Σε μία λεκάνη απορροής, οι σπουδαιότερες διεργασίες που παρατηρούνται είναι η δημιουργία απορροής από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και οι μεταβολές της χρονικά και τοπικά, η αποσάθρωση του εδάφους, η στερεομεταφορά των υδατορευμάτων, η οποία σχετίζεται με τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών προς τις κατάντη περιοχές κ.λπ.

Οι προαναφερθείσες διεργασίες επηρεάζονται τόσο από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά όσο και από τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής. Επίσης, σε μεγάλο βαθμό επηρεάζονται από τυχόν μεταβολές του αρχικού καθεστώτος ροής εξαιτίας ανθρωπογενών επεμβάσεων. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής συνοψίζονται κατά κύριο λόγο στο μέγεθος, το σχήμα, το μέσο υψόμετρο, τις κλίσεις, το ανάγλυφο, τη μέση κλίση, τη μέγιστη υψομετρική διαφορά και το βαθμό τραχύτητας της λεκάνης. Από τα παραπάνω, το μέγεθος της λεκάνης απορροής είναι από τα σημαντικότερα μορφολογικά χαρακτηριστικά της, αφού απ' αυτό εξαρτάται ο χρόνος συγκέντρωσης και κατ' επέκταση το υδρογράφημα. Επίσης, σημαντική είναι η κλίση της, αφού όσο μικρότερο το μέγεθός της λεκάνης, τόσο αυξάνεται η κλίση. Από το σχήμα της λεκάνης εξαρτάται και η συνολική απορροή στην έξοδό της. Με βάση αυτό, επιμήκεις λεκάνες έχουν μεγαλύτερο χρόνο συγκέντρωσης από ανάλογης έκτασης ριπιδοειδείς ή κυκλικές και κατά συνέπεια μικρότερες παροχές.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζει τη συμπεριφορά δύο λεκανών του νομού Αττικής. Κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των ΨΜΕ κάθε λεκάνης υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της κάθε μίας από αυτές. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής περιγραφή των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό όλων των απαραίτητων μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου στη διαδικασία της ταξινόμησης.

### 3.2 Κριτήρια επιλογής

Ιδανικά, αρχικός στόχος είναι να επιλεγούν λεκάνες κατάλληλης έκτασης, που μορφολογικά να συμπεριλαμβάνουν όλες τις κατηγορίες γήινων επιφανειών, που θα περιέχονται στην ταξινόμηση. Μια πρώτη προσέγγιση έγινε στη λεκάνη του ρέματος Καλυβίων, η οποία αποτελεί περίπτωση φτωχή σε μορφολογικά χαρακτηριστικά. Επομένως, επιλέγεται η ευρύτερη λεκάνη απορροής του ποταμού Ερασίνου, με ικανοποιητική έκταση και μορφολογία. Αν και η λεκάνη απορροής του π. Ερασίνου αποτελεί πλέον ικανοποιητική επιλογή, στόχος είναι να εξεταστεί και δεύτερη λεκάνη, έτσι ώστε να συναχθεί συμπέρασμα για την τιμή του HAND γενικά στις ελληνικές λεκάνες απορροής. Είναι απαραίτητο η μορφή των λεκανών να αντιπροσωπεύει τις Ελληνικές λεκάνες απορροής, ώστε να γενικευθεί το εύρος των τιμών των ορίων κάθε κλάσης.

Συγκρίνοντας τις Ελληνικές λεκάνες με αυτή του ποταμού Wark στο Λουξεμβούργο (Gharari et al., 2008), όπου και εφαρμόστηκε ανάλογη ταξινόμηση στηριζόμενη στο δείκτη HAND και στις κλίσεις, οι Ελληνικές λεκάνες ως επί το πλείστον έχουν μόνον ορεινές και πεδινές περιοχές, ενώ σε αυτή του Λουξεμβούργου παρουσιάζεται ποικιλομορφία πολλών και διαφορετικών ιδιαίτερων κατηγοριών γήινων επιφανειών.

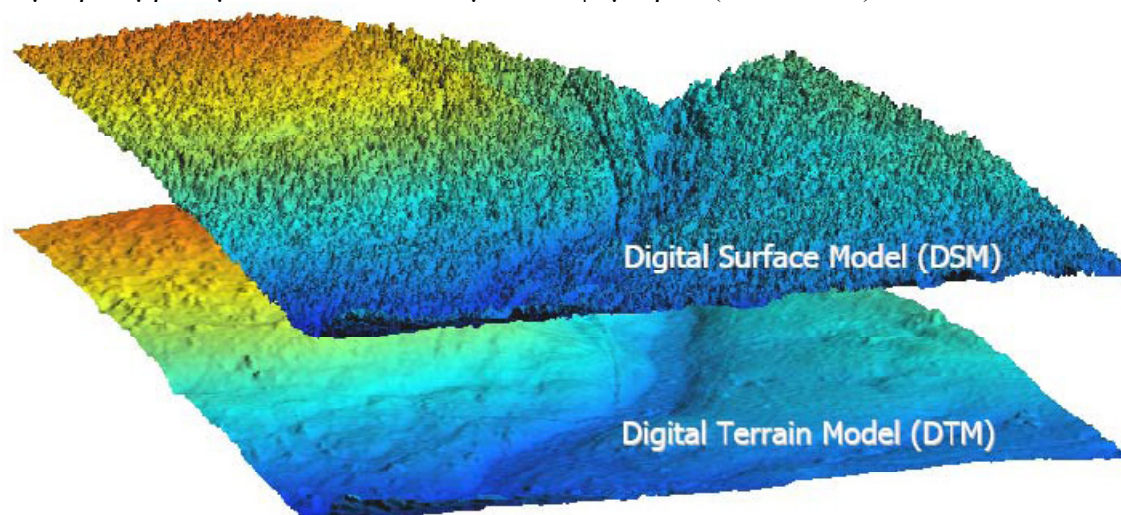
Για την επιλογή της δεύτερης λεκάνης εξετάστηκαν αρχικά λεκάνες της Αττικής και της Θεσσαλίας. Τελικά, επιλέγεται μια στη Δυτική Αττική, η λεκάνη του π. Σαρανταπόταμου, πιο συγκεκριμένα, έτσι ώστε αυτή να εκτείνεται από την Πάρνηθα (ορεινές περιοχές) έως τον Ασπρόπυργο (πεδινές περιοχές). Καθοριστικής σημασίας παράμετρος, ήταν η ύπαρξη διαθέσιμων δεδομένων, υψηλής ανάλυσης ΨΜΕ και ορθοφωτογραφιών.

### 3.3 Δεδομένα

Στα εδάφια που ακολουθούν αναλύεται ο τύπος των αρχικών δεδομένων, η διαδικασία με την οποία παράγονται και οι ακρίβειες. Περιγράφονται οι δυσκολίες και οι λόγοι για τους οποίους ήταν απαραίτητη η προμήθεια δεδομένων από διαφορετικές πηγές και, τέλος, αναφέρεται εν συντομία η χρήση των δεδομένων .

#### 3.3.1 Φωτογραμμετρικά Δεδομένα

Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ, Digital Terrain Model) της περιοχής αποτελεί το απαραίτητο αρχικό σύνολο δεδομένων για την προσέγγιση ζητημάτων που σχετίζονται με την τοπογραφία. Το ΨΜΕ είναι ουσιαστικά μια ψηφιακή αναπαράσταση τμήματος της φυσικής γήινης επιφάνειας και ορίζεται ως το σύνολο των σημείων σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς (X, Y, Z), το οποίο περιγράφει με ακρίβεια την πραγματική επιφάνεια του εδάφους (Kraus, 2003). Διαχωρίζεται από το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (ΨΜΑ, Digital Surface Model) που είναι το σύνολο της γεω-πληροφορίας για μια περιοχή συμπεριλαμβανομένων και των δεδομένων υψομέτρου (Εικόνα 3-1).



Εικόνα 3-1 Διαφορά μεταξύ του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου και του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.

Τα ψηφιακά δεδομένα μπορεί να είναι κατανεμημένα ακανόνιστα (ακανόνιστα τρίγωνα, TINs) ή να ακολουθούν κανονικοποιημένου κάναβο (grid), η κατανομή αυτών εξαρτάται και από τη μέθοδο συλλογής. Τα στάδια της φωτογραμμετρικής διαδικασίας η οποία ακολουθήθηκε για την παραγωγή του ΨΜΕ συνοψίζονται στα:

- συλλογή αεροφωτογραφιών (Α/Φ),
- μέτρηση φωτοσταθερών,
- επίλυση αεροτριγωνισμού – αποκατάσταση προσανατολισμού Α/Φ,
- παραγωγή ΨΜΕ και
- παραγωγή ορθοφωτογραφίας.



Για την παραγωγή του συγκεκριμένου ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκαν έγχρωμες Α/Φ της Κτηματολόγιο Α.Ε. κλίμακας περίπου 1:15 000 και προγενέστερης φωτοληψίας του 2007.

Οι Α/Φ αναλύθηκαν το 2007 από τα Εργαστήρια Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «INTERREG III C-Sud Initiative, Regional Operation Framework of NOE Programme, Disaster Management GIS with emphasis on cultural sites» με συντονιστή του προγράμματος τον καθηγητή κ. Γ. Τσακίρη (Πιστρίκα, 2010).

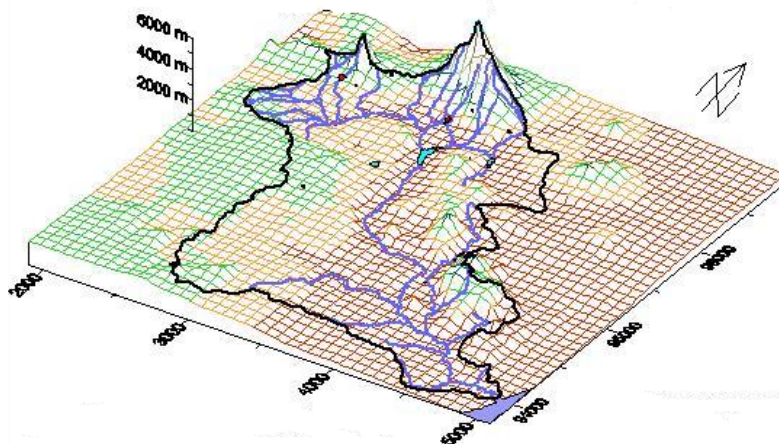
Οι Α/Φ θεωρούνται πρόσφατης λήψης και, κατά συνέπεια, η εξαγωγή πληροφορίας από αυτές ανταποκρίνεται στην υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής μελέτης. Η μετατροπή των Α/Φ σε ψηφιακή εικόνα έγινε με τη διαδικασία της σάρωσης με ανάλυση 1200 dpi σε ειδικό φωτογραμμετρικό σαρωτή.

Με την επίλυση του αεροτριγωνισμού με τη μέθοδο των δεσμών προσδιορίζεται ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων με ορισμένη οριζοντιογραφική ακρίβεια κατά  $x$  και  $y$ , και ορισμένη υψομετρική κατά  $z$  ακρίβεια. Οι ακρίβειες φαίνονται παρακάτω:

- Οριζοντιογραφική ακρίβεια κατά  $x$ : RMSE=0.025 m, max=0.11 m
- Οριζοντιογραφική ακρίβεια κατά  $y$ : RMSE=0.025 m, max=0.18 m
- Υψομετρική ακρίβεια: RMSE=0.06 m, max=0.31 m.

Ακολουθεί η εξαγωγή του ΨΜΕ υπό μορφή κανονικού κανάβου (Εικόνα 3-2). Η διάσταση του κανάβου στο έδαφος είναι 25 m, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται σχετικά ικανοποιητική απόδοση του ανάγλυφου της περιοχής στο ΨΜΕ, ως προς την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια για τη διερεύνηση των κριτηρίων της ταξινόμησης (π.χ., δείκτης HAND). Το παρόν ΨΜΕ στο εξής θα αναφέρεται ως ΨΜΕ παραγόμενο από φωτογραμμετρική διαδικασία ή ΨΜΕ[1].

Γενικότερα ο μεγαλύτερος αριθμός σημείων δίνει τη δυνατότητα για καλύτερη αναπαράσταση, ενώ η ανάλυση καθορίζει τη χρήση και το ποια χαρακτηριστικά του εδάφους είναι ορατά στο μοντέλο. Τέλος, η ποιότητα του ΨΜΕ εξαρτάται από την ακρίβειά του (απόλυτη ακρίβεια) και από το με ποια πιστότητα αναπαρίσταται το ανάγλυφο (σχετική ακρίβεια). Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια είναι οι εναλλαγές του αναγλύφου, η πυκνότητα των σημείων (μέθοδος συλλογής δεδομένων), η μέθοδος του κανάβου, ο αλγόριθμος παρεμβολής και η υψομετρική ακρίβεια (Ιωαννίδης, 2010).



Εικόνα 3-2: Κατανομή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους υπό μορφή κανονικοποιημένου κανάβου.

Η κλίμακα του τελικού προϊόντος της ορθοφωτογραφίας είναι 1:5 000, με βάση αυτή την κλίμακα, το βήμα κανάβου πρέπει να κυμαίνεται από 10 m έως 50 m. Δεδομένου ότι η μέγιστη ακρίβεια για κλίμακα προϊόντος 1:5 000 είναι το 1 m, τιμή που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της διακριτικής ικανότητας του ματιού (0.2 mm) με το συντελεστή της

κλίμακα του τελικού προϊόντος (5 000), οι ακρίβειες θεωρούνται ιδιαίτερα ικανοποιητικές για την σκόπευση χαρακτηριστικών σημείων. Το πλήθος των αρχικών ορθοφωτογραφιών ενώθηκε και δημιουργήθηκε το ορθοφωτομωσαϊκό, που στο εξής θα καλείται ορθοφωτομωσαϊκό[1]. Τα σημεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και για τον έλεγχο του αποτελέσματος της ταξινόμησης με τη χρήση της ασαφούς λογικής. Στο εξής, θα αναφέρονται ως δείγμα σημείων από το ορθοφωτομωσαϊκό[1].

Επιπλέον το ορθοφωτομωσαϊκό[1], που καλύπτει τμήμα της λεκάνης του π. Ερασίνου χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση των υφιστάμενων χρήσεων γης της αντίστοιχης περιοχής.

### 3.3.2 Δεδομένα Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

Με δεδομένο ότι το φωτογραμμετρικό ΨΜΕ[1] είχε παραχθεί για μικρότερης έκτασης περιοχή, σε σχέση με την περιοχή που καλύπτει ο υδροκρίτης, είναι απαραίτητη η χορήγηση πρόσθετης υψομετρικής πληροφορίας που να καλύπτει το σύνολο της λεκάνης απορροής του π. Ερασίνου και της λεκάνης του π. Σαρανταπόταμου.

Νέο ΨΜΕ για το σύνολο των περιοχών ενδιαφέροντος, χορηγήθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.. Το ΨΜΕ αυτό θα καλείται ΨΜΕ[2]. Χορηγήθηκε σε αρχεία υπό τη μορφή ESRI lattice (floating), με διάσταση κανονικοποιημένου κανάβου στο έδαφος ίση με 5 m και τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχεία τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακας 3-1.

Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς είναι το European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS '89) και το προβολικό σύστημα αναφοράς είναι η Εγκάρσια Μερκατορική προβολή (TM) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

κεντρικός μεσημβρινός:  $\lambda_0 = 24^\circ \text{ A}$

συντελεστής κλίμακας σε  $\lambda_0 = 24^\circ \text{ A}$ :  $k_0 = 0.9996$

πλάτος αναφοράς:  $\varphi_0 = 00^\circ 00' 00'' .00$

προσθετική σταθερά στο X:  $X_0 = 500\,000.00 \text{ m}$

προσθετική σταθερά στο Y:  $Y_0 = -2\,000\,000.00 \text{ m}$

η τιμή του συντελεστή κλίμακας  $k$  (μέτρου γραμμικής παραμόρφωσης) σε κάθε σημείο υπολογίζεται με βάση τον προσεγγιστικό τύπο:

$$k = 0.012311 * (X - 0.5)^2 + 0.9996$$

όπου  $X$  η τετμημένη του σημείου σε εκατομύρια μέτρα, δηλαδή  $X = X * 10^{-6}$ .

Πίνακας 3-1: Βασικά χαρακτηριστικά του ψηφιακού μοντέλου (Κτηματολόγιο Α.Ε.).

Χαρακτηριστικό	Προδιαγραφή
Μέγεθος Εικονοστοιχείου στο έδαφος (m)	5.00
Περιμετρική επικάλυψη (m)	300
Τύπος αρχείου	ESRI Floating Point Grid
Διανομή πινακίδων	ITRF κλίμακας 1:5 000
Διαστάσεις πινακίδας στο έδαφος (m)	4600 x 3600
Γεωμετρική ακρίβεια	RMSEz $\leq 2.00 \text{ m}$
Απόλυτη υψομετρική ακρίβεια	$\leq 3.92 \text{ m}$ για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

Η λήψη των αεροφωτογραφιών, για την παραγωγή του, έγινε την περίοδο από Ιανουάριο του 2007 έως Ιούνιο του 2009. Για τη φωτοληψία χρησιμοποιήθηκε η αναλογική φωτομηχανή τύπου ZEISS RMK TOP 15 εφοδιασμένη με φακό 150 mm, σύστημα απόσβεσης του



φαινομένου της πρόσθιας κίνησης (FMC) και βάση με γυροσκοπικούς μηχανισμούς τύπου ZEISS TA-S (Gyro Stabilized Suspension Mount). Η κλίμακα των αναλογικών αεροφωτογραφιών είναι περίπου 1:25 000 και για τη μετατροπή τους σε ψηφιακή μορφή χρησιμοποιήθηκε σαρωτής επίπεδης κοίτης τύπου Z/I Imaging Photoscan 2002 γεωμετρικής ακρίβειας καλύτερης των 2 μm με σύστημα αυτόματης προώθησης του film εφοδιασμένος με λογισμικό αυτόματης σάρωσης (Z/I Imaging Autoscans) (Καββάδας, 2009).

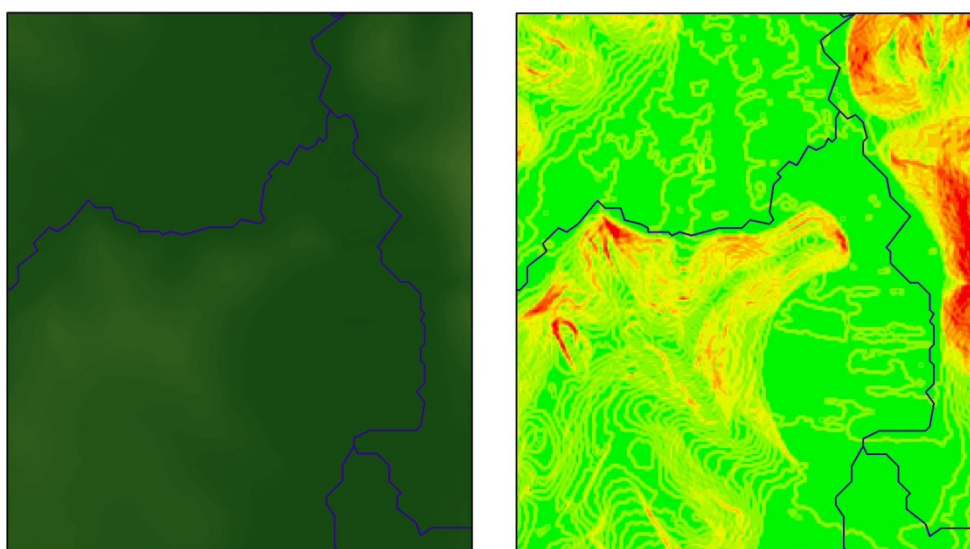
Τα παραπάνω δεδομένα έπρεπε να μετασχηματιστούν στη χαρτογραφική προβολή του ΕΓΣΑ '87, ώστε να συμφωνούν με τα φωτογραμμετρικά δεδομένα και τα τελικά παράγωγα να αποδοθούν σε χάρτης στο Ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (ΕΓΣΑ '87). Ο παραπάνω μετασχηματισμός είναι μετασχηματισμός εφτά παραμέτρων. Όπως φαίνεται με μια πρώτη ματιά από τα χαρακτηριστικά της προβολής, μια μετάθεση ως προς τον άξονα y δεν είναι αρκετή. Ο μετασχηματισμός είναι εφικτός μόνο με τη γνώση των τιμών των παραμέτρων, στοιχεία τα οποία δεν συνόδευαν τα δεδομένα, με αποτέλεσμα τελικά να πραγματοποιηθεί εντός του προγράμματος ArcGIS.

Μετά την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων (ΨΜΕ[2]) στο ArcGIS, διαπιστώθηκε πως υπάρχουν μεγάλης έκτασης περιοχές χωρίς καταχωρημένη υψομετρική πληροφορία (διαβαθμισμένες περιοχές).

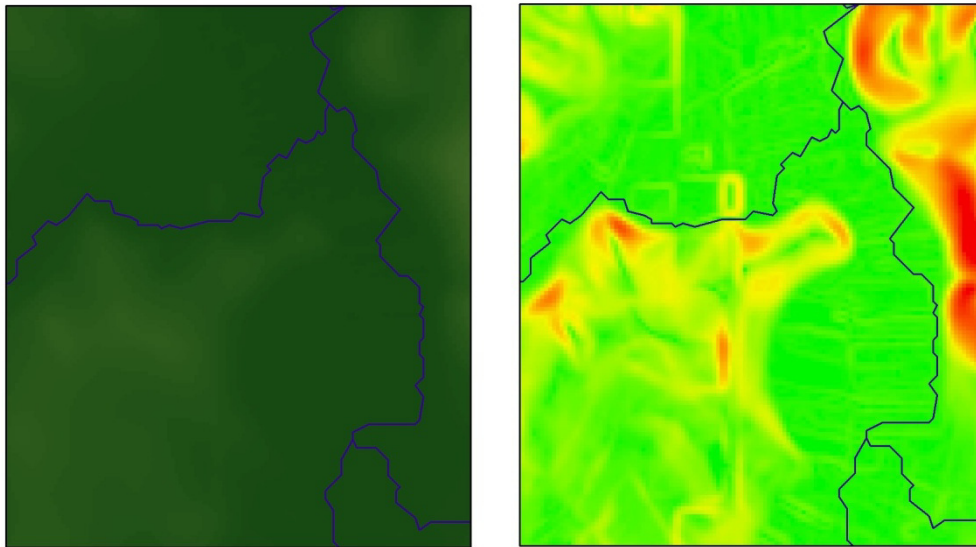
Στην λεκάνη απορροής του π. Ερασίνου, οι διαβαθμισμένες περιοχές, είναι μεγάλης έκτασης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρόβλημα ως προς τον ακριβή προσδιορισμό των μετέπειτα υδρολογικών μεγεθών και της ακρίβειας αυτών. Η πλήρωση των κενών δεν είναι ικανοποιητικής ακρίβειας λύση καθώς εισάγει νέα σφάλματα διαφορετικής προελεύσεως.

Στην αναζήτηση νέου ΨΜΕ για την ανατολική λεκάνη, συνέβαλε και το γεγονός των συστηματικών σφαλμάτων που παρουσιάστηκαν.

Στην Εικόνα 3-3 φαίνεται τμήμα της περιοχής του ΨΜΕ[2] και οι κλίσεις του εδάφους. Οι γραμμικές περιοχές κίτρινου χρώματος, που παρατηρούνται στην Εικόνα 3-3 (δεξιά), εντός της πεδινής περιοχής (πράσινο χρώμα) φαίνεται να ακολουθούν τη λογική των ισούψων καμπυλών στον κλίση, άρα πρόκειται για περιοχές αυξημένης κλίσης σε σχέση με την κλίση των γειτονικών περιοχών, ουσιαστικά η Εικόνα 3-3 παρουσιάζει μία περιοχή με αναβαθμίδες, που στην πραγματικότητα δεν υφίσταται. Η ορθή απεικόνιση των κλίσεων της περιοχής φαίνεται στην Εικόνα 3-4.



Εικόνα 3-3: Απόσπασμα ΨΜΕ (αριστερά) και κανάβου κλίσεων (δεξιά), δεδομένα από Κτηματολόγιο Α.Ε.



Εικόνα 3-4: Απόσπασμα ΨΜΕ (αριστερά) και κανάβου κλίσεων (δεξιά), δεδομένα από ΟΚΧΕ.

Αντίθετα, στην περιοχή της δυτικής Αττικής και στη λεκάνη του π. Σαρανταπόταμου, οι περιοχές χωρίς υψομετρική πληροφορία είναι μικρής έκτασης και με την εφαρμογή των εντολών συμπλήρωσης και συνέχισης των υψομέτρων, ώστε να προκύψει ορθό υδρολογικά ΨΜΕ, το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε.

Το ΨΜΕ[3] από τον ΟΚΧΕ διατίθεται υπό την μορφή σημειακών αρχείων shapfiles, με καταχωρημένες σε πεδία τις τιμές των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων και της υψομετρικής πληροφορίας αντίστοιχα. Το μέγεθος του κανονικοποιημένου κανάβου μεταξύ των σημείων στο έδαφος είναι 10 m και το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87), στο οποίο χρησιμοποιείται ως προβολικό σύστημα η Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή με τα εξής χαρακτηριστικά:

κεντρικός μεσημβρινός:  $\lambda_0 = 24^\circ \text{ A}$

συντελεστής κλίμακας σε  $\lambda_0 = 24^\circ \text{ A}$ :  $k_0 = 0.9996$

πλάτος αναφοράς:  $\varphi_0 = 00^\circ 00' 00''.00$

προσθετική σταθερά στο X:  $X_0 = 500\,000.00 \text{ m}$

προσθετική σταθερά στο Y:  $Y_0 = 0.00 \text{ m}$

Τέλος, για τη στόχευση του δείγματος των σημείων εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και του ελέγχου των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης στηριζόμενη σε ασαφή λογική, για τη λεκάνη απορροής του π. Σαρανταπόταμου, χρησιμοποιήθηκαν οι ορθοφωτογραφίες, που ελεύθερα διατίθενται από τον ΟΚΧΕ, οι οποίες ενώθηκαν σε ορθοφωτομωσαϊκό[3].

Για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών και του ΨΜΕ[3] χρησιμοποιήθηκαν αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:15 000 οι οποίες προήλθαν από αεροφωτογράφιση που πραγματοποίησε ο ΟΚΧΕ σε συνεργασία με τη ΓΥΣ. Η αεροφωτογράφιση έγινε με αναλογική φωτομηχανή ZEISS RMK TOP 30, με φακό 300 mm. Οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν από τον Ιούλιο έως το Σεπτέμβριο του 2010. Για τη σάρωση των αεροφωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε επίπεδος φωτογραμμετρικός σαρωτής LEICA DSW 700 που διαθέτει η ΓΥΣ. Οι αεροφωτογραφίες σαρώθηκαν στα 1700 dpi (1 pixel = 15  $\mu\text{m}$ ).

Η μέτρηση των φωτοσταθερών σημείων πραγματοποιήθηκε από συνεργείο του ΟΚΧΕ με χρήση δεκτών GPS τύπου TRIBBLE R8 και του συστήματος HEPOS. Η επίλυση των φωτοσταθερών σημείων έγινε στο ΕΓΣΑ '87. Η επίλυση του αεροτριγωνισμού, η παραγωγή του DTM και η παραγωγή των ορθοφωτοχαρτών, πραγματοποιήθηκαν από τον ΟΚΧΕ με

χρήση του λογισμικού INPHO. Το DTM προήλθε από αυτοματοποιημένες μεθόδους που στηρίζονται στη συσχέτιση των ψηφιακών εικόνων (image matching) με μέγεθος εικονοστοιχείου στο έδαφος 10 m.

Τα ψηφιακά αρχεία των ορθοεικόνων είναι τύπου JPEG2000 με ενσωματωμένη τη γεωαναφορά. Στις διαβαθμισμένες περιοχές τα συγκεκριμένα ψηφιακά αρχεία των ορθοεικόνων εμφανίζονται μαύρα. Από το δικτυακό τόπο geodata.gov.gr είναι διαθέσιμα δωρεάντα εξής: οι ορθοφωτογραφίες, τα μεταδεδομένα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά παραγωγής τους. Λόγω του ότι είναι ορθοφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης και κατ' επέκταση και μεγάλου μεγέθους, επιλέχθηκε ενδεικτικά μικρός αριθμός λωρίδων από τους πρόποδες της Πάρνηθας (στις ορεινές περιοχές, οι ορθοφωτογραφίες είναι υπό κατασκευή και δεν είναι προς το παρόν διαθέσιμες) έως τον Ελευσίνιο Κόλπο. Στόχος είναι να αποδοθούν κατά τη συλλογή του δείγματος των σημείων όλοι οι πιθανοί τύποι γήινων επιφανειών, εντός της λεκάνης.

### 3.3.3 Μέτρηση δείγματος σημείων με GPS

Για την αξιολόγηση και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης είναι απαραίτητη η ύπαρξη πληροφορίας από επιτόπου παρατήρηση σημείων, που χαρακτηρίζονται ανάλογα με τη σχετική τους θέση στη λεκάνη και τις υφιστάμενες υδρολογικές συνθήκες στις ανάλογες κατηγορίες. Η μεταφορά αυτής της πληροφορίας γίνεται με μέτρηση των επιλεγμένων σημείων με χρήση GPS (Global Positioning System, Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης).

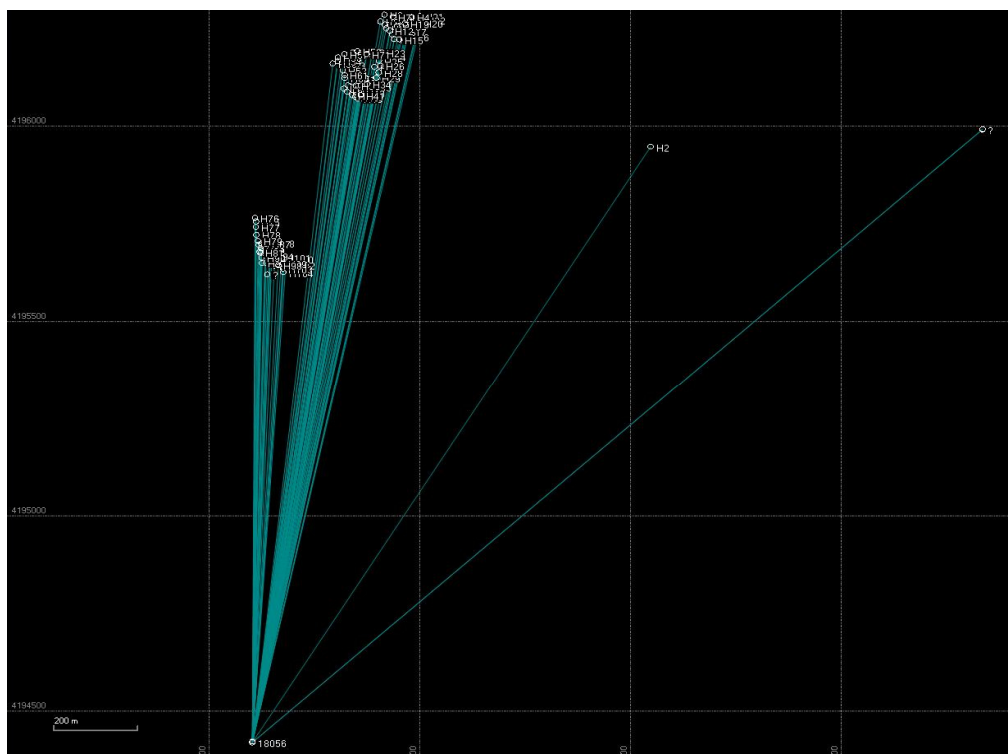
Λόγω του ότι η παραπάνω διαδικασία είναι χρονοβόρα και κοπιαστική, το πλήθος των σημείων (περίπου 100 σημεία) είναι μικρότερης τάξης μεγέθους από το αντίστοιχο δείγμα που συλλέχθηκε μέσω ορθοφωτογραφιών (περίπου 6000 σημεία) και πολύ μικρότερης τάξης ως προς το σύνολο των σημείων κάθε λεκάνης. Παρόλα αυτά αποτελεί μια ένδειξη.



Εικόνα 3-5: Βάθρο ΓΥΣ, δέκτης Base.

Η επίλυση των βάσεων (Εικόνα 3-6) των μετρημένων σημείων έγινε με το λογισμικό Spectra Precision Survey Office, ορίζοντας ως σταθμό αναφοράς το βάθρο της ΓΥΣ με τις γνωστές συντεταγμένες που παραμένει τοποθετημένος ο δέκτης Base (Εικόνα 3-5).





Εικόνα 3-6: Οι βάσεις των σημείων πεδίου.

Μετά την επίλυση προέκυψαν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των μετρημένων σημείων στο σύστημα ΕΓΣΑ'87 με ακρίβεια για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%:

- Οριζοντιογραφική ακρίβεια: 0.011 m, max = 0.017 m
- Υψομετρική ακρίβεια: 0.020 m, max = 0.035 m.

Καταληκτικά, από τα διαθέσιμα δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν:

- Λεκάνη π. Ερασίνου:

Για τον υπολογισμό των κριτηρίων της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε το ΨΜΕ[3] από τον ΟΚΧΕ, κανονικοποιημένου κανάβου διάστασης 10 m. Για τη συλλογή του δείγματος των σημείων εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και ελέγχου των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης η ορθοφωτογραφία[1] από τη φωτογραμμετρική διαδικασία.

- Λεκάνη π. Σαρανταπόταμου:

Για τον υπολογισμό των κριτηρίων της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε το ΨΜΕ[2] από την Κτηματολόγιο Α.Ε., κανονικοποιημένου κανάβου διάστασης 5 m. Για τη συλλογή του δείγματος των σημείων εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και ελέγχου των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης η ορθοφωτομωσαικό[3] από τον ΟΚΧΕ.

### 3.4 Γενικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά λεκανών

#### 3.4.1 Λεκάνη π. Ερασίνου

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του ποταμού Ερασίνου, στην ανατολική Αττική (Εικόνα 3-7). Η λεκάνη του Ποταμού, έκτασης 202 km<sup>2</sup> οριοθετείται από τον υδροκρίτη του ρέματος Ραφήνας (βόρεια), την οροσειρά του Υμηττού (δυτικά) και τους αυχένες μεταξύ των υψωμάτων Ψηλόβραχος, Κορυφή, Μερέντα, Κερατοβούνι, Πάνειο Όρος, Στρογγυλοπούλα, Ζυγός και Κόντρα (νότια).

Το ρέμα Ερασίνου αποτελεί τον αποδέκτη της απορροής της κεντρικής περιοχής των Μεσογείων (ευρύτερη περιοχή Παιανίας, Κορωπίου, νότια ζώνη Σπάτων) και της νότιας περιοχής των Μεσογείων (κοινότητες Μαρκόπουλο, Κουβαράς) (Μπενσασσών και Παπαλεξόπουλος, 2004).

Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι περίπου 1020 m, ενώ το μέσο υψόμετρο κυμαίνεται στα 171 m με τυπική απόκλιση ίση με 150.24 m, χαρακτηρίζοντας γενικότερα τη λεκάνη πεδινή. Τον χαρακτηρισμό πεδινή επιβεβαιώνουν και οι τιμές των κλίσεων της λεκάνης, των οποίων η μέγιστη τιμή είναι 86.9°, ενώ η μέση κλίση κυμαίνεται στις 8.4° με τυπική απόκλιση ίση με 10.13°. Η περίμετρος της λεκάνης κυμαίνεται στα 104 km και το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου είναι περίπου 87 km.



Εικόνα 3-7: Σχετική θέση λεκάνης π. Ερασίνου στον Ελλαδικό χώρο.

Συγκεντρώνει την απορροή τριών βασικών ρεμάτων: του ρέματος Αγίου Γεωργίου, του ρέματος Μαρκοπούλου και του ίδιου του Ερασίνου, που είναι και ο τελικός αποδέκτης των υδάτων, εκβάλλοντας στον κόλπο Βραυρώνας.

Η σχετική θέση της υδρολογικής λεκάνης του π. Ερασίνου, που βρίσκεται στα ανατολικά του νομού Αττικής, απεικονίζεται στην Εικόνα 3-8.



Εικόνα 3-8:Σχετική Θέση λεκάνης π. Ερασίνου στο ν. Αττικής.

Η λεκάνη απορροής του Ερασίνου διακρίνεται σε τρεις ζώνες μορφολογικά (Μπενσασσών και Παπαλεξόπουλος, 2004):

- Στο ανάντη τμήμα της λεκάνης υπάρχουν έντονες πτυχώσεις και μισγάγγειες στις κλιτύες του Υμηττού και έντονες κατά μήκος κλίσεις.
- Το μεσαίο τμήμα της λεκάνης περιλαμβάνει τους κώνους αποθέσεων των φερτών των ανάντη χειμάρρων από τις εύφορες καλλιεργήσιμες περιοχές του κάμπου των Μεσογείων. Χαρακτηριστικό της μεσαίας ζώνης είναι η ολική έλλειψη μισγαγγείων. Σημειώνεται πως η μεταβολή στις χρήσεις γης περιορίζει συνεχώς τη διήθηση και η επιφανειακή απορροή μετατρέπεται πλέον σε εκτεταμένο πλημμυρικό φαινόμενο.
- Τέλος, στο τρίτο, κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής παρουσιάζονται πτυχώσεις εδάφους με φυσικές βαθιές γραμμές και μικρές κοιλάδες και επανεμφανίζεται η κοίτη του ρέματος Ερασίνου, η οποία δέχεται πρώτα τις απορροές από τη λεκάνη του ρέματος Μαρκοπούλου και στη συνέχεια τις σημαντικότερες απορροές από το ρέμα Αγίου Γεωργίου και τα συμβάλλοντα σε αυτό ρέματα Μαλέξη, Αγίας Άννας, Καλυβίων και Κουβαρά. Η συμβολή του ρέματος Αγ. Γεωργίου στο �έμα του Ερασίνου πραγματοποιείται σε μικρή απόσταση (2 km περίπου) από την εκβολή του ρέματος Ερασίνου στον όρμο Βραυρώνας.

Σε μήκος 4.5 km περίπου ανάντη της συμβολής με το ρέμα Ερασίνου η κοίτη εκφυλίζεται. Σ' αυτό συμβάλουν οι εκτεταμένες καλλιέργειες στις ανάντη ζώνες. Η συμβολή του ρέματος Αγ. Γεωργίου στο ρέμα του Ερασίνου πραγματοποιείται σε μικρή απόσταση (2 km περίπου) από την εκβολή του ρέματος Ερασίνου στον όρμο Βραυρώνας.

Πέραν των σημαντικών έργων που έχουν κατασκευαστεί την τελευταία δεκαετία όπως το Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών, η Αττική Οδός, η Λεωφόρος Βάρης-Κορωπίου, η Λεωφόρος Μαρκοπούλου το Ιπτικό Κέντρο, η Βιομηχανική Ζώνη στην περιοχή Καρελά, ΒΙΟΠΑ Κορωπίου, αγωγός φυσικού αερίου και στο άμεσο μέλλον αναμένεται να κατασκευαστούν νέα έργα (η Λεωφόρος Υμηττού-Σπάτων, το Επιχειρησιακό Πάρκο Μαρκοπούλου, η Σιδηροδρομική γραμμή Αθηνών-Λαυρίου κ.λ.π.). Η κατασκευή των σημαντικών αυτών έργων, σε συνδυασμό με τις ραγδαίες και ανεξέλεγκτες μεταβολές στις χρήσεις γης μετέβαλε προς το δυσμενέστερο τις συνθήκες απορροής στον Ερασίνο.

Η αποχέτευση των όμβριων υδάτων του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών γίνεται με τελικό αποδέκτη το κατάντη τμήμα του βορείου κλάδου του ρέματος Ερασίνου. Τα όμβρια ύδατα

εντός του αεροδρομίου συλλέγονται από το σύστημα που έχει κατασκευαστεί στο νότιο άκρο του αερολιμένος σε λεκάνη αποθήκευσης/ανάσχεσης, όγκου της τάξεως των 300000 m<sup>3</sup>. Στη συνέχεια, γίνεται ελεγχόμενη εκροή των όμβριων, τα οποία προέρχονται από περίπου το 90% της έκτασης του αεροδρομίου, με μέγιστη παροχή 1.75 m<sup>3</sup>/s (Μπενσασσών και Παπαλεξόπουλος, 2004).

Τέλος, στην εκβολή του Ερασίνου, βρίσκεται ένας σημαντικός υγροβιότοπος (ενταγμένος στο πρόγραμμα Natura 2000) και εκτεταμένη περιοχή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (Ναός Βραυρωνίας Αρτέμιδος). Η εκβολή είναι ανεπαρκής και δεν έχουν κατασκευαστεί τα απαιτούμενα τεχνικά έργα για τη διόδευση της πλημμυρικής παροχής στη θάλασσα, είτε άμεσα, είτε μέσω του υγροβιότοπου.

Σε μια ζώνη πλάτους 2 km κατά μήκος των ρεμάτων του Αγ. Γεωργίου και Ερασίνου, έκτασης ίσης περίπου με 45 km<sup>2</sup>, εντοπίζεται το μεγαλύτερο πρόβλημα πλανώμενης απορροής και παράλληλα συγκέντρωσης αστικού ιστού και γι' αυτό η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει ιστορικό καταγραφής άμεσης πλευρικής ζημιάς σε κτήρια (Πιστρίκα, 2010).

Επιπλέον, η λεκάνη του ρέματος Αγ. Γεωργίου χαρακτηρίζεται από μικρές κατά μήκος κλίσεις. Το ορεινό ανάγλυφο στα νότια δεν είναι απόκρημνο και στις πλαγιές όπως και σε όλη την λεκάνη υπάρχουν εκτεταμένες καλλιέργειες και κατά τόπους κτίσματα. Η κοίτη είναι διαμορφωμένη σε μεγάλο μήκος και υπάρχει εύκολη πρόσβαση σε σημαντικό μήκος του ρέματος. Σε μήκος 4.5 km περίπου ανάντη της συμβολής με το ρέμα Ερασίνου η κοίτη εκφυλίζεται. Σ' αυτό συμβάλουν οι εκτεταμένες καλλιέργειες στις ανάντη ζώνες. Πολλοί δρόμοι διασταυρώνονται με το ρέμα και για τις διαβάσεις έχουν κατασκευαστεί σε κάποιες περιπτώσεις μικρά, ανεπαρκή τεχνικά. Σε άλλες περιπτώσεις έχει διακοπεί η συνέχεια της κοίτης από δρόμους, οπότε σε συνδυασμό με τις μικρές κατά μήκος κλίσεις, παρατηρούνται φαινόμενα λιμναζόντων υδάτων, καθώς το ρέμα υπερχειλίζει πάνω από το δρόμο για να συνεχίσει τη ροή του προς τα κατάντη.

#### **3.4.2 Λεκάνη π. Σαρανταπόταμου**

Ως δεύτερη περιοχή (Εικόνα 3-9) εφαρμογής επιλέχθηκε η λεκάνη του π. Σαρανταπόταμου, στη Δυτική Αττική (Εικόνα 3-9. Σχετική θέση λεκάνης π. Σαρανταπόταμου στον ελλαδικό χώρο.Εικόνα 3-10). Την ευρύτερη περιοχή του Θριάσιου Πεδίου διατρέχουν πλήθος ρεμάτων τα οποία πηγάζουν στους ορεινούς όγκους περιμετρικά της περιοχής. Αναλυτικότερα από τα όρη Αιγάλεω, Πάρνηθα, Πάστρα, Κιθαιρώνα Πατέρα και Τρικέρατο πηγάζουν οι χείμαρροι Αγ. Γεωργίου, Αγ. Ιωάννου, ο Σαρανταπόταμος, ο χείμαρρος Σούρες, το Μικρό και το Μεγάλο Κατερίνι, το ρέμα του Αγ. Βλασίου και τα ρέματα Λούτσας και Γιακουμή, που αποτελούν το βασικό υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής και εκβάλλουν στον Ελευσινιακό κόλπο. Η κύρια πηγή του Ποταμού είναι στο όρος Κιθαιρώνα κοντά στο χωρίο Βίλια ενώ στον κύριο κλάδο συμβάλλουν οι χείμαρροι Αγ. Βλάσιος, Ξηρόρεμα και Μεγάλο Κατερίνι.



Εικόνα 3-9. Σχετική θέση λεκάνης π. Σαρανταπόταμου στον ελλαδικό χώρο.

Οι νότιες πλαγιές της Πάρνηθας αποστραγγίζονται μέσω τεσσάρων μεγάλων ρεμάτων, αυτά είναι το ρέμα της Γιαννούλας, της Μαύρης Ώρας, ο Σαρανταπόταμος και του Αγ. Ιωάννη.

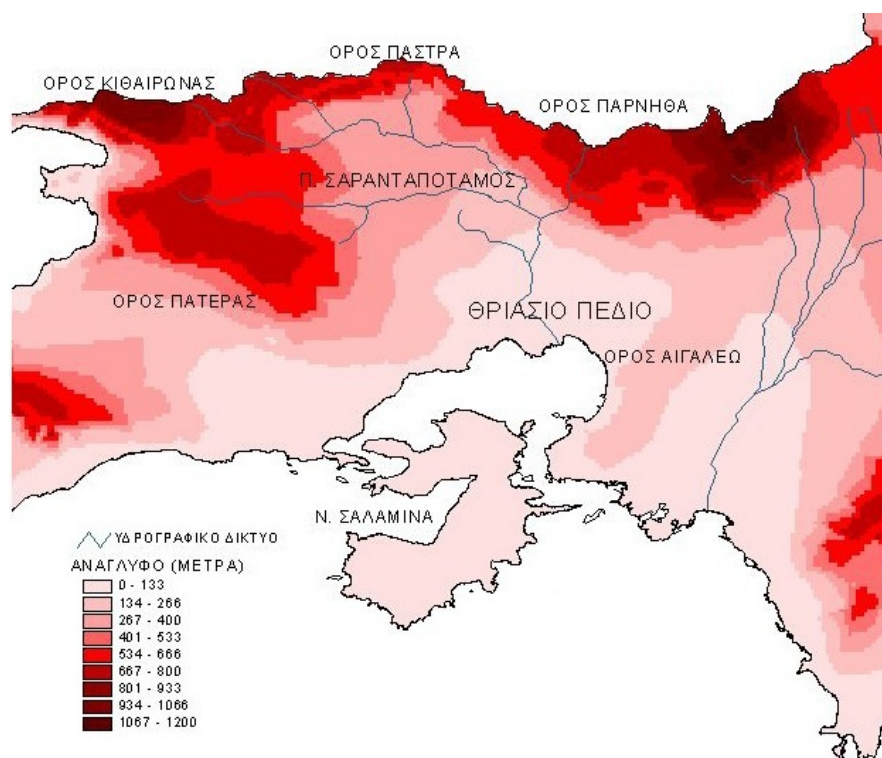


Εικόνα 3-10. Σχετική θέση λεκάνης π. Σαρανταπόταμου στο ν. Αττικής.

Ο Σαρανταπόταμος αποτελεί το κυριότερο ποτάμι της περιοχής του Θριάσιου Πεδίου και της Δυτικής Αττικής (Εικόνα 3-10) με μήκος περίπου 43 km, καθώς συμβάλλουν σ' αυτό τα νερά που προέρχονται από όλους τους γειτονικούς ορεινούς όγκους. Η λεκάνη απορροής (Εικόνα 3-11) έχει ως φυσικά όρια τους όγκους: Πάστρα (βόρεια), βορειοδυτικά το όρος Κιθαίρων, νοτιοδυτικά το όρος Πατέρας (1132 m), την Πάρνηθα (ανατολικά) και νότια λόφους με μικρότερο υψόμετρο (Ράχη Σωτήρος, 432 m, Κορυφή, 384 m) (Λιμπεροπούλου, 2010). Το συνολικό μήκος του κύριου κλάδου της λεκάνης είναι 231.78 km και έχει γενική διεύθυνση ροής από βορρά προς νότο έως ότου εκβάλλει στον Κόλπο της Ελευσίνας. Το δέλτα της



εκβολής του βρίσκεται στη θάλασσα, αλλά η ποσότητα νερού που φτάνει έως εκεί χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα να παροχετευθεί. Για την διευκόλυνση της αποστράγγισης, η κοίτη του έχει διευθετηθεί και διαπλατυνθεί τα τελευταία χρόνια. Η λεκάνη απορροής έχει έκταση περίπου 325.8 km<sup>2</sup>. Το βασικό χαρακτηριστικό των ρεμάτων της περιοχής είναι η εποχιακή παροχή που σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες καταβόθρες καθιστά την μελέτη του π. Σανταπόταμου ιδιαίζουσα περίπτωση.



Εικόνα 3-11. Ευρύτερη περιοχή Θριάσιου Πεδίου (Κουτσογιάννης και Μαμάσης, 2001).

Το κλίμα χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό με εξαίρεση τα υψηλά σημεία της λεκάνης όπου είναι ορεινό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 300 και 400 mm, ενώ οι ημέρες βροχής κυμαίνονται μεταξύ 50 μέχρι 100 ετησίως. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις παράκτιες περιοχές, ενώ αυξάνει στα υψηλότερα σημεία της λεκάνης. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 17 °C και 19 °C ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από την θάλασσα, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι περίπου 19 °C (Κουτσογιάννης και Μαμάσης, 2001).



## 4 Μεθοδολογία ταξινόμησης που εφαρμόστηκε

---

### 4.1 Γενικά

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση δύο μεθόδων ταξινόμησης που εφαρμόστηκαν για τις δύο υδρολογικές λεκάνες μελέτης. Η θεωρία στην οποία βασίζεται κάθε διαδικασία ταξινόμησης είναι καθοριστική για την προετοιμασία και οργάνωση των δεδομένων, την ερμηνεία και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Η χρήση μεθόδων ασαφούς ταξινόμησης αξιοποιεί την ελευθερία και την ευελιξία αυτών των μεθόδων, για την ταξινόμηση προτύπων. Αντίθετα, στα νευρωνικά δίκτυα, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η εκ των προτέρων εκπαίδευση του συστήματος, εφαρμόζεται μια καθοδήγηση του συστήματος.

Για τον έλεγχο και την εκπαίδευση που απαιτούνται από τις διαδικασίες ταξινόμησης, είναι απαραίτητη η δημιουργία δεδομένων που να καλύπτουν τις παραπάνω ανάγκες. Το κεφάλαιο κλείνει παρουσιάζοντας τη διαδικασία υπολογισμού των κριτηρίων ταξινόμησης και την εφαρμογή του θεωρητικού πλαισίου σε κάθε μία από τις λεκάνες. Επιπλέον αναλύονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ώστε να ολοκληρωθεί η ταξινόμηση. Χρησιμοποιήθηκαν σημεία, τα οποία ταξινομήθηκαν Αριστοτελικά σε καθεμία από τις κλάσεις, στις οποίες είναι επιθυμητό να ταξινομηθούν οι υδρολογικές λεκάνες. Οι κλάσεις αυτές ορίστηκαν βάσει της μορφολογίας των υδρολογικών λεκανών, των χρήσεων γης, και των ιδιοτήτων του υδρογραφικού δικτύου που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια ταξινόμησης. Η επιλογή τους έγινε μέσω βιβλιογραφικής έρευνας που διεξήχθη και με γνώμονα αυτή να καλύπτει, κατά το δυνατόν, τα χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών που συναντώνται στην ελληνική επικράτεια.

Οι περιοχές της υδρολογικής λεκάνης εφ' εξής θα αντιπροσωπεύονται από τα αντίστοιχα κελιά του κανάβου, τα οποία έχουν καταχωρημένη την τιμή του κάθε κριτηρίου στο κέντρο τους. Ουσιαστικά μετατρέπεται το σύνολο των κελιών του κανάβου (περιοχές της υδρολογικής λεκάνης) σε σημεία, τα οποία αναφέρονται στο κέντρο κάθε κελιού. Αρκεί τελικά η ταξινόμηση των παραπάνω σημείων για την ολική ταξινόμηση των περιοχών των υδρολογικών λεκανών. Το πλήθος των σημείων που απαρτίζουν κάθε λεκάνη εξαρτάται από την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και το μέγεθος του κανάβου στο έδαφος.

### 4.2 Υπολογισμός υδρολογικών κριτηρίων

Για τον υπολογισμό των κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία της ταξινόμησης, χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία, από τα προγράμματα ArcGIS και MatLab. Επιπλέον προγραμματίστηκαν σε περιβάλλον MatLab, αλγόριθμοι και διαδικασίες για την ολοκλήρωση του υπολογισμού των απαραίτητων κριτηρίων.

Αρχικά στο αρχικό ΨΜΕ (Εικόνα Π-1, Εικόνα Π-12) εφαρμόζεται η διαδικασία της ομαλοποίησης του ΨΜΕ, με τη χρήση ενός φίλτρου, που βασίζεται στην κατανομή Gauss. Στο περιβάλλον του προγράμματος MatLab, εισάγεται το ΨΜΕ κάθε λεκάνης, υπό τη μορφή κανονικοποιημένου κανάβου. Το φίλτρο που επιλέγεται από την εργαλειοθήκη του προγράμματος, είναι το fspecial και είναι κατάλληλο ώστε να εφαρμοστεί στην αντίστοιχη μορφή των δεδομένων. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα φίλτρο που εφαρμόζεται σε στατιστικά δεδομένα, όπως για παράδειγμα οι εικόνες. Επιλέγεται ουσιαστικά ένα χωρικά κατανομημένο

παράθυρο μεγέθους 3x3 κελιών, όπου χρησιμοποιείται η κατανομή Gauss και ανάλογα με την τιμή της τυπικής απόκλισης που θα οριστεί, ολοκληρώνεται η διαδικασία της ομαλοποίησης. Στην περίπτωση των δύο λεκανών που μελετώνται, επιλέγεται η τυπική απόκλιση να είναι ίση με 2 m, τιμή που σχετίζεται με την υψομετρική ακρίβεια των αρχείων του ΨΜΕ. Το ομαλοποιημένο ΨΜΕ που εξάγεται από την παραπάνω διαδικασία, είναι και αυτό που χρησιμοποιείται στην μετέπειτα διαδικασία υπολογισμών για την εξαγωγή του υδρολογικά ορθού ΨΜΕ.

Η επεξεργασία του ομαλοποιημένου ΨΜΕ για την εξαγωγή του υδρολογικά ορθού ΨΜΕ έχει ως αποτέλεσμα την καταχώρηση, σε κάθε κελί, της τιμής του διορθωμένου υψομέτρου που χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των κριτηρίων.

Ο δείκτης HAND (Εικόνα Π-4, Εικόνα Π-15) υπολογίστηκε ως η υψομετρική διαφορά του κάθε κελιού από το κοντινότερο σε αυτό κελί που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο. Για τον υπολογισμό του δείκτη σε κάθε κελί χρειάζεται η αρχική υψομετρική πληροφορία από το ομαλοποιημένο ΨΜΕ. Επιπλέον, χρειάζεται το επίθεμα της διεύθυνσης απορροής (Εικόνα Π-2, Εικόνα Π-13) έτσι όπως υπολογίζεται από το πρόγραμμα ArcGIS, από το οποίο ο αλγόριθμος «διαβάζει» τη διεύθυνση προς την οποία απορρέει κάθε κελί. Τέλος, είναι απαραίτητο το επίθεμα που παρουσιάζει σε κανονικοποιημένη μορφή το υδρογραφικό δίκτυο (Εικόνα Π-3, Εικόνα Π-14). Για τον ορθό υπολογισμό των κριτηρίων, ως υδρογραφικό δίκτυο χαρακτηρίζεται το κεντρικό κελί όλων των κελιών που αποτελούν το εύρος του υδρογραφικού δικτύου. Συνεπώς, με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ουσιαστικά το υδρογραφικό δίκτυο περιγράφεται από μεμονωμένα κελιά τα οποία συνδέονται είτε με εφαπτόμενες πλευρές είτε με εφαπτόμενες κορυφές. Τα κελιά αυτά επιλέγονται με βάση το κριτήριο του ότι σε αυτά απορρέει ο μέγιστος αριθμός κελιών από τους γειτονικούς αριθμούς που εμφανίζονται.

Ο τελικός υπολογισμός του δείκτη HAND έγινε με τον συνυπολογισμό όλων των παραπάνω στη διαδικασία υπολογισμού και με την εκτέλεση διαδοχικών εντολών if, ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις. Ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε, λαμβάνει πληροφορία και από τα τρία επίπεδα και σε κάθε περίπτωση εκτελεί ανάλογες εντολές. Τέλος, προκύπτει ένα αρχείο shapfile, όπου σε νέο πεδίο είναι αποθηκευμένη η τιμή του δείκτη HAND για κάθε σημείο. Το αρχείο αυτό εισάγεται κατευθείαν πλέον στο ArcGIS και τα αποτελέσματα απεικονίζονται ως χάρτης. Η χρωματική παλέτα που επιλέγεται αποδίδει τις διαφορετικές τιμές του δείκτη HAND. Οι χάρτες του δείκτη για τις δύο λεκάνες φαίνονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π-4, Εικόνα Π-15).

Στην περίπτωση του δεύτερου υδρολογικού κριτηρίου, αυτού της κλίσης του εδάφους, ο υπολογισμός του έγινε μέσα στο πρόγραμμα ArcGIS με τη μέθοδο της μέγιστης κατεύθυνσης. Ως αρχικό δεδομένο για τη διαδικασία υπολογισμού, χρησιμοποιείται το ομαλοποιημένο ΨΜΕ. Συνοπτικά αναφέρεται πως ο αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται από το ArcGIS, λαμβάνει τη μέγιστη διαφορά κλίσης ως προς την έννοια των γραμμών και αντίστοιχα ως προς την έννοια των στηλών. Για κάθε κελί της λεκάνης, υπολογίζεται η κλίση και η τιμή της αποθηκεύεται σε νέο shapfile. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των κλίσεων παρουσιάζονται σε χάρτες και για τις δύο λεκάνες μελέτης (Εικόνα Π-5, Εικόνα Π-16).

Τέλος, η Ευκλείδεια υδρολογική απόσταση αποτελεί το τρίτο κριτήριο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ταξινόμησης. Ο υπολογισμός της υδρολογικής απόστασης για κάθε κελί της λεκάνης, γίνεται στο MatLab. Τα αρχικά δεδομένα είναι όμοια με τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του δείκτη HAND. Η υδρολογική απόσταση ουσιαστικά ισούται με το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ των κελιών που ορίζουν τη διεύθυνση απορροής ξεκινώντας από το εξεταζόμενο κελί της λεκάνης μέχρι το κοντινότερο σε αυτό κελί που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο. Στην παρούσα φάση έγινε υπολογισμός της

υδρολογικής απόστασης και με τον τύπο της οριζοντιογραφικής απόστασης και τα δύο αποτελέσματα των δύο υπολογισμών συγκρίθηκαν αρχικά ποιοτικά και στη συνέχεια ως προς τα αποτελέσματα της ταξινόμησης. Φαίνεται τελικά από τα ποσοστά επιτυχίας, πως η χρήση της Ευκλείδειας απόστασης ως προς τη διεύθυνση απορροής, δίνει ομαλότερο αποτέλεσμα, χωρίς απότομες εναλλαγές των τιμών στους χάρτες της απόστασης και μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας ως προς τα αποτελέσματα της ταξινόμησης. Οι χάρτες (Εικόνα Π-6, Εικόνα Π-17) που απεικονίζουν τις τιμές της υδρολογικής απόστασης για κάθε κελί των λεκανών παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

### 4.3 Ασαφής Ταξινόμηση

Βάσει της ασαφούς ταξινόμησης, κάθε στοιχείο προς ταξινόμηση δεν ανήκει σε μία μοναδική ομάδα, αλλά ανήκει σε όλες τις ομάδες, με διαφορετικό, όμως, βαθμό συμμετοχής. Στόχος της διαδικασίας είναι η δημιουργία κλάσεων που να αναδεικνύουν την αρχική πληροφορία των δεδομένων. Για την εφαρμογή της ασαφούς ταξινόμησης του πλήθους των σημείων που αποτελούν κάθε υδρολογική λεκάνη, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Fuzzy c-means. Η διαδικασία εκτελείται στο περιβάλλον του προγράμματος MatLab. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο αλγόριθμος μοιάζει αρκετά με τον αλγόριθμο k-means, αλλά βασικά αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Επιλέγεται ένας αριθμός ομάδων
- Αποδίδεται τυχαία σε κάθε στοιχείο ένα βαθμός συμμετοχής του σε κάθε ομάδα
- Υπολογίζεται το κεντροειδές σημείο κάθε ομάδας
- Για κάθε στοιχείο υπολογίζεται (επικαιροποιείται) ο βαθμός συμμετοχής στην κάθε ομάδα, βάσει των νέων κεντροειδών
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι ο αλγόριθμος να συγκλίνει.

Ο αλγόριθμος επιδιώκει ταυτόχρονα να μεγιστοποιήσει τη μέση απόσταση μεταξύ των κεντροειδών σημείων των ομάδων και να ελαχιστοποιήσει τη μέση απόσταση μεταξύ των στοιχείων της ίδιας ομάδας από το κεντροειδές της ομάδας. Βασικό πρόβλημα είναι ότι τα μέγιστα και τα ελάχιστα είναι τοπικά και τα αποτελέσματα εξαρτώνται σημαντικά από την αρχικοποίηση που γίνεται.

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο περιβάλλον του προγράμματος MatLab. Για το σύνολο των σημείων κάθε λεκάνης υπολογίζεται η τιμή του κάθε κριτηρίου. Οι τιμές αυτές αποθηκεύονται σε έναν πίνακα με αριθμό γραμμών τόσες όσα και τα σημεία και αριθμό στηλών τόσες όσα και τα κριτήρια. Πρόκειται δηλαδή για τη μετατροπή του κανάβου κάθε κριτηρίου όπως παρουσιάζεται υπό μορφή χάρτου σε διάγραμμα (πίνακα στήλης). Πρόκειται ουσιαστικά για έναν πίνακα με πλήθος γραμμών όσα και τα σημεία τα οποία αποτελούν κάθε λεκάνη και με τόσες στήλες όσες και το πλήθος των κριτηρίων που κάθε φορά επιλέγονται. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια, η πρώτη στήλη περιέχει την τιμή του δείκτη HAND για κάθε σημείο και η δεύτερη στήλη, περιέχει την τιμή της κλίσης του εδάφους αντίστοιχα. Στην περίπτωση που εισέρχεται και το τρίτο κριτήριο της υδρολογικής απόστασης καταλαμβάνει την τρίτη στήλη του πίνακα.

Για την εφαρμογή της ταξινόμησης χρησιμοποιείται η συνάρτηση `fcm`, από την αντίστοιχη εργαλειοθήκη του προγράμματος. Ο αλγόριθμος αφήνεται ελεύθερος να υπολογίζει τα κεντροειδή σημεία κάθε κλάσης. Ο χρήστης ορίζει το πλήθος των κλάσεων και το βαθμό ασάφειας ή επικάλυψης των κλάσεων. Στην προκειμένη περίπτωση, ο αριθμός των κλάσεων είναι 5 και ο βαθμός ασάφειας που τελικά επιλέχθηκε είναι 2, τιμή που χαρακτηρίζεται ως συνηθισμένη. Ο βαθμός ασάφειας παίρνει τιμές από ένα έως άπειρο. Η τιμή ένα αντιστοιχεί σε Αριστοτελική ταξινόμηση. Συνηθισμένο εύρος των τιμών του βαθμού ασάφειας είναι από

1.7 έως 2.3 Μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές για ταξινομήσεις παρόμοιες με αυτήν που επιδιώκεται δεν έχουν νόημα.

Οι έξοδοι της διαδικασίας είναι οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων στο χώρο των δύο ή των τριών κριτηρίων και οι βαθμοί συμμετοχής κάθε σημείου σε όλες τις κλάσεις. Σημαντικό να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι κάθε κλάση που δημιουργείται ελεύθερα από τη διαδικασία, χαρακτηρίζεται και εκπροσωπείται από τις συντεταγμένες του κεντροειδούς σημείου της ως προς τους άξονες των κριτηρίων. Στις συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων εμπεριέχεται ο βαθμός συμμετοχής, επομένως η τιμή η οποία εξάγεται τελικά δεν αποτελεί κάτι ανάλογο για παράδειγμα του μέσου όρου του κάθε κριτηρίου για κάθε κλάση.

Καταληκτικά, για να προκύψουν οι τελικές κλάσεις και κάθε σημείο να κατατάσσεται αυστηρά σε μία κλάση, όπως ισχύει στην Αριστοτελική λογική, είναι απαραίτητη η εφαρμογή της διαδικασίας της απασαφοποίησης. Αποτελεί ουσιαστικά τη διαδικασία εκείνη όπου ο βαθμός συμμετοχής αποτελεί το κριτήριο για την καταχώρηση του σημείου στην αντίστοιχη κλάση. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η μέθοδος της μέγιστης συμμετοχής για την τελική κατάταξη. Το σημείο κατατάσσεται στην κλάση στην οποία εμφανίζει το μέγιστο εκ των πέντε βαθμών συμμετοχής. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα αυστηρό κριτήριο απασαφοποίησης. Λιγότερο αυστηρό κριτήριο αποτελεί για παράδειγμα η εφαρμογή του μέσου όρου, διαδικασία η οποία δεν εξετάστηκε.

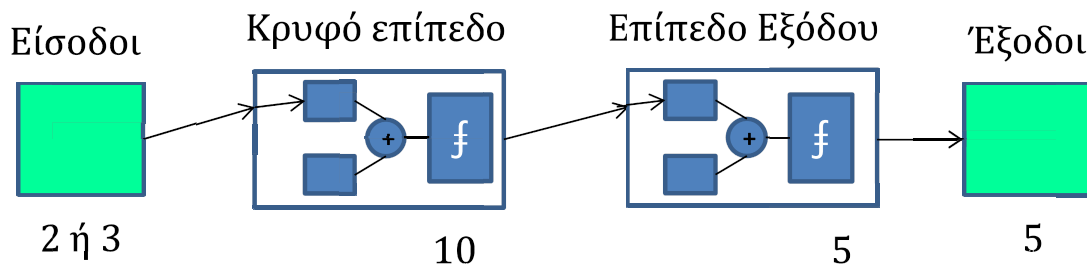
#### 4.4 Νευρωνικά Δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα (ΝΔ) εκτελούν επεξεργασία πληροφορίας, η οποία βασίζεται στη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και ακολουθούν την ιδέα της μοντελοποίησης τύπου «μαύρου κουτιού», χρησιμοποιώντας μοντέλα του ανθρώπινου εγκεφάλου τα οποία εμπνέονται από τη βιολογία και τη νευροφυσιολογία.

Ο ορισμός των τεχνητών ΝΔ απορρέει από το βιολογικό ανάλογο, που είναι το εξής: Ο εγκέφαλος αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων νευρώνων, δηλαδή νευρικών κυττάρων. Καθένας νευρώνας δέχεται ερεθίσματα (εισόδους) από άλλους νευρώνες, μέσω συνδέσεων, τα οποία επηρεάζουν την κατάστασή του, και, ανάλογα με αυτή τη κατάσταση, στέλνει με τη σειρά του ερεθίσματα (εξόδους) σε άλλους νευρώνες. Κάθε σύνδεση μεταξύ δύο νευρώνων χαρακτηρίζεται από μία τιμή ισχύος η οποία υποδηλώνει πόσο ισχυρή είναι η μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

Ουσιαστικά, τεχνητό ΝΔ είναι μια αρχιτεκτονική δομή (δίκτυο) αποτελούμενη από ένα πλήθος διασυνδεδεμένων μονάδων επεξεργασίας (τεχνητοί νευρώνες). Κάθε μονάδα επεξεργασίας χαρακτηρίζεται από εισόδους και εξόδους. Υλοποιεί τοπικά έναν υπολογισμό με βάση τις εισόδους που δέχεται και μεταδίδει το αποτέλεσμα (έξοδος) σε άλλες μονάδες επεξεργασίας με τις οποίες συνδέεται. Οι τιμές των βαρών των συνδέσεων αποτελούν τη γνώση που είναι αποθηκευμένη στο τεχνητό ΝΔ και καθορίζουν τη λειτουργικότητά του.

Τα τεχνητά ΝΔ, είναι συστήματα μεγάλης κλίμακας τα οποία περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό μη γραμμικών επεξεργαστών ειδικού τύπου, οι οποίοι καλούνται νευρώνες. Κάθε νευρωνικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από μια κατάσταση, ένα σύνολο εισόδων με βάρη που προέρχονται από άλλους νευρώνες και μία εξίσωση, η οποία περιγράφει τη δυναμική λειτουργία του ΝΔ. Τα βάρη του ΝΔ ανανεώνονται (λαμβάνουν συνέχεια νέες τιμές) μέσω μίας διαδικασίας εκπαίδευσης, η οποία πραγματοποιείται με την ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης κόστους. Οι βέλτιστες τιμές των βαρών αποθηκεύονται, ως δυνάμεις των διασυνδέσεων μεταξύ των νευρώνων και χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της εργασίας για την οποία προορίζεται το ΝΔ. Τα ΝΔ είναι κατάλληλα για προβλήματα στα οποία ο συνήθης υπολογισμός δεν είναι αποδοτικός, π.χ. μηχανική όραση, αναγνώριση προτύπων, αναγνώριση φωνής, αυτόματος έλεγχος κ.λπ..



Εικόνα 4-1: Βασικό μοντέλο Νευρωνικού Δικτύου.

Ο νευρώνας είναι η θεμελιώδης μονάδα επεξεργασίας της πληροφορίας και αποτελείται από τα εξής βασικά στοιχεία:

- Ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης
- Ένα κόμβο γραμμικής άθροισης
- Μια συνάρτηση ενεργοποίησης (μη γραμμική).

Η εκπαίδευση του ΝΔ είναι μία θεμελιακή ικανότητα των νευρωνικών δικτύων, η οποία τους επιτρέπει να εκπαιδεύονται από το περιβάλλον τους και να βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους με το πέρασμα του χρόνου. Η εκπαίδευση αναφέρεται στη διεργασία επίτευξης μίας επιθυμητής συμπεριφοράς μέσω της ανανέωσης των τιμών των συναπτικών βαρών. Αλγόριθμος εκπαίδευσης είναι ένα προκαθορισμένο σύνολο καλά ορισμένων κανόνων επίλυσης του προβλήματος εκπαίδευσης του ΝΔ. Ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο εργάζεται κάθε ΝΔ, οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Επιβλεπόμενη εκπαίδευση
- Ενισχυτική εκπαίδευση
- Μη επιβλεπόμενη εκπαίδευση (αυτο-οργανούμενη)

Ανάλογα με τη δομή του και τον αλγόριθμο εκπαίδευσης, ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ικανό να λύσει πλήθος προβλημάτων όπως προσέγγιση συναρτήσεων, προβλήματα αντιστοίχισης, ταξινόμηση προτύπων, προβλήματα ομαδοποίησης προτύπων (clustering).

Το πρόβλημα της ταξινόμησης προτύπων είναι το βασικό πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Αναλυτικότερα, ζητείται να ταξινομηθεί ένας δεδομένος αριθμός εισόδων σε ένα σταθερό σύνολο δεδομένων κατηγοριών. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί τόσο με επιβλεπόμενη όσο και με μη επιβλεπόμενη εκπαίδευση. Στην πρώτη περίπτωση το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται με ένα σύνολο ζευγών εισόδου - κατηγορία (προτύπων) και ακολούθως καλείται να ταξινομήσει πρότυπα που δεν έχει δει προηγουμένως. Μη επιβλεπόμενη εκπαίδευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν δεν διατίθεται προγενέστερη γνώση των κατηγοριών στις οποίες πρόκειται να ταξινομηθούν τα πρότυπα εισόδου.

Η συνάρτηση ενεργοποίησης στον βιολογικό νευρώνα θεωρείται πως είναι η βηματική συνάρτηση ή συνάρτηση κατωφλίου (threshold function). Στην κατασκευή των τεχνητών ΝΔ, χρησιμοποιούνται συναρτήσεις που το γράφημά τους μοιάζει με τη βηματική, αλλά σε αντίθεση με αυτή είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες. Οι συναρτήσεις αυτής της κατηγορίας ονομάζονται σιγμοειδείς (sigmoids), αφού το γράφημά τους μοιάζει με τελικό σίγμα «ς».

Η απλούστερη περίπτωση τεχνητών ΝΔ που αποτελούν και την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη κατηγορία είναι τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feed forward networks). Το χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι δεν υπάρχει ανατροφοδότηση της εξόδου ενός νευρώνα προς τους νευρώνες από τους οποίους επηρεάζεται άμεσα ή έμμεσα. Από τα δίκτυα

πρόσθιας τροφοδότησης, παρουσιάζει ενδιαφέρον η κατηγορία στην οποία οι νευρώνες είναι οργανωμένοι σε επίπεδα ή στρώματα (layers). Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται πρόσθιας τροφοδότησης γιατί, με δεδομένη κάποια είσοδο, για τον υπολογισμό της εξόδου πραγματοποιούνται υπολογισμοί, όλοι προς την ίδια κατεύθυνση: από την είσοδο προς την έξοδο.

Το δίκτυο που χρησιμοποιείται στην αναγνώριση προτύπων (στο εργαλείο prtool του Matlab) είναι ένα δίκτυο δύο επιπέδων πρόσθιας τροφοδότησης, με σιγμοειδή συνάρτηση μετάβασης και στα δύο επίπεδα (κρυφό επίπεδο και επίπεδο εξόδου). Ο αριθμός των κρυφών νευρώνων που χρησιμοποιήθηκε είναι 10, ο οποίος είναι και ο προεπιλεγμένος αριθμός κρυφών νευρώνων. Ο αριθμός των νευρώνων εξόδου είναι 5, που είναι ίδιος με τον αριθμό των επιθυμητών κλάσεων.

Το πρόβλημα της ταξινόμησης προτύπων αφορά την ταξινόμηση ενός διανύσματος εισόδου σε ένα σταθερό σύνολο κατηγοριών. Πρόκειται δηλαδή ουσιαστικά για ένα πρόβλημα απεικόνισης. Για την εκπαίδευση του ΝΔ, χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των σημείων που επιλέχθηκαν μέσω παρατήρησης των ορθοφωτογραφιών. Αρχικά, το σύνολο των παραπάνω σημείων θεωρείται οριστικά ταξινομημένο στις αντίστοιχες κλάσεις και, στη συνέχεια, το καθένα από τα υπόλοιπα σημεία της λεκάνης κατατάσσεται στην κλάση που είναι ο «κοντινότερος γείτονας», δηλαδή στην κλάση στην οποία ανήκει το κοντινότερο σε αυτό σημείο (π.χ., στον χώρο HAND, SLOPE για 2 κριτήρια).

#### 4.5 Κλάσεις Ταξινόμησης

Ο διαχωρισμός του αναγλύφου των υδρολογικών λεκανών σε μικρότερες περιοχές - ομάδες με τα ίδια χαρακτηριστικά, μελετώντας τη μορφολογία του αναγλύφου αποτελεί διαδικασία ερευνητικού ενδιαφέροντος. Το σύνολο των υδρολογικών λεκανών στον Ελλαδικό χώρο αποτελείται από παραποτάμιες περιοχές, μικρού ή μεγαλύτερου πλάτους, ανάλογα με την κοιλάδα την οποία διαρρέει ο ποταμός. Οι περιοχές αυτές συχνά μετασχηματίζονται σε υγροτόπους κοντά στις εκβολές, λόγω των μικρών κλίσεων του εδάφους, των μεγάλων παροχών των ποταμών και των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα με το πέρασμα των χρόνων, όπως η στερεομεταφορά και η διάβρωση.

Κατά την απομάκρυνση από τη μέση στάθμη της θάλασσας, η ποικιλομορφία του αναγλύφου είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των Ελληνικών τοπίων. Καλλιεργούμενες εκτάσεις, λόφοι μικρού υψόμετρου, απότομες πλαγιές, βαθιά φαράγγια, ομαλότερες μισγάγγειες, επίπεδες ορεινές περιοχές και αιχμηρές κορυφογραμμές είναι μερικά από τα κατεξοχήν αντιπροσωπευτικά τοπία.

Ο σαφής ορισμός των κλάσεων στις οποίες πρόκειται να ταξινομηθούν οι λεκάνες μελέτης, καθιστά τα αποτελέσματα άμεσα αντιληπτά και δεν αφήνει δυσνόητα σημεία. Βάσει της αρχικής εκτίμησης της μορφολογίας των λεκανών επιλέγεται η ταξινόμηση αυτών να γίνει σε πέντε κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία, οι περιοχές που κατατάσσονται, ονομάζονται παρόχθιες περιοχές και αντιπροσωπεύουν περιοχές που βρίσκονται πολύ κοντά στο υδρογραφικό δίκτυο, έχουν μικρές κλίσεις και δεν ανήκουν στα πρηνή που δημιουργούνται στις όχθες των ποταμών, αλλά εμπεριέχουν περιοχές που χαρακτηρίζονται ως υγρότοποι ή δέλτα ποταμών. Ο δείκτης HAND, στα πεδία αυτά έχει πολύ μικρή τιμή καθώς το υψόμετρο του ποταμού ουσιαστικά συμπίπτει με το υψόμετρο των παραπάνω περιοχών.

Οι περιοχές που ανήκουν στη δεύτερη κλάση, ουσιαστικά αποτελούν γεωγραφική συνέχεια των παραπάνω περιοχών στην περίπτωση όπου το ανάγλυφο συνεχίζεται ομαλό. Οι περιοχές αυτές καλούνται «πεδινές εκτάσεις». Αυτές, αν και είναι θεωρητικά επίπεδες εκτάσεις, έχουν μέσο όρο τιμών κλίσης εδάφους, ελαφρώς υψηλότερο από την πρώτη κατηγορία.



Οι πρόποδες των βουνών αποτελούν μεγάλης έκτασης περιοχές στην Ελληνική επικράτεια, λόγω του έντονου ορεινού αναγλύφου, είναι φυσικό να αποτελούν το διαχωριστικό στοιχείο μεταξύ των πεδινών περιοχών και των απότομης κλίσεως ζωνών. Οι περιοχές αυτές κατατάσσονται στην τρίτη κατηγορία και αποτελούν τις «πλαγιές ήπιας κλίσης». Ο δείκτης HAND είναι ασφαλώς μεγαλύτερος από ό,τι στις δύο προηγούμενες κατηγορίες, λόγω του ότι η αύξηση της κλίσης οδηγεί σε αύξηση των υψομέτρων των περιοχών αυτών έναντι των υψομέτρων του υδρογραφικού δικτύου απ' όπου υπολογίζεται ο δείκτης, που πιθανά διέρχεται από πεδινές περιοχές και δεν διασχίζει μισγάγγειες.

Στην τέταρτη κατηγορία βρίσκονται οι «πλαγιές απότομης κλίσης». Οι περιοχές αυτές αποτελούν και χαρακτηρίζουν την πληθώρα των ορεινών επικλινών περιοχών. Η αυξημένη κλίση του εδάφους, επιτρέπει συνθήκες άμεσης απορροής των κατακρημνίσεων. Το σύνολο της απορροής που συμβαίνει στην κλάση αυτή ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό πλημμυρών στον Ελλαδικό χώρο.

Καταληκτικά, παρουσιάζεται η πέμπτη και τελευταία κλάση στην οποία πρόκειται να ταξινομηθούν οι λεκάνες μελέτης. Η κλάση αυτή αντιπροσωπεύει τα «οροπέδια» και επομένως ονομάζεται αντίστοιχα. Δεν είναι συνηθισμένη η εμφάνισή της στις Ελληνικές υδρολογικές λεκάνες.

Ανάλογα με τη μέθοδο ταξινόμησης και το είδος της υδρολογικής λεκάνης, οι περιοχές αυτών ταξινομούνται στις παραπάνω κλάσεις ή σε κλάσεις ανεξάρτητες των παραπάνω. Οι τελευταίες προκύπτουν λόγω της ελευθερίας του συστήματος να επιλέξει και να δημιουργήσει κλάσεις ανάλογα με τις τιμές των κριτηρίων.

Είναι, επομένως, επιτακτική ανάγκη του προσδιορισμού των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης, στην περίπτωση όπου αυτή διαφέρει από τις πέντε που ορίστηκαν παραπάνω.

#### **4.6 Εύρος κλάσεων**

Η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη HAND, προφανώς μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε ΨΜΕ, ανεξαρτήτως οριζοντιογραφικής ή υψομετρικής ακρίβειας και να εμπεριέχει σιωπηρά την μορφολογική και υδρολογική πληροφορία. Για την βέλτιστη ταξινόμηση των περιοχών μιας λεκάνης απορροής, είναι απαραίτητη η εφαρμογή των κατάλληλων ορίων στις τιμές του δείκτη HAND. Σε αυτή την περίπτωση, είναι αναγκαία η πληροφορία από μετρήσεις πεδίου. Λεπτομερή δεδομένα κατά μήκος των διατομών των κλάδων ενός υδατορεύματος, αποτελούν την απάντηση στην εύρεση και τον προσδιορισμό των ορίων.

Η εκτέλεση των μετρήσεων πεδίου, αποτελεί χρονοβόρα και κοπιαστική διαδικασία, που μπορεί να αντικατασταθεί από φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, το πλήθος των σημείων που είναι απαραίτητα για τη βαθμονόμηση του συστήματος, την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τον προσδιορισμό του εύρους των κλάσεων, προέρχεται από επιτόπου τοπογραφικές μετρήσεις με τη χρήση συστήματος GPS.

Το εύρος των τιμών των χαρακτηριστικών με βάση τα οποία θα ταξινομηθεί το σύνολο των κελιών της λεκάνης απορροής, προκύπτουν έτσι ώστε τα παρατηρούμενα επίγεια σημεία, να ταξινομηθούν, μετά την ολοκλήρωση της ταξινόμησης, στην αντίστοιχη κλάση στην οποία αρχικά καταγράφηκαν. Ο παραπάνω «εξαναγκασμός» ως προς τη διαδικασία της ταξινόμησης, δεν έχει ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη ταξινόμηση.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η επιλογή των σημείων έγινε από ορθοφωτογραφίες, με συνυπολογισμό των κλίσεων, των χρήσεων γης και της ύπαρξης ή όχι υδρογραφικού δικτύου. Αποτέλεσμα της διαδικασίας που εφαρμόστηκε, είναι η συλλογή περίπου 14000 χαρακτηριστικών σημείων σε χρονικό διάστημα λιγότερο των τεσσάρων ημερών (και στις

δύο λεκάνες μαζί). Το δείγμα αυτό των σημείων χρησιμοποιήθηκε στην εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, αλλά δεν συμπεριλήφθηκε στην ασαφή ταξινόμηση.

Για τον έλεγχο και τη συμφωνία του φωτογραμμετρικού δείγματος ως προς την πραγματικότητα, χρησιμοποιήθηκε τρίτο δείγμα σημείων, που συλλέχθηκε με επιτόπου μετρήσεις σε περιοχή της λεκάνης στην Ανατολική Αττική. Τα παραπάνω σημεία χαρακτηρίστηκαν και κατατάχθηκαν στις κλάσεις, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πεδίου και με βάση την παρατήρηση των επίγειων συνθηκών.

Η εμφάνιση δυσκολιών, κατά τη φάση αυτή των μετρήσεων πεδίου, όπως η μικρή διάρκεια "ζωής" της μπαταρίας του ενός εκ των δύο δεκτών, η έλλειψη οπτικής επαφής μεταξύ του δέκτη Base και Rover, απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου μέτρησης με GPS, το ελλιπές οδικό δίκτυο για την προσέγγιση κλάσεων όπως η πέμπτη σε ορεινότερες περιοχές, είχε ως αποτέλεσμα τη μέτρηση μη ικανοποιητικού αριθμού σημείων σε όλες τις κλάσεις. Συνέπεια των παραπάνω είναι ο έλεγχος μόνον των δύο πρώτων κλάσεων και η καταχώρηση αντίστοιχα σημείων μόνον σε αυτές τις δύο κλάσεις. Ο αριθμός των σημείων που καταχωρήθηκαν σε καθεμία από τις δύο κλάσεις είναι περίπου 50 σημεία.

## 5 Αποτελέσματα

---

### 5.1 Εφαρμογή στη λεκάνη του π. Ερασίνου

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η γενική υδρολογική διερεύνηση της περιοχής της λεκάνης του π. Ερασίνου. Ειδικότερα αντικείμενα είναι η κατάρτιση χαρτών τόσο του αποτελέσματος της ταξινόμησης, όπου θα παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι γήινων μονάδων, όσο και των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται σε αυτή. Η διαδικασία για την παραγωγή των μεγεθών, που στην προκειμένη περίπτωση είναι οι κλίσεις του εδάφους, ο δείκτης HAND και οι αποστάσεις από τον κοντινότερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου παρουσιάζεται παρακάτω.

#### 5.1.1 Προετοιμασία

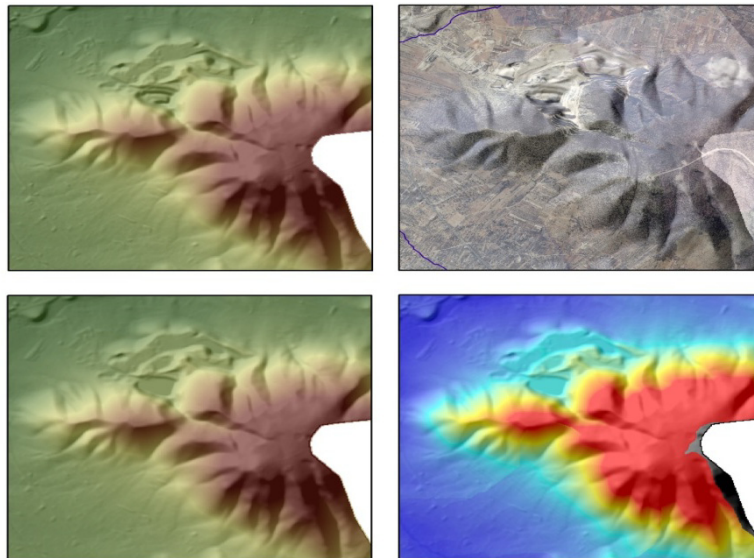
Για την έναρξη των υπολογισμών των παραπάνω μεγεθών, και την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μοναδικό απαραίτητο δεδομένο είναι το ΨΜΕ[3]. Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται στο πρόγραμμα ArcGIS 10 της ESRI.

Αρχικά, εισάγεται το δεδομένο ΨΜΕ[3] υπό μορφή σημείων και αυτό μετατρέπεται σε κανονικοποιημένο αρχείο κανάβου (raster αρχείο, grid), με μέγεθος κανάβου όσο και η απόσταση των σημείων. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η αποφυγή εφαρμογής παρεμβολής για την απόδοση των υψομέτρων σε αρχείο raster. Το ΨΜΕ είναι μία αναπαράσταση κανονικοποιημένης μορφής (raster) της επιφάνειας του εδάφους, στην οποία κάθε εικονοστοιχείο (κελί) περιέχει ως περιγραφική ιδιότητα τη τιμή του υψομέτρου της γήινης επιφάνειας. Κάθε κελί του αρχείου raster έχει ως τιμή υψομέτρου την αντίστοιχη τιμή του σημείου του ΨΜΕ[3]. Το σημείο αυτό βρίσκεται στο κέντρο του κελιού του κανάβου.

Στην Εικόνα Π-1 παρουσιάζεται η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του π. Ερασίνου, όπως περιγράφεται από τα δεδομένα.

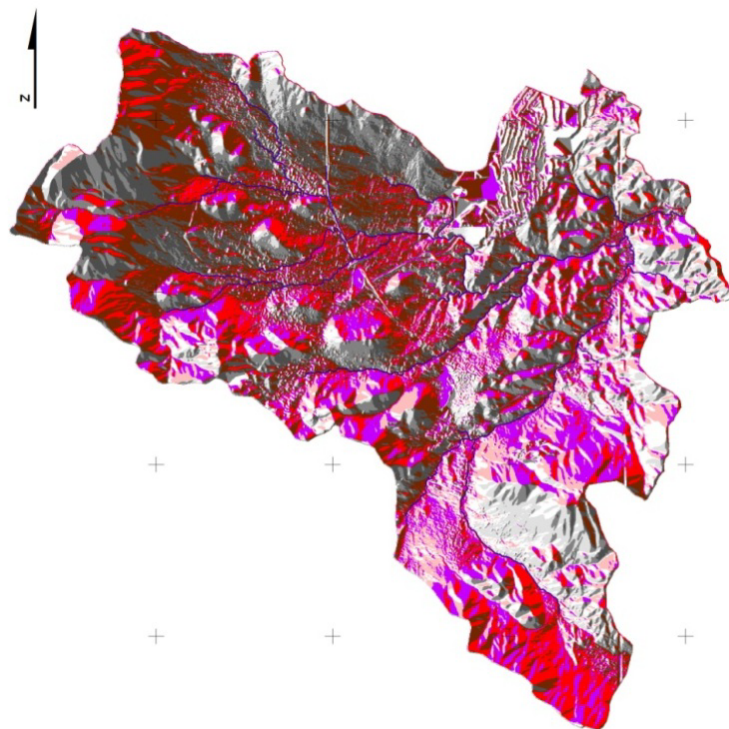
Το παραπάνω raster ΨΜΕ, δεν είναι διορθωμένο ως προς την υδρολογική του συνέπεια, επομένως είναι αναγκαία η εφαρμογή του συνόλου των εντολών, για την παραγωγή του υδρολογικά ορθού ΨΜΕ της λεκάνης του π. Ερασίνου. Στη συνέχεια, το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ ομαλοποιείται και από το ομαλοποιημένο εξάγονται τα υπολογισμένα μεγέθη της κλίσης του εδάφους, του δείκτη HAND και των αποστάσεων.

Για την εκτίμηση της ποιότητας του ΨΜΕ που προέκυψε, δημιουργείται ένα σκιασμένο ΨΜΕ για τον εντοπισμό των χονδροειδών σφαλμάτων (τυχόν βυθίσματα) και στην περίπτωση που αυτά υπάρχουν εκτελείται η εντολή Fill για το γέμισμα αυτών. Ο λόγος εκτέλεσης της παραπάνω εντολής είναι τελικά να απορρεύσει όλο το πλήθος των κελιών της λεκάνης. Επομένως, διορθώνονται τοπικές ανωμαλίες ή βυθίσματα, τα οποία δεσμεύουν ποσότητες υδάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της διόρθωσης είναι περιοχές όπως τάφροι ή ορυχεία, όπως αυτό στα νότια της λεκάνης Ερασίνου, στους πρόποδες του όρους Μερέντα, στην περιοχή Γιδοτόπι όπου φαίνεται η διόρθωση των υψομέτρων του ορυχείου (Εικόνα 5-1). Στο πάνω αριστερά εικόνα παρουσιάζεται το ανάγλυφο της περιοχής, όπως το αναπαριστά το αρχικό ΨΜΕ. Πάνω δεξιά απεικονίζεται η ορθοφωτογραφία της περιοχής του ορυχείου, κάτω αριστερά παρουσιάζεται η ίδια περιοχή όπως αναπαρίσταται από το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ στο οποίο έχει γίνει ομαλοποίηση και κάτω δεξιά είναι ο δείκτης HAND.

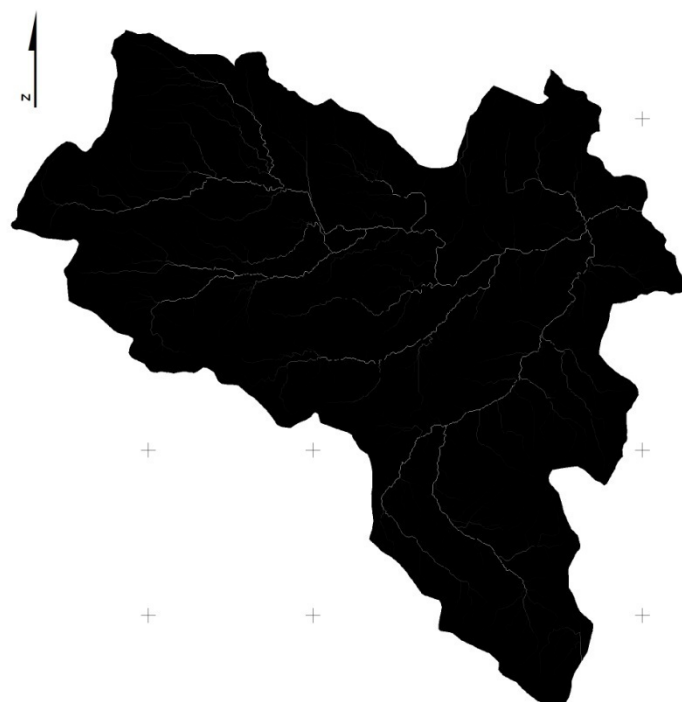


Εικόνα 5-1: Περιοχή ορυχείου.

Για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από το ΨΜΕ μεσολαβούν δύο βήματα: η δημιουργία κανάβου διεύθυνσης απορροής (Εικόνα 5-2) και η δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικής ροής (Εικόνα 5-3, Εικόνα Π-3). Τα παραπάνω δύο μεγέθη υπολογίζονται και συγκρίνονται για την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ με την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το ομαλοποιημένο υδρολογικά ορθό ΨΜΕ.



Εικόνα 5-2: Κανάβος Διεύθυνσης Απορροής, λεκάνης π. Ερασίνου.



Εικόνα 5-3: Κάναβος Συγκεντρωτικής απορροής λεκάνης π. Ερασίνου.

Από τα στατιστικά στοιχεία που υπολογίζονται για το σύνολο της λεκάνης, από τον κάναβο διεύθυνσης απορροής, που απεικονίζει το χαρακτηρισμό κάθε κελιού της λεκάνης, ανάλογα με τη διεύθυνση στην οποία απορρέει, φαίνεται ότι το 18.9% των κελιών απορρέουν προς την ανατολή και το αμέσως μικρότερο ποσοστό των 15.2% των κελιών απορρέει προς τα νοτιοανατολικά, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5-1.

Πίνακας 5-1: Στατιστικά στοιχεία κανάβου Διεύθυνσης Απορροής

Διεύθυνση Απορροής	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1 (Α)	383005	18.9
2 (ΝΑ)	307137	15.2
4 (Ν)	241627	11.9
8 (ΝΔ)	150872	7.5
16 (Δ)	200764	9.9
32 (ΒΔ)	177984	8.8
64 (Β)	293789	14.5
128 (ΒΑ)	268385	13.3
Σύνολο:	2023563	100

Μετά την εφαρμογή της ομαλοποίησης του ΨΜΕ, η κατανομή των κελιών ως προς τη διεύθυνση απορροής (Εικόνα Π-2), δεν μεταβάλλεται αισθητά (Πίνακας 5-2).

Πίνακας 5-2: Στατιστικά στοιχεία ομαλοποιημένου κανάβου Διεύθυνσης Απορροής.

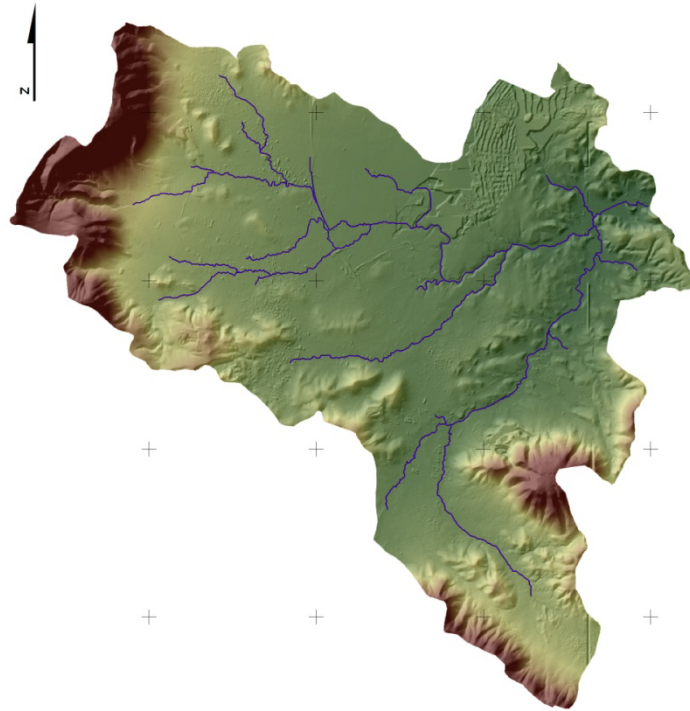
Διεύθυνση Απορροής	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1 (Α)	387794	19.16

Διεύθυνση Απορροής	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
2 (NA)	320142	15.82
4 (N)	228770	11.31
8 (NΔ)	150818	7.45
16 (Δ)	192537	9.51
32 (BΔ)	182046	9.00
64 (B)	285208	14.09
128 (BA)	276248	13.65
Σύνολο:	2023563	100

Από τον κίονα συγκεντρωτικής ροής, θα προκύψει το τελικό υδρογραφικό δίκτυο, με το οποίο θα διορθωθεί ως προς τις κλίσεις το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ. Η εφαρμογή συγκεκριμένης τιμής κατωφλίου για την εξαγωγή του δικτύου είναι βαρύνουσα σημασίας διαδικασία. Η επιλογή της κατάλληλης τιμής έγινε μετά από δοκιμές. Επιλέχθηκε η τιμή των 40 000. Η τιμή αυτή είναι το όριο με το οποίο κάθε κελί της λεκάνης χαρακτηρίζεται υδρογραφικό δίκτυο ή όχι. Ουσιαστικά, σημαίνει πως αν σε κάποιο κελί απορρέει αριθμός κελιών μεγαλύτερος από 40 000 τότε αυτό το κελί χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο ενώ στην αντίθετη περίπτωση αποτελεί το υπόβαθρο της λεκάνης. Το υδρογραφικό δίκτυο που τελικά επιλέχθηκε προσαρμόζεται αρκετά καλά στο υδρογραφικό δίκτυο, που αποτυπώνεται στους χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1/5 000, και επομένως αντιστοιχεί στην πραγματικότητα.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής του υδρογραφικού δικτύου στο αντίστοιχο κελί της εξόδου της λεκάνης απορροής του π. Ερασίνου, μετρήθηκαν να απορρέουν σε αυτό 1 897 990 κελιά. Το πλήθος των κελιών που απαρτίζουν τη λεκάνη είναι 2 023 563. Η παραπάνω μετρημένη διαφορά, αποτελεί συμπέρασμα πως αυτός ο μικρός αριθμός κελιών δεν απορρέουν στην έξοδο της λεκάνης, αλλά προφανώς λόγω κλίσεων του εδάφους απορρέουν προς άλλη διεύθυνση. Στο γεγονός αυτό συμβάλουν τα σφάλματα που υπάρχουν στο ΨΜΕ (περιοχές χωρίς υψομετρική πληροφορία, περιοχές ορυχείων, βυθίσματα λόγω χονδροειδών σφαλμάτων στα αρχικά δεδομένα κατά την παραγωγή του ΨΜΕ) που πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να εξαλειφτούν τελείως κατά τη διαδικασία της υδρολογικής διόρθωσης. Αναλυτικότερα, αναφέρεται η περίπτωση που κατά τη συνήθη διαδικασία υδρολογικής συνόρθωσης, εκτελείται η εντολή Fill, για τη διόρθωση μερικών από τις παραπάνω πηγές σφαλμάτων. Η εφαρμογή της παραπάνω εντολής, μιας και εκτελείται στο σύνολο της λεκάνης και όχι σε επιλεγμένες περιοχές, όταν εκτελείται σε περιοχές χωρίς αλλοιώσεις, υπάρχουν περισσότερες πιθανότητες να συμπληρώσει περιοχές που αποτελούν υδρογραφικό δίκτυο, όπου η μορφολογία του εδάφους εκεί είναι παρόμοιας φύσης με αυτή των προς διόρθωση περιοχών όπως για παράδειγμα μια τάφρος, παρά πεδινές περιοχές ή περιοχές ήπιου ανάγλυφου. Τελικό αποτέλεσμα είναι η αλλοίωση των χαρακτηριστικών των παρόχθιων περιοχών, γεγονός που γεννά επιπρόσθετα σφάλματα στη μετέπειτα διαδικασία της ταξινόμησης των περιοχών αυτών.

Το παραγόμενο υδρογραφικό δίκτυο από τα δεδομένα του ΨΜΕ[3] χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της υδρολογική συνέπειας του ΨΜΕ[3], ώστε να προκύψει το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ της λεκάνης του π. Ερασίνου. Στους υπολογισμούς του δείκτη HAND και της απόστασης κάθε κελιού της λεκάνης από το κοντινότερο σε αυτό, κελί που χαρακτηρίζεται ως κλάδος υδατορεύματος.



Εικόνα 5-4: Ομαλοποιημένο ΨΜΕ λεκάνης π. Ερασίνου.

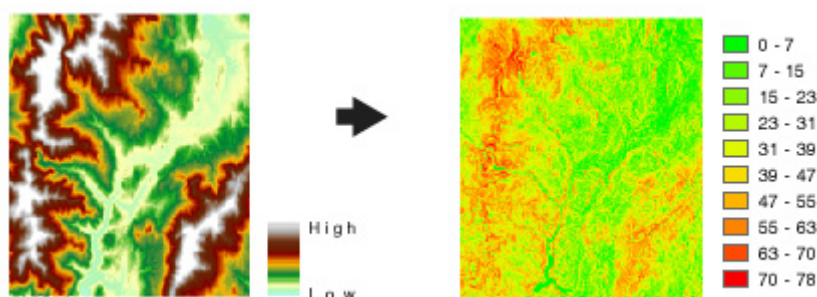
Το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ της λεκάνης του π. Ερασίνου και το παραγόμενο αντίστοιχο υδρογραφικό δίκτυο φαίνονται στην Εικόνα 5-4. Το εύρος των υψομέτρων της λεκάνης εκτείνεται από 0 m (ελάχιστο υψόμετρο, στην ακτογραμμή στην περιοχή των εκβολών του ποταμού (κόλπος Βραυρώνας) έως 1017.8 m (μέγιστο υψόμετρο, στην περιοχή του Υμηττού, βορειοανατολικά της λεκάνης) με μέσο υψόμετρο τα 171.3 m και τυπική απόκλιση αυτού 150.2 m.

Ακολουθεί ο υπολογισμός των κλίσεων του εδάφους της λεκάνης, διαδικασία που έγινε με τη χρήση της αντίστοιχης εντολής (slope) του προγράμματος ArcGIS 10. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται, υπολογίζει την κλίση για κάθε κελί του ΨΜΕ ως τη μέγιστη διαφορά των τιμών των υψομέτρων κατά τη διεύθυνση x (γραμμές κανάβου) προς την αντίστοιχη απόσταση dx και αντίστοιχα ως προς τη διεύθυνση y (στήλες κανάβου) προς την απόσταση dy. Η εξίσωση υπολογισμού φαίνεται παρακάτω (ESRI 2010):

$$slope\_degrees = \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{dz^2}{dx} + \frac{dz^2}{dy}}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (5.1)$$

Τα αποτελέσματα του αλγόριθμου δίνουν τιμές της κλίσης σε μοίρες (degrees), το εύρος των τιμών είναι από 0, επίπεδες επιφάνειες έως 90° απότομες κλίσεις, σχεδόν κατακόρυφες. Όταν η κλίση παίρνει την τιμή 45°, η οριζόντια απόσταση είναι ίση με την κατακόρυφη απόσταση, που αντιστοιχεί στην υψομετρική διαφορά. Στην παρακάτω Εικόνα 5-5, δεξιά παρουσιάζεται ο κανάβος των κλίσεων, που αντιστοιχεί στην αντίστοιχη περιοχή αναγλύφου, που φαίνεται στο αριστερό μέρος της εικόνας.





Εικόνα 5-5: Υπολογισμός κλίσεων από το ΨΜΕ (πηγή: ESRI, 2010).

### 5.1.2 Αποτελέσματα Ταξινόμησης

Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζεται το πλήθος των κελιών της λεκάνης του π. Ερασίνου και η κλάση στην οποία καταχωρήθηκε, μετά την εφαρμογή της ασαφούς ταξινόμησης με την εφαρμογή των δύο κριτηρίων, του δείκτη HAND, έτσι όπως αυτός υπολογίστηκε από το ομαλοποιημένο ΨΜΕ και την κλίση του εδάφους. Η ταξινόμηση έδειξε πως το μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης (52.35%) ταξινομείται στην κλάση 1, που αποτελεί τις παρόχθιες περιοχές. Η αμέσως εκτενέστερη κλάση είναι η κλάση 2. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ταξινόμησης υπό μορφή χάρτου, φαίνονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π-8).

Πίνακας 5-3: Ποσοστά κάλυψης, μέσω ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των δύο κριτηρίων.

Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1	1005178	52.35
2	475379	24.76
3	243716	12.69
4	133971	6.98
5	62029	3.23
Σύνολο:	1920273	100.00

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 5-4 με τα αποτελέσματα της ταξινόμησης όπου λήφθηκαν υπ' όψη και τα τρία κριτήρια, ο δείκτης HAND, η κλίση του εδάφους και η απόσταση. Το αποτέλεσμα είναι σαφώς διαφοροποιημένο και αυτό δείχνει την επίδραση του τρίτου κριτηρίου στη διαδικασία ταξινόμησης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ταξινόμησης υπό μορφή χάρτου, φαίνονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π-9).

Πίνακας 5-4: Ποσοστά κάλυψης, μέσω ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των τριών κριτηρίων.

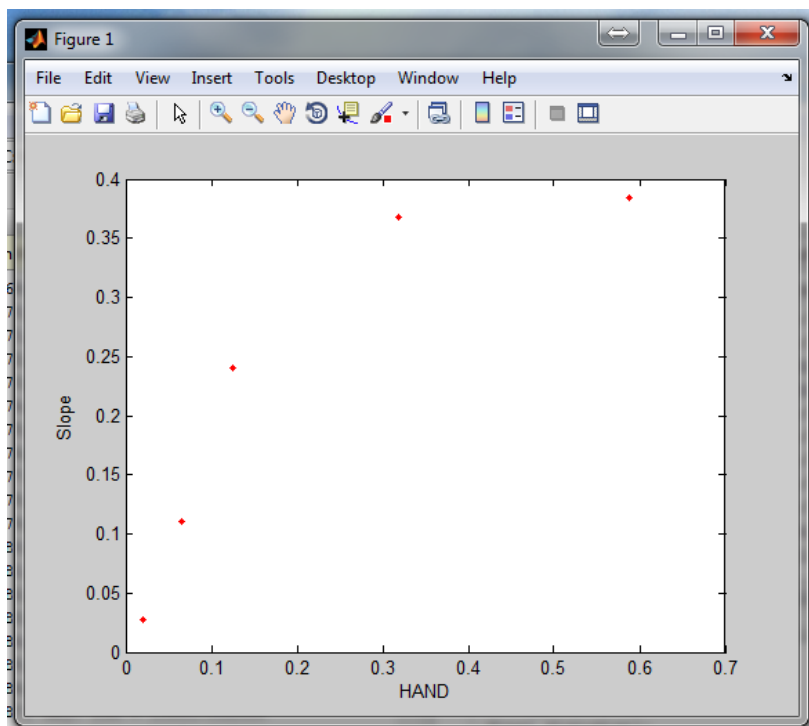
Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1	668299	34.80
2	552772	28.79
3	316454	16.48
4	235436	12.26
5	147312	7.67
Σύνολο:	1920273	100.00

Όπως φαίνεται και από τους αντίστοιχους χάρτες που παρουσιάζουν τα απασαφοποιημένα αποτελέσματα της ασαφούς διαδικασίας, για δύο (Εικόνα 5-7) και τρία κριτήρια (Εικόνα



5-9), η βέλτιστη ταξινόμηση της λεκάνης δεν προκύπτει με την εφαρμογή των δύο κριτηρίων, καθώς η επιφάνεια που καλύπτει η πρώτη κλάση προσεγγίζει πολύ μεγαλύτερης έκτασης περιοχή από ό,τι αυτή η κλάση αυτή αναμένεται να καταλαμβάνει στην πραγματικότητα.

Στην Εικόνα 5-6 φαίνεται η διάταξη των κεντροειδών σημείων ως προς τους άξονες των δύο κριτηρίων, ενώ στον Πίνακα 5-5 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων κάθε κλάσης, όπως αυτές προέκυψαν από την ασαφή ταξινόμηση με δύο κριτήρια.

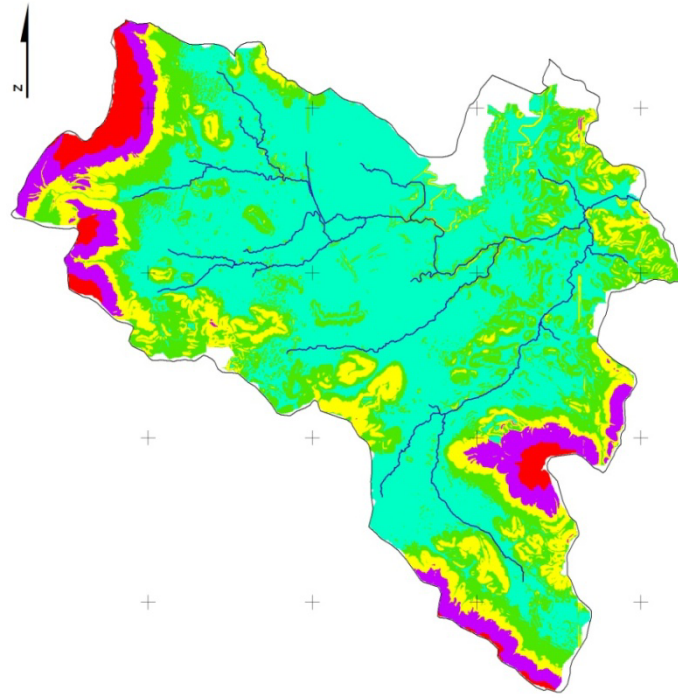


Εικόνα 5-6: Τα κεντροειδή σημεία των πέντε κλάσεων για δύο κριτήρια.

Με βάση τη θεωρία την οποία ακολουθούν οι αλγόριθμοι ασαφούς ταξινόμησης, κάθε κλάση περιλαμβάνει σημεία τα οποία βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κεντροειδές σημείο κάθε κλάσης. Η επαναληπτική διαδικασία που εκτελείται, έχει ως πρωταρχικό στόχο τον ορισμό κεντροειδών σημείων ίσου πλήθους με τον αριθμό των κλάσεων που επιλέγει ο χρήστης και, στη συνέχεια, την βελτιστοποίηση της θέσης αυτών των σημείων μειώνοντας την τιμή της συνάρτησης στόχου της μεθόδου.

Πίνακας 5-5: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων ως προς τους άξονες των δύο κριτηρίων της ασαφούς ταξινόμησης.

Κλάση	Δείκτης HAND (m)	Κλίση (°)
1	505.95	33.38
2	274.08	31.92
3	107.80	20.84
4	55.71	9.59
5	17.56	2.43
max	859.67	86.918



Εικόνα 5-7: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με δύο κριτήρια.

Από τις συντεταγμένες των πέντε κεντροειδών σημείων (τιμές του δείκτη HAND, της κλίσης και της απόστασης για κάθε σημείο, στον τριών διαστάσεων χώρο των αντίστοιχων μεγεθών) φαίνεται πως οι κλάσεις που δημιουργούνται δεν περιγράφουν σε όλες τις περιπτώσεις τα χαρακτηριστικά της κλάσης την οποία αναμένεται να απεικονίζουν στους χάρτες.

Το εύρος τιμών για κάθε κριτήριο και κάθε κλάση, όπως προκύπτει μετά τη ασαφή ταξινόμηση με δύο κριτήρια παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες. Για το δείκτη HAND παρουσιάζονται στον Πίνακας 5-6.

Πίνακας 5-6: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.

HAND (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0	75.19	189.30	795.46
2	0	14.75	31.3	247.58
3	0	27.6	87.4	392.86
4	0	14.28	43.40	272.62
5	0	11.50	16.13	128.3

Για τις κλίσεις του εδάφους οι αντίστοιχες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακας 5-7 Πίνακας 5-6.

Πίνακας 5-7: Το εύρος τιμών κλίσεων για κάθε κλάση.

Κλίση (degrees)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0	4.24	10.59	42.54
2	0	1.74	3.44	15.36
3	0	2.2	7.23	35.6

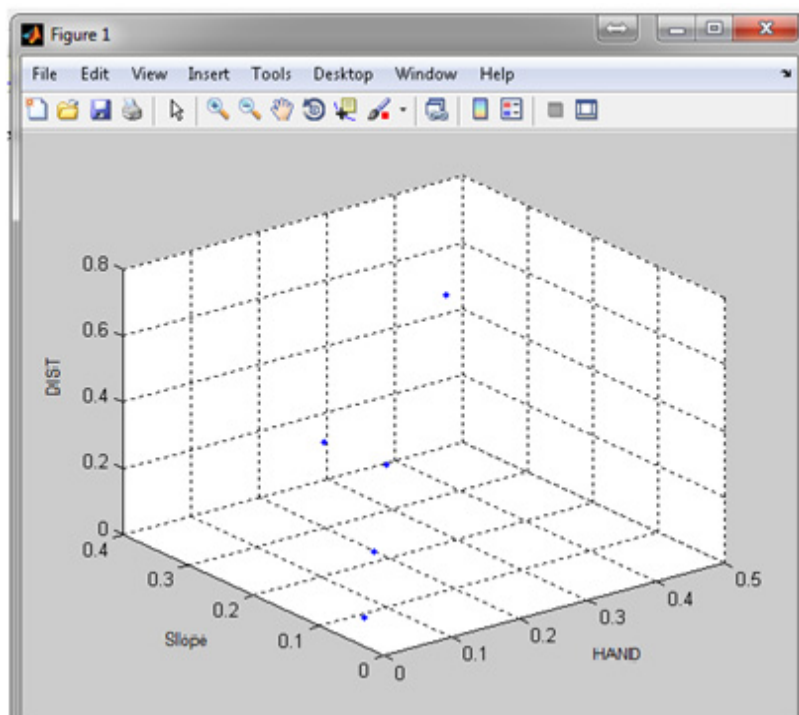
Κλίση (degrees)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
4	0	1.8	5.26	38.7
5	0	1.1	1.4	6.50

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-9 η είσοδος του τρίτου κριτηρίου φαίνεται να ευνοεί την κατάταξη ορισμένων περιοχών σε κάποια κλάση και αντίστοιχα να δυσχεραίνει τις αποφάσεις ως προς την κατάταξη άλλων περιοχών. Για παράδειγμα, οι τirkουάζ περιοχές, όπου αντιπροσωπεύουν τις παρόχθιες περιοχές, όπου οι τιμές και των τριών κριτηρίων είναι ελάχιστες φαίνεται ότι μετά την εισαγωγή της απόστασης μειώθηκαν και πρακτικά προσεγγίζουν καλύτερα τον αρχικό ορισμό της κλάσης. Όμοια συμβαίνει και με την πέμπτη κλάση, την κλάση των οροπεδίων (κόκκινο), όπου η απόσταση από τον κοντινότερο κλάδο υδρογραφικού δικτύου παίρνει τιμές κοντά στη μέγιστη τιμή του εύρους των τιμών των αποστάσεων. Η κλάση αυτή με την χρήση του τρίτου κριτηρίου βελτιώθηκε αισθητά. Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως και με τις ενδιάμεσες κλάσεις, όπου τα κεντροειδή δεν αντιπροσωπεύουν τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά αυτών. Ο Πίνακας 5-8 παρουσιάζει τις συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων, ως προς τους τρεις άξονες των τριών κριτηρίων.

Πίνακας 5-8: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων ως προς τους άξονες των τριών κριτηρίων της ασαφούς ταξινόμησης.

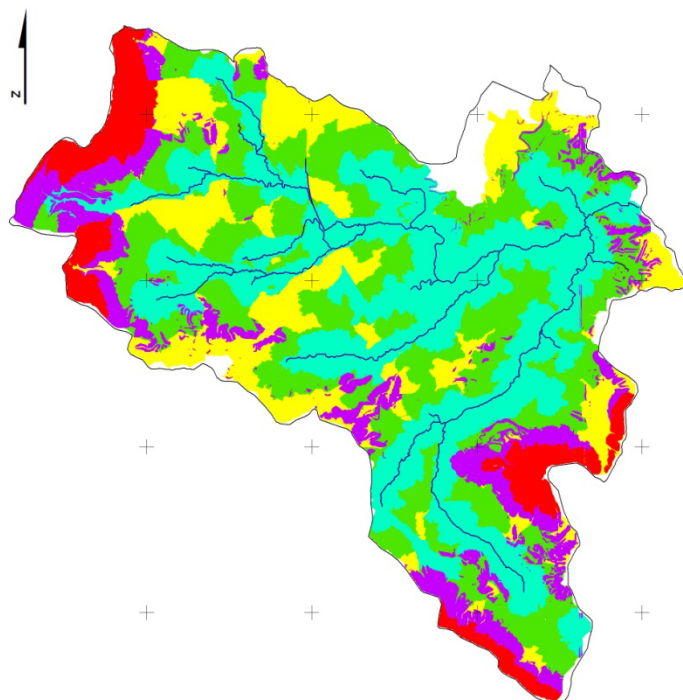
Κλάση	Δείκτης HAND (m)	Κλίση (°)	Απόσταση (m)
1	379.42	31.72	2960.93
2	37.02	5.14	1396.12
3	68.33	6.81	2705.74
4	136.82	22.29	1871.67
5	11.72	3.81	396.66
max	859.67	86.918	5845

Η Εικόνα 5-8 απεικονίζει τη διάταξη των σημείων στο τρισδιάστατο χώρο των τριών κριτηρίων, του δείκτη HAND, της κλίσης και της απόστασης.



Εικόνα 5-8 Η διάταξη των κεντροειδών σημείων ως προς τους άξονες των τριών κριτηρίων της ασαφούς ταξινόμησης.

Ακολουθεί το απασαφοποιημένο αποτέλεσμα της ασαφούς ταξινόμησης με τη χρήση των τριών υδρολογικών κριτηρίων. Η κατανομή των εκτάσεων στις ασαφής κλάσεις που προέκυψαν μετά τη διαδικασία ταξινόμησης, φαίνονται στην Εικόνα 5-9.



Εικόνα 5-9: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με τρία κριτήρια.

Στόχος για την ερμηνεία των παραπάνω αποτελεσμάτων είναι ο ορισμός εκ νέου των κλάσεων που δημιουργήθηκαν, με βάση τα χαρακτηριστικά του κεντροειδούς σημείου κάθε κλάσης.

Το εύρος τιμών για κάθε κριτήριο και κάθε κλάση, όπως προκύπτει μετά την ασαφή ταξινόμηση με τρία κριτήρια παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες

Για το δείκτη HAND παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-9.

Πίνακας 5-9: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.

HAND (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0	21.9	39.9	268.7
2	0	98.9	208.4	859.7
3	0	3.6	10.6	285.0
4	0	10.6	38.5	283.5
5	0	9.8	20.2	193.4

Για τις κλίσεις του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-10 Πίνακας 5-6.

Πίνακας 5-10: Το εύρος τιμών των κλίσεων για κάθε κλάση.

Κλίση (degrees)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0	1.6	3.3	28.8
2	0	5.6	11.5	46.9
3	0	1.1	3.0	30.2
4	0	1.5	5.3	45.5
5	0	1.1	2.5	18.6

Για τις αποστάσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-11 Πίνακας 5-14 Πίνακας 5-6.

Πίνακας 5-11: Το εύρος τιμών των αποστάσεων για κάθε κλάση.

Απόσταση (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0	869.9	1328.7	4346.2
2	0	788.6	1572.4	5734.0
3	0	116.4	233.6	929.4
4	0	169.9	574.5	3813.1
5	0	394.5	654.5	2083.7

Αντίθετα με τα παραπάνω, η εφαρμογή ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα, έχει ως συνέπεια τα αποτελέσματα να είναι κατευθυνόμενα. Η διαδικασία της ταξινόμησης με αυτή τη μέθοδο, απαιτεί δεδομένα εκπαίδευσης του συστήματος και επομένως αναγνώρισης εκ των προτέρων των χαρακτηριστικών της κάθε κλάσης.

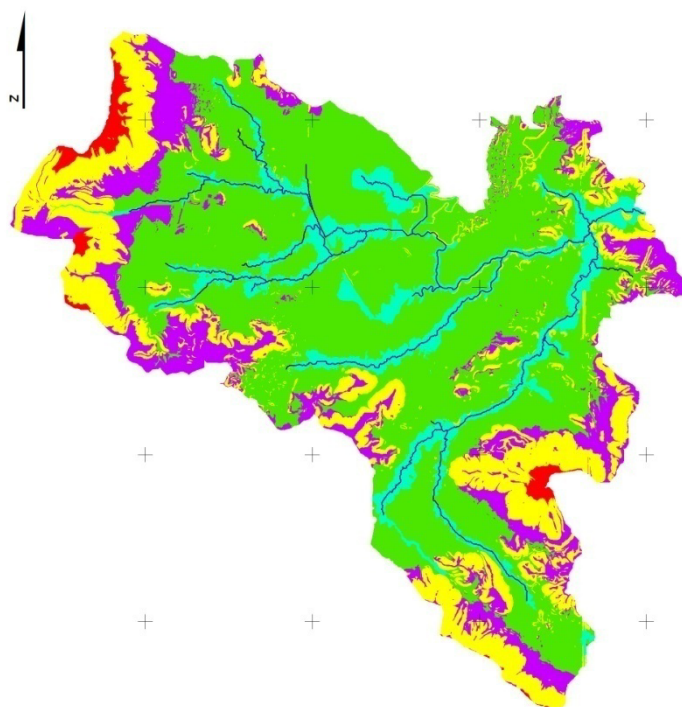
Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τη χρήση των νευρωνικών δικτύων και για την αξιοποίηση δύο και τριών κριτηρίων αντίστοιχα, φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5-12: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.

Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1	212622	11.07

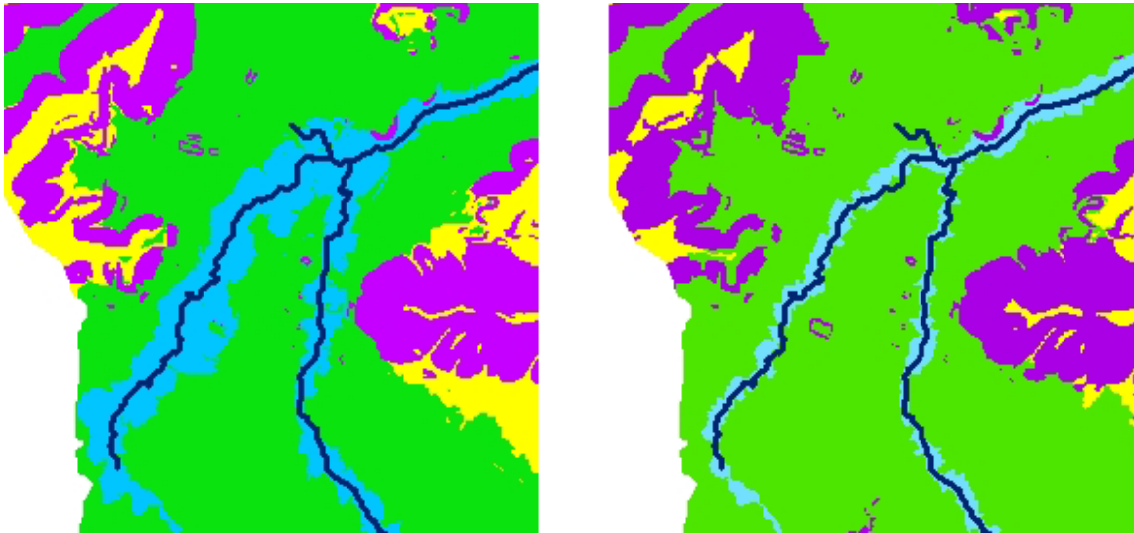
Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
2	1014323	52.82
3	387575	20.18
4	275789	14.36
5	29964	1.56
Σύνολο:	1920273	100.00

Η βέλτιστη ταξινόμηση για τη λεκάνη του π. Ερασίνου επιτυγχάνεται με τη χρήση των δύο κριτηρίων (Εικόνα 5-10). Από τα ποσοστά που καταλαμβάνει κάθε κλάση στη λεκάνη και από την Εικόνα Π-10, όπου απεικονίζεται το αποτέλεσμα φαίνεται πως η κλάση 2 (πράσινο), όπου αντιστοιχεί στις πεδινές περιοχές έχει ποσοστό κάλυψης της λεκάνης 52.82%, ποσοστό αναμενόμενο καθώς πρόκειται για μια βασικά πεδινή λεκάνη.



Εικόνα 5-10: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.

Επιπλέον, η απόδοση της κλάσης 1, που αντιστοιχεί στις παρόχθιες περιοχές, αν και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η παράμετρος της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο (περιοχές πολύ κοντά στο ποτάμι), απεικονίζεται επακριβώς από τη χρήση των δύο υδρολογικών παραμέτρων. Από τον ορισμό της κλάσης είναι σαφές πως τα δύο κριτήρια είναι ικανοποιητικά για τον προσδιορισμό, καθώς παρόχθιες είναι οι περιοχές με πολύ μικρό HAND και πολύ μικρές τιμές κλίσεων. Περιοχές όπου η κλάση 1 επεκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον άξονα του ποταμού, είναι διότι είναι πεδινές περιοχές με αντίστοιχα μικρές τιμές του δείκτη HAND. Παράδειγμα τέτοιων περιοχών είναι η περιοχή στα βορειοδυτικά του όρους Μερέντα, στους πρόποδες αυτού (Εικόνα 5-11). Την περιοχή διέρχεται κλάδος του ρέματος Αγ. Γεωργίου, και στο συγκεκριμένο σημείο εμφανίζεται διεύρυνση του πλημμυρικού πεδίου αντίστοιχα.



Εικόνα 5-11: Λεπτομέρεια διεύρυνσης των παρόχθιων περιοχών (υπολεκάνη Αγ. Γεωργίου, λεκάνη π. Ερασίνου).

Πίνακας 5-13: Καθοριστική τιμή του δείκτη HAND για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.

HAND (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0	0.05	0.43	11.33
2	0	14.52	17.78	90.73
3	0	53.97	128.94	762.12
4	0	21.28	48.07	399.80
5	0	18.57	104.25	676.95

Ο Πίνακας 5-13 παρουσιάζει την μέση τιμή του δείκτη HAND για κάθε κλάση, όπως υπολογίζεται από το σύνολο των σημείων της λεκάνης που καταχωρήθηκαν από το ΝΔ στην αντίστοιχη κλάση. Ακολουθεί όμοια ο Πίνακας 5-14 για την κλίση του εδάφους.

Πίνακας 5-14: Καθοριστική τιμή της κλίσης του εδάφους για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.

Κλίση (degrees)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0	0.06	0.54	12.73
2	0	1.53	2.13	10.84
3	0	12.93	10.10	46.91
4	0	37.68	18.73	67.47
5	0	0.89	5.03	36.25

Από τις παραπάνω τιμές για κάθε κλάση, μπορεί πλέον να οριστεί σαφώς το εύρος τιμών του αντίστοιχου κριτηρίου για κάθε κλάσης, για τη λεκάνη του Ερασίνου.

Επομένως, στην κλάση 1 που αναπαριστά τις παρόχθιες εκτάσεις, ο δείκτης HAND παίρνει πολύ μικρές τιμές και αντίστοιχα και η κλίση. Στη δεύτερη κλάση, των πεδινών εκτάσεων, ο δείκτης HAND αυξάνεται, με μέση τιμή τα 14.52 m ενώ η κλίση παραμένει σχετικά μικρή (1.53°), όπως είναι και αναμενόμενο. Στις πλαγιές ήπιας κλίσης, ο δείκτης HAND έχει μέση τιμή ίση με 54 m περίπου και η κλίση 13° περίπου. Στις πλαγιές απότομης κλίσης οι μέσες



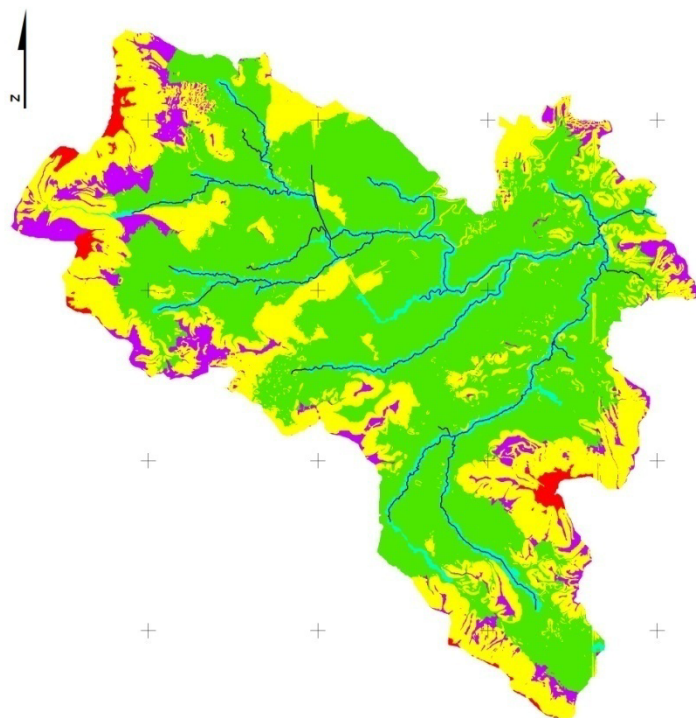
τιμές των δύο κριτηρίων είναι 21.28 m ο δείκτης HAND και 37.68° η κλίση. Στην τελευταία κλάση, όπου ανήκουν τα οροπέδια, οι μέσες τιμές είναι 18.57 m ο δείκτης HAND και 0.89° η κλίση, που είναι λογικό, διότι τα οροπέδια είναι επίπεδες περιοχές σε μεγάλο υψόμετρο. Καθώς ο δείκτης HAND αποτελεί μια ομαλοποιημένη εκδοχή του ΨΜΕ, ως προς το υδρογραφικό δίκτυο, η έκφραση «περιοχές σε μεγάλο υψόμετρο» συνεπάγεται και περιοχές με μεγάλο δείκτη HAND.

Με την εισαγωγή του τρίτου υδρολογικού κριτηρίου, ως χαρακτηριστικού στα δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, τα αποτελέσματα φαίνεται να αποκλίνουν από αυτά της βέλτιστης ταξινόμησης. Στον Πίνακα 5-15, παρουσιάζονται τα ποσοστά κάλυψης της κάθε κλάσης ως προς το σύνολο της λεκάνης.

Πίνακας 5-15: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα, χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.

Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1	110185	5.74
2	1074026	55.93
3	578872	30.15
4	130728	6.81
5	26462	1.38
Σύνολο:	1920273	100.00

Ο παράγοντας της απόστασης φαίνεται πως περιορίσε την έκταση της κλάσης 1 και βοήθησε την καλύτερη προσέγγιση της κλάσης 5, του οροπεδίου. Αντίθετα, δεν είναι ενθαρρυντικά τα αποτελέσματα ως προς την προσέγγιση των ενδιάμεσων κλάσεων (Εικόνα 5-12, Εικόνα Π-11).



Εικόνα 5-12: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.

Τα ποσοστά επιτυχίας των παραπάνω ταξινομήσεων, που προκύπτουν συγκρίνοντας την κλάση στην οποία κατατάχθηκαν αρχικά τα σημεία του δείγματος σε σχέση με την κλάση



στην οποία αποδόθηκαν μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας των ταξινομήσεων φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5-16.

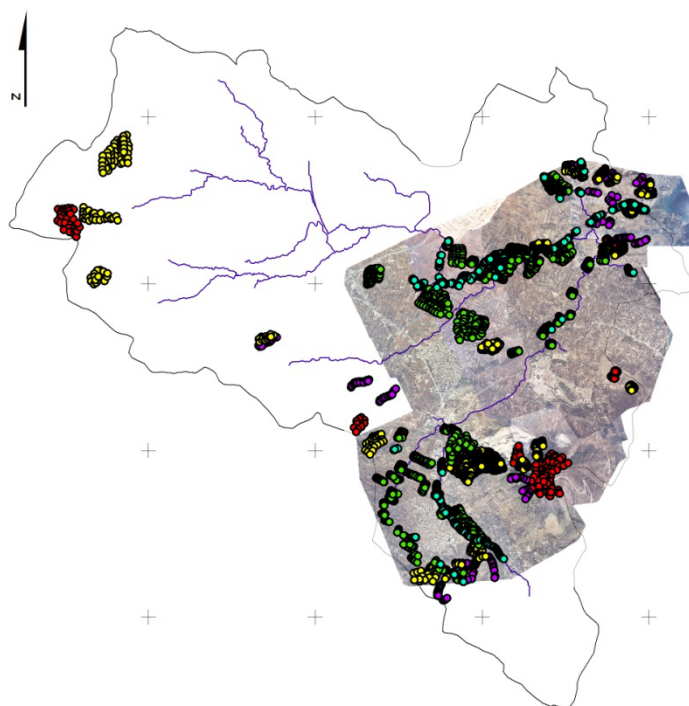
Πίνακας 5-16: Ποσοστά επιτυχίας ταξινομήσεων ανά κλάση, για την λεκάνη Ερασίνου.

Ποσοστά επιτυχίας (%)	Κλάση 1	Κλάση 2	Κλάση 3	Κλάση 4	Κλάση 5
Ταξινόμηση fcm2	1.22	0.00	57.14	9.57	8.76
Ταξινόμηση fcm3	89.09	0.00	32.34	0.99	11.52
Ταξινόμηση με ANN2	93.67	70.11	81.30	51.65	32.26
Ταξινόμηση με ANN3	87.80	79.04	84.67	43.89	32.72

FCM2 = Μέθοδος FCM με δύο κριτήρια, FCM3 = Μέθοδος FCM με τρία κριτήρια

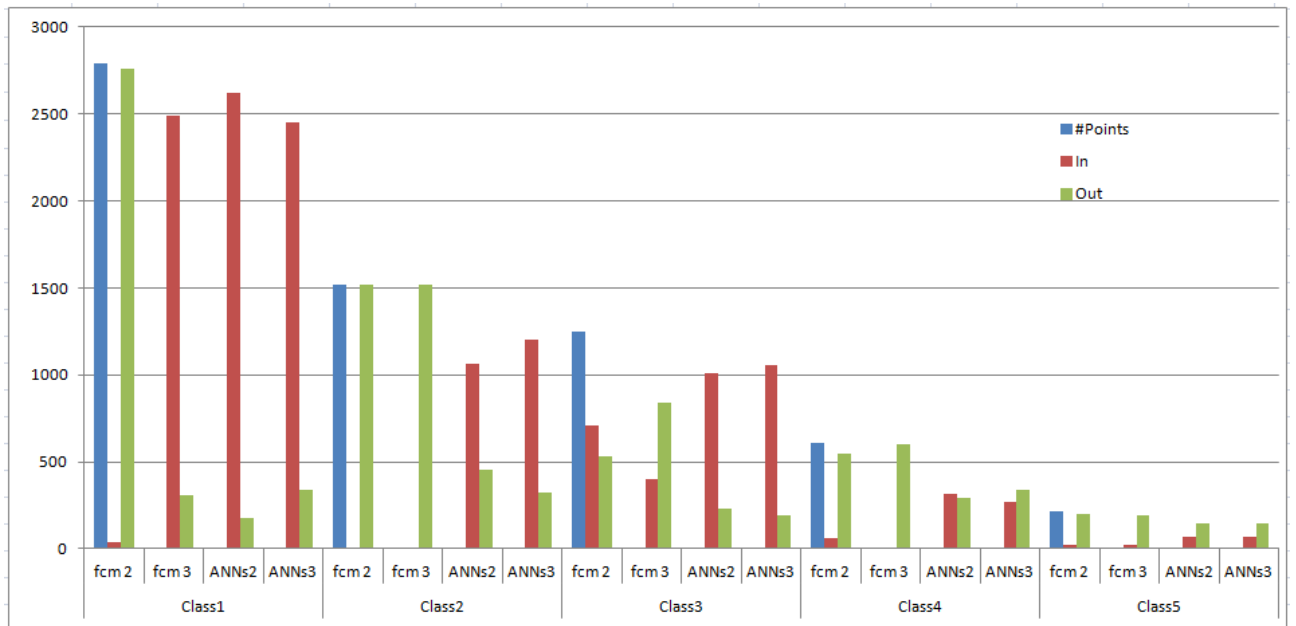
ANN2 = Μέθοδος ΝΔ με δύο κριτήρια, ANN3 = Μέθοδος ΒΔ με τρία κριτήρια

Η κατανομή των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν ως δείγμα παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 5-13, Εικόνα Π-7).



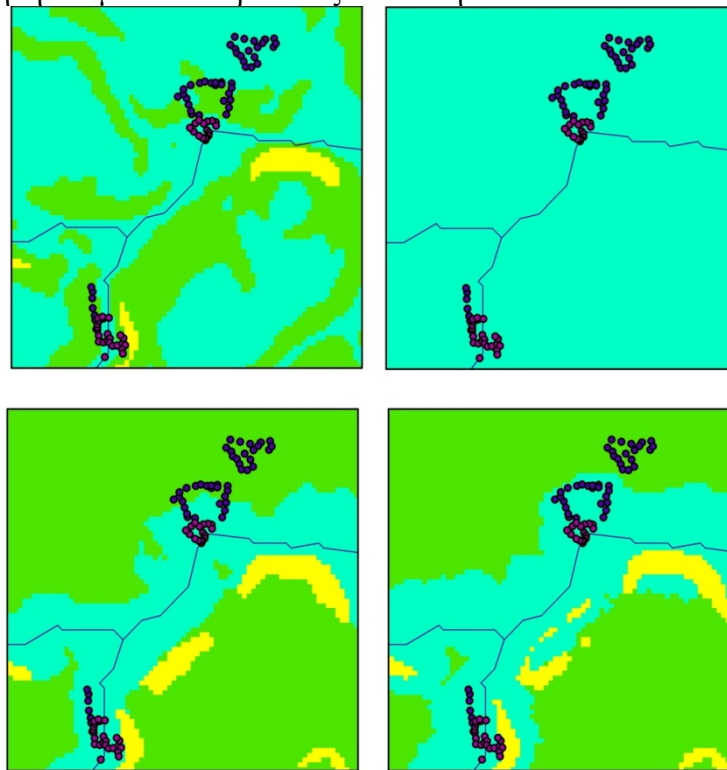
Εικόνα 5-13: Κατανομή σημείων ελέγχου στην λεκάνη π. Ερασίνου.

Τα ίδια ποσοστά απεικονίζονται υπό τη μορφή ράβδων, για την γραφική αναπαράστασή τους (Εικόνα 5-14).



Εικόνα 5-14: Γραφική αναπαράσταση της επιτυχίας κάθε ταξινόμησης ανά κλάση, αποτελέσματα λεκάνης Ερασίνου.

Τα σημεία που μετρήθηκαν με GPS παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-15.



Εικόνα 5-15: Κατανομή σημείων μετρημένων με GPS, εξ αρχής οριστικά ταξινομημένων σε δύο κλάσεις.

Πρόκειται για σημεία που ταξινομήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε δύο κλάσεις, στην παρόχθια (κλάση 1) και στην πεδινή (κλάση 2). Στην Εικόνα 5-15 πάνω φαίνεται το αποτέλεσμα της ταξινόμησης με την ασαφή λογική εφαρμόζοντας δύο (αριστερά) και τρία (δεξιά) κριτήρια αντίστοιχα και οι κάτω εικόνες αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα που παρουσιάζουν τα ΝΔ με δύο (αριστερά) και τρία (δεξιά) κριτήρια όμοια. Τα σημεία που είναι

σκούρα κόκκινα κατατάσσονται στην πρώτη κλάση και τα σημεία που είναι μπλε κατατάσσονται εξ αρχής στη δεύτερη κλάση.

Τα ποσοστά των τεσσάρων ταξινομήσεων για το σύνολο των σημείων που μετρήθηκαν με GPS παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5-17.

Πίνακας 5-17: Ποσοστά επιτυχίας των τεσσάρων ταξινομήσεων σε σχέση με τα μετρημένα σημεία με GPS.

Ποσοστά επιτυχίας (%)	Κλάση 1	Κλάση 2
Ταξινόμηση fcm2	0.00	3.64
Ταξινόμηση fcm3	69.05	41.82
Ταξινόμηση με ANN2	100.00	67.27
Ταξινόμηση με ANN3	97.62	45.45

FCM2 = Μέθοδος FCM με δύο κριτήρια, FCM3 = Μέθοδος FCM με τρία κριτήρια  
ANN2 = Μέθοδος ΝΔ με δύο κριτήρια, ANN3 = Μέθοδος ΒΔ με τρία κριτήρια

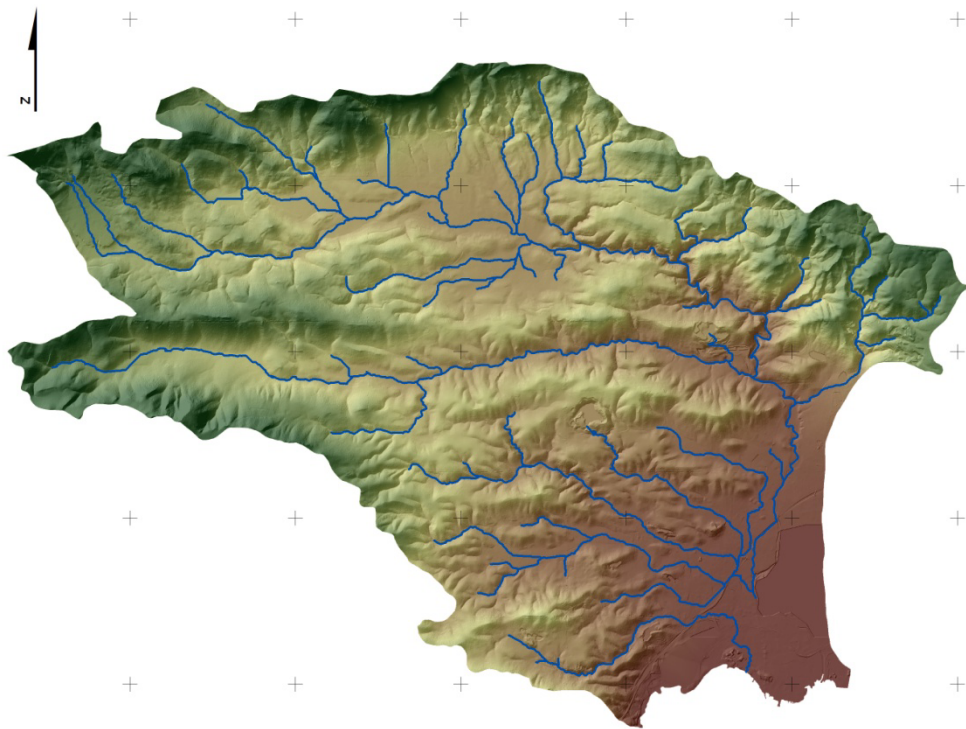
## 5.2 Εφαρμογή στη λεκάνη του ποταμού Σαρανταπόταμου

Η υδρολογική διερεύνηση της λεκάνης απορροής του π. Σαρανταπόταμου, ακολουθεί τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην υδρολογική λεκάνη στην ανατολική Αττική του π. Ερασίνου. Επιμέρους στόχοι είναι όμοια ο υπολογισμός των κριτηρίων του θα συντελέσουν στη διαδικασία της ταξινόμησης και η εξαγωγή του αποτελέσματος υπό μορφή χαρτών. Λόγω του ότι υπάρχουν διαφορές στη μορφολογία του αναγλύφου αυτής της λεκάνης σε σύγκριση με την ανατολική, ενδέχεται τα αποτελέσματα να μην αντιστοιχίζονται με εκείνα της ανατολικής. Η λεκάνη του Σαρανταπόταμου, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερης έκτασης ορεινό κομμάτι σε σχέση με τη λεκάνη του Ερασίνου που βασικά χαρακτηρίζεται ως πεδινή.

### 5.2.1 Προετοιμασία

Η λεκάνη του π. Σαρανταπόταμου καλύπτεται αποκλειστικά από δεδομένα ΨΜΕ[2] με μέγεθος κανάβου στο έδαφος 5 m (Εικόνα ΠΙ-12). Αρχικά εισάγεται το δεδομένο ΨΜΕ[2] υπό μορφή σημείων και μετατρέπεται σε κανονικοποιημένο αρχείο κανάβου (raster αρχείο, grid), με μέγεθος κανάβου όσο και η απόσταση των σημείων. Κάθε κελί του αρχείου raster έχει ως τιμή υψομέτρου την αντίστοιχη τιμή του σημείου του ΨΜΕ[2], το σημείο αυτό βρίσκεται στο κέντρο του κελιού του κανάβου. Το ΨΜΕ της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης καθώς και ο υδροκρίτης του π. Σαρανταπόταμου φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 5-16).

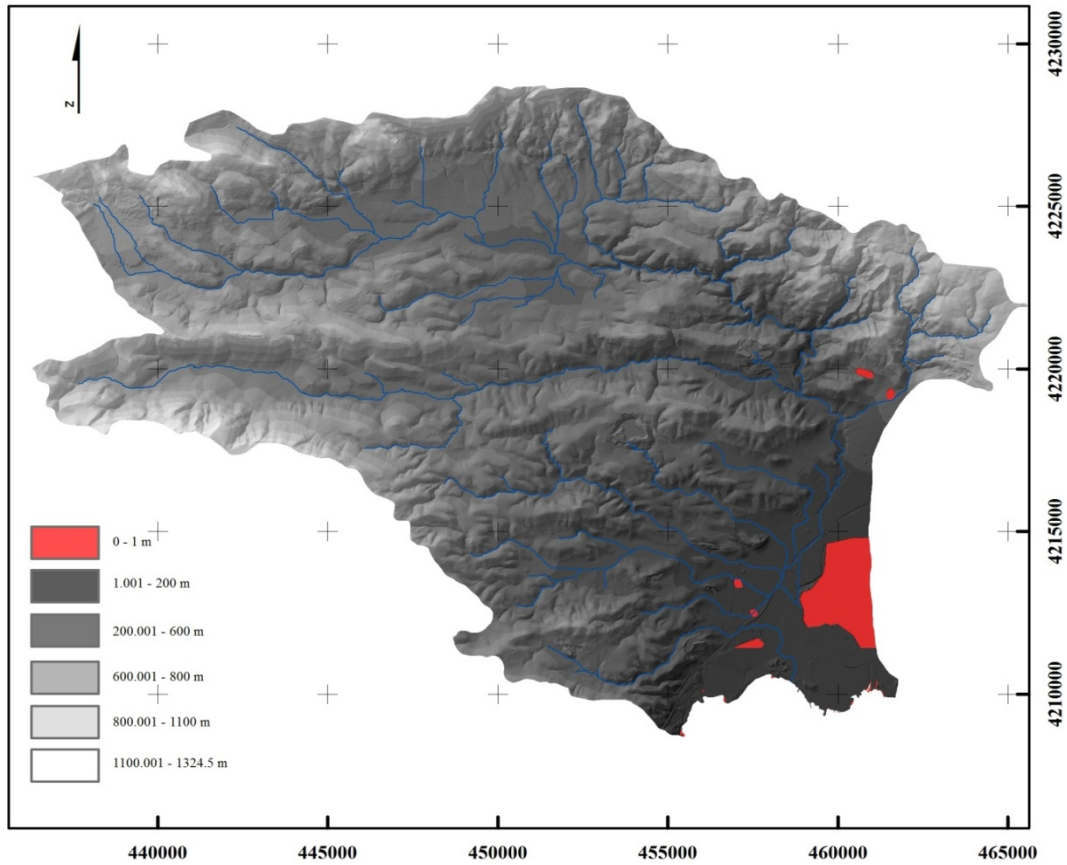
Το παραπάνω raster ΨΜΕ, δεν είναι διορθωμένο ως προς την υδρολογική του συνέπεια, επομένως είναι αναγκαία η εφαρμογή του συνόλου των εντολών, για την παραγωγή του υδρολογικά ορθού ΨΜΕ της λεκάνης. Η διαδικασία αυτή θα διορθώσει τυχόν χονδροειδή σφάλματα στα υψόμετρα.



Εικόνα 5-16: ΨΜΕ[2] της λεκάνης π. Σαρανταπόταμου.

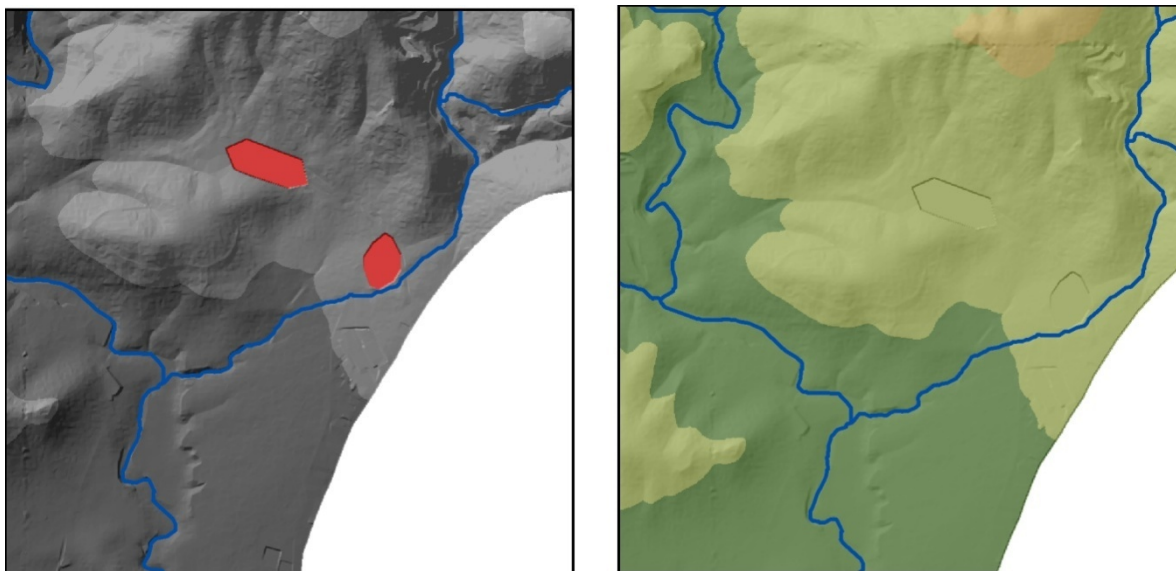
Στην περιοχή της λεκάνης του π. Σαρανταπόταμου που περικλείει ο υδροκρίτης, μόνο λίγες μικρής έκτασης περιοχές εμφανίζουν μηδενικά υψόμετρα, αν και οι περιοχές που τις περιβάλλουν έχουν μεγαλύτερο υψόμετρο. Λόγω του ότι είναι καταχωρημένη η υψομετρική πληροφορία (μηδενική τιμή υψομέτρου) κατά τη διαδικασία υδρολογικής συνόρθωσης της λεκάνης απορροής τα υψόμετρα αυτά διορθώνονται αυτόματα έτσι ώστε, τελικά, να μην αποτελούν βυθίσματα του ΨΜΕ. Οι νέες τιμές που καταγράφονται, συμφωνούν με τις τιμές των υψομέτρων της περιοχής που τις περιβάλλει. Δυσκολία στη διόρθωση και στην επεξεργασία υπάρχει όταν τα αντίστοιχα κελιά είναι καταχωρημένα ως κελιά χωρίς καταγραφή (NoData Values), όπως συνέβη στη λεκάνη Ερασίνου.

Αναλυτικότερα, οι περιοχές μηδενικού υψομέτρου, παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-17. Αυτές βρίσκονται βορειοανατολικά (δύο περιοχές) και νοτιοανατολικά (τρεις περιοχές) της λεκάνης και χρωματίζονται με κόκκινο. Η τιμή αυτή του υψομέτρου είναι δυσανάλογη και απολύτως εσφαλμένη σε σχέση με τις τιμές των υψομέτρων των γειτονικών – οριακών περιοχών. Για παράδειγμα, οι βόρειες κόκκινες περιοχές μηδενικού υψομέτρου, βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή με υψόμετρο από 100 m έως 200 m, όπως φαίνεται στο υπόμνημα των υψομέτρων της λεκάνης, γεγονός αναμενόμενο λόγω του ότι η περιοχή αυτή αποτελεί τους πρόποδες του όρους της Πάρνηθας. Κατά τη διαδικασία διόρθωσης του ΨΜΕ ως προς την υδρολογική συνέπεια, εκτελείται η εντολή Fill εντός του προγράμματος ArcMap 10, με την οποία γεμίζουν πιθανά βυθίσματα που υπάρχουν στο ψηφιακό μοντέλο με στόχο την απορροή αυτών των κελιών στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η διόρθωση των υψομέτρων στις κόκκινες περιοχές, με συνέπεια να μην είναι απαραίτητη η εφαρμογή κάποιου άλλου είδους διαδικασίας διόρθωσης.



Εικόνα 5-17: Περιοχές μηδενικού υψομέτρου. λεκάνης π. Σαρανταπόταμου

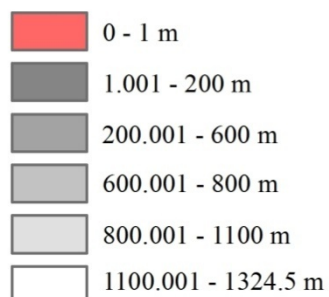
Στη συνέχεια ακολουθεί το αποτέλεσμα της διόρθωσης των περιοχών με μηδενική υψομετρική πληροφορία. Στην Εικόνα 5-18 απεικονίζονται οι δύο περιοχές. Παρατηρώντας το υπόμνημα των δύο ψηφιακών μοντέλων, φαίνεται πως, αν και δεν έχει αλλάξει η μορφή και το σχήμα των περιοχών, έχουν αλλάξει η τιμές των υψομέτρων. Στο διορθωμένο ΨΜΕ όσες περιοχές έχουν υψομετρικές τιμές από 0 έως 1 m θα έπρεπε να εμφανίζονται κόκκινες, γεγονός που δεν συμβαίνει, καθότι τα νέα υψόμετρα πλέον αποδίδονται με το χρώμα που στους αντιστοιχεί, στην παρούσα περίπτωση με πράσινο ανοιχτό.



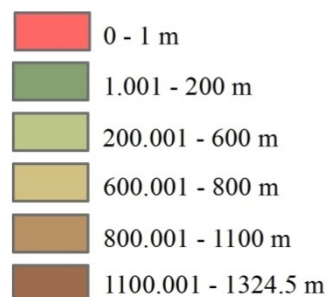
### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

ΨΜΕ[2]



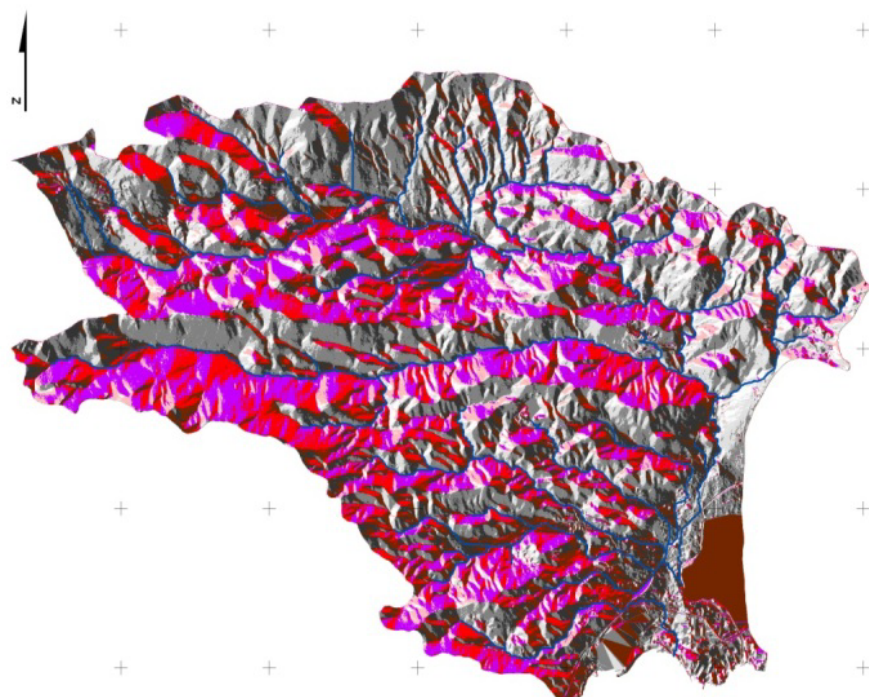
ΨΜΕ[2] μετά την εκτέλεση της εντολής Fill



Εικόνα 5-18: Λεπτομέρεια διόρθωσης ΨΜΕ με την εντολή Fill (λεκάνη π. Σαρανταπόταμου).

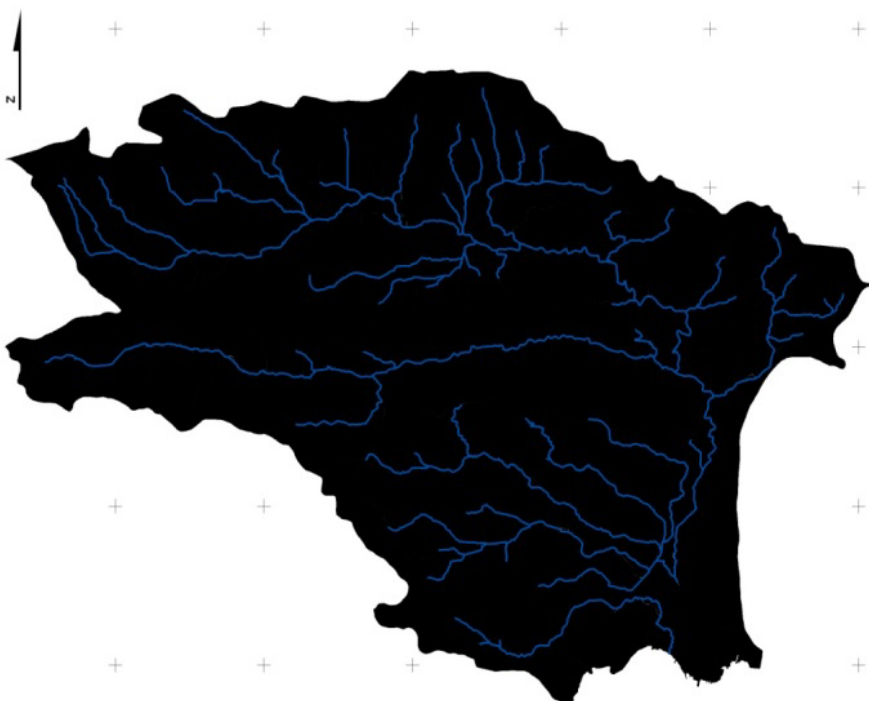
Στη συνέχεια, το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ ομαλοποιείται και από το ομαλοποιημένο ΨΜΕ εξάγονται τα υπολογισμένα μεγέθη της κλίσης του εδάφους (Εικόνα Π-16), του δείκτη HAND (Εικόνα Π-15) και των αποστάσεων (Εικόνα Π-17).





Εικόνα 5-19: Κάναβος Διεύθυνσης Απορροής, λεκάνης στη Δυτική Αττική.

Για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από το ΨΜΕ[2] μεσολαβούν δύο βήματα: η δημιουργία κανάβου διεύθυνσης απορροής (Εικόνα 5-19) και η δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικής ροής (Εικόνα 5-20). Τα παραπάνω δύο μεγέθη υπολογίζονται και συγκρίνονται για την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ με την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το ομαλοποιημένο υδρολογικά ορθό ΨΜΕ.



Εικόνα 5-20: Κάναβος Συγκεντρωτικής Απορροής, λεκάνης στη Δυτική Αττική.

Από τα στατιστικά στοιχεία που υπολογίζονται για το σύνολο της λεκάνης, από τον κανάβο διεύθυνσης απορροής, που απεικονίζει το χαρακτηρισμό κάθε κελιού της λεκάνης, ανάλογα με τη διεύθυνση στην οποία αυτό απορρέει, φαίνεται ότι το 21.2% των κελιών απορρέουν

προς το Νότο και γενικά ανάλογα ποσοστά αντιστοιχούν σε όλες τις διευθύνσεις απορροής, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5-18.

Πίνακας 5-18: Στατιστικά στοιχεία κανάβου Διεύθυνσης Απορροής, Δυτικής λεκάνης απορροής.

Διεύθυνση Απορροής	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1 (Α)	1638690	12.24
2 (ΝΑ)	2205047	16.46
4 (Ν)	2839234	21.20
8 (ΝΔ)	1422652	10.62
16 (Δ)	756174	5.65
32 (ΒΔ)	880047	6.57
64 (Β)	1936611	14.46
128 (ΒΑ)	1713950	12.80
Σύνολο:	13392405	100.00

Μετά την εφαρμογή της ομαλοποίησης του ΨΜΕ, η κατανομή των κελιών ως προς τη διεύθυνση απορροής, δεν μεταβάλλεται αισθητά (Πίνακας 5-19). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφορά ως προς τον συνολικό αριθμό κελιών που αποτελούν τη λεκάνη, μετά την εφαρμογή της ομαλοποίησης του ψηφιακού μοντέλου.

Πίνακας 5-19: Στατιστικά στοιχεία ομαλοποιημένου κανάβου Διεύθυνσης Απορροής, Δυτικής λεκάνης απορροής.

Διεύθυνση Απορροής	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1 (Α)	1627272	12.15
2 (ΝΑ)	2214735	16.54
4 (Ν)	2859207	21.35
8 (ΝΔ)	1418630	10.59
16 (Δ)	742347	5.54
32 (ΒΔ)	867047	6.47
64 (Β)	1947376	14.54
128 (ΒΑ)	1715786	12.81
Σύνολο:	13392400	100

Από τον κανάβο συγκεντρωτικής ροής, θα προκύψει το τελικό υδρογραφικό δίκτυο, με το οποίο θα διορθωθεί ως προς τις κλίσεις το αρχικό ΨΜΕ[2] και θα προκύψει το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ, της λεκάνης του π. Σαρανταπόταμου. Η επιλογή της κατάλληλης τιμής κατωφλίου για την εξαγωγή του δικτύου έγινε με δοκιμές. Επιλέχθηκε η τιμή των 70 000 ως το όριο με βάση το οποίο κάθε κελί της λεκάνης χαρακτηρίζεται υδρογραφικό δίκτυο ή όχι. Μετά από τη σύγκριση της τιμής των 70 000 με την τιμή κατωφλίου που δόθηκε για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης Ερασίνου (κατώφλι των 40 000), φαίνεται πως η τιμή αυτή εξαρτάται από το μέγεθος του κελιού του ψηφιακού μοντέλου της λεκάνης, όσο μικρότερο το μέγεθος του κελιού στο έδαφος τόσο μεγαλύτερη η τιμή του κατωφλίου.



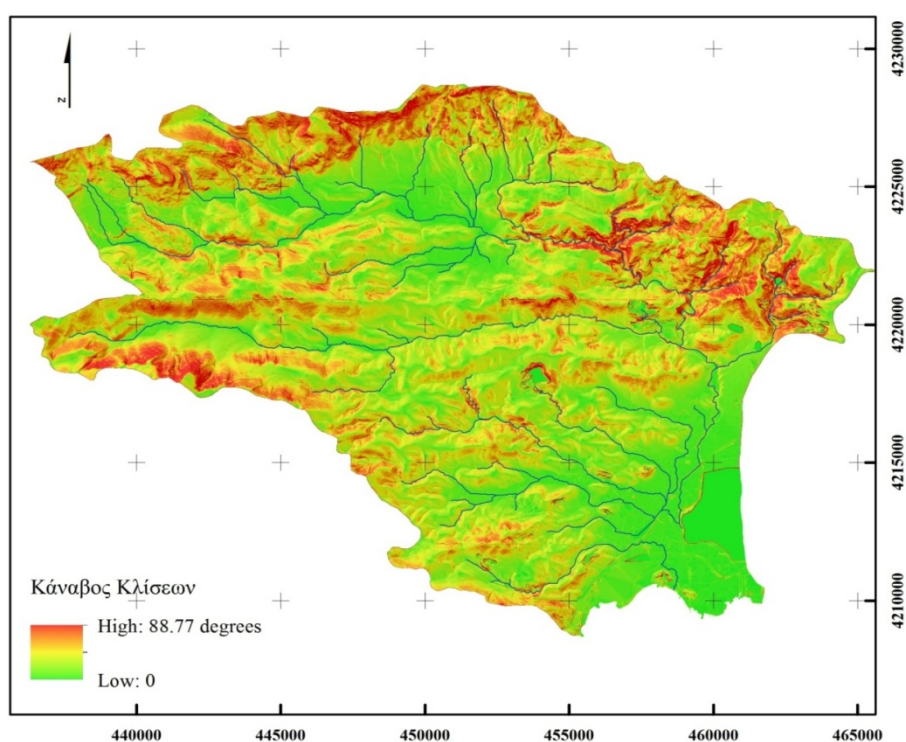
Το υδρογραφικό δίκτυο που τελικά παράχθηκε προσαρμόζεται αρκετά καλά στο υδρογραφικό δίκτυο, που αποτυπώνεται στους χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1/5 000, και επομένως αντιστοιχεί στην πραγματικότητα.

Το παραγόμενο υδρογραφικό δίκτυο από τα δεδομένα του ΨΜΕ[2] χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της υδρολογική συνέπειας του ΨΜΕ[2], ώστε να προκύψει το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ της λεκάνης του π. Σαρανταπόταμου.

Για τον υπολογισμό των κανάβων του δείκτη HAND, των κλίσεων του εδάφους και της απόστασης χρησιμοποιείται το ομαλοποιημένο ΨΜΕ και ο ομαλοποιημένος κανάβος διεύθυνσης απορροής.

Το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ της λεκάνης του π. Σαρανταπόταμου έχει εύρος υψομέτρων που εκτείνεται από 0 m (ελάχιστο υψόμετρο, στην ακτογραμμή στην περιοχή των εκβολών του Ποταμού, κόλπος Ελευσίνας) έως 1324 m (μέγιστο υψόμετρο, στην περιοχή της Πάρνηθας, βόρεια της λεκάνης, με μέσο υψόμετρο τα 404 m και τυπική απόκλιση 225 m.

Ακολουθεί ο υπολογισμός των κλίσεων του εδάφους της λεκάνης, διαδικασία που έγινε με τη χρήση της εντολής (slope) του προγράμματος ArcGIS 10.

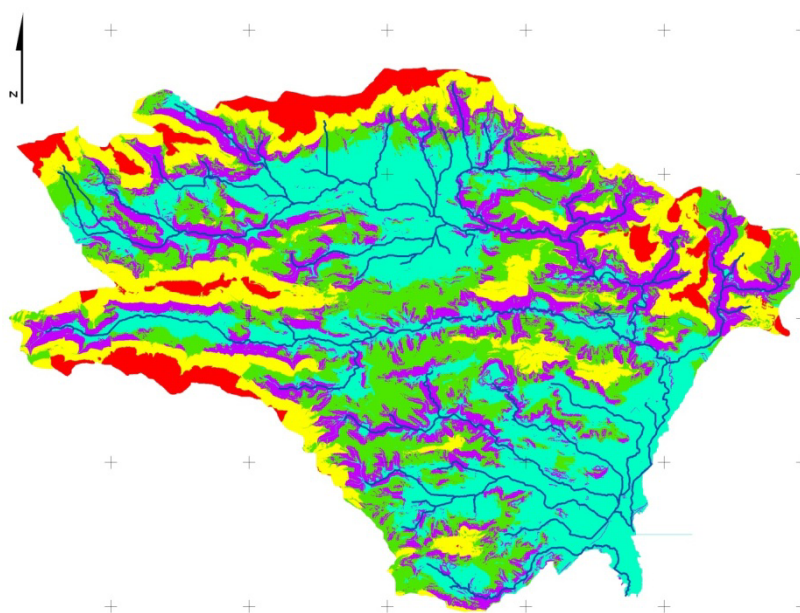


Εικόνα 5-21: Κάναβος Κλίσεων.

### 5.2.2 Αποτελέσματα Ταξινόμησης

Στον Πίνακα 5-20 παρουσιάζεται το πλήθος των κελιών της λεκάνης του π. Σαρανταπόταμου και η κλάση (υλοποιείται ως Layer ή επίθεμα) στην οποία καταχωρήθηκε κάθε κελί, μετά την εφαρμογή της ασαφούς ταξινόμησης με την εφαρμογή των δύο κριτηρίων, του δείκτη HAND και της κλίσης του εδάφους. Ο δείκτης HAND και ο κανάβος κλίσεων υπολογίστηκαν από το ομαλοποιημένο ΨΜΕ. Η ταξινόμηση έδειξε (Εικόνα 5-22) πως το μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης (31.9%) ταξινομείται στην κλάση 2, που προσεγγίζει τις παρόχθιες περιοχές. Ο όρος «προσεγγίζει» αναλύεται ως εξής: από τις συντεταγμένες του κεντροειδούς 2 φαίνεται πως το αντίστοιχο επίθεμα έχει τιμή κέντρου ως προς το δείκτη HAND ίση με 24.56 m και κλίσης 5.18°. Η κλάση 1 που αντιστοιχεί στις παρόχθιες περιοχές, έχει, κανονικά, μικρές τιμές για το δείκτη HAND και μικρές τιμές για την κλίση, όμως η τιμή 24 για αυτή την κατηγορία είναι μία αρκετά υψηλή τιμή. Ιδανικά και

λαμβάνοντας υπ' όψιν τη βιβλιογραφία, η τιμή αυτή κυμαίνεται γύρω στα 5 m. Όμοια και για την τιμή της κλίσης του εδάφους, που ιδανικά θα έπρεπε να κυμαίνεται περίπου στις 2 με 3°. Το αμέσως μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης παρουσιάζεται στο Layer 4.



Εικόνα 5-22: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με δύο κριτήρια.

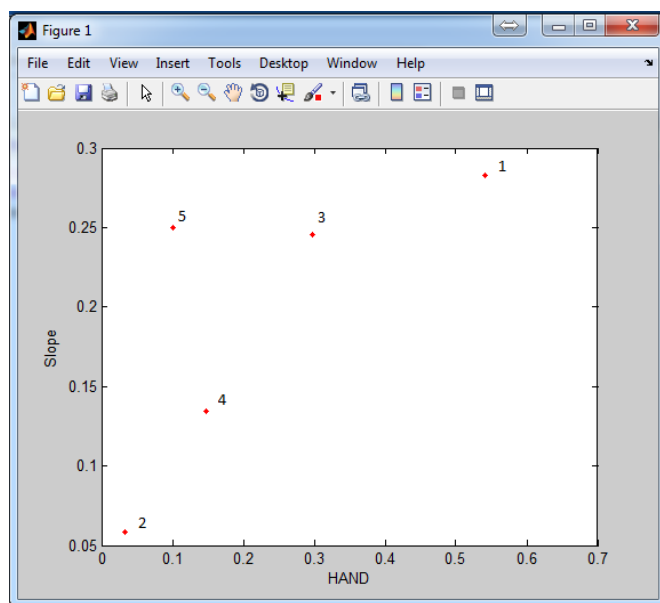
Πίνακας 5-20: Αποτελέσματα Ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των δύο κριτηρίων.

Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
Layer 1	732539	5.87
Layer 2	3979240	31.90
Layer 3	2084412	16.71
Layer 4	3009256	24.12
Layer 5	2668932	21.40
Σύνολο:	12474379	100.00

Οι κλάσεις της ασαφούς λογικής (Layers) δεν έχουν αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία ως προς τις κλάσεις όπως θεωρήθηκαν κατά την ταξινόμηση των σημείων από ορθοφωτομωσικά. Βάσει των συντεταγμένων των κεντροειδών σημείων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-21 και της γραφικής απεικόνισης αυτών στην Εικόνα 5-23, είναι σαφής η αναντιστοιχία. Τα κεντροειδή ουσιαστικά χαρακτηρίζουν το αντίστοιχο Layer, καθώς όλα τα κελιά που κατατάσσονται σε αυτό, απέχουν όσο το δυνατόν μικρότερη απόσταση από το κεντροειδές.

Πίνακας 5-21: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων, ως προς του άξονες των δύο κριτηρίων.

Layer	Δείκτης HAND (m)	Κλίση (°)
Κεντροειδές 1	394.80	25.13
Κεντροειδές 2	24.56	5.18
Κεντροειδές 3	216.78	21.80
Κεντροειδές 4	108.11	11.94
Κεντροειδές 5	73.50	22.17
max	729.612	88.77



Εικόνα 5-23: Τα κεντροειδή σημεία των κλάσεων για δύο κριτήρια.

Το εύρος τιμών για κάθε κριτήριο και κάθε κλάση, όπως προκύπτει μετά τη ασαφή ταξινόμηση με δύο κριτήρια παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες. Για το δείκτη HAND παρουσιάζονται στον Πίνακας 5-22.

Πίνακας 5-22: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.

HAND (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0.0	138.0	210.0	662.3
2	0.0	7.9	17.2	112.2
3	0.0	61.5	102.0	334.5
4	0.0	21.6	47.0	261.8
5	0.0	13.5	33.4	151.5

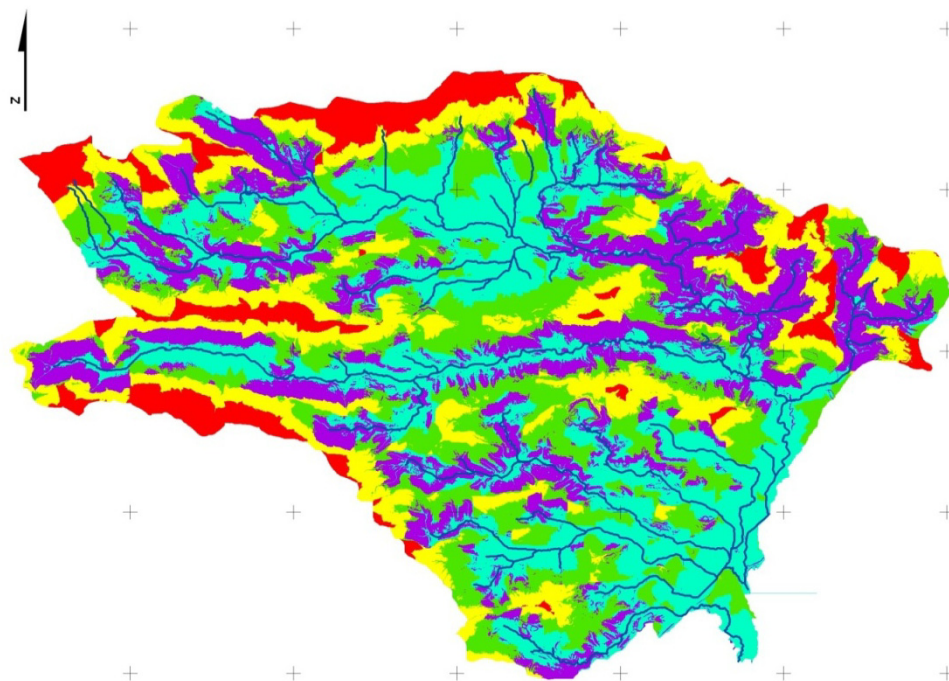
Για τις κλίσεις του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακας 5-23 Πίνακας 5-6.

Πίνακας 5-23: Το εύρος τιμών κλίσεων για κάθε κλάση.

Slope (degrees)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0.0	7.7	12.2	74.9
2	0.0	1.5	2.9	14.1
3	0.0	5.7	9.7	63.9
4	0.0	1.9	4.2	17.7
5	0.0	3.9	8.5	60.8

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 5-24 με τα αποτελέσματα της ταξινόμησης όπου λήφθηκαν υπ' όψη και τα τρία κριτήρια, ο δείκτης HAND, η κλίση του εδάφους και η

απόσταση. Το αποτέλεσμα είναι σαφώς διαφοροποιημένο και δείχνει την επίδραση του τρίτου κριτηρίου στη διαδικασία της ταξινόμησης.



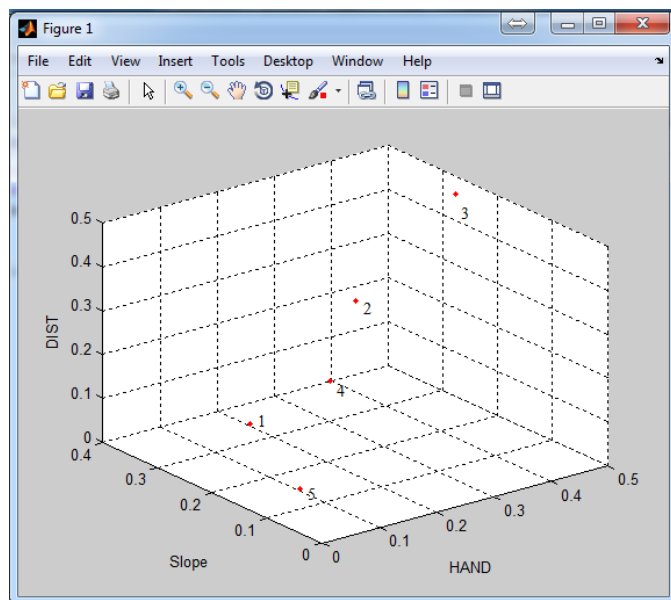
Εικόνα 5-24: Αποτέλεσμα ασαφούς ταξινόμησης με τρία κριτήρια.

Πίνακας 5-24: Αποτελέσματα Ασαφούς ταξινόμησης με χρήση των τριών κριτηρίων.

Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
Layer 1	2821733	22.62
Layer 2	2272667	18.22
Layer 3	1023549	8.21
Layer 4	2734302	21.92
Layer 5	3622128	29.04
Σύνολο:	12474379	100.00

Πίνακας 5-25: Οι συντεταγμένες των κεντροειδών σημείων, ως προς του άξονες των τριών κριτηρίων.

Κεντροειδές κλάσης	Δείκτης HAND (m)	Κλίση (°)	Απόσταση (m)
1	77.12	21.49	443.64
2	190.33	18.58	1577.24
3	350.00	22.62	2235.89
4	97.57	11.04	1172.15
5	23.63	6.51	325.72
max	729.612	88.77	4648.66



Εικόνα 5-25: Τα κεντροειδή σημεία των κλάσεων για τρία κριτήρια.

Το εύρος τιμών για κάθε κριτήριο και κάθε κλάση, όπως προκύπτει μετά την ασαφή ταξινόμηση με τρία κριτήρια παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες

Για το δείκτη HAND παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-26.

Πίνακας 5-26: Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κλάση.

HAND (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0.0	14.2	36.9	280.5
2	0.0	48.1	87.3	353.8
3	0.0	129.5	195.5	662.3
4	0.0	14.7	35.7	259.6
5	0.0	6.2	15.5	184.8

Για τις κλίσεις του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-27 Πίνακας 5-6.

Πίνακας 5-27: Το εύρος τιμών των κλίσεων για κάθε κλάση.

Κλίση (degrees)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0.0	3.7	8.3	63.9
2	0.0	4.8	8.9	57.7
3	0.0	7.6	11.7	74.9
4	0.0	1.5	3.8	25.7
5	0.0	1.4	3.0	15.9

Για τις αποστάσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-28 Πίνακας 5-6.

Πίνακας 5-28: Το εύρος τιμών των αποστάσεων για κάθε κλάση.

Απόσταση (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0.0	81.3	214.3	1359.3

Απόσταση (m)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
2	0.0	404.8	736.9	3142.9
3	0.0	795.1	1191.2	4506.4
4	0.0	215.8	492.8	2442.2
5	0.0	93.9	201.0	1011.1

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τη χρήση της ασαφούς λογικής, υπό μορφή χαρτών για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π-19, Εικόνα Π-20).

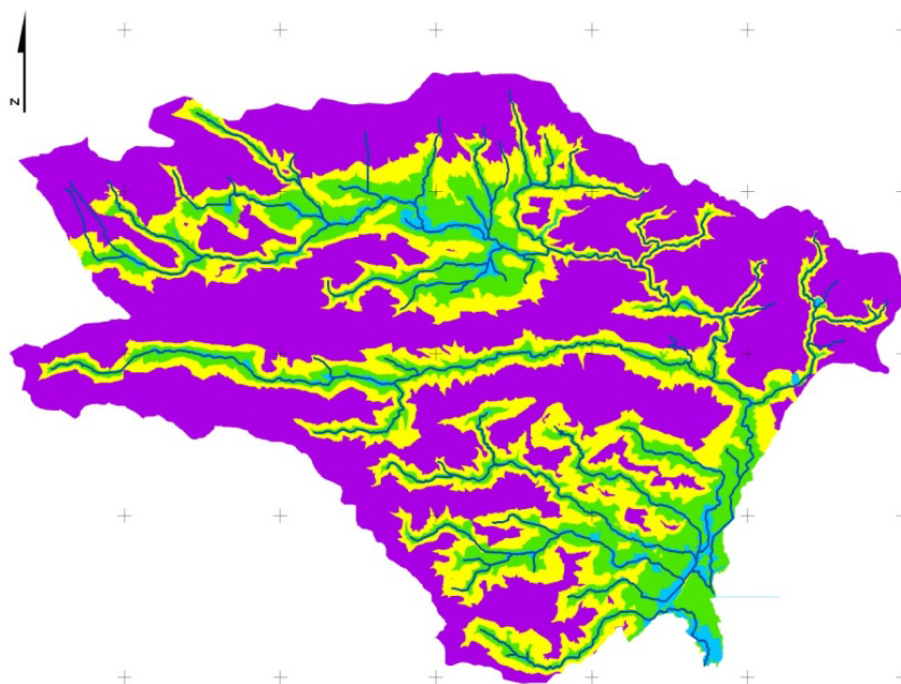
Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τη χρήση των νευρωνικών δικτύων και για την αξιοποίηση δύο (Πίνακας 5-29) και τριών κριτηρίων αντίστοιχα, για τη λεκάνη Σαρανταπόταμου φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5-29: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.

Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1	668962	5.36
2	1996958	16.01
3	2945387	23.61
4	6863067	55.02
5	5	0.00
Σύνολο:	12474379	100.00

Η βέλτιστη ταξινόμηση για τη λεκάνη του π. Σαρανταπόταμου επιτυγχάνεται με τη χρήση των δύο κριτηρίων (Εικόνα 5-26). Από τα ποσοστά που καταλαμβάνει κάθε κλάση στη λεκάνη και από την εικόνα, όπου απεικονίζεται το αποτέλεσμα φαίνεται πως η κλάση 4 (μωβ), όπου αντιστοιχεί στις πλαγιές με έντονη κλίση έχει ποσοστό κάλυψης της λεκάνης 55%, ποσοστό αναμενόμενο καθώς πρόκειται για μια βασικά ορεινή λεκάνη.





Εικόνα 5-26: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο υδρολογικών παραμέτρων.

Επιπλέον, η απόδοση της κλάσης 1, που αντιστοιχεί στις παρόχθιες περιοχές, προφανώς λόγω του ότι δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η παράμετρος της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο (περιοχές πολύ κοντά στο ποτάμι), απεικονίζεται μειωμένη με τη χρήση των δύο υδρολογικών παραμέτρων. Από τον ορισμό της κλάσης είναι σαφές πως τα δύο κριτήρια είναι μάλλον ανεπαρκή για τον προσδιορισμό, καθώς παρόχθιες είναι οι περιοχές με πολύ μικρό HAND και πολύ μικρές τιμές κλίσεων, σε πολύ μικρή απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο. Περιοχές όπου η κλάση 1 επεκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον άξονα του ποταμού, είναι διότι είναι πεδινές περιοχές με αντίστοιχα μικρές τιμές του δείκτη HAND.

Πίνακας 5-30: Καθοριστική τιμή του δείκτη HAND για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.

Κλάση	HAND (m)			
	Min	Mean	Std	Max
1	0.0	0.02	0.3	12.7
2	0.0	1.4	4.8	26.8
3	0.0	8.9	18.9	70.0
4	0.0	119.1	123.0	729.6
5	0.0	0.0	0.0	0.0

Ο Πίνακας 5-30 παρουσιάζει την μέση τιμή του δείκτη HAND για κάθε κλάση, όπως υπολογίζεται από το σύνολο των σημείων της λεκάνης που καταχωρήθηκαν από το ΝΔ στην αντίστοιχη κλάση. Ακολουθεί όμοια ο Πίνακας 5-31 για την κλίση του εδάφους.

Πίνακας 5-31: Καθοριστική τιμή της κλίσης του εδάφους για κάθε κλάση της λεκάνης Ερασίνου, με νευρωνικά δίκτυα και χρήση δύο κριτηρίων.

Κλάση	Κλίση (degrees)			
	Min	Mean	Std	Max

Κλίση (degrees)				
Κλάση	Min	Mean	Std	Max
1	0.0	0.1	1.2	49.3
2	0.0	0.7	3.1	49.2
3	0.0	2.2	5.5	60.8
4	0.0	10.7	10.4	77.7
5	0.0	0.0	0.0	0.0

Από τις παραπάνω τιμές για κάθε κλάση, μπορεί πλέον να οριστεί σαφώς το εύρος τιμών του αντίστοιχου κριτηρίου για κάθε κλάσης, για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου.

Επομένως στην κλάση 1, που αναπαριστά τις παρόχθιες εκτάσεις ο δείκτης HAND παίρνει πολύ μικρές τιμές και αντίστοιχα και η κλίση. Στη δεύτερη κλάση των πεδινών εκτάσεων, ο δείκτης HAND αυξάνεται, με μέση τιμή τα 1.4 m ενώ η κλίση παραμένει μικρή (0.7°), όπως είναι και το αναμενόμενο. Στις πλαγιές ήπιας κλίσης, ο δείκτης HAND έχει μέση τιμή ίση με 8.9 m περίπου και η κλίση 2.7° περίπου. Στις πλαγιές απότομης κλίσης οι μέσες τιμές των δύο κριτηρίων είναι 119 m ο δείκτης HAND και 107 ° η κλίση. Στην τελευταία κλάση, όπου ανήκουν τα οροπέδια, δεν εμφανίζονται ταξινομημένα κελιά.

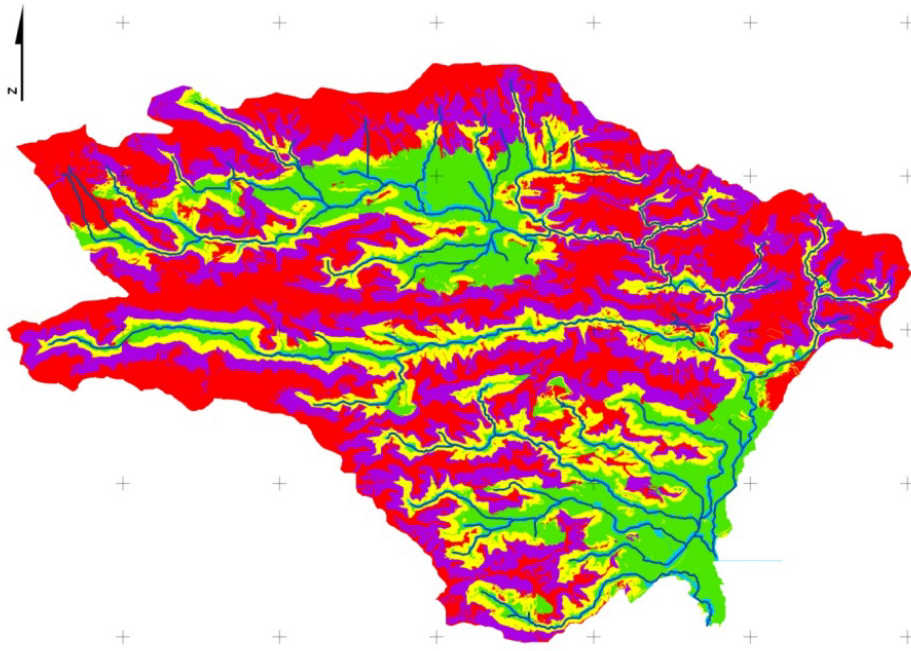
Με την εισαγωγή του τρίτου υδρολογικού κριτηρίου, ως χαρακτηριστικό στα δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, τα αποτελέσματα φαίνεται να αποκλίνουν από αυτά της αρχικής ταξινόμησης των δύο κριτηρίων. Στον Πίνακα 5-32, παρουσιάζονται τα ποσοστά κάλυψης της κάθε κλάσης ως προς το σύνολο της λεκάνης.

Πίνακας 5-32: Ποσοστά κάλυψης, ταξινόμηση με νευρωνικά δίκτυα, χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.

Κλάση	Πλήθος κελιών	Ποσοστό (%)
1	703188	5.64
2	1941127	15.56
3	2175568	17.44
4	3489987	27.98
5	4164509	33.38
Σύνολο:	12474379	100.00

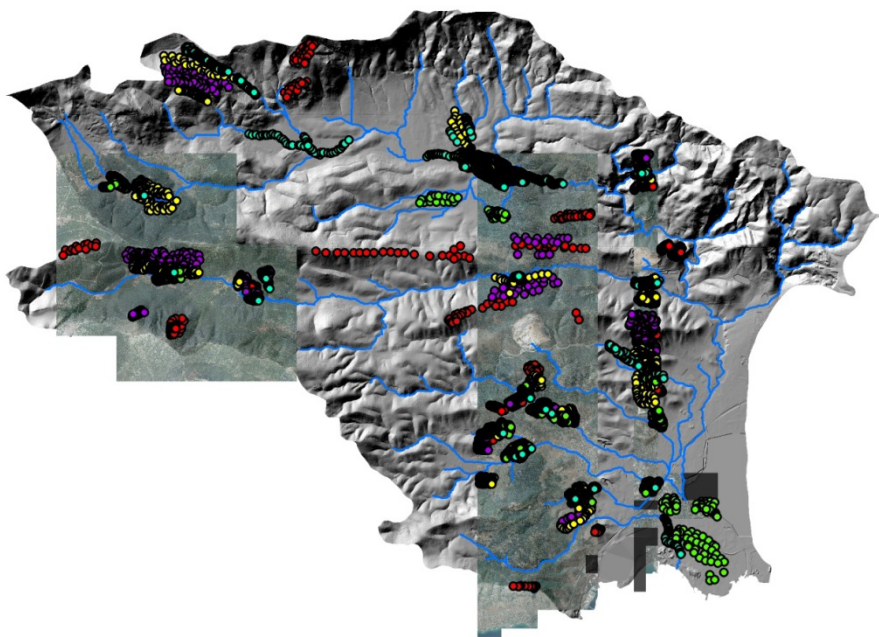
Ο παράγοντας της απόστασης φαίνεται πως περιορίσε την έκταση της κλάσης 1 και βοήθησε την καλύτερη προσέγγιση της κλάσης 5, του οροπεδίου. Αντίθετα, δεν είναι ενθαρρυντικά τα αποτελέσματα ως προς την προσέγγιση των ενδιάμεσων κλάσεων (Εικόνα 5-27).





Εικόνα 5-27: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταξινόμησης με νευρωνικά δίκτυα και χρήση τριών υδρολογικών παραμέτρων.

Για το σύνολο των σημείων του δείγματος (Εικόνα Π-18) που συλλέχθηκε με παρατήρηση του ορθοφωτομωσαϊκού[3] υπολογίζονται τα ποσοστά επιτυχίας με βάση κάθε ταξινόμηση. Η οριστική κατάταξη των σημείων στην κατάλληλη κλάση έγινε λαμβάνοντας υπόψη τις χρήσεις γης έτσι όπως παρουσιάζονταν, το ΨΜΕ καθώς χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο και τον κλίση των κλίσεων. Πριν την παρουσίαση των ποσοστών επιτυχίας του δείγματος ανάλογα με το αποτέλεσμα κάθε ταξινόμησης (Πίνακας 5-33), είναι σκόπιμο να παρουσιαστεί η κατανομή αυτών των σημείων στη λεκάνη του π. Σαρανταπόταμου (Εικόνα 5-28).



Εικόνα 5-28: Κατανομή του δείγματος σημείων στη λεκάνη μελέτης του π. Σαρανταπόταμου.

Τα ποσοστά επιτυχίας των παραπάνω ταξινομήσεων, που προκύπτουν συγκρίνοντας την κλάση στην οποία κατατάχθηκαν αρχικά τα σημεία του δείγματος σε σχέση με την κλάση

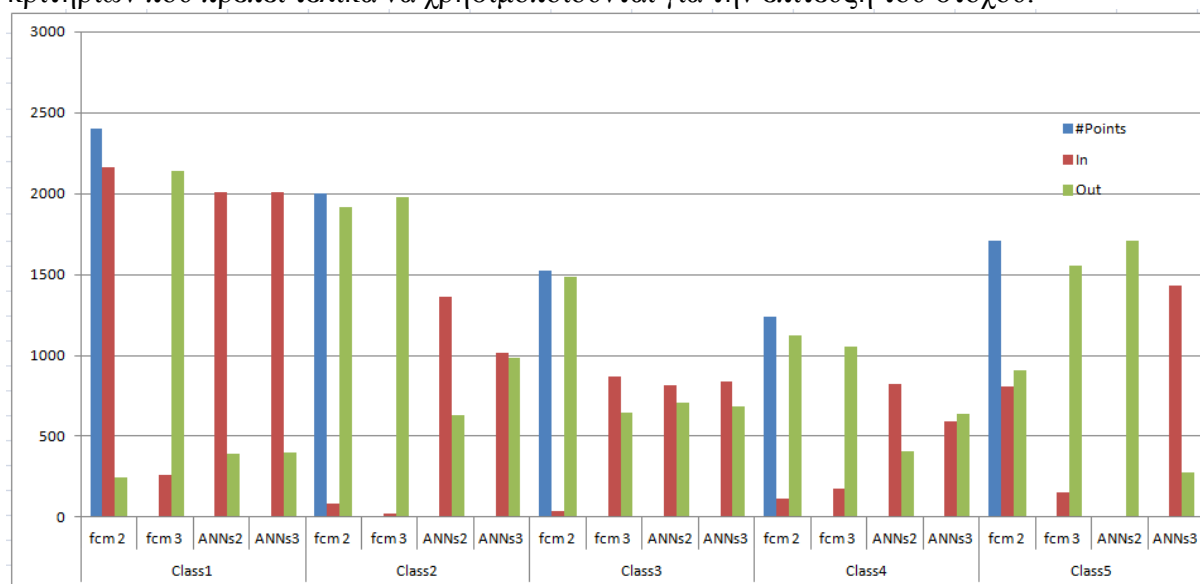
στην οποία αποδόθηκαν μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας των ταξινομήσεων φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5-33.

Πίνακας 5-33: Ποσοστά επιτυχίας ταξινομήσεων ανά κλάση, για την λεκάνη Σαρανταπόταμου.

Ποσοστά επιτυχίας (%)	Κλάση 1	Κλάση 2	Κλάση 3	Κλάση 4	Κλάση 5
Ταξινόμηση fcm2	89.81	4.06	2.50	9.31	47.11
Ταξινόμηση fcm3	11.02	0.95	57.40	14.57	9.00
Ταξινόμηση με ANN2	83.57	68.30	53.71	66.96	0.00
Ταξινόμηση με ANN3	83.49	50.73	55.10	48.18	83.75

FCM2 = Μέθοδος FCM με δύο κριτήρια, FCM3 = Μέθοδος FCM με τρία κριτήρια  
ANN2 = Μέθοδος ΝΔ με δύο κριτήρια, ANN3 = Μέθοδος ΒΔ με τρία κριτήρια

Η γραφική αναπαράσταση (Εικόνα 5-29) των παραπάνω ποσοστών είναι μια καλή αρχική προσέγγιση της μεθόδου με την οποία επιτυγχάνεται η βέλτιστη ταξινόμηση, αλλά και των κριτηρίων που πρέπει τελικά να χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του στόχου.



Εικόνα 5-29: Γραφική αναπαράσταση της επιτυχίας κάθε ταξινόμησης ανά κλάση, αποτελέσματα δυτικής λεκάνης (π. Σαρανταπόταμου).

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με τη χρήση των νευρωνικών δικτύων, υπό μορφή χαρτών για τη λεκάνη του Σαρανταπόταμου παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π-21, Εικόνα Π-22).

## 6 Συμπεράσματα

---

Η έρευνα που διεξήχθη στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιτρέπει την εξαγωγή των ακόλουθων συμπερασμάτων:

- Η εφαρμογή του ψηφιακού μοντέλου HAND που πραγματοποιήθηκε σε δύο ελληνικές λεκάνες απορροής, αποδεικνύει την ισχυρή και αξιόπιστη συσχέτιση των συνθηκών ροής του νερού, όπως αυτές αποτυπώνονται μέσω του καθορισμού του υδρογραφικού δικτύου, με το εύρος των κλάσεων ταξινόμησης στην περίπτωση των νευρωνικών δικτύων. Προϋπόθεση είναι να διατηρείται η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και αυτή να αντιστοιχεί στις πραγματικές υδρολογικές συνθήκες. Η συσχέτιση των δύο (HAND και υδρογραφικού δικτύου) είναι εμφανής.
- Κατά τη διαδικασία των υπολογισμών του δείκτη HAND, αρχικά χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ, γεγονός που δεν οδήγησε σε ακριβή προσδιορισμό των κλάσεων. Ακολούθησε η ομαλοποίηση του ΨΜΕ και ο υπολογισμός του δείκτη HAND για δεύτερη φορά, όπου το αποτέλεσμα ήταν ομαλότερο, χωρίς απότομες εναλλαγές των τιμών του δείκτη HAND σε κοντινές περιοχές. Το ομαλοποιημένο ΨΜΕ οδήγησε σε βέλτιστη ταξινόμηση, χωρίς μεγάλη διαφοροποίηση μεγεθών όπως ο κλίση διεύθυνσης απορροής και ο κλίση κλίσεων. Βέβαια, λόγω της εφαρμογής της ομαλοποίησης, το μέγιστο υψόμετρο του αρχικού ΨΜΕ μειώθηκε κατά 10 m περίπου και ο αριθμός των κελιών που τελικά εκβάλλουν στην έξοδο της λεκάνης μειώθηκε ελαφρώς.
- Τα αρχικά δεδομένα πρέπει να συνοδεύουν ανάλογης ακρίβειας μετρήσεις πεδίου, και ανάλογης ακρίβειας είναι και τα αποτελέσματα της ταξινόμησης που προκύπτουν. Στο σημείο αυτό αποδεικνύεται η ανάγκη διαθεσιμότητας δεδομένων. Για παράδειγμα, αναφέρεται η περίπτωση δυσχέρειας του μοντέλου HAND, ως προς την απόδοση λεπτομερειών όπως τα απότομα πρανή στις παρόχθιες εκτάσεις, λόγω χονδροειδούς ανάλυσης του ΨΜΕ. Αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι η λανθασμένη ταξινόμηση ή η μη απόδοση παρόμοιων περιοχών.
- Η επιλογή των κατάλληλων δεδομένων, έχει άμεσα αντίκτυπο στην ακρίβεια και στην πιστότητα των αποτελεσμάτων, πάντα βέβαια συνυπολογίζοντας και τον παράγοντα του κόστους. Η δημιουργία ΨΜΕ από τοπογραφικούς χάρτες (ψηφιοποίηση ισοϋψών) αποτελεί τη συνήθη μέθοδο, αλλά αποδεικνύεται μη ακριβής μέθοδος λόγω σφαλμάτων στις ισοϋψείς καμπύλες, σφαλμάτων ψηφιοποίησης και λόγω δυσμενούς κατανομής των σημείων. Αντίθετα, οι επίγειες γεωδαιτικές μέθοδοι (total station ή GPS) αποτελούν μεγάλης ακρίβειας προσεγγίσεις αλλά για περιορισμένο αριθμό παρατηρήσεων. Τα στερεοσκοπικά φωτογραμμετρικά μοντέλα παράγουν ΨΜΕ μετά από ημιαυτόματη ή και πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία, ακρίβειας ανάλογης των δεδομένων εισαγωγής. Τέλος, η χρήση δορυφορικών μοντέλων (LiDAR, SAR) αποτελεί οικονομική μέθοδο απόκτησης ΨΜΕ για μεγάλες περιοχές ενδιαφέροντος, υψηλής ανάλυσης και στην περίπτωση των SAR ανεξάρτητης από τις καιρικές συνθήκες. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η χρήση έτοιμων ορθοφωτογραφιών σε συνδυασμό με λήψη περιορισμένου αριθμού δεδομένων υπαίθρου.
- Η δυνατότητα των GIS να ενσωματώνουν δεδομένα από διάφορες πηγές και η ικανότητα της επίδειξης σύνθετων σχέσεων μεταξύ δεδομένων με κατανοητό τρόπο

και η παρουσίασή τους υπό μορφή επιθεμάτων στους τελικούς χάρτες είναι τα κύρια πλεονεκτήματα τους. Από την άλλη πλευρά η διαχείριση μεγάλου όγκου αρχείων μέσα στο περιβάλλον του ArcGIS 10 είναι χρονοβόρα και όχι πάντα επιτυχώς ολοκληρώσιμη διαδικασία.

- Η εφαρμογή ταξινόμησης με δύο διαφορετικές μεθοδολογίες επέτρεψε τη σύγκριση δύο διαφορετικών μεθόδων ως προς τη γενικότερη φιλοσοφία. Η ασαφής ταξινόμηση χαρακτηρίζεται από ευελιξία, ελευθερία, προσαρμογή και άριστη απόδοση της φυσικής πραγματικότητας, όπου τα στοιχεία δεν είναι ή άσπρα ή μαύρα. Αυστηρή μπορεί να χαρακτηριστεί η διαδικασία της απασαφοποίησης, αν και, ανάλογα με την τεχνική που ακολουθείται, τα συμπεράσματα ποικίλουν. Αντίθετα, τα νευρωνικά δίκτυα, εκπροσωπούν μια αυστηρότερη ως προς την εφαρμογή των κριτηρίων συνθήκη και προφανώς ακριβέστερη μέθοδο απόδοσης όμοιων προτύπων. Η ικανότητα εκπαίδευσης του συστήματος του νευρωνικού δικτύου αποτελεί το μείζον πλεονέκτημά τους. Αυτό αποδείχτηκε και στην παρούσα εργασία.
- Η γνώση των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης, αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα στη διαδικασία της ταξινόμησης, καθώς και το πλήθος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια. Από τα αποτελέσματα, αποδεικνύεται πως η χρήση μικρότερου αριθμού κριτηρίων (δύο, εν προκειμένω), δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα, επαληθεύοντας τον κανόνα της απλότητας. Η εισαγωγή του τρίτου κριτηρίου της «υδρολογικής» απόστασης, αντί να διευκολύνει τις διαδικασίες, φαίνεται να τις κάνει πιο πολύπλοκες, αλλοιώνοντας τα αποτελέσματα.
- Η βέλτιστη ταξινόμηση της λεκάνης απορροής για την ανατολική Αττική, όπως φαίνεται και από τα ποσοστά επιτυχίας προκύπτει με τη χρήση των νευρωνικών δικτύων και το συνδυασμό των απλά υπολογισμένων κριτηρίων του δείκτη HAND και της κλίσης του εδάφους με μέσο ποσοστό επιτυχίας για το σύνολο των κλάσεων, 65.8%. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται και τα τρία κριτήρια, σε άλλες κλάσεις βελτιώνονται τα ποσοστά, ενώ σε άλλες αυξάνονται οι αστοχίες.
- Η βέλτιστη ταξινόμηση της δυτικής υδρολογικής λεκάνης της Αττικής, με βάση τα ποσοστά επιτυχίας επιτυγχάνεται με τη χρήση των νευρωνικών δικτύων και των συνδυασμό των κριτηρίων του δείκτη HAND και της κλίσης του εδάφους με μέσο ποσοστό επιτυχίας για το σύνολο των κλάσεων πάνω από 54%.
- Όσον αφορά στη ταξινόμηση με ασαφή λογική, τα αποτελέσματα χρήζουν αναλυτικής ερμηνείας. Αν και δεν εμφανίζονται μεγάλα ποσοστά επιτυχίας, το βέβαιο είναι πως το σύστημα αφήνεται ελεύθερο να ταξινομήσει την προσφερόμενη σε αυτό πληροφορία χωρίς περιοριστικούς παράγοντες. Επιπλέον, ακόμα και αν η απεικόνιση των αποτελεσμάτων δείχνει να ακολουθεί κάποια λογική χωρική κατανομή σε σχέση με το υδρογραφικό δίκτυο, δεν ισχύει το ίδιο αν εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά της κάθε κλάσης ως προς τα κριτήρια.
- Περιοχές, που από την ασαφή ταξινόμηση περιβάλλουν το υδρογραφικό δίκτυο, δεν αποτελούν πάντοτε παρόχθιες περιοχές. Τα κεντροειδή σημεία κάθε κλάσης ουσιαστικά τις ορίζουν κιόλας. Είναι αξιοσημείωτο παρόλα αυτά πως σε περίπτωση παντελούς έλλειψης πληροφορίας ή γνώσης επί του αντικειμένου μελέτης (προφανώς για «εκπαίδευση» κάποιας άλλης μεθόδου), η εφαρμογή μιας ταξινόμησης με βάση την ασαφή λογική, μπορεί να εξάγει συμπεράσματα, έστω και με περιορισμένο αναμενόμενο βαθμό επιτυχίας στην ταξινόμηση.
- Η ασαφής ταξινόμηση παράγει τοπικά βέλτιστες τάξεις οι οποίες μεγιστοποιούν την αρχική πληροφορία και ελαχιστοποιούν το σφάλμα λόγω μεταγενέστερων παρεμβάσεων ή γεω-στατιστικών διαδικασιών. Φυσικά η μέθοδος αυτή

χαρακτηρίζεται και από μειονεκτήματα, τα κυριότερα από τα οποία είναι η δυσκολία στην οπτικοποίηση (λόγω επικαλύψεων) και στην αποτίμησή της.

- Για τον υπολογισμό των ορίων των κριτηρίων που τελικά χαρακτηρίζουν κάθε κλάση, βέλτιστη προσέγγιση θεωρείται ο υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των σημείων της υδρολογικής λεκάνης που τελικά κατατάχθηκαν στην αντίστοιχη κλάση. Η σύγκριση των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες τιμές για το δείγμα των σημείων αποδεικνύει το βαθμό «εξαναγκασμού» που το σύστημα θέτει ως απαραίτητη προϋπόθεση κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης.



# Αναφορές

---

## Στην ελληνική γλώσσα

- Ιωαννίδης, Χ. (2010) *Φωτογραμμετρία II, Εκπαιδευτικές σημειώσεις*, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ. (1999) *Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ. και Μαμάσης, Ν. (2001) *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών στο Θριάσιο Πεδίο*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Καββάδας, Κ.Ι., (2009) *Διασφάλιση ποιότητας χαρτογραφικών υποβάθρων του Εθνικού Κτηματολογίου*, Κτηματολόγιο Α.Ε.
- Λιμπεροπούλου, Χ. (2010) *Η συμβολή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου του Σαρανταπόταμου και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην εκδήλωση πλημμύρων*, Πτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Μπενσασσών Α., Παπαλεξοπούλος Β. (2004) *Αντιπλημμυρική προστασία του λεκανοπεδίου ρέματος Ερασίνου*, Ημερίδα ΤΕΕ «Αντιπλημμυρική Προστασία Αττικής», Αθήνα.
- Πετρίδης, Σ. (2004) *Αυτοπροσαρμοζόμενα Ασαφή Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές σε Προβλήματα Ταξινόμησης*. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα.
- Πιστρίκα, Α. (2010) *Εκτίμηση Άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.
- Τσακίρης, Γ. (1995) *Υδατικοί Πόροι*. I. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Χατζηχρήστος, Θ., Καλλίτσα, Α. (2006) *Ανάπτυξη Γεωδημογραφικού Συστήματος για το νομό Αττικής*, 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο HellasGIS, Αθήνα, Ελλάδα.
- Kraus, K. (2003) *Φωτογραμμετρία*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Έκδοση Β' Βελτιωμένη, Τόμος 1, Αθήνα, Ελλάδα.

## Ξενόγλωσσες

- Bacao, F, Lobo, V., Painho, M. (2005) *Self-organizing maps as substitutes for k-means clustering*, Computational Science - ICCS 2005, Pt 3. Lecture Notes in Computer Science, pp. 476-483.
- Bailey, R.G. (2004) *Identifying ecoregion boundaries*. *Environmental Management*, 34 (Suppl 1):S14-S26.
- Beck, M.B., Straten, G. van. (1983) *Uncertainty and forecasting of water quality*, Springer – Verlag, Bernil and New York.
- Bernier, P.Y., Swanson, R.H., Woodard, P.D. (1987) *Forest hydrology and watershed management*. Conference Proceedings, Wallingford, Oxfordshire: IAHS Press.
- Bezdek, C.J., Ehrlich, R., Full, W. (1984) *FCM: the fuzzy c-means clustering algorithm*, In *Computers and Geosciences*, Vol. 10, No. 2-3, pp. 191-203.

- Bezdek, J., Tsao, E., Pal, N. (1994) *Fuzzy Kohonen Clustering Networks*, Pattern, Recognition, Vol 27 No5 pp757-764.
- Bolliger, J. (2005) *Simulating complex landscapes with a generic model: Sensitivity to qualitative and quantitative classifications*. *Ecological Complexity*, 2(2):131-149.
- Bolliger, J, Mladenoff, DJ. (2005) *Quantifying spatial classification uncertainties of the historical Wisconsin landscape (USA)*. *Ecography*, (28):141–156.
- Bryan, BA. (2006) *Synergistic techniques for better understanding and classifying the environmental structure of landscapes*. *Environmental Management*, 37(1): 126-140.
- Chorley, R. J., Schumm, S. A., and Sugden, D. E., (1984) *Geomorphology*, Methuen & Co. Ltd, 1984.4386.
- Coleman, A.M. (2008) *An Adaptive Landscape Classification Procedure Using Geoinformatics and Artificial Neural Network*. MSc Thesis, Vrije University, Amsterdam, The Netherlands.
- Cowardin, L.M., Carter, V., Golet, F., LaRoe, E. (1979) *Classification of wetlands and deepwater 30 habitats of the United States*, US Fish and Wildlife Service, Washington DC, 4386.
- Demek, J. (1972) *Manual of detailed geomorphological mapping*. Academia, Prague, pp. 344.
- Duff, J. H., Triska, F. J., Jackman, A. P., LaBaugh, J. W. (1997) *The Influence of Streambed Sediments on the Solute Chemistry of Ground-Water Discharge in the Upper Shingobee River*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4215, pp. 143-147.
- Ehsani, AH. (2007) *Artificial Neural Networks: Application in Morphometric and Landscape Features Analysis*, KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm, pp. 53.
- ESRI (2010) *ArcGIS Desktop and Arc/INFO Workstation* (Version 10). Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, California.
- Freer, J., McDonnell, J., Beven, K., Burns, D., Hooper, R., Aulenbach, B., Kendall, C., Peters, N. (2002) *Understanding the spatial and temporal dynamic contributions of subsurface storm runoff at the hillslope scale*. *Water Resour. Re.*, 38(12): 5-1–5-16.
- Gharari, S., Fenicia F., Hrachowitz M., Savenije H. H. G. (2011) *Land classification based on hydrological landscape unit*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3275–3291.
- Güler, C., Kurt M.A., Alpaslan, M., Akbulut, C., (2012) *Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques*, *Journal of Hydrology*, Volumes 414–415, 11 January 2012, Pages 435–451).
- Hilbert, D.W., Ostendorf, B. (2001) *The utility of artificial neural networks for modelling the distribution of vegetation in past, present and future climates*. *Ecological Modelling*, 146(1-3):311-327.
- Hsieh, B.B., Jourdan, M.R. (2006) *Watershed Similarity Analysis for Military Applications Using Supervised-Unsupervised Artificial Neural Networks*, Proceedings of the 25th Army Science Conference, Orlando, Florida.
- Jang, J.S.R., Sun C.T., Mizutani, E. (1997) *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.



- Joy, M.K., Death, R.G. (2004) *Predictive modelling and spatial mapping of freshwater fish and decapod assemblages using GIS and neural networks*, *Freshwater Biology* 49(8):1036-1052.
- Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen and I.A. Shiklomanov, (2007) *Freshwater resources and their management. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- Lenz, R. and Peters, D. (2006) *From data to decisions - Steps to an application-oriented landscape research*. *Ecological Indicators*, 6(1):250-263.
- Lin, G.F. and Chen, L.H. (2005) *Time series forecasting by combining the radial basis function network and the self-organizing map*. *Hydrological Processes* 19(10):1925-1937.
- Lin, G.F. and Chen, L.H. (2006) Identification of Homogeneous Regions for Regional Frequency Analysis using the Self-Organizing Map. *Journal of Hydrology* 324(1-4):1-9.
- Lingireddy, S. and Brion, G.M. (2005). *Artificial Neural Networks in Water Supply Engineering*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, pp. 173.
- Mathworks, (2012), *Matlab Documentantation center*, Natick, Massachusetts, U.S.A.
- Michie, D., Spiegelhalter, D.J. and Taylor, C.C. (1994) *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*. *Ellis Horwood*, London, England, pp. 289.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1988) *Where do channels begin?*, *Nature*, 336, 232–234.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R. (1991) *Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological and biological application*, *Hydrol. Processes*, 5 (1), 3-30.
- Park, Y.S., Kwak, I.S., Chon, T.S., Kim, J.K. and Jorgensen, S.E. (2001) *Implementation of artificial neural networks in patterning and prediction of exergy in response to temporal dynamics of benthic macroinvertebrate communities in streams*. *Ecological Modelling*. 146(1-3):143-157.
- Renno, C.D., Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Soares, J.V., Hodnett, M.G., Tomasella, J. and Waterloo, M.J. (2008) *HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra30 firme rainforest environments in Amazonia*, *Remote Sens. Environ.*, 112(9), 3469–3481, doi:10.1016/j.rse.2008.03.018, 4384, 4394.
- Ross, T.J. (1995) *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, McGraw-Hill, page 379.
- Toth, J. (1963) *A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins*. *Journal of Geophysical Research*, 68:4795-4812.
- Triska, F.J., Duff J.H., and Avanzino, R.J. (1993) *Patterns of Hydrological Exchange and Nutrient Transformation in the Hyporheic Zone of a Gravel-Bottom Stream: Examining Threstrial-Aquatic Linkages*, *Freshwater Biology* 29:259-274.
- Neufeld M. (1998) *Comparison of Unsupervised Classifiers*, *University of Alberta University of Saskatchewan*, Edmonton, Canada.
- Openshaw S., Gillard A. (1978) *On the Stability of a Spatial Classification of Census Enumaration Districts Data*, in P.W.S. Batey (ED) *Theory and Methods in Urban and Regional Analysis*, Pion, London, 101 – 119.

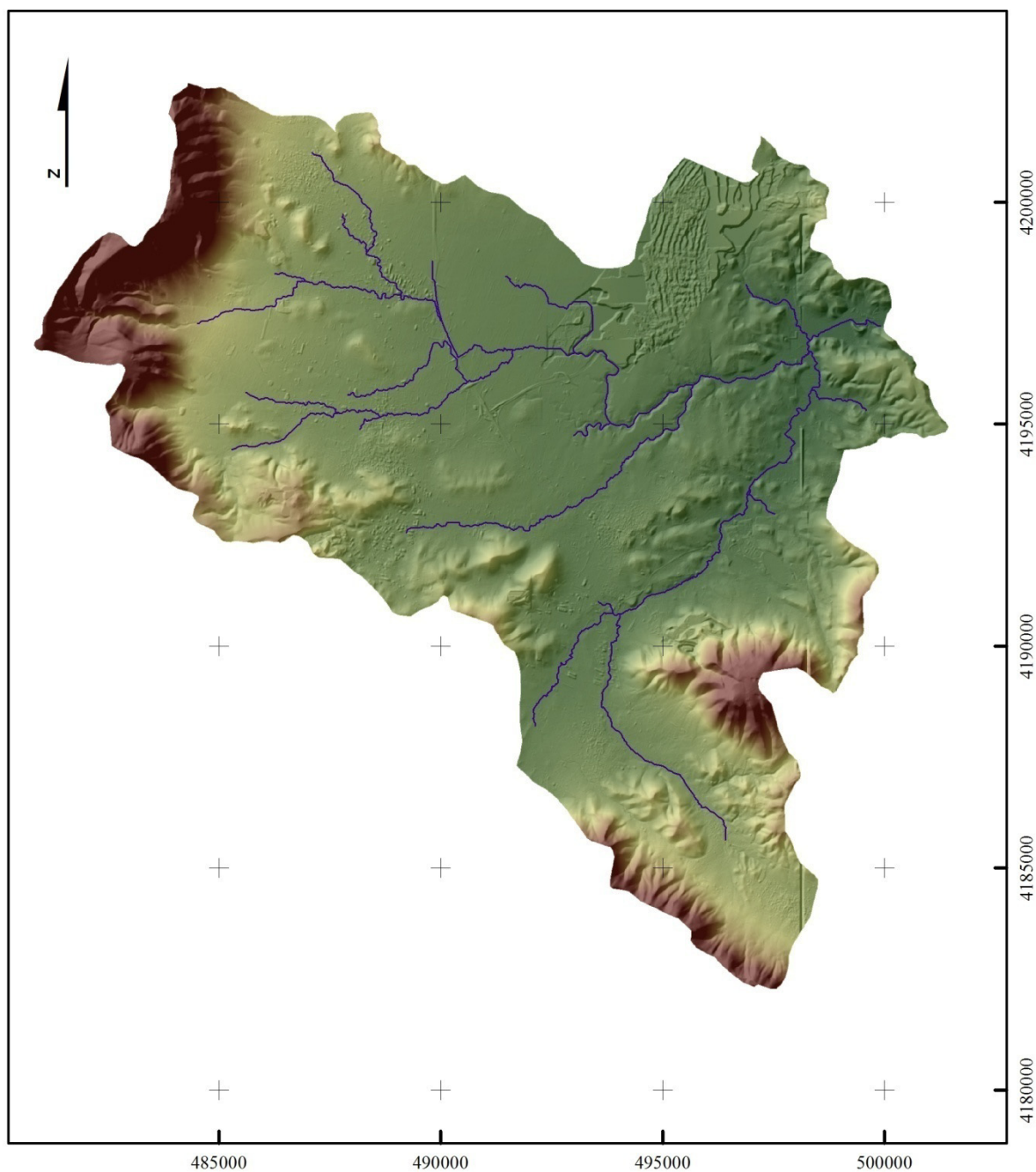
- Openshaw S. (1994) *Neuroclassification of Spatial data in D.C. Hewitson and R.G. Craneleds, Neural Nets: applications in Geography*, Kluwer, Boston, 53 – 70.
- Openshaw S (1997) *Artificial Intelligence in Geography*, Wiley, London.
- Savenije, H.H.G. (2010) *HESS Opinions, Topography driven conceptual modeling (FLEX-Topo)*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 2681–2692, doi:10.5194/hess-14-2681-201, 2010. 4382, 4384, 5 4387.
- Soille, P., Vogt, J. and Colombo, R. (2003) *Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models*. Water Resources Research, 39(12), 1366–1375.
- Yuras, G. (1996) Remote Sensing. *Center for Oceanographic Research in the Eastern South Pacific, University of Concepción*. Accessed November 19, 2007 at <http://copas.udec.cl/~gabriel/tutoriales/rsnote/contents.htm> (undated webpage).
- Ward, R.C., Robinson, M. (2000) *Principles of Hydrology*. 4th Edition, McGraw-Hill, London, UK.
- Wardrop, D.H., Bishop, J.A., Easterlin, M., Hychka, K., Myers, W., Patil, G.P. and Taillie, C. (2005) *Use of landscape and land use parameters for classification and characterization of watersheds in the mid-Atlantic across five physiographic provinces*. Environmental and Ecological Statistics, 12(2):209-223.
- Water Agenda, <http://www.lifewateragenda.org/html/wfd-gr.html>, προσπελάστηκε στις 16/10/2012.
- Winter, T.C. (2001) *The Concept of Hydrologic Landscapes*, Journal of the American Water Resources Association, VOL. 37, NO.2.
- Zadeh, L.A., (1965) *Fuzzy Sets*, Information and control, 8, 338-353.

## Παράρτημα

---



## Απόδοση Αναγλύφου λεκ. π. Ερασίνου



### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

ΨΜΕ Λεκάνης π. Ερασίνου

Max: 1020 m

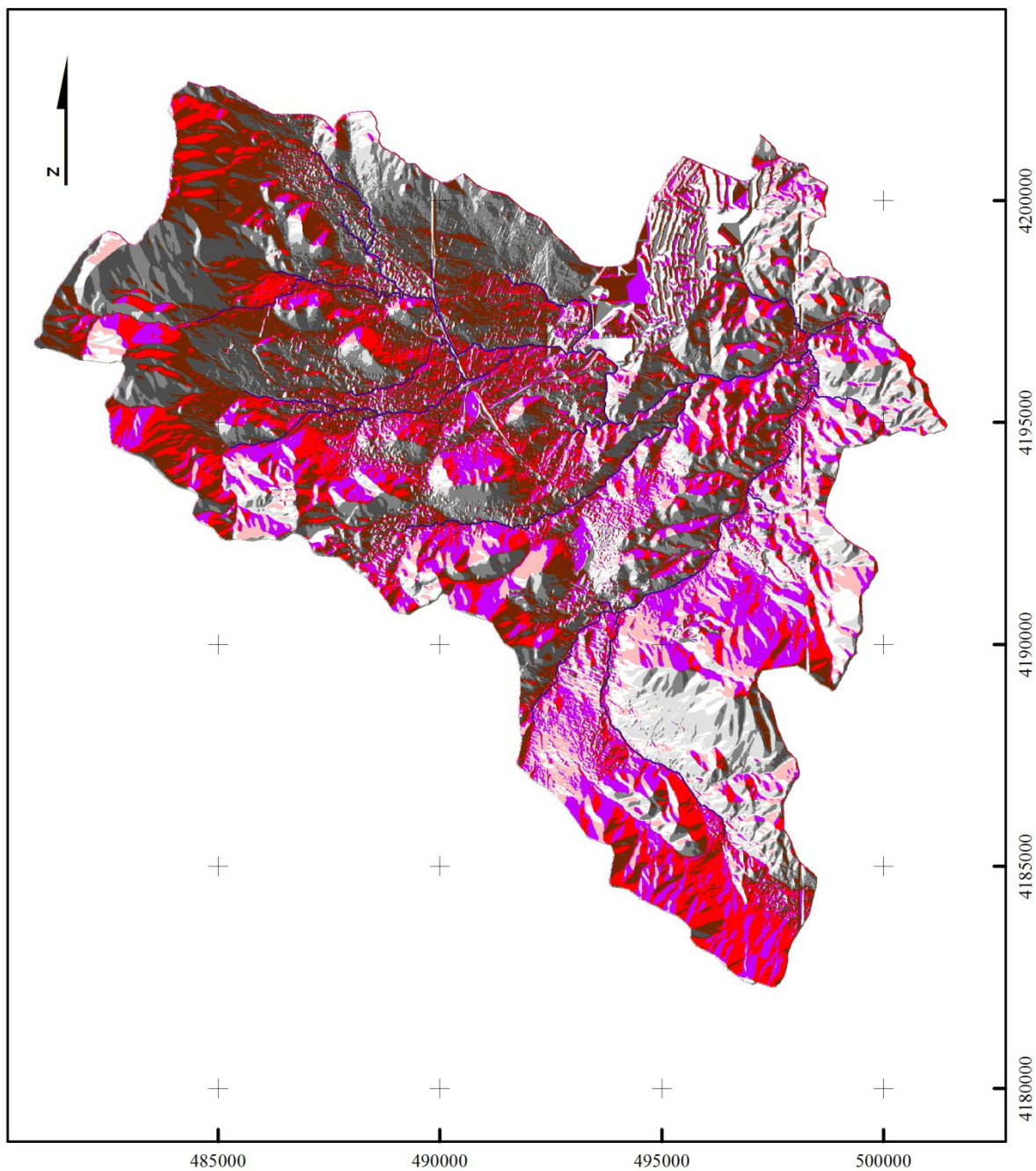
Min: 0 m

Κλίμακα 1/150.000



Εικόνα Π-1: Απόδοση Αναγλύφου λεκάνης π. Ερασίνου.

Ομαλοποιημένος κάρναβος Διεύθυνσης Απορροής λεκ. π. Ερασίνοπ



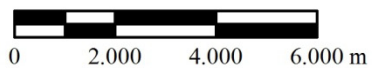
**Υπόμνημα**

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

Ομαλοποιημένος Κάρναβος Διεύθυνσης Απορροής

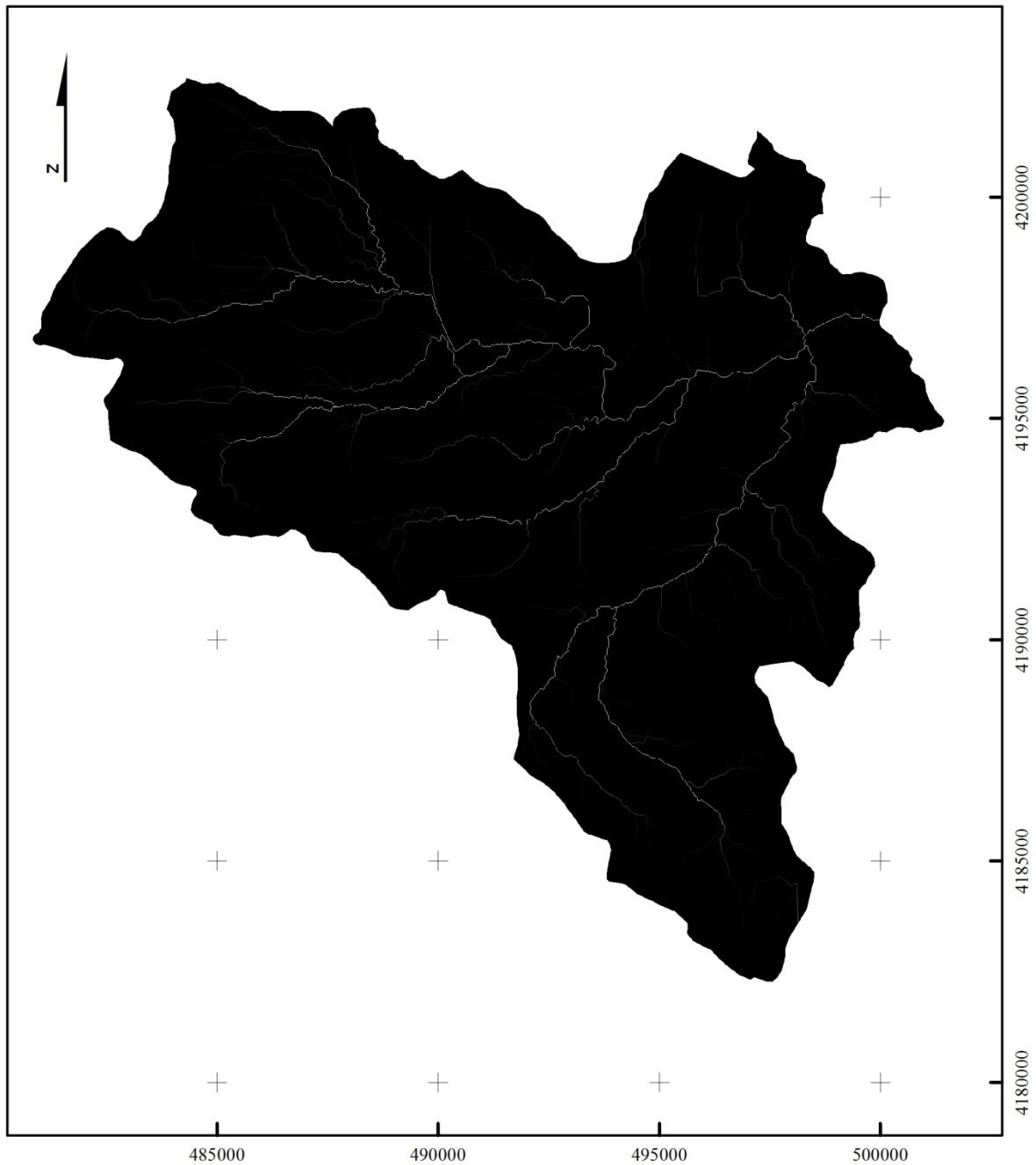
 A	 Δ
 ΝΑ	 ΒΔ
 Ν	 Β
 ΝΔ	 ΒΑ

Κλίμακα 1/150.000



Εικόνα Π-2: Ομαλοποιημένος κάρναβος διεύθυνσης απορροής λεκάνης π. Ερασίνοπ.

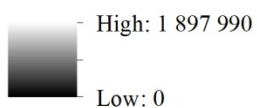
## Κάναβος Συγκεντρωτικής Ροής λεκ. π. Ερασίνου



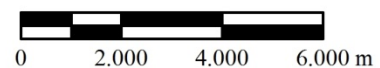
### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

Κάναβος Συγκεντρωτικής Ροής



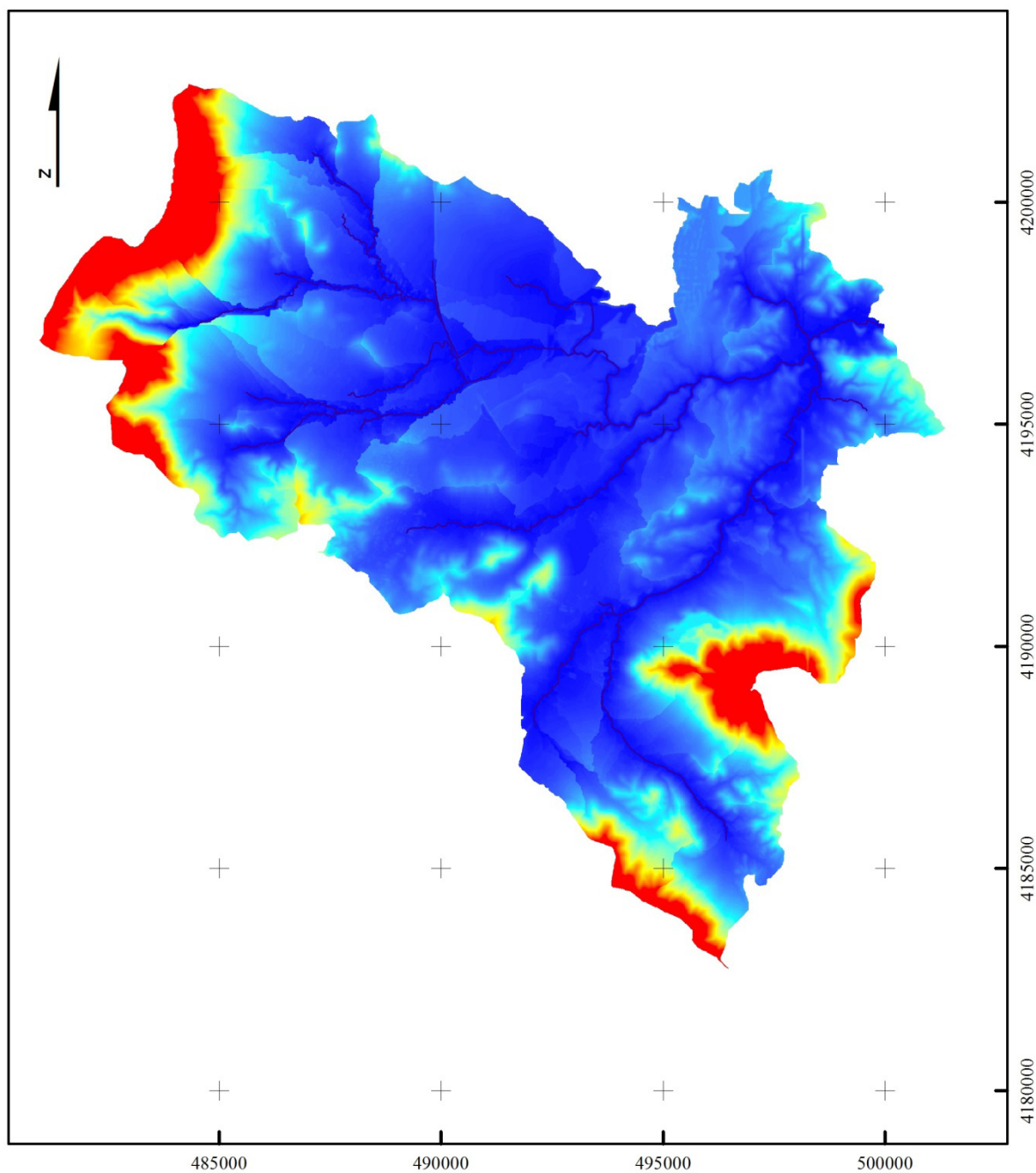
Κλίμακα 1/150.000



Εικόνα Π-3: Κάναβος Συγκεντρωτικής ροής λεκάνης π. Ερασίνου.



## Κατανομή δείκτη HAND



### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

Δείκτης HAND

High: 859.67 m  
Low: 0 m

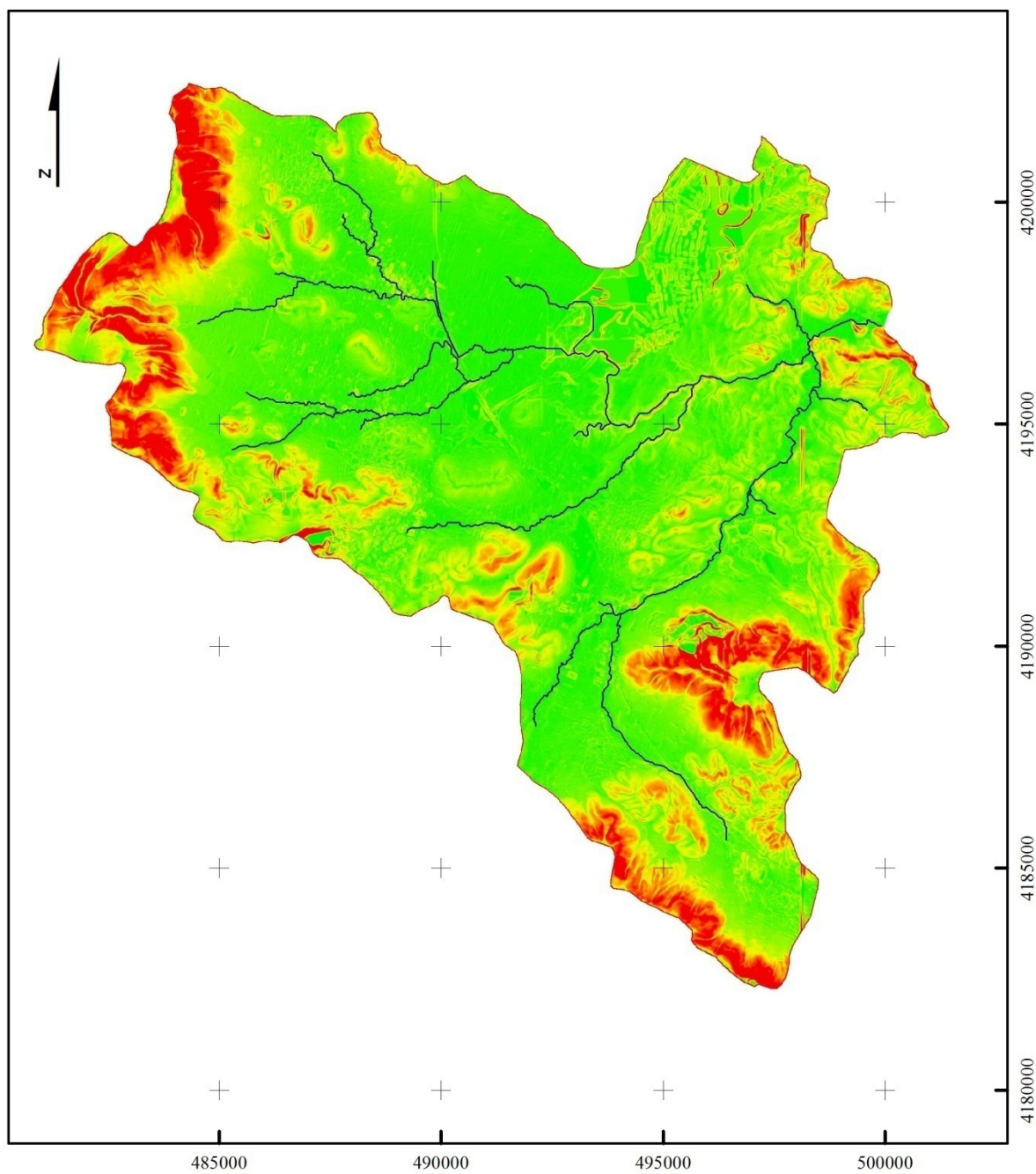
Κλίμακα 1/150.000

0 2.000 4.000 6.000 m

Εικόνα Π-4: Δείκτης HAND.



## Κάναβος Κλίσεων Εδάφους



### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

Κλίσεις

High: 86.9 degrees

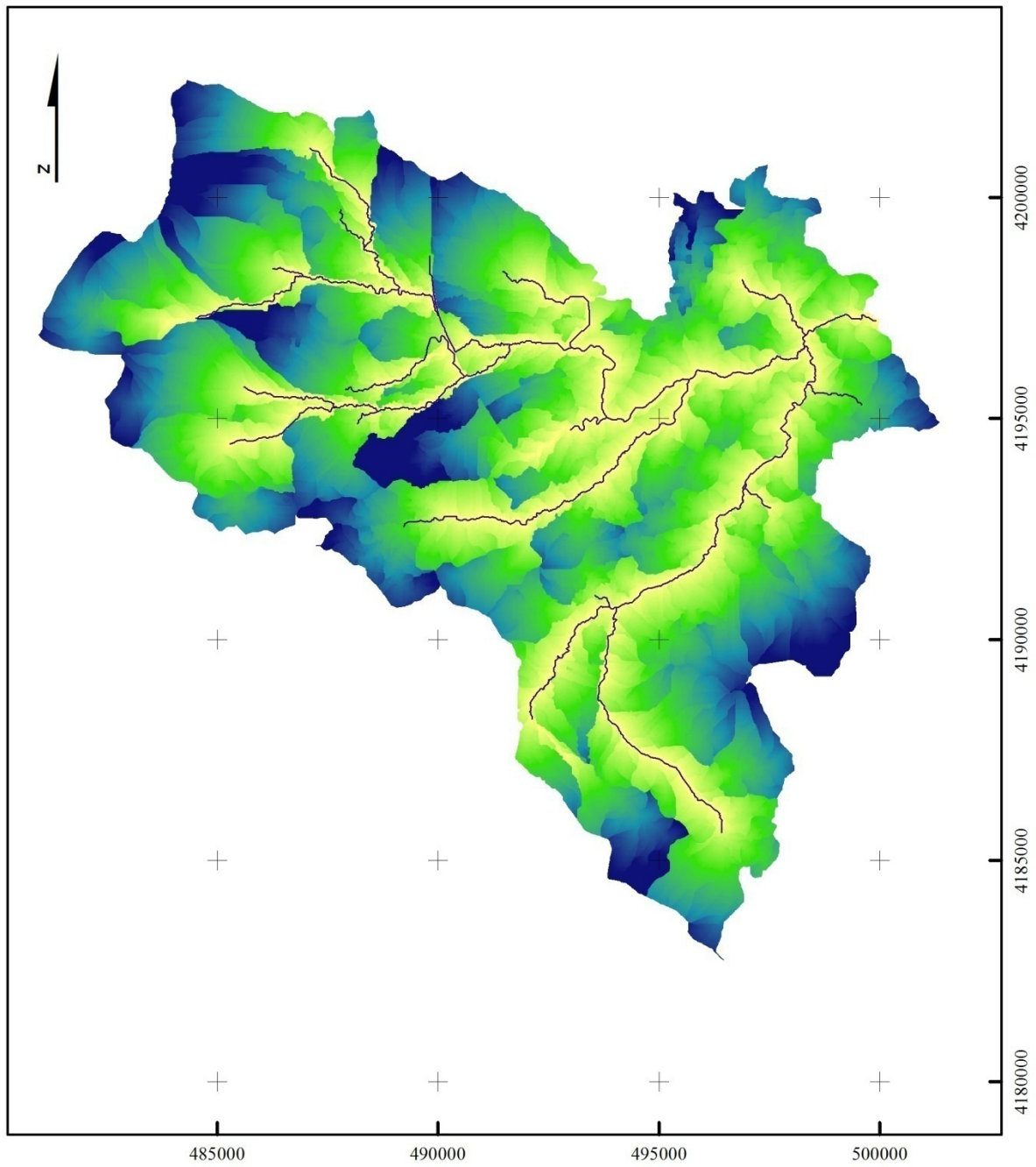
Low: 0

Κλίμακα 1/150.000



Εικόνα Π-5:Κάναβος Κλίσεων Εδάφους.

## Κάναβος Αποστάσεων από τον κοντινότερο κλάδο Υδρογραφικού Δικτύου



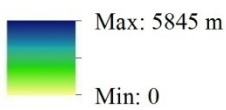
### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

Κλίμακα 1/150.000

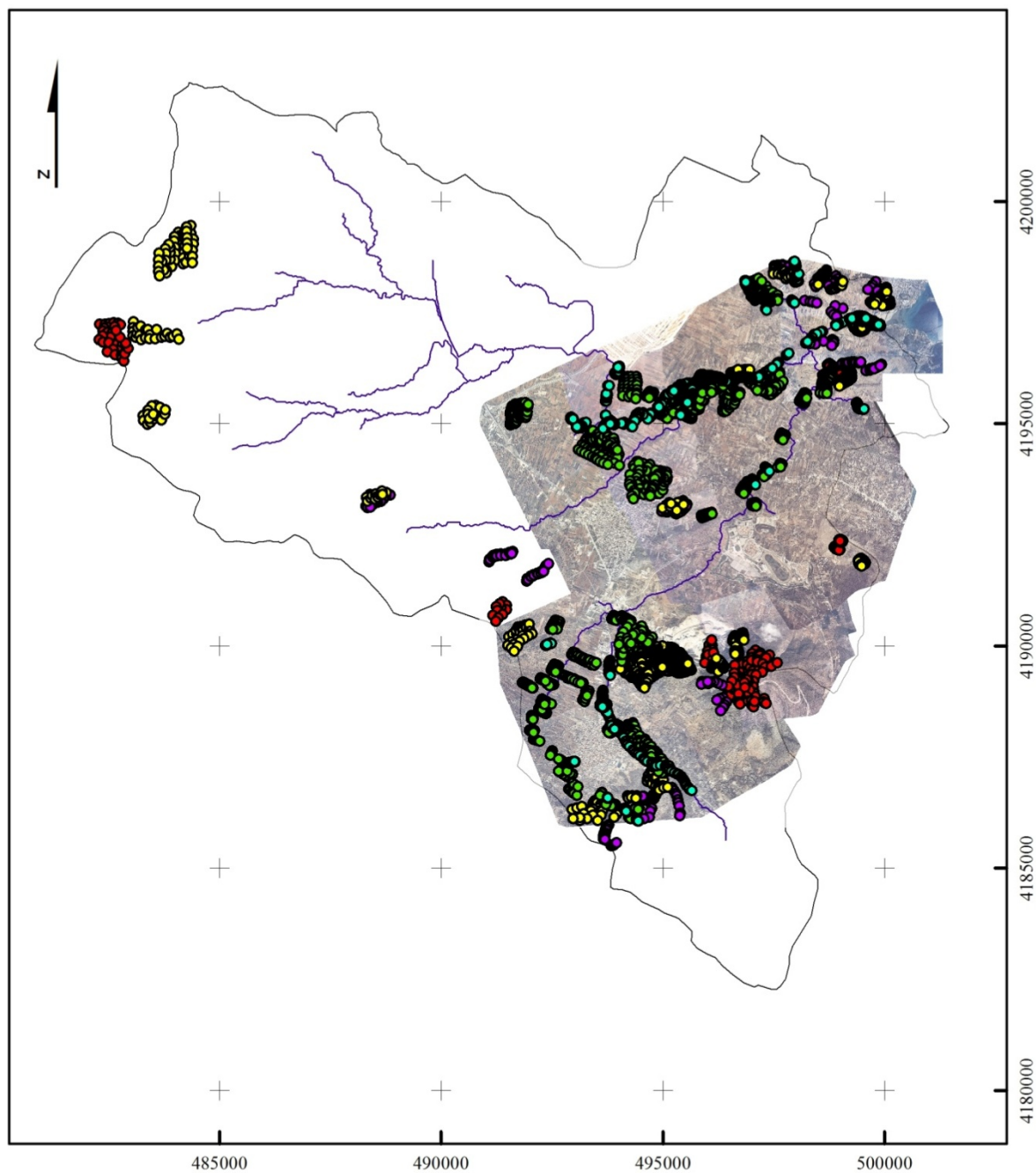


Αποστάσεις από τον κοντινότερο κλάδο Υδρογραφικό Δικτύου



Εικόνα Π-6: Κάναβος Αποστάσεων από τον κοντινότερο κλάδο Υδρογραφικού δικτύου.

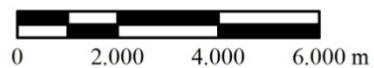
## Κατανομή δείγματος σημείων



### Υπόμνημα

- Παρόχθιες Εκτάσεις
- Πεδινές Εκτάσεις
- Πλαγιές Ήπιας Κλίσης
- Πλαγιές Απότομης Κλίσης
- Οροπέδια
- Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο
- Υδροκρίτης

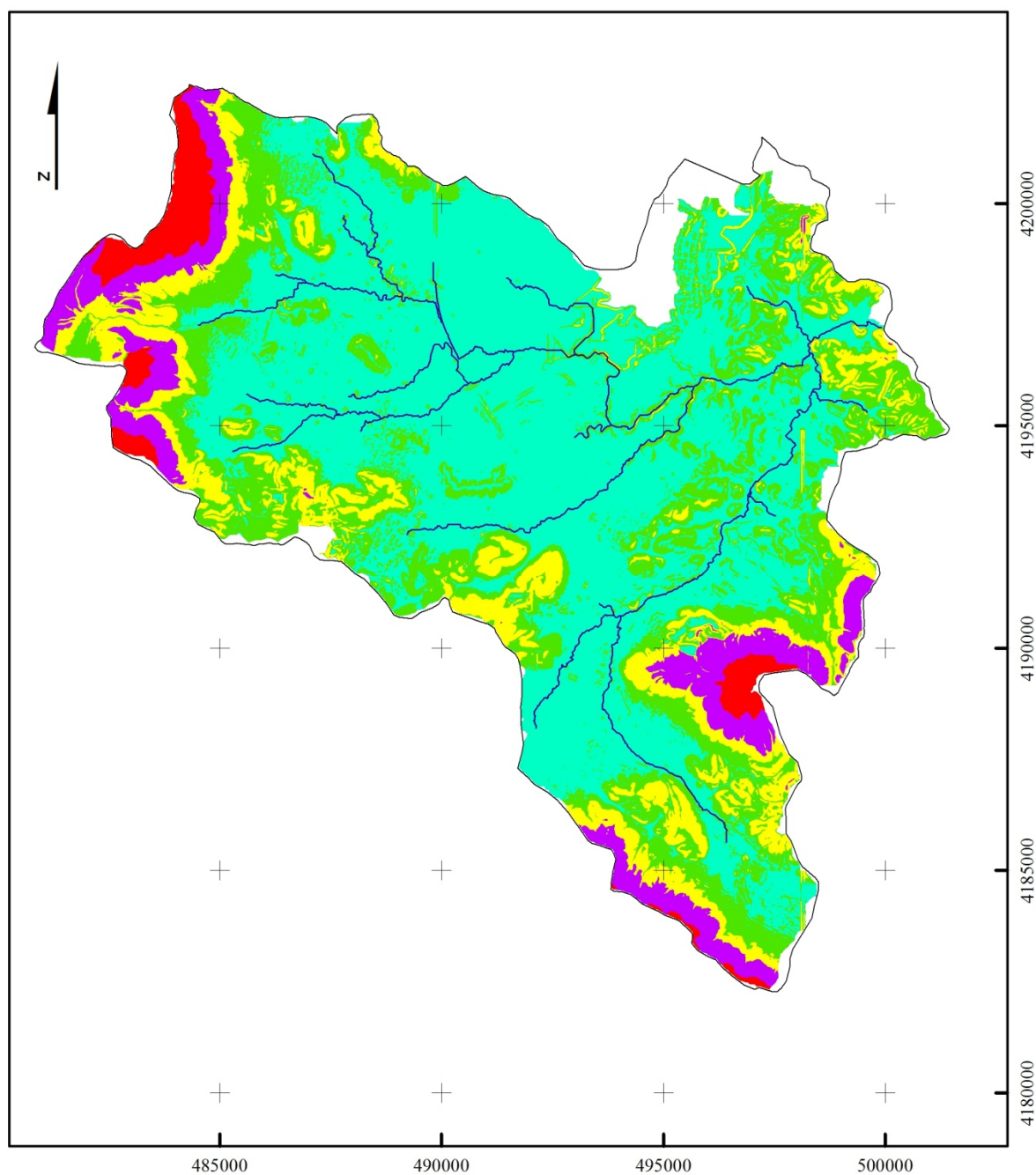
Κλίμακα 1/150.000



Εικόνα Π-7: Κατανομή δείγματος σημείων στη λεκάνη π. Ερασίνου.



## Ταξινόμηση με Ασαφή Λογική δύο υδρολογικών παραμέτρων



### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

Κλάσεις Ταξινόμησης

Layer 5

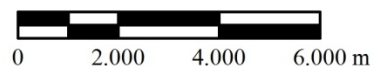
Layer 2

Layer 4

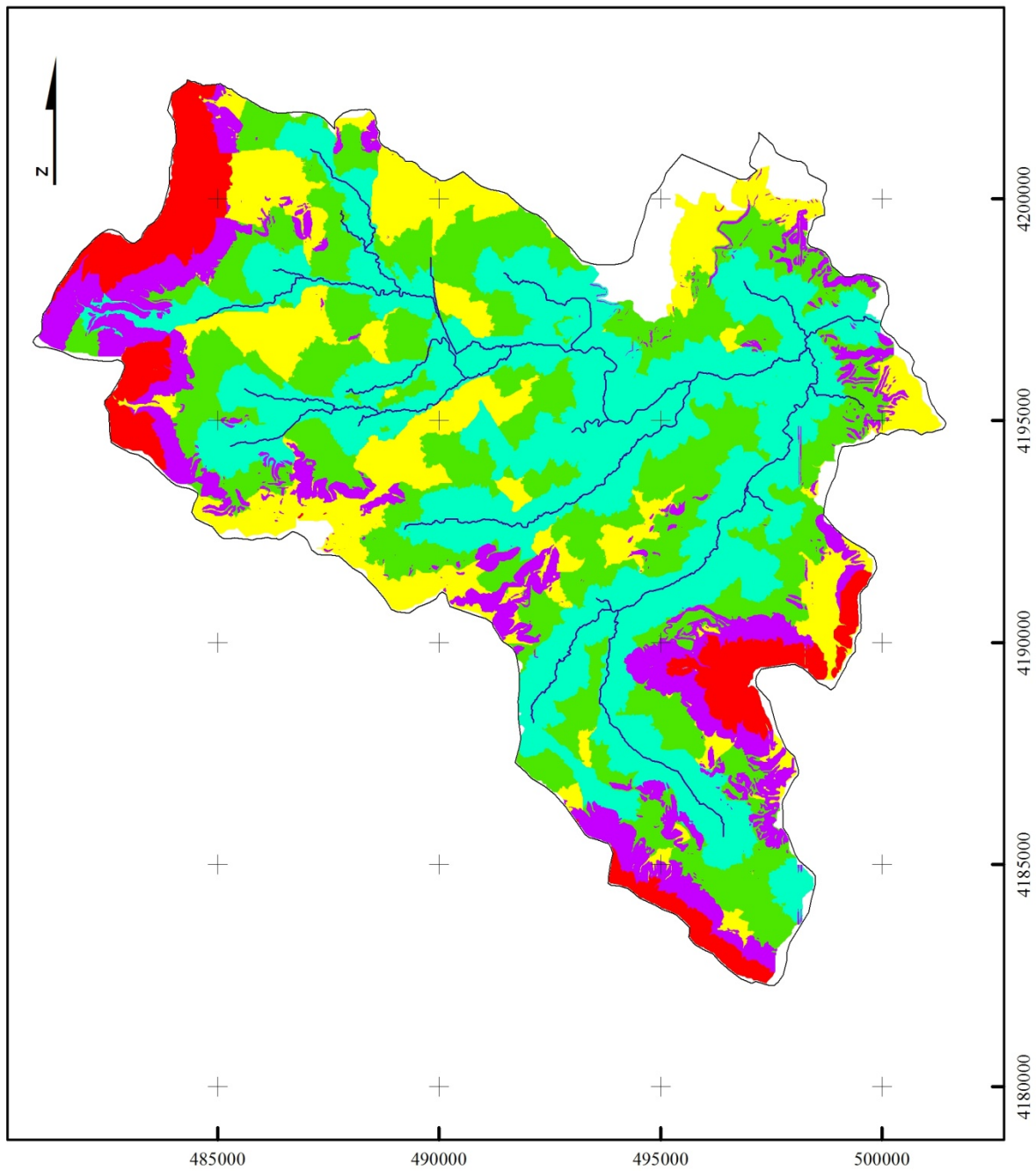
Layer 3

Layer 1

Κλίμακα 1/150.000








Εικόνα Π-8: Ταξινόμηση με Ασαφή Λογική δύο υδρολογικών παραμέτρων.



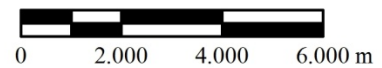
**Υπόμνημα**

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

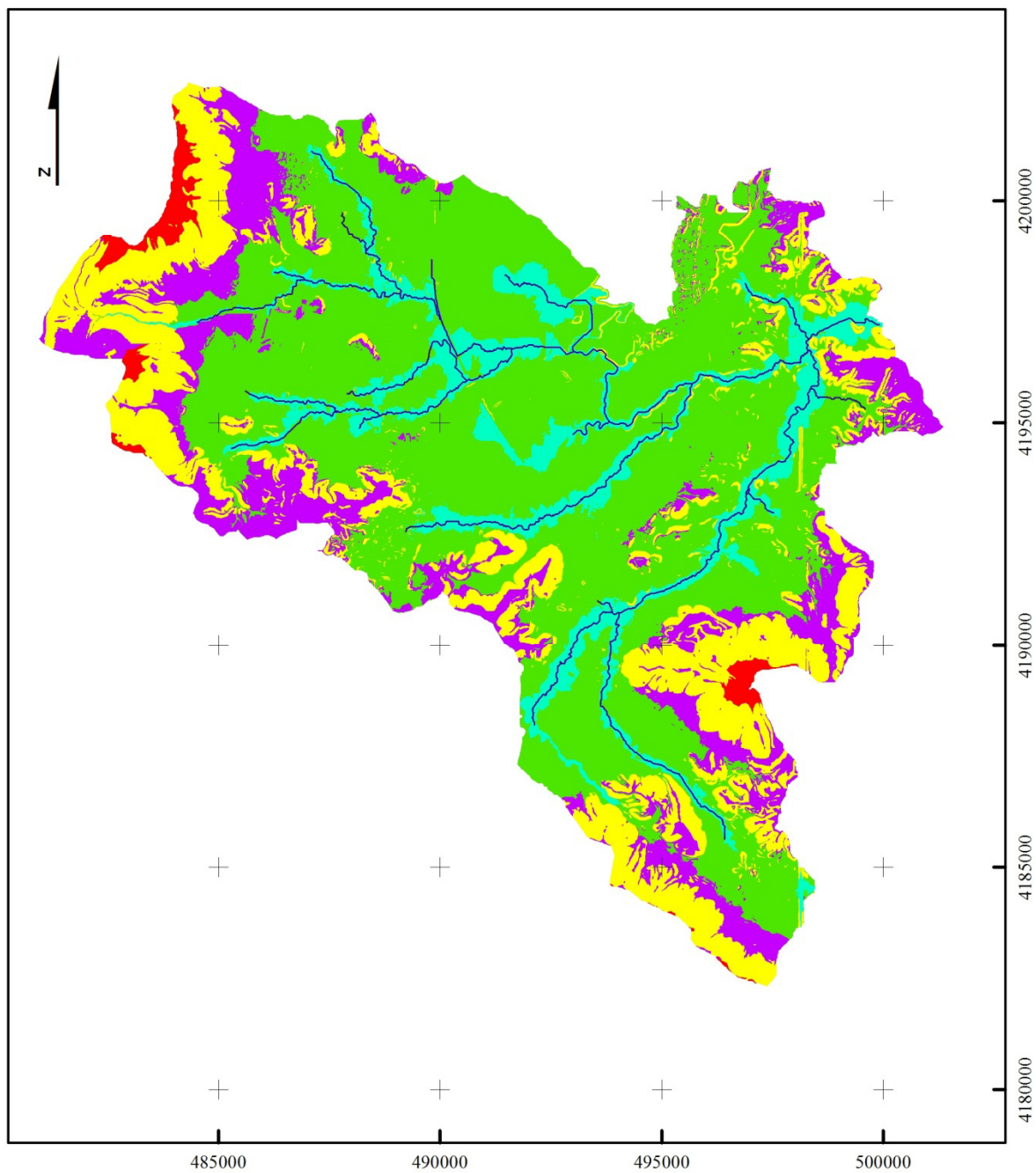
Κλάσεις Ταξινόμησης

-  Layer 3
-  Layer 5
-  Layer 1
-  Layer 4
-  Layer 2

Κλίμακα 1/150.000



Εικόνα Π-9: Ταξινόμηση με Ασαφή Λογική τριών υδρολογικών παραμέτρων.



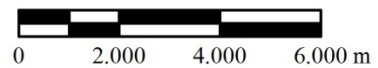
### Υπόμνημα

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

Κλάσεις Ταξινόμησης

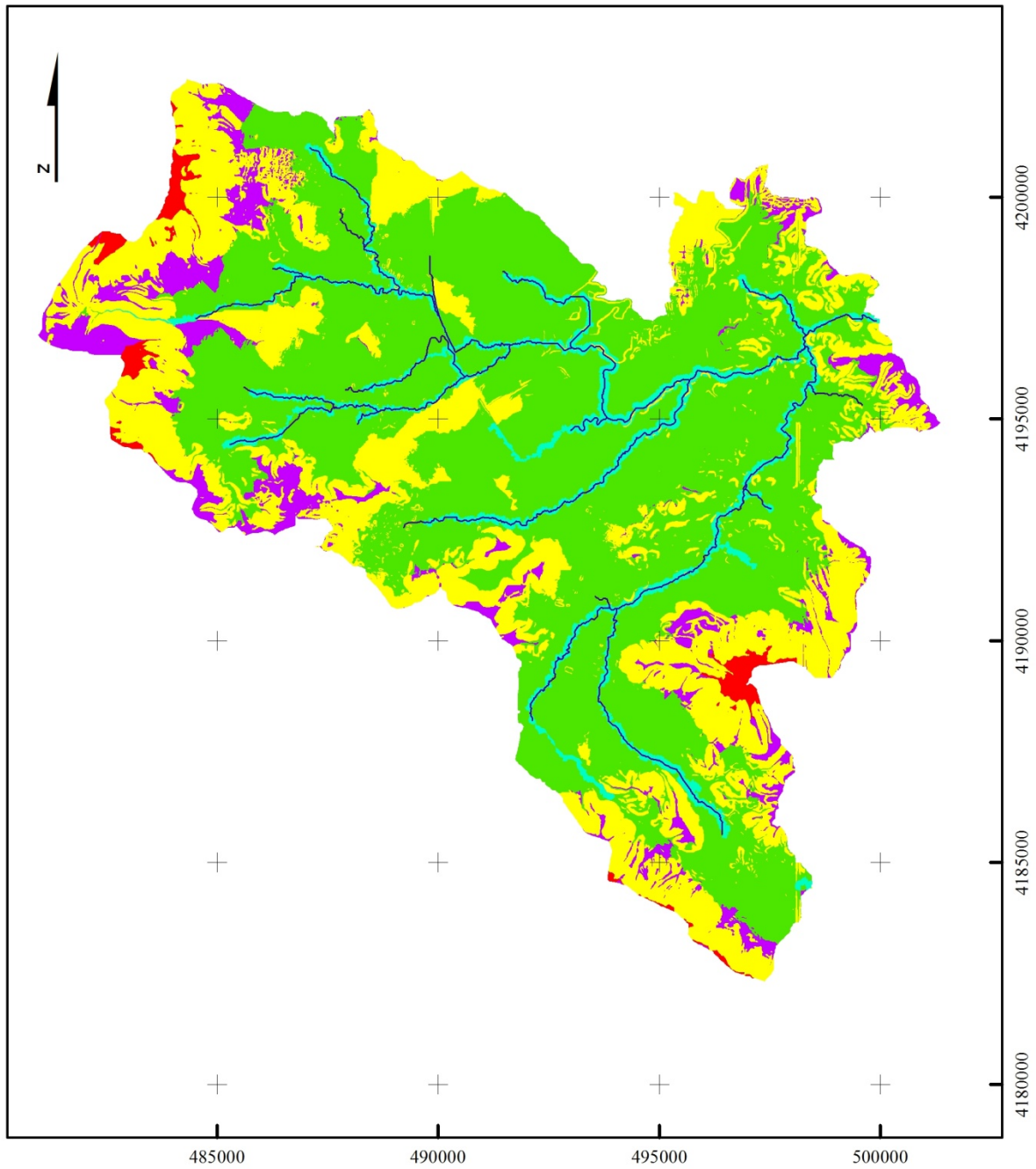
-  Παρόχθιες Περιοχές
-  Πεδινές Εκτάσεις
-  Περιοχές Χαμηλής Κλίσης
-  Περιοχές Έντονης Κλίσης
-  Οροπέδια

Κλίμακα 1/150.000



Εικόνα Π-10: Ταξινόμηση με Νευρωνικά Δίκτυα δύο Υδρολογικών παραμέτρων.





**Υπόμνημα**

— Παραγόμενο Υδρογραφικό Δίκτυο

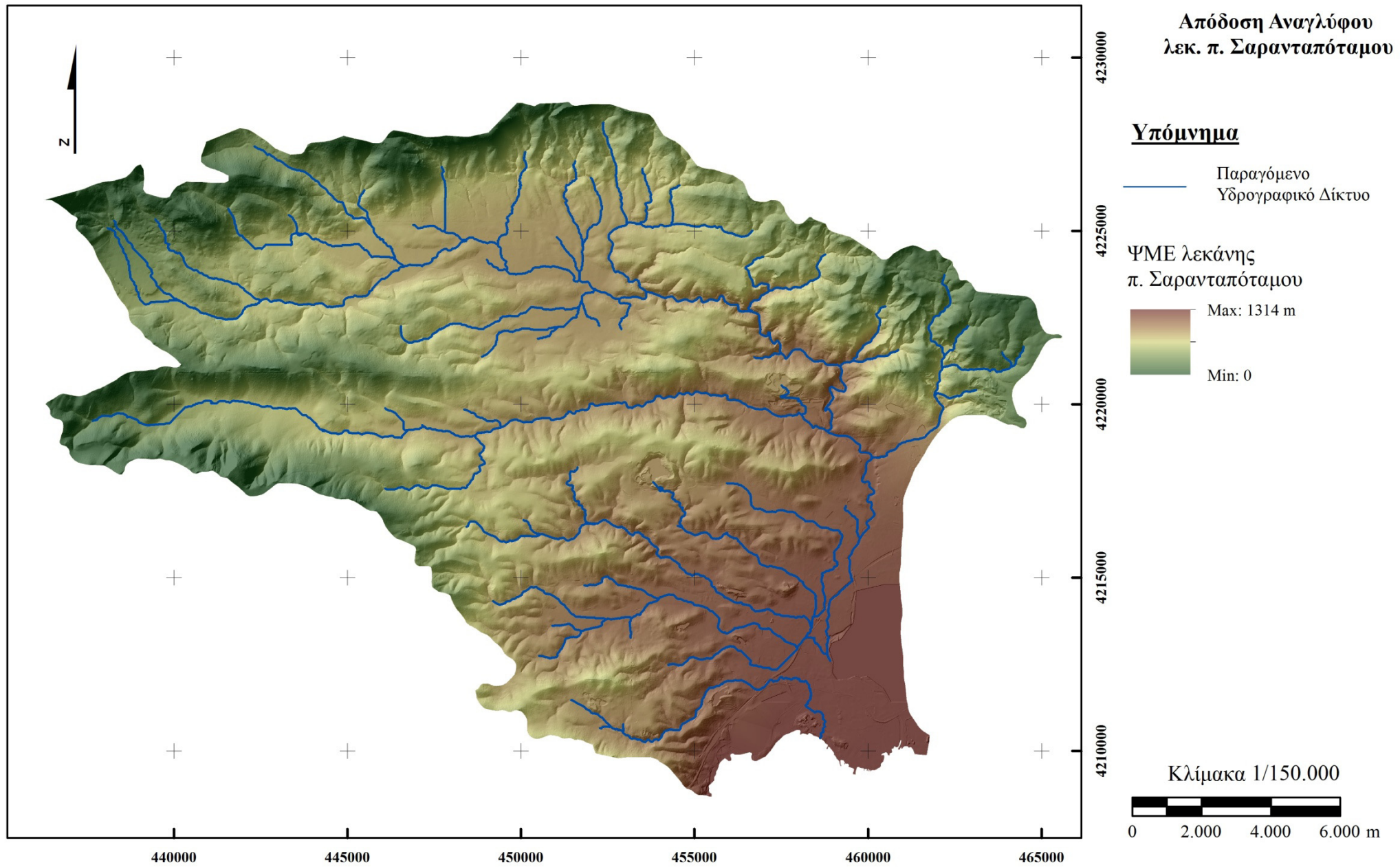
Κλάσεις Ταξινόμησης

-  Παρόχθιες Περιοχές
-  Πεδινές Εκτάσεις
-  Περιοχές Χαμηλής Κλίσης
-  Περιοχές Έντονης Κλίσης
-  Οροπέδια

Κλίμακα 1/150.000

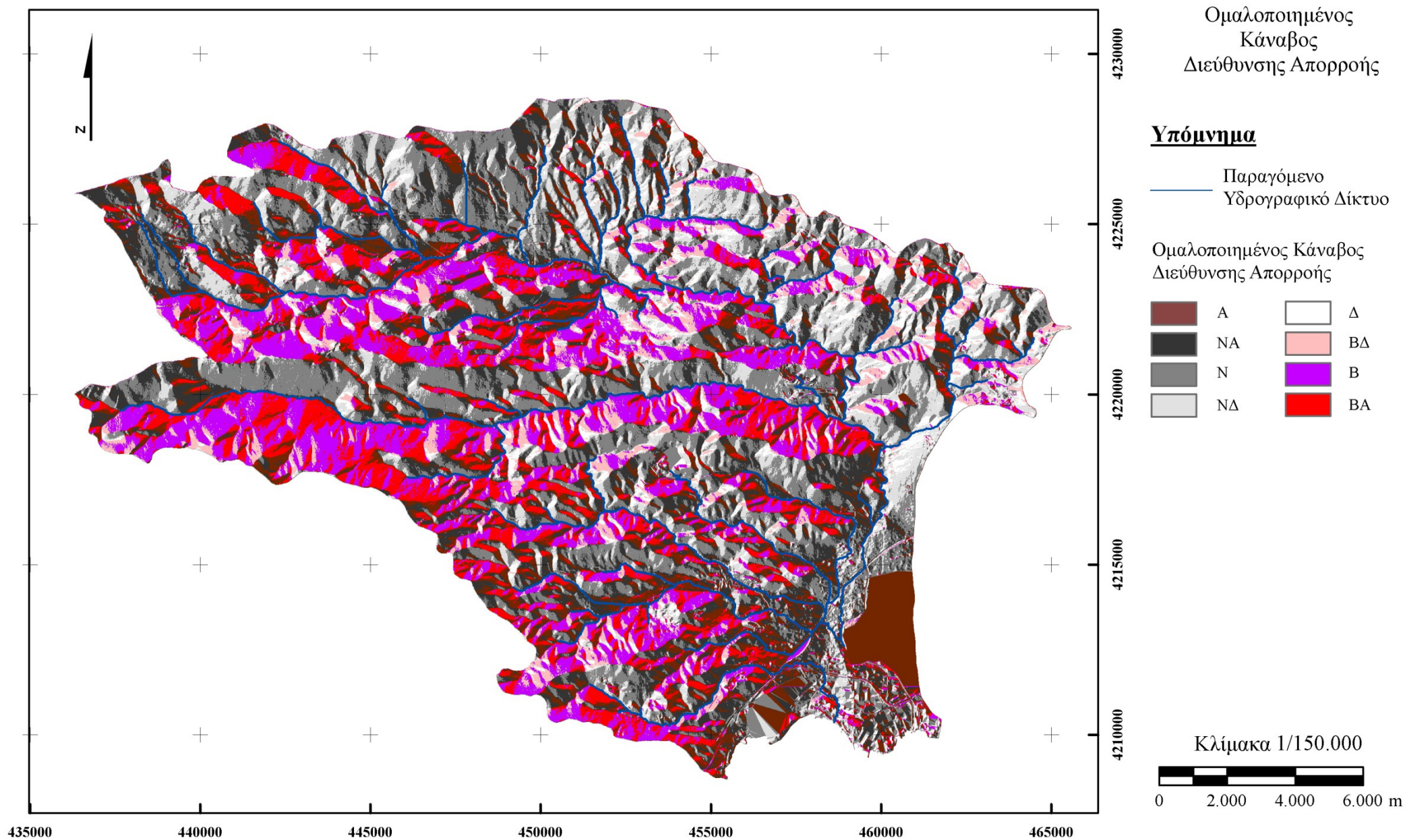


Εικόνα Π-11: Ταξινόμηση με Νευρωνικά Δίκτυα τριών Υδρολογικών παραμέτρων.

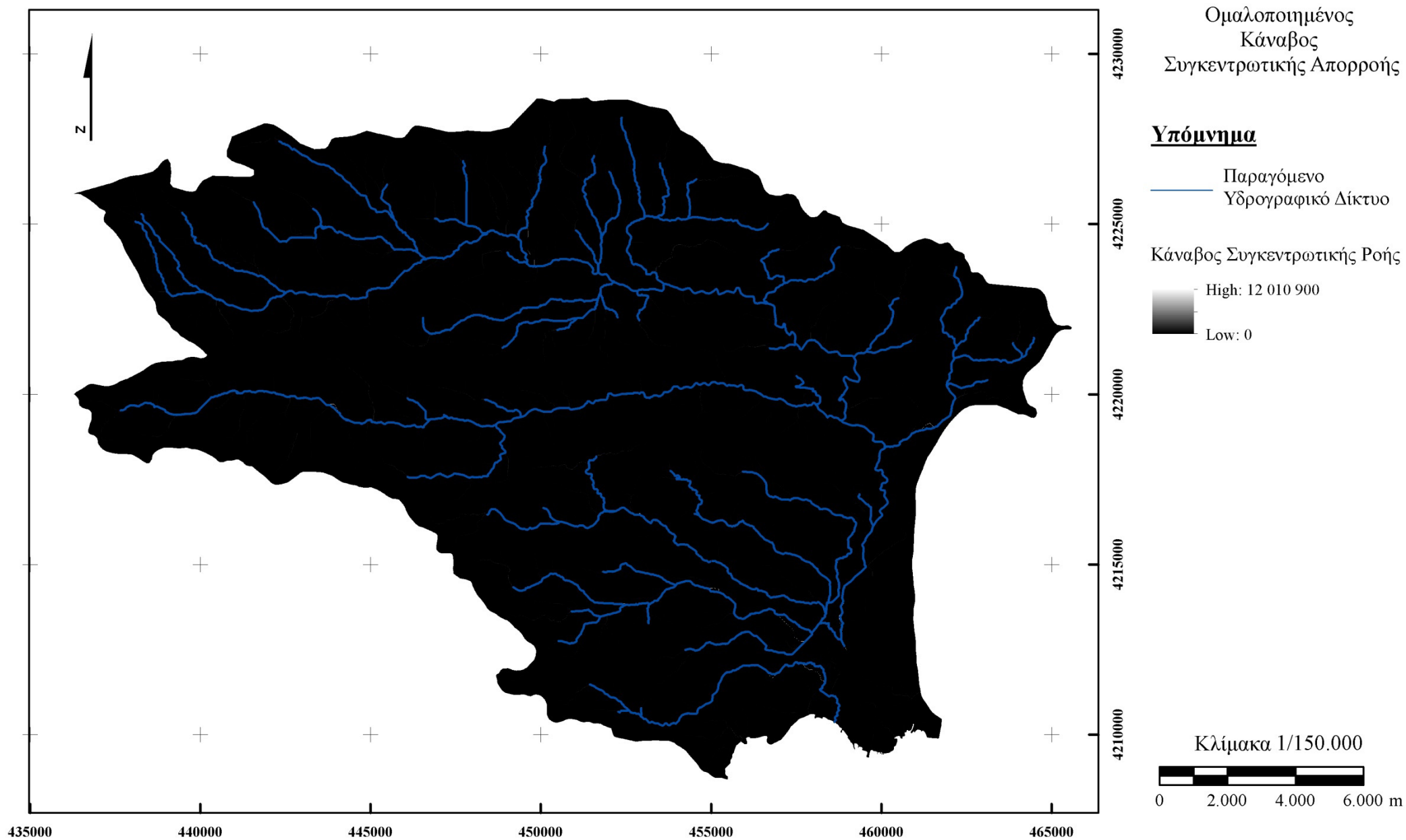


Εικόνα Π--12: Απόδοση Αναγλύφου λεκάνης π. Σαρανταπόταμου.



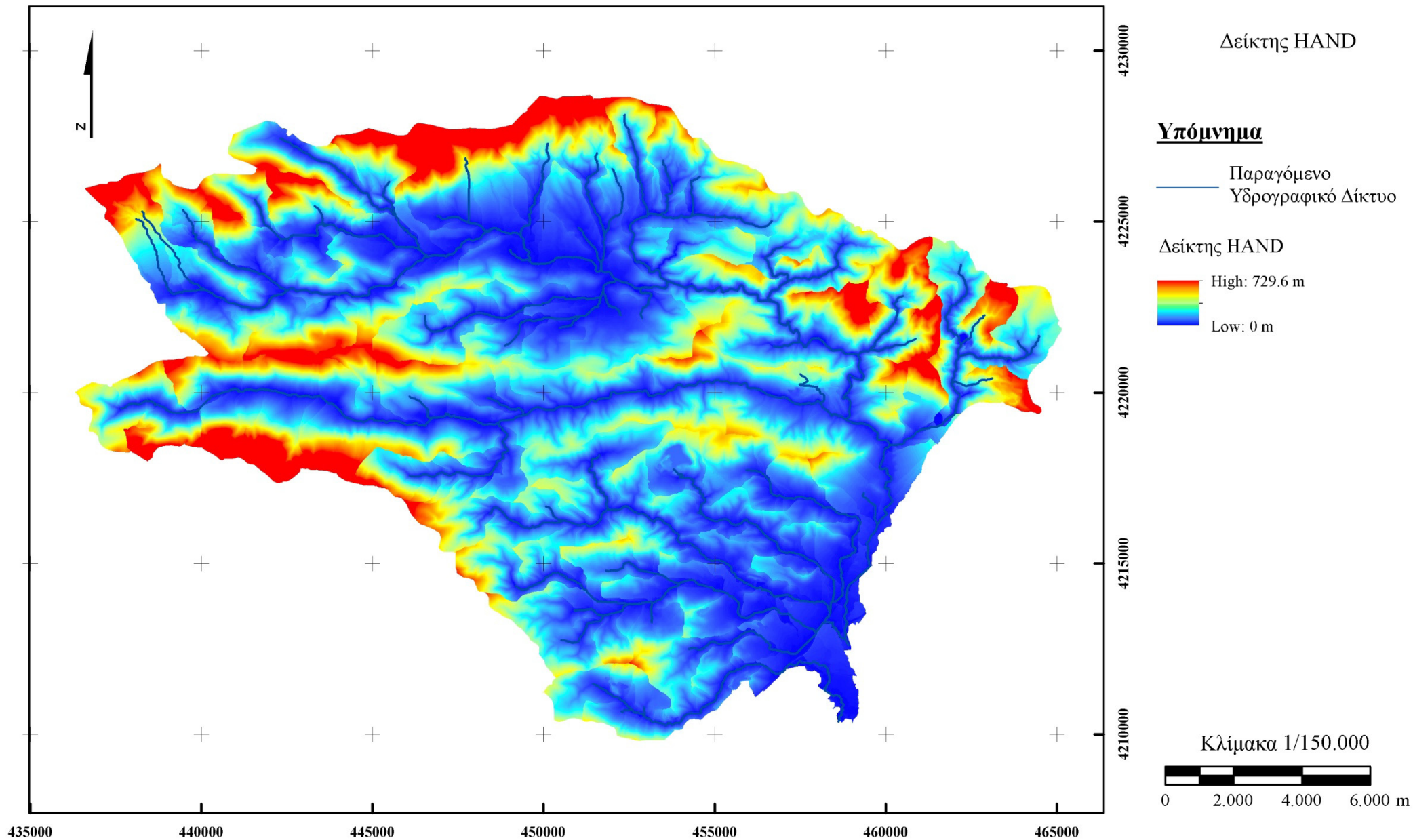


Εικόνα Π-13: Ομαλοποιημένος Κάναβος Διεύθυνσης Απορροής λεκάνης π. Σαρανταπόταμου.

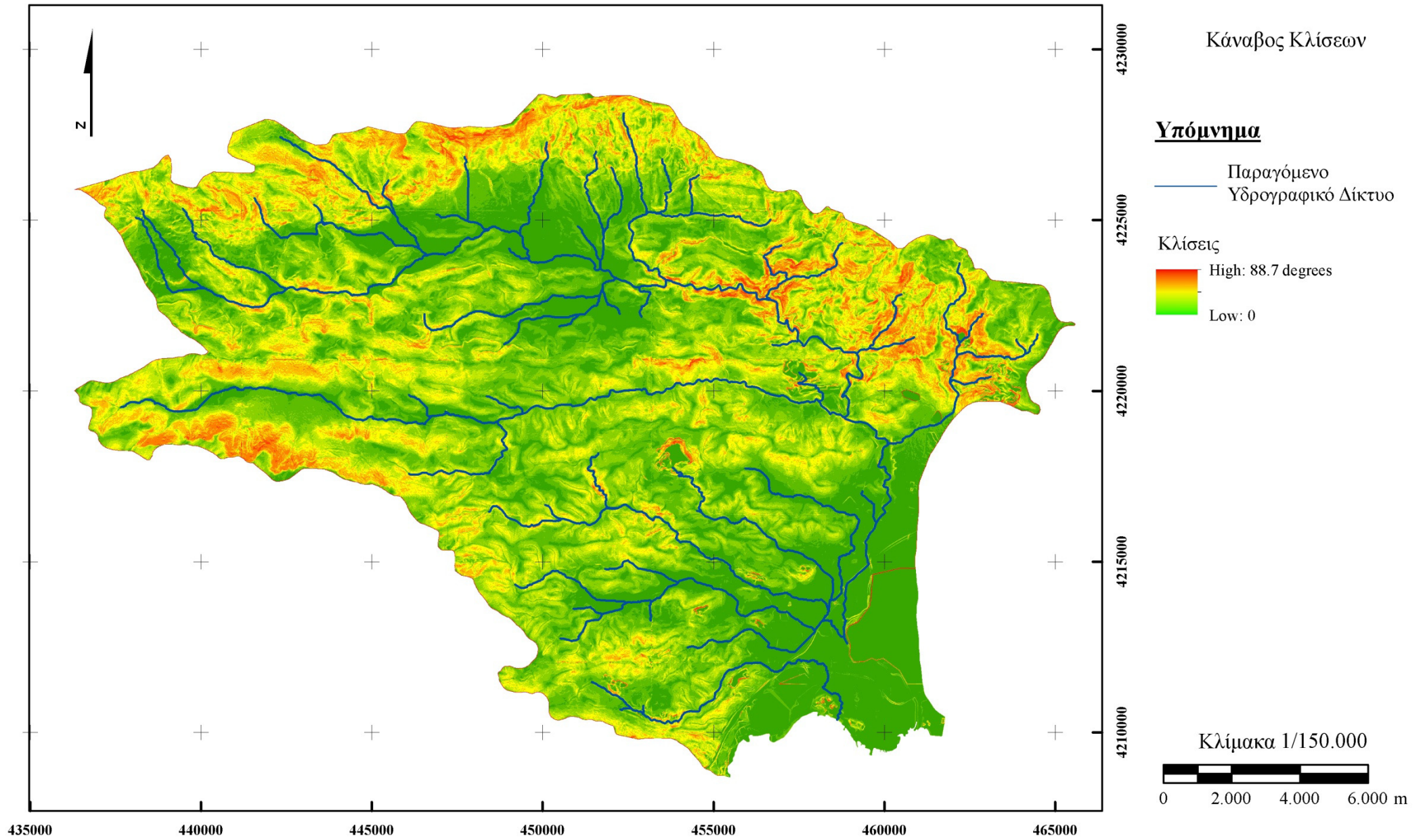


Εικόνα Π-14: Ομαλοποιημένος Κάναβος Συγκενρωτικής Απορροής.



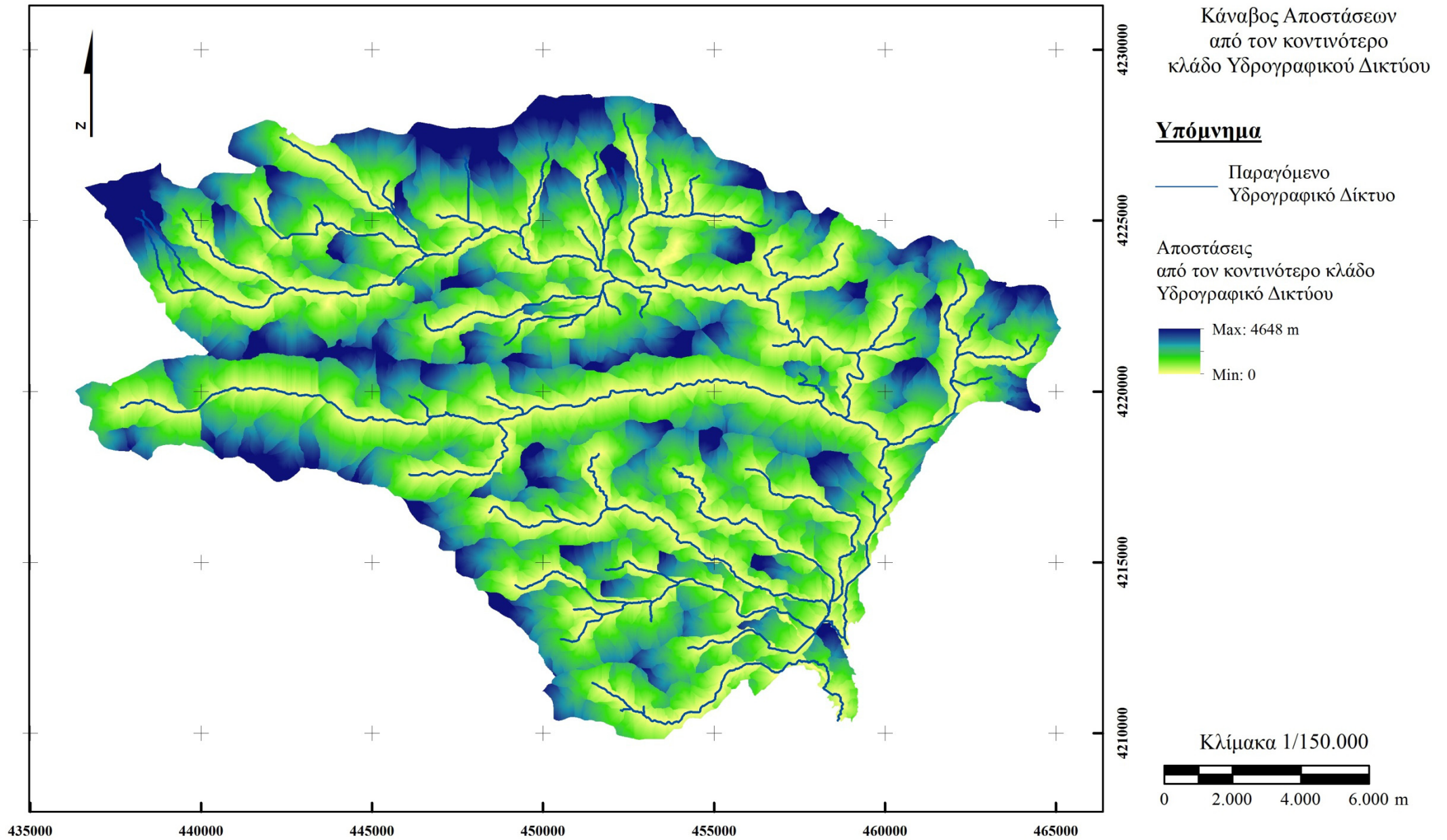


Εικόνα ΠΙ-15: Δείκτης HAND λεκάνης π. Σαρανταπόταμου.

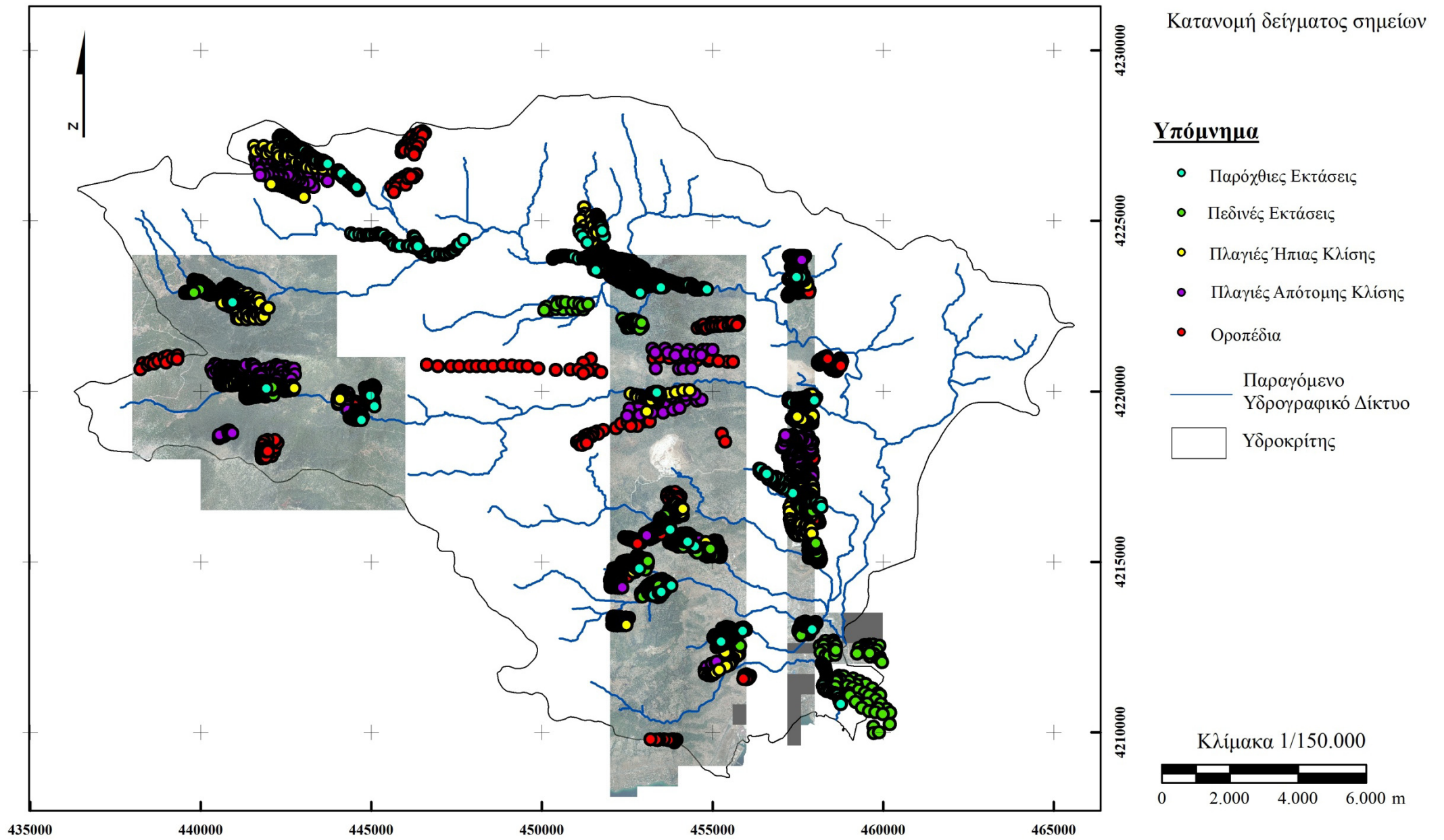


Εικόνα Π-16: Κάναβος κλίσεων εδάφους λεκάνης π. Σαρανταπόταμου.



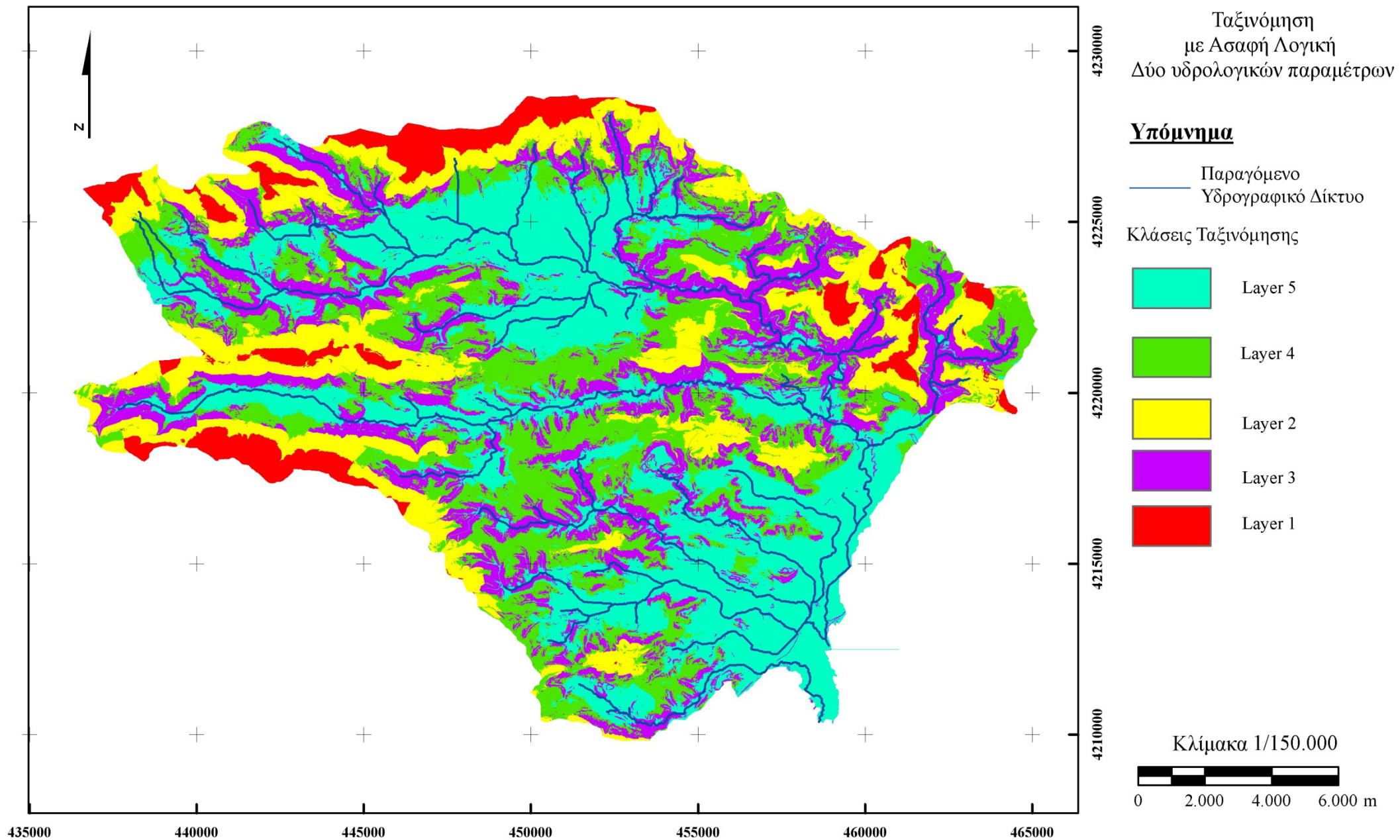


Εικόνα Π-17: Κάναβος αποστάσεων από τον κοντινότερο κλάδο Υδρογραφικού δικτύου.



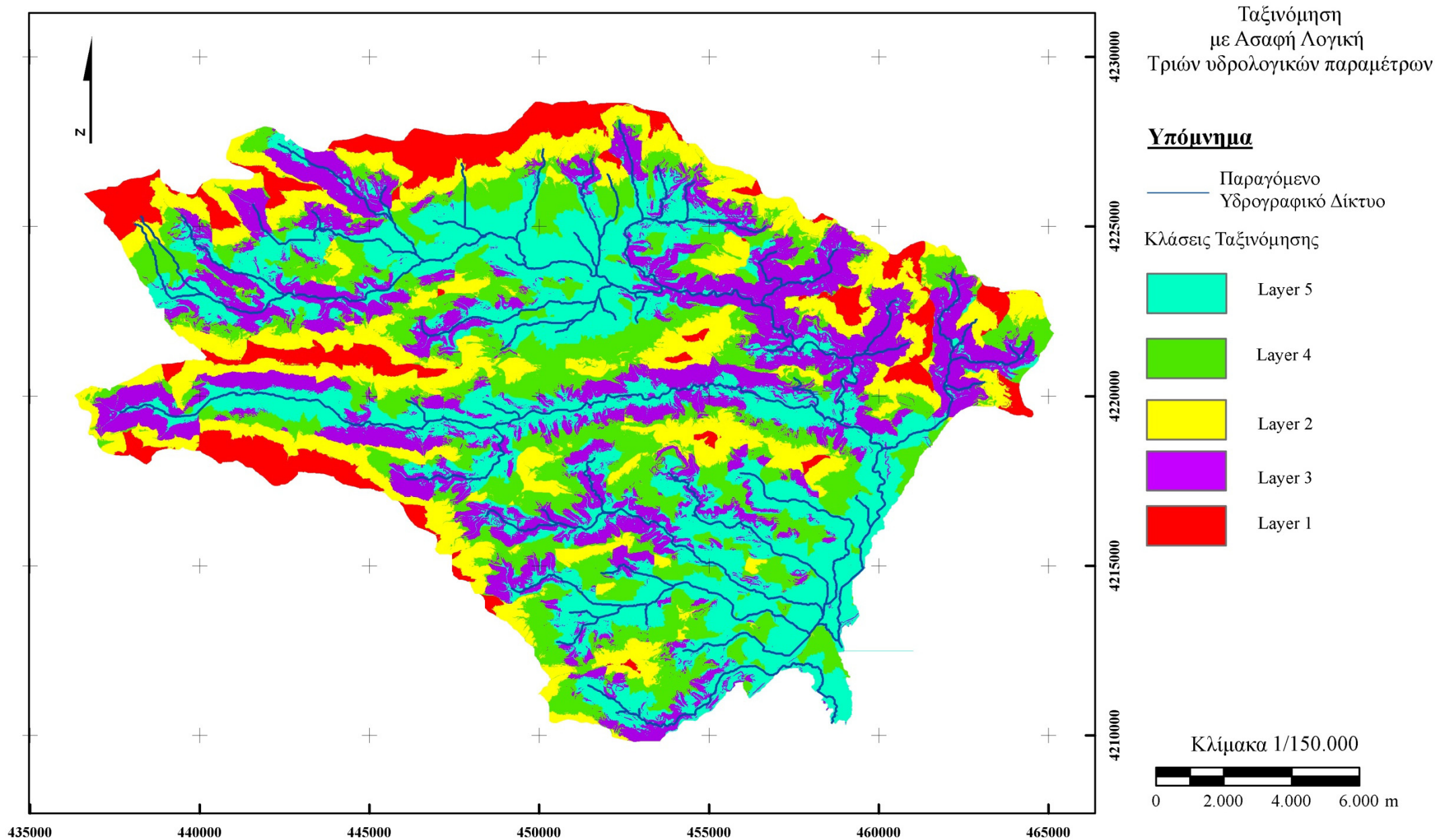
Εικόνα ΠΙ-18: Κατανομή δείγματος σημείων στη λεκάνη π. Σαρανταπόταμου.



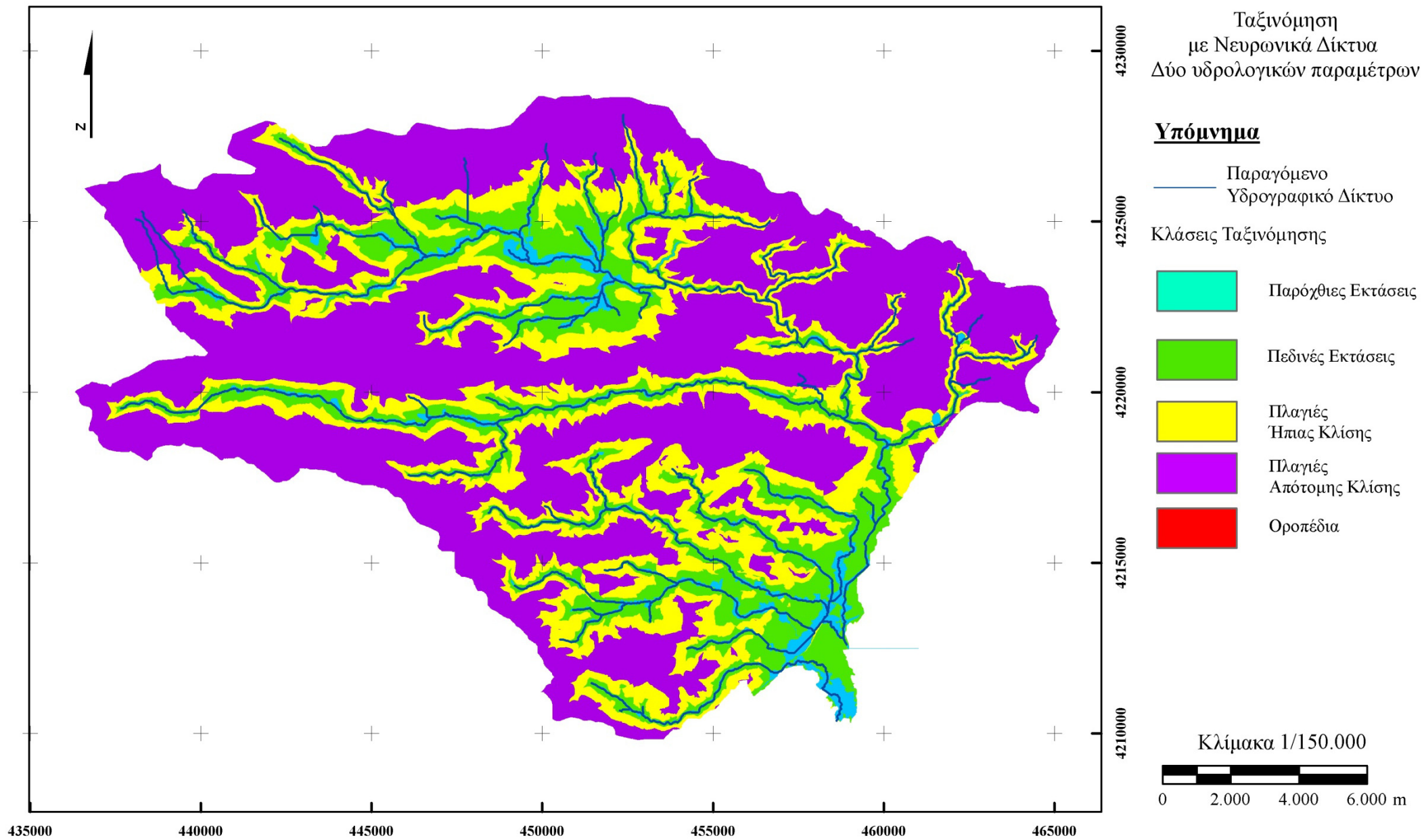


Εικόνα Π-19: Ταξινόμηση με Ασαφή Λογική δύο υδρολογικών παραμέτρων.



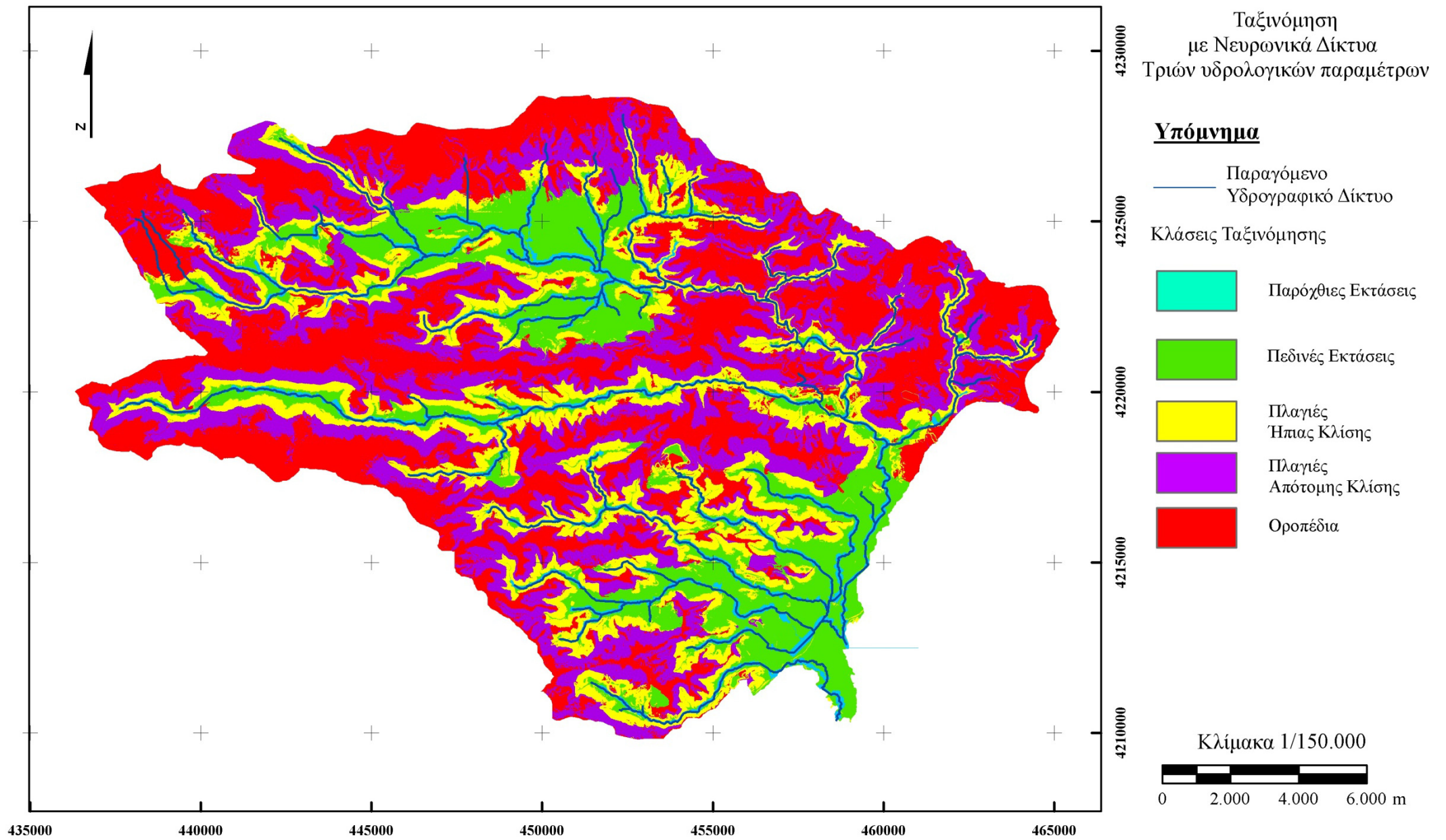


Εικόνα Π-20: Ταξινόμηση με Ασαφή Λογική τριών υδρολογικών κριτηρίων.



Εικόνα Π-21: Ταξινόμηση με Νευρωνικά Δίκτυα δύο υδρολογικών κριτηρίων.





Εικόνα ΠΙ-22: Ταξινόμηση με Νευρωνικά Δίκτυα τριών υδρολογικών παραμέτρων