

Ιεραρχική και δομική αναπαράσταση υδρογραφικών προτύπων στο σύστημα DPA-PC

Δ. Αργιαλάς και Ε. Ρούσσος

Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης, Τομέας Τοπογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων, ΕΜΠ, 15780 Αθήνα

Περίληψη

Τα υδρογραφικά πρότυπα χρησιμοποιούνται ευρέως στην φωτογεωλογία και γεωμορφολογία διότι είναι χρήσιμα στην αναγνώριση των γεωμορφών και της τεκτονικής δομής μιας περιοχής. Αυτή η εργασία παρουσιάζει ένα φιλικό προς το χρήστη σύστημα ανάλυσης και αναγνώρισης υδρογραφικών προτύπων, το DPA-PC, σε περιβάλλον Microsoft Windows. Το σύστημα στηρίζεται σε μία μέθοδο δομικής αναγνώρισης προτύπων η οποία περιέλαβε ένα ιεραρχικό μοντέλο κατάτμησης του προτύπου σε τάξεις Stahler, την οργάνωση των ιδιοτήτων του δικτύου σε σχεσιακά μοντέλα, και την ταξινόμησή του με ένα κατάλληλα διαμορφωμένο δένδρο απόφασης. Τέλος η εργασία αυτή αναπτύσσει αλγόριθμους αναπαράστασης της ιεραρχικής δομής υδρογραφικών προτύπων με δενδριτικές δομές δεδομένων. Συμπεραίνεται ότι το DPA-PC μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά στην ταξινόμηση ορισμένων τύπων υδρογραφικών προτύπων.

Abstract

Drainage patterns are used in photogeology and geomorphology because they are useful in the recognition of landforms and structures of a region. This paper presents a user friendly system for drainage pattern analysis and recognition, called DPA-PC, within the Microsoft Windows environment of a personal computer. DPA-PC is based on a structural pattern recognition methodology which included hierarchical and relational models, attribute selection and extraction and decision tree classification of the patterns. Emphasis is given, in this paper, in the algorithms (tree structures) developed for the hierarchical representation of the patterns. The paper concludes that DPA-PC can help a novice photointerpreter in the recognition of certain types of drainage patterns.

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

1. Εισαγωγή

Τα υδρογραφικά δίκτυα σχηματίζονται από τη συνάθροιση των φυσικών υδατορευμάτων σε μια περιοχή. Η διευθέτηση ενός δεδομένου συνόλου υπό παραποτάμους σε ένα υδρογραφικό δίκτυο διαμορφώνει ένα σχήμα το οποίο έχει ονομαστεί το πρότυπο του υδρογραφικού δικτύου ή *υδρογραφικό πρότυπο* (Howard 1967, Parvis 1950).

Ένας σημαντικός λόγος για τη μελέτη των υδρογραφικών προτύπων είναι η αξία τους στην αναγνώριση των γεωμορφών και της τεκτονικής δομής μιας περιοχής καθώς και στην εκτίμηση της διαπερατότητας και διάβρωσης. Γι' αυτό το λόγο τα υδρογραφικά πρότυπα έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί στη φωτογεωμορφολογία, γεωλογία και γεωμορφολογία (Gudilin 1973, Way 1978, Lillelsand and Kiefer 1979, Mintzer 1983, Αστεριάδης 1990, Παπαπέτρου-Ζομάνη 1993).

Ποιοτικές περιγραφές των υδρογραφικών προτύπων έχουν δοθεί από τους Zernitz, Parvis, και Howard και περιλήφθηκαν στον Argialas (1985). Αυτή η εργασία χρησιμοποιεί μόνο τα «κύρια» ή «βασικά» υδρογραφικά πρότυπα, των οποίων τα σχήματα είναι διακριτά, και ως εκ τούτου υπαγόμενα σε ταξινόμηση με υπολογιστή. Αυτά τα πρότυπα είναι: *δενδριτικό, φτερωτά, παράλληλο, δικτυωτό, ορθογώνιο, γωνιοκό, ακτινωτό και δακτυλιοειδές*. Ο Πίνακος 1 παρουσιάζει περιληπτικά την γεωλογική σημασία αυτών των υδρογραφικών προτύπων.

Η αναγνώριση των υδρογραφικών προτύπων από τον άνθρωπο, έχει επιτευχθεί, δεν παύει όμως να είναι σχετικά δαπνηρή και χροναβόρα, καθώς οι ειδικοί φωτοερμηνευτές πρέπει να είναι εκπαιδευμένοι και να έχουν μακρά εμπειρία. Για αυτούς τους λόγους αλλά και για να επιτευχθεί μια πιο συστηματική και επαναλαμβανόμενη αναγνώριση, επιδιώκεται η κατασκευή αλγόριθμων που να προσομοιάζουν το αποτέλεσμα που θα 'δινε ένας φωτοερμηνευτής. Μια τέτοια ποσοτική και αλγοριθμική αναγνώριση των υδρογραφικών προτύπων, στηριζόμενη στη θεωρία της δομικής αναγνώρισης προτύπων, έχει γίνει από τον Αργιολά (Argialas 1986, Argialas 1985, Argialas κ.ά 1988). Η υλοποίησή του λογισμικού DPA (*Drainage Pattern Analysis system*) έγινε σε Fortran και το σύστημα IBM TSO.

Αυτή η εργασία, διατηρώντας την ανωτέρω γενικότερη μεθοδολογική προσέγγιση, εστιάζει:

- σε μια νέα προσέγγιση αναπαράστασης της τοπολογικής δομής και γεωμετρίας των υδρογραφικών προτύπων, με δενδριτικές δομές δεδομένων, και
- στην υλοποίηση ολοκλήρου πακέτου ανάλυσης και ταξινόμησης υδρογραφικών προτύπων σε περιβάλλον Microsoft Windows, με Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

χρήση αντικειμενοστραφών τεχνικών που στηρίζονται στη γλώσσα Visual Basic (Ρούσσος 1995). Το νέο λογισμικό ανάλυσης και ταξι- νόμησης υδρογραφικών δικτύων καλείται DPA-PC (Ρούσσος 1995).

ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ	ΤΥΠΙΚΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΕΣ
ΔΕΝΔΡΙΤΙΚΟ	Ομοιογενή και ομοιόμορφα πετρώματα σχεδόν οριζόντια ιζηματογενή πετρώματα, πυριγενή, σύνθετα μεταμορφωμένα, παλαιά κατατμημένα παράκτια πεδία
ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ	Κεκλιμένα παράκτια πεδία ή πεδία λιμνών, βοσάλτες, πρηνή μεταπτώσεων
ΟΡΘΟΓΩΝΙΟ/ΓΩΝΙΑΚΟ	σχιστάλιθοι, γνεύσιοι, ψαμμίτες σε Ξηρά κλίματα
ΦΤΕΡΩΤΟ	αιολικά πετρώματα, πλημμυρικά πεδία λεπτής υφής
ΔΙΚΤΥΩΤΟ	πτυχωμένες ή επικλινείς ιζηματογενείς στρώσεις, ώριμα κατακερματισμένα παράκτια πεδία
ΑΚΤΙΝΩΤΟ	θολοειδή βουνά ή λόφαι, ηφαιστειακοί κώνοι
ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΕΣ	γρανιτικά ή ιζηματογενή πετρώματα

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Τυπικές σχέσεις υδρογραφικών προτύπων και γεωμορφών

2. Η μεθοδολογία της δομικής αναγνώρισης υδρογραφικών προτύπων

2.1. Νοητική ιεραρχική οργάνωση των υδρογραφικών προτύπων

Για την επεξεργασία σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μιας φυσικής οντότητας (όπως το υδρογραφικό δίκτυο) και το μετασχηματισμό του σε ένα νοητικό μοντέλο (όπως το υδρογραφικό πρότυπο) μέσω μιας διαδικασίας νοητικής αφαίρεσης απαιτείται η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου της φυσικής οντότητας. Αυτό το μαθηματικό μοντέλο δεν είναι απαραίτητο να είναι αριθμητικό, αλλά μπορεί να είναι και συμβολικό (Argialas 1996, Argialas 1985, Argialas and Harlow 1990, Χαδιδρίσιου κ.ά. 1990). Μια τέτοια προσέγγιση δείχνει να είναι αρκετά φυσική και είναι

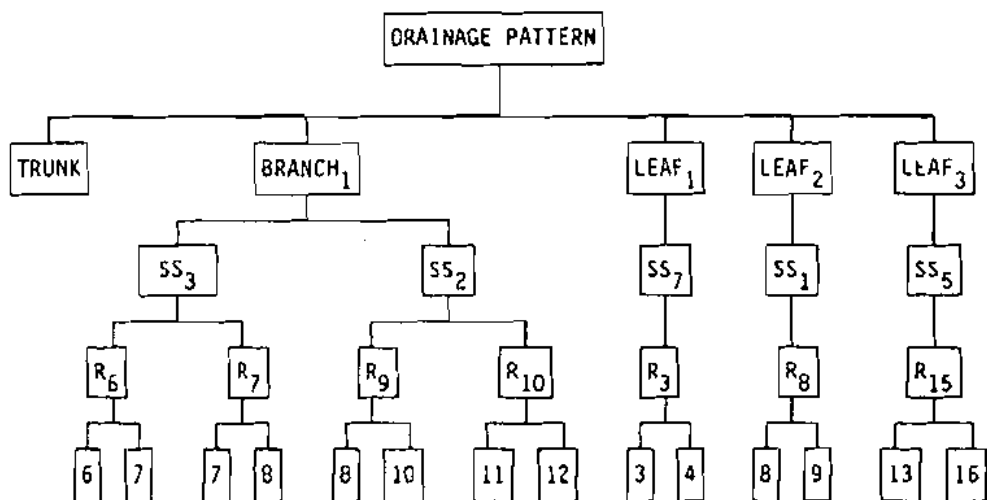
περισσότερο συμβατή με τη νοητική εικόνα που έχει ένας ειδικός για το σύστημα. Επίσης ένα συμβολικό μαθηματικό μοντέλο είναι δυνατόν να συνυπάρχει ή να προέρχεται από ένα αριθμητικό.

Μια μεθοδική αναζήτηση ενός τέτοιου μοντέλου προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κατάλληλου θεωρητικού πλαισίου. Ένα τέτοιο πλαίσιο για τη λειτουργία της ταξινόμησης είναι η μεθοδολογία της *δομικής ανσ- γνώρισης προτύπων* (Argialas κ.ά. 1988). Τα δομικά μοντέλα εφαρμόζονται μέσω των *ιεραρχικών και σχεσιακών μοντέλων*. Σ' αυτή την εργασία παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της κατασκευής των ιεραρχικών δομικών μοντέλων και των αντιστοίχων αλγόριθμων όπως υλοποιήθηκαν στη γλώσσα Visual Basic σε περιβάλλον Microsoft Windows.

Κατά τη δομική προσέγγιση ένα πολύπλοκο πρότυπο αναπαρίσταται μέσω των απλούστερων υποπροτύπων του, των ιδιοτήτων τους, και των σχέσεων ανάμεσά τους. Έτσι σχηματίζεται μια ιεραρχία αντικειμένων του υδρογραφικού προτύπου, σε πέντε επίπεδα (Σχ. 1):

- i) Στο ανώτερο ιεραρχικά επίπεδο βρίσκεται το ίδιο το υδρογραφικό πρότυπο.
- ii) Αυτό *αναλύεται* στα «σημασιολογικά αντικείμενα» (tokens), τα οποία ορίζονται σε όρους αντικειμένων κατωτέρων επιπέδων, τα οποία ονομάζονται «Κορμός» (Trunk), «Κλάδοι» (Branches) και «Φύλλα» (Leaves) και είναι αντιστοίχως ο κύριος ποταμός, οι πρωτεύοντες και οι δευτερεύοντες παραπόταμοι. Ο κορμός είναι το υδατόρευμα τρίτης τάξεως στη διάταξη κατά Strahler και «ο ποταμός» στους ορισμούς των προτύπων. Οι κλάδοι αντιστοιχούν στα υδατορεύματα δεύτερης τάξεως στη διάταξη κατά Strahler ή στους «κυρίους παραπόταμους» στον ορισμό των προτύπων. Τα φύλλα αντιστοιχούν στα υδατορεύματα πρώτης τάξης κατά Strahler ή στους «δευτερεύοντες παραπόταμους» στους ορισμούς των προτύπων.
- iii) Αυτοί συντίθενται από τα τμήματα Strahler (Strahler Segments), μέσω μιας ευριστικής διαδικασίας.
- iv) Τα τμήματα Strahler συντίθενται από ευθύγραμμα τμήματα (Reaches), τα οποία έχουν την ίδια τάξη Strahler.
- v) Τέλος στο κατώτατο επίπεδο περιγραφής βρίσκονται τα βασικά ή αρχέγονα στοιχεία τα οποία είναι οι κόμβοι (nodes) και δεν αναλύονται περισσότερο.

Η πραγματική διαδικασία γένεσης του ιεραρχικού μοντέλου ακολουθεί την αντίστροφη πορεία, και είναι ένας αλγόριθμος *συνάθροισης από κάτω - προς - τα - πάνω* όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα. Η βασική ιδέα της δομικής αναπαράστασης έγκειται στο να βρίσκουμε ιδιότητες αντικειμένων ψηλότερα στην ιεραρχία από τις ιδιότητες αντικειμένων χαμηλότερα στην ιεραρχία (που είναι γνωστά ή υπολογισμένα).



Σχ. 1. Παραδειγμα της ιεραρχικής οργάνωσης των επιμέρους αντικειμένων ενός υδρογραφικού προτύπου στο σύστημα DPA-PC:SS, είναι τα κατά Strahler τμήματα, R_n είναι τα ευθύγραμμα τμήματα, οι δε αριθμοί, όπως 6 ή 7, φωνερώζουν τους κόμβους.

2.2. Αλγοριθμική οργάνωση των υδρογραφικών προτύπων

Η θεωρητική βάση της δομικής αναπαράστασης των δικτύων καθώς και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι δίνονται σε πέντε στάδια στα επόμενα. Οι αλγόριθμοι επεξηγούνται με παραδείγματα κώδικα υπολογιστή ο οποίος έχει γραφεί στη γλώσσα VisualBasic.

2.2.1. Πρώτο στάδιο: Αρχική αναπαράσταση των προτύπων

Η πρώτη λειτουργία της δομικής αναγνώρισης των υδρογραφικών προτύπων είναι η αναπαράσταση και περιγραφή τους έτσι ώστε να μπορούν να εισαχθούν στον υπολογιστή. Ένας λογικός τρόπος εισαγωγής των υδρογραφικών προτύπων στον υπολογιστή είναι η ψηφιοποίηση. Κατά την ψηφιοποίηση αυτή, θα πρέπει

- να διατηρείται η τοπολογία και η γεωμετρία του προτύπου
- να επιλεγούν στοιχεία μέγιστης πληροφορίας, και
- να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αρχική αναπαράστασή τους για την μετέπειτα ανάλυση και ολοκληρωμένη περιγραφή τους.

Μια λογική επιλογή για την αρχική ψηφιοποίηση των προτύπων είναι οι κόμβοι τους (Coffman και Turner 1971). Για την περιγραφή των κόμβων κατά την ψηφιοποίηση (που είναι τα αντικείμενα χαμηλότερου επι-

πέδου), χρησιμοποιούνται ως ιδιότητες, οι ορθογώνιες καρτεσιανές συντεταγμένες (x_i, y_i) των κόμβων i του δικτύου, καθώς και ένας συμβολικός κωδικός (Code), που εκφράζει το είδος του κόμβου. Κάθε είδος κόμβου αντιστοιχεί σε διαφορετικό τοπολογικό βαθμό (degree), ανάλογα με τον αριθμό των «κλάδων» (branches) που συντρέχουν σ' αυτόν τον κόμβο. Τα είδη των κόμβων είναι:

- Στόμιο (Mouth) «M»,
- Ενδιάμεσος Κόμβος (Intermediate) «I»,
- Κόμβος Σύνδεσης (Junction) «J», και
- Πηγή (source) «S».

Ο κόμβος, ως τύπος δεδομένων (a Simple Node), υλοποιείται στη γλώσσα VisualBasic, για παράδειγμα, ως εξής:

```
Type a Simple Node
    Code As String*1
    x As Single
    y As Single
End Type
```

Για την σύνθεση υψηλότερου επιπέδου αντικειμένων των προτύπων, είναι αναγκαίο να περιγραφεί η φυσική τοπολογική δομή των υδρογραφικών δικτύων, η οποία είναι μια δομή δέντρου. Μια δυνητικά χρήσιμη τοπολογική σχέση για αυτή την περιγραφή είναι η *Adjacent_to(i, j)*, όπου i, j είναι κόμβοι του δικτύου. Δύο κόμβοι ενός δένδρου λέγονται ότι είναι γειτονικοί, εάν υπάρχει ένας κλάδος ανάμεσά τους. Συνεπώς η έννοια της γειτνίασης θα πρέπει επίσης να περιγραφεί στον υπολογιστή. Ακολουθεί η προσέγγιση που επιλέξαμε.

Κάθε κόμβος έχει ένα διατεταγμένο ζεύγος παιδιών-κόμβων, τα οποία για πλήθος = 2, μπορούμε να τα ονομάσουμε 'αριστερό', και 'δεξί'. Η διάταξη αυτή είναι απαραίτητη έτσι ώστε να μετατρέψουμε ένα διαστάτο υδρογραφικό δίκτυα (πρότυπο μεγαλύτερης διάστασης, σε μονοδιάστατη συμβολοσειρά κόμβων ('MJJsJ...')) χωρίς απώλεια της τοπολογικής πληροφορίας. Η πληροφορία αυτή ενσωματώνεται στην παραγόμενη συμβολοσειρά (χρησιμοποιώντας τη θέση κάθε συμβόλου μέσα στη συμβολοσειρά, το είδος του συμβόλου, καθώς και όλη την προηγούμενη υπακολουθία συμβόλων), για την μετέπειτα ανασύσταση του προτύπου. Συνεπώς, ορίζουμε την δομή του Κόμβου Δέντρου (a Tree Node) να περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία (ιδιότητες):

- τοπολογικός κωδικός,
- συντεταγμένες x και y , και
- κατάλληλοι δείκτες ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους δηλαδή: γονέα (parent), αριστερό (left), και δεξί (right).

RULE #1: Κάθε REACH που έχει ως NOUP ένα NODE με CODE = 1 (ή nodeType = 's') παίρνει ORD = 1. (Όπου NOUP, ο ανάντη κόμβος του ευθύγραμμου τμήματος).

RULE #2: Έστω NODE = i .

Έστω $\{n$ και $m\}$ οι ΤΑΞΕΙΣ (ORDERS) των UPSTREAM REACHES του i .

Αν ($n = m$),

η τάξη (ORDER) ΤΟΥ DOWNSTREAM REACH είναι $n + 1$.

αλλιώς,

η τάξη (ORDER) ΤΟΥ DOWNSTREAM REACH είναι $\max(n, m)$.

RULE #3: Ένα δέντρο μπορεί να πάρει τάξη κατά Strahler, όταν έχουν πάρει τάξη κατά Strahler όλα τα υποδέντρα του.

Το αποτέλεσμα της εκτέλεσης του τρίτου βήματος στο παράδειγμά μας, είναι η απόδοση τάξεων κατά Strahler, στα ευθύγραμμα τμήματα του προτύπου, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 5.

Reach	(Node (i), Node (j))	Order
1	(10, 9)	1
2	(9, 7)	1
3	(8, 7)	1
4	(6, 4)	1
5	(5, 4)	1
6	(7, 2)	2
7	(4, 3)	2
8	(3, 2)	2
9	(2, 1)	3

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Απόδοση τάξεων κατά Strahler στα ευθύγραμμα τμήματα ενός προτύπου

Τα παραπάνω μπορούν να υλοποιηθούν στη γλώσσα Visual Basic ως:

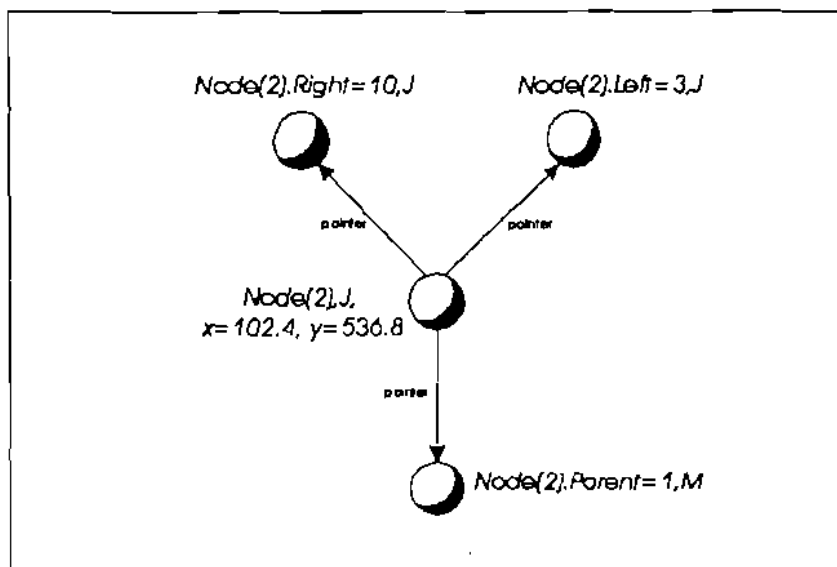
```

Type aTreeNode
    Code As String*1
    x As Single
    y As Single
    Parent as Variant
    Left as Variant
    Right As Variant
End Type

```

όπου Variant είναι ένας γενικευμένος (generic) τύπος δεδομένων της Visual Basic. Μια γραφική απεικόνιση της δομής δένδρου δίνεται στο Σχ. 2.

Όπως εύκολα παρατηρείται, η δομή δεδομένων τύπου aTreeNode, είναι μια επαυξημένη μορφή της δομής τύπου aSimpleNode, ώστε να επιτρέπει την σύλληψη της τοπολογίας του προτύπου. Αυτή η σύλληψη είναι δυνατή εφόσον ένα πρότυπο έχει ψηφιοποιηθεί κατά μια συγκεκριμένη διάταξη, όπως αυτή που γίνεται από το στόμιο προς τις πηγές και από αριστερά προς τα δεξιά, υποθέτοντας ότι το στόμιο βρίσκεται προς το κάτω μέρος της σελίδας.

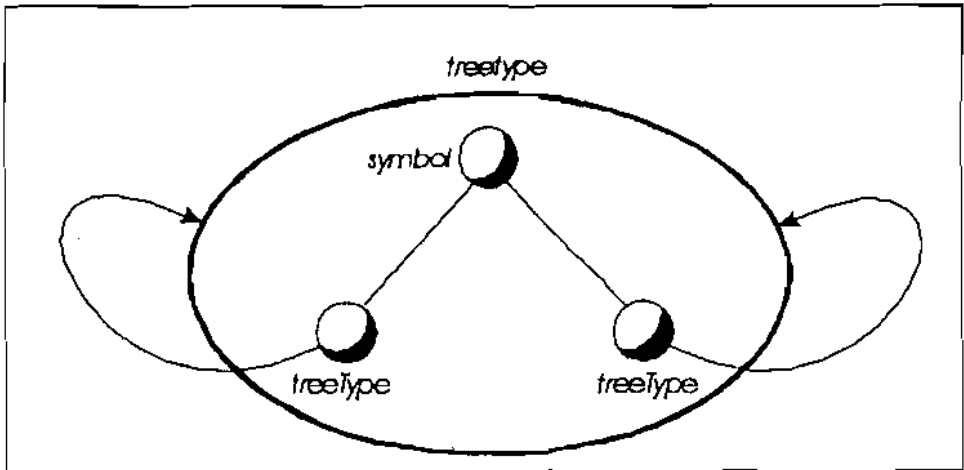


Σχ. 2. Ένα παράδειγμα της δομής δεδομένων τύπου aTreeNode, όπου φαίνονται οι γειτανικοί κόμβοι (Parent, Left, Right) του κόμβου 2, οι συντεταγμένες του x, y και οι τοπολογικοί κωδικοί όλων των κόμβων.

Έτσι ένα δέντρο (πρότυπο) είναι ένα διατεταγμένο σύνολο κόμβων, κατά την έννοια του Coffman (Coffman and Turner 1971), τύπου `aTreeNode`. Για την αναπαράσταση των προτύπων ως δέντρων, σχεδιάστηκε μια δενδρική δομή δεδομένων, η οποία είναι μια αναδρομική δομή (Pavlidis 1977). Αυτό σημαίνει ότι ένας τύπος-δέντρο αποτελείται από δύο ή περισσότερα υποδέντρα, τα οποία είναι επίσης δέντρα κ.ο.κ. (Σχ. 3). Σε μια περιγραφική γλώσσα η οποία υποστηρίζει ενδογενείς αναδρομικούς τύπους δεδομένων (τύπου Prolog), αυτό μπορεί να γραφτεί ως:

```
domains
treeType = tree (symbol, treeType, treeType)
```

A Recursive Tree Structure



Σχ. 3. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η αναδρομική φύση της δενδρικής δομής δεδομένων.

Η δενδρική δομή δεδομένων υλοποιείται αντίστοιχα στη VisualBasic, ως μια μεταβλητή μορφής πίνακα («Node»), η οποία ορίζεται με βάση τη δομή δεδομένων `aTreeNode`, η οποία ορίστηκε προηγουμένως:

```
Dim Node (MAXNODES) As a Tree Node
```

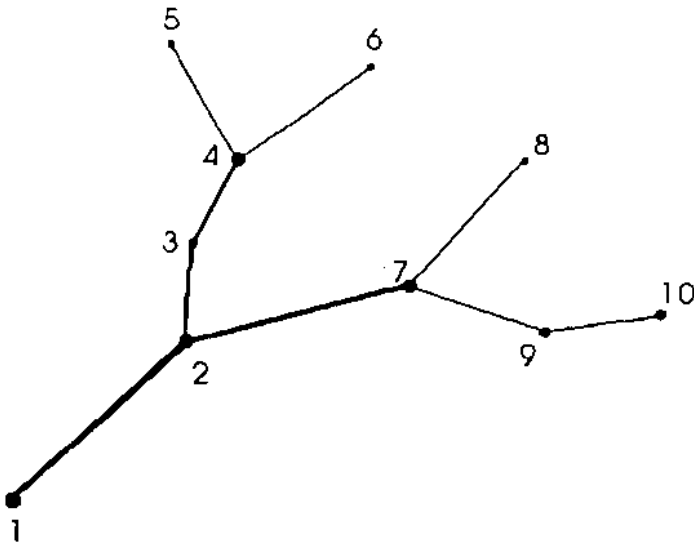
όπου `MAXNODES`, ο μέγιστος αριθμός κόμβων ενός δέντρου.

Ο συμβολισμός «αντικείμενο ιδιότητα» σημαίνει «ιδιότητα του αντικείμενου» και έτσι για παράδειγμα: αν η μεταβλητή `Node` οριστεί ως τύπου `aTreeNode`, τότε μπορούμε να πούμε: `Node.Code`, `Node.x.`, `Node.y.`

Για παράδειγμα, εάν το υπό ανάλυση υδρογραφικό πρότυπο είναι αυτό που απεικονίζεται στο Σχ. 4, τότε η ψηφιοποίησή του θα δώσει ένα

αρχείο της μορφής του Πίνακα 2, όπου $MAXNODES = 10$, και το περιεχόμενό του είναι μια δομή του τύπου a Simple Node.

Η μοναδιάστατη συμβολοσειρά που αντιστοιχεί σ' αυτό το πρότυπο είναι η Symbol String = «MJlJssJsls».



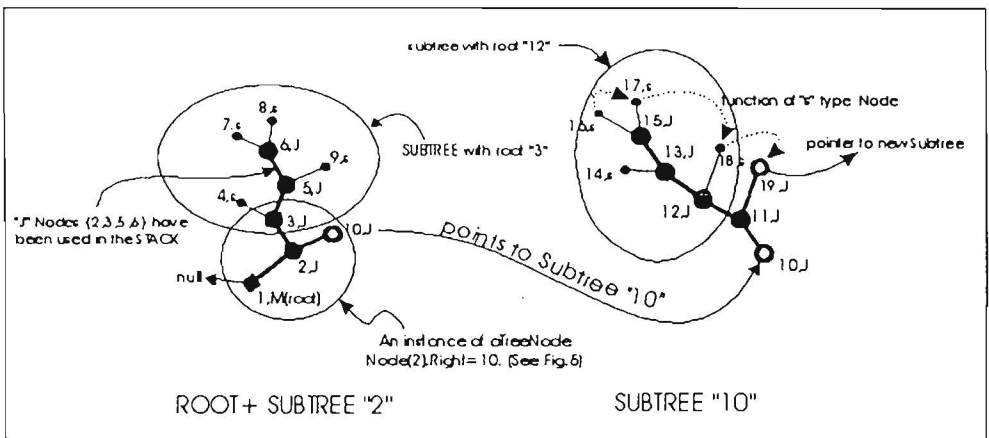
Σχ. 4. Ένα παράδειγμα Υδρογραφικού Προτύπου.

Node (i)	Node (i) · x	Node (i) · y	Node (i) · Code
1	168.2	130.0	M
2	240.6	200.0	J
3	250.0	240.5	I
4	260.5	285.0	J
5	228.0	337.3	S
6	320.0	329.5	S
7	340.4	230.0	J
8	391.0	290.0	S
9	402.0	210.5	I
10	503.5	180.0	S

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Τυπικές σχέσεις υδρογραφικών προτύπων και γεωμορφών
Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

2.2.2. Δεύτερο στάδιο: Αλγόριθμος ανασύστασης της τοπολογίας των προτύπων

Στη συνέχεια το πρόγραμμα «κτίζει» αυτόματα την τοπολογία του προτύπου, με στοιχείο εισαγωγής το αρχείο των ψηφιοποιημένων κόμβων. Ο αλγόριθμος ανασυντάσσει την τοπολογία του προτύπου, μέσω μιας από-κάτω-προς-τα-πάνω διαδικασίας, η οποία επεξεργάζεται την εισαχθείσα συμβολοσειρά (π.χ. «MJJJ...»), και ο οποίος εξασφαλίζει ότι θα έχει τελειώσει πρώτα το αριστερό υπο-δέντρο κάθε δέντρου, πριν πάει στο δεξί. Στον επόμενο αλγόριθμο, ο αριθμός n είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για την απαρίθμηση των κόμβων και παίρνει ακέραιες τιμές από 1 έως MAXNODES. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια STACK, η οποία είναι μια μονοδιάστατη δομή δεδομένων, η οποία λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή το τελευταίο μέσα-πρώτο έξω (Last In First Out - LIFO) (Pavlidis 1977). Ο αλγόριθμος είναι (βλ. και Σχ. 5):



Σχ. 5. Ένα παράδειγμα της τοπολογικής δομής του δέντρου. Τα περιεχόμενα των ελλειψεων είναι υποσύνολα του όλου προτύπου, τα οποία είναι επίσης δέντρα. Οι «σκούροι» κόμβοι «J» αποθηκεύονται δυναμικά στο STACK. Επίσης φαίνονται τρία διαδοχικά βήματα της απαρίθμησης n των κόμβων {...16, 17, 18, 19,...}, ως αποτέλεσμα της παρουσίας των συμβόλων τύπου «s» μέσα στο SymbolString.

1. Επέλεξε την αρχή (ρίζα) του δέντρου, η οποία είναι το στόμιο «M».
2. Δώσε του την τιμή $n = 1$.
3. Επανέλαβε τα βήματα {4, 5, 6, 7, 8}:
4. Δίνε σε κάθε κόμβο «I» που συναντάς, την τιμή $n = n + 1$.
5. Κινήσου ανάντη, έως ότου συναντήσεις έναν κόμβο σύνδεσης «J».

6. Δώσε στο αριστερό του παιδί, τιμή $n = n + 1$.
7. Βάλε τον κόμβο «j» στο STACK.
8. Έως ότου συναντήσεις μια πηγή «S», οπότε: (λειτουργία του κάμβου τύπου «S»)
9. Δώσε στο πρώτο δεξι παιδί του κόμβου «J» που θα βγάλεις από το STACK, τιμή $n = n + 1$.
10. Εάν $n < \text{MAXNODES}$, πήγαινε στο βήμα 3, αλλιώς τέλος.

Η εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου στο αρχείο του παραδείγματος, ανασυντάσσει την τοπολογική δομή του προτύπου του Σχήματος 4, και τα αποτελέσματα της εκτέλεσης φαίνονται στον Πίνακα 3. Για παράδειγμα, η 2η σειρά του Πίνακα 3, λέει ότι ο κόμβος Node (2), έχει ως γονικό κόμβο τον Node (1). Parent = 1, και παιδιά του Node (i). Left = 3 και Node (i). Right = 7. Το σύμβολο 'null' σημαίνει κατά σύμβαση, ότι η ιδιότητα του αντικειμένου στην αντίστοιχη περίπτωση δεν ορίζεται. Επιπροσθέτως στον Πίνακα 4 φαίνονται τα περιεχόμενα της δομής STACK (που όπως προαναφέρθηκε περιέχει «J» Κάμβους), και η οποία μεταβάλλεται δυναμικά καθώς ο αλγόριθμος επεξεργάζεται νέα σύμβολα του Symbol String.

Node (i)	Node (i) . Parent	Node (i) . Left	Node (i) . Right
1	null	2	null
2	1	3	7
3	2	4	null
4	3	5	6
5	4	null	null
6	4	null	null
7	2	8	9
8	7	null	null
9	7	10	null
10	9	null	null

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Αρχείο που παρουσιάζει την ανασύσταση της δενδρικής τοπολογίας ενός προτύπου

Θέση στη συμβολοσειρά = i	Symbol	Περιεχόμενα της STACK
1	M	{ }
2	J	{2}
3	I	{2}
4	J	{2, 4}
5	S	{2}
6	S	{2}
7	J	{2, 7}
8	S	{2}
9	I	{2}
10	S	{ }

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Περιεχόμενα της δομής STACK που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος της ανασύστασης της τοπολογίας ενός προτύπου

2.2.3. Τρίτο στάδιο: Δόμηση ευθυγράμμων τμημάτων και απόδοση τάξεων κατά Strahler

Το επόμενο βήμα είναι η απόδοση τάξεων (*orders*) κατά Strahler, στα ευθύγραμμα τμήματα του υδρογραφικού προτύπου τα οποία έχουν ως άκρα τους κόμβους. Ένα ευθύγραμμο τμήμα (*reach*) στη συγκεκριμένη υλοποίηση αποτελείται από ένα διατεταγμένο ζεύγος κόμβων:

$$\text{Reach} = (i, j), i, j = \text{NODE (τύπου a Tree Node)}$$

Η απόδοση των τάξεων γίνεται μέσω μιας αναδρομικής αλγεβρικής σχέσεως που έχει προταθεί από τον Strahler, και ουσιαστικά η τάξη κατά Strahler (που είναι ένας φυσικός αριθμός, υδατορεύματος, μέσα στο σύστημα του υδρογραφικού δικτύου. Χρησιμοποιώντας μια περιγραφική σύνταξη υπό τη μορφή κανόνων, έχουμε:

2.2.4. Τέταρτο στάδιο: Δόμηση των τμημάτων Strahler

Για να κατασκευάσουμε τα τμήματα κατά Strahler εκτελούμε τον επόμενο κανόνα:

RULE #4: Ομαδοποιήσε τα ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία έχουν πάρει ίδια τάξη κατά Strahler, από την προηγούμενη διαδικασία.

Ένα Strahler Segment υλοποιείται στο συγκεκριμένο σύστημα ως μια λίστα (NodeList) τύπου Prolog, όπου στοιχεία της λίστας είναι διαδοχικοί κόμβοι του δέντρου:

Strahler Segment = $[i, j, K, \dots], i, j, k, \dots = \text{NODE}$ (τύπου a Tree Node).

Η αλγοριθμική έκφραση του Κανόνα #4 είναι:

1. Ξεκίνησε από τους εξωτερικούς κόμβους του δέντρου (τις πηγές «s»).
2. Θέσε την Order = 1.
3. Για κάθε εξωτερικό κόμβο:
4. Εκτέλεσε τη διαδικασία {11, 12, 13}
5. Επέλεξε τον επόμενο εξωτερικό κόμβο.
6. Θέσε Order = Order + 1
7. Για κάθε εσωτερικό κόμβο που είναι τέλος του προηγούμενου StrahlerSegment
8. Επανάλαβε τη διαδικασία {11, 12, 13}
9. Επέλεξε τον επόμενο εσωτερικό κόμβο.
10. Εάν δεν έχεις φθάσει στη μέγιστη τάξη κατά Strahler, πήγαινε στο βήμα 6
Αλλιώς,
Τέλος.
11. Επανάλαβε το βήμα {12}:
12. Τοποθέτησε τον κατάντη γειτονικό κόμβο στη λίστα.
13. Έως ότου, συναντήσεις ένα κόμβο ο οποίος να ανήκει σε Reach με μεγαλύτερο Order.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου παραγωγής των τμημάτων Strahler στο παραπάνω παράδειγμα δίνει τον επόμενο Πίνακα 6, όπου φαίνονται τα τμήματα κατά Strahler (Strahler Segments) του προτύπου του Σχήματος 4, και οι τάξεις του.

- στην αλλαγή κλίμακας,
- στη μετάθεση,
- στο προσανατολισμό και
- σε άλλες «μη σημαντικές» για την ταξινόμηση των υδρογραφικών προτύπων μεταβολές.

Γενικώς, οι δεκαέξι τελικές ιδιότητες (Πίν. 7) σχετίζονται με

- τους λόγους διακλάδωσης,
- τους τύπους διακλάδωσης,
- την ευθύτητα, την ομοιομορφία και την επιμήκυνση των διαφόρων αντικειμένων,
- τις γωνίες ανάμεσα στα διάφορα αντικείμενα, και
- τις διαφορές προσανατολισμού των αντικειμένων.

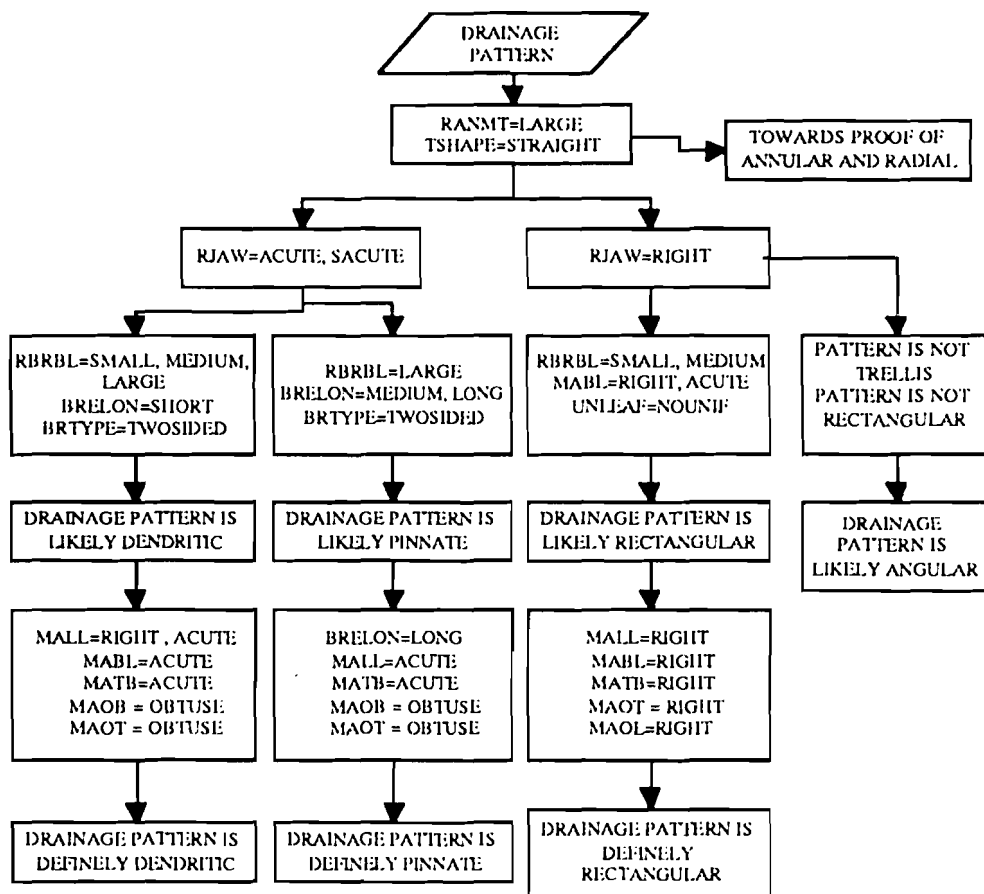
Οι ιδιότητες των υδρογραφικών προτύπων μπορούν να θεωρηθούν από τοπολογική ή γεωμετρική σκοπιά. Η *τοπολογική* σκοπιά θεωρεί τις διασυνδέσεις του προτύπου και δίνει κάποιο σχήμα διάταξης των ρευμάτων. Η *γεωμετρική* έχει να κάνει με τα μήκη, τα σχήματα, και τους προσανατολισμούς των συστατικών μερών του προτύπου. Η επιλογή των ιδιοτήτων των προτύπων βασίστηκε στην προσωπική εμπειρία και κρίση (Argialas 1985, Ρούσσος 1995). Ο Πίνακας 7 δείχνει όλες τις δεκαέξι ιδιότητες σε όρους της μεθόδου εξαγωγής τους.

2.4. Ταξινόμηση υδρογραφικών προτύπων

Αφού έχει γίνει η κατάτμηση των προτύπων και η εξαγωγή ιδιοτήτων, το επόμενο βήμα είναι η ταξινόμηση των προτύπων. Η ταξινόμηση αφορά την κατάταξη ενός προτύπου σε μια από τις πολλές πιθανές τάξεις. Στη στατιστική αναγνώριση προτύπων, συνήθως αναζητείται μια συνάρτηση απόφασης ή ένα μέτρο ομοιότητας για να εκτελέσει τη διαδικασία της ταξινόμησης. Εδώ, απαιτείται μια κατάλληλη διατύπωση του προβλήματος της ταξινόμησης, μέσα στο δομικό πλαίσιο. Ο στόχος είναι να διατάξουμε μια συστοιχία ελέγχων, ιεραρχικά οργανωμένη, η οποία θα καθορίζει εάν ένα δεδομένο πρότυπο έχει συγκεκριμένες τιμές ιδιοτήτων. Μια εννοιολογική ιεραρχία ταξινόμησης των υδρογραφικών προτύπων σχεδιάστηκε για να εκφράσει, με τη μορφή ενός δέντρου απόφασης, τη γνώση τη σχετιζόμενη με τα υδρογραφικά πρότυπα (Σχ. 6). Οι κανόνες επέτρεψαν στον ταξινομητή να «αποδείξει» ή να «απορρίψει» μια απόφαση για μια δεδομένη είσοδο υδρογραφικού προτύπου. Βασιζόμενοι σε αυτούς τους κανόνες και τους σχετικούς ελέγχους, κάθε υδρογραφικό πρότυπο κατετάγη σε μια από τις οκτώ προκαθορισμένες τάξεις (Ρούσσος 1995, Argialas κ.ά. 1988).

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Ποσοτικές ιδιότητες των υδρογραφικών προτύπων και τυπικές τιμές τους για δυο πρότυπα

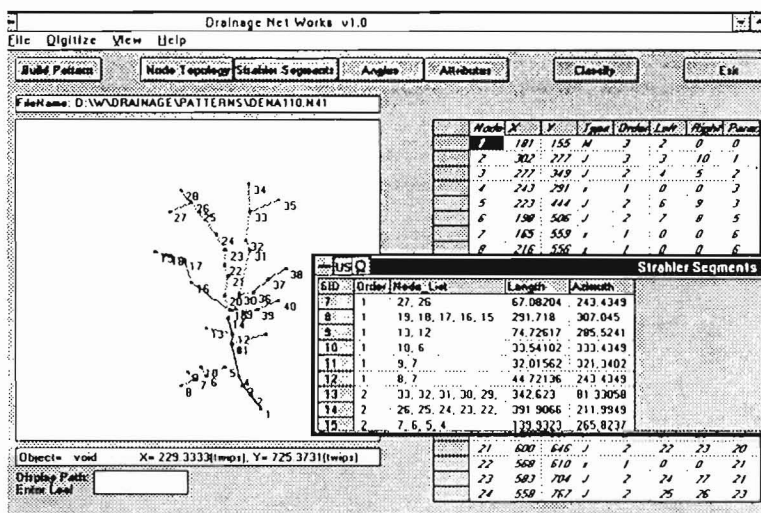
No	Είδος Ιδιότητας	Αντικείμενο	Ιδιότητα	Νοηματική Εξήγηση	Συναρτησιακή εξάρτηση ιδιοτήτων		Τιμές ιδιοτήτων για δυο πρότυπα	
					Τοπολογική	Γεωμετρική		
						Γωνιακή (πλάγια) ή Γραμμική (όρθια)	Δενδρικό	Ορθογώνιο
1	Ιδιότητες Υποπροτύπων	Κορμός (TRUNK)	TSHAPE	Shape of the Trunk		Mean (CURVE/STRAIGHT)	STRAIGHT	STRAIGHT
2			BRTYPE	Type of Branching	(KLEFT KRIGHT)		TWOSIDED	TWOSIDED
3			MAOT	Mean Intermediate Angle On the Trunk		Intermediate Angle	OBTUSE	RIGHT
4		Κλάδοι (BRANCH)	BSHAPE	Branch Shape		Mean (CURVE/STRAIGHT)		
5			BRELON	Branch Elongation		Length (BRANCHES/ Length (LEAVES))	SHORT	
6			MAOB	Mean Intermediate Angle On the Branches		Intermediate Angle	OBTUSE	RIGHT
7			Φύλλα (LEAF)	UNLEAF	Uniformity of Leaves		Mean (LEN)/ST.DV.(LEN)	
8		MAOL		Mean Intermediate Angle On the Leaves		Intermediate Angle		RIGHT
9	Σχέσεις μεταξύ Υποπροτύπων	Κορμού-Κλάδων	MATB	Mean Junction Angle between the Trunk and the Branches		Junction Angle	ACUTE	RIGHT
10		Κλάδων Φύλλων	RBRBL	Ranked Bifurcation Ratio between Branches and Leaves	Bifurcation Ratio (1,2)		SMALL MEDIUM LARGE	SMALL MEDIUM
11			BLAZDIF	Azimuthal Difference between Branches and Leaves		Azimuths		
12			MABL	Mean Junction Angle between Branches and Leaves		Junction Angle	ACUTE	RIGHT, ACUTE
13			RMA12	Ranked Mean Angle between 1st and 2nd order Leaves		Junction Angle		
14		Φύλλων-Φύλλων	MALL	Mean Junction Angle among Leaves		Junction Angle	ACUTE RIGHT	RIGHT
15	Ιδιότητες του προτύπου ως όλου	Πρότυπου	RJAW	Ranked Junction Angle		Junction Angle	ACUTE SACUTE	RIGHT
16			RANMT	Ranked Angle with Vertex on the Center of Gravity of the Nodes and Sides Diverging to the Mouth of the Trunk		Mouth-Grav.Cntr-Tip	LARGE	LARGE



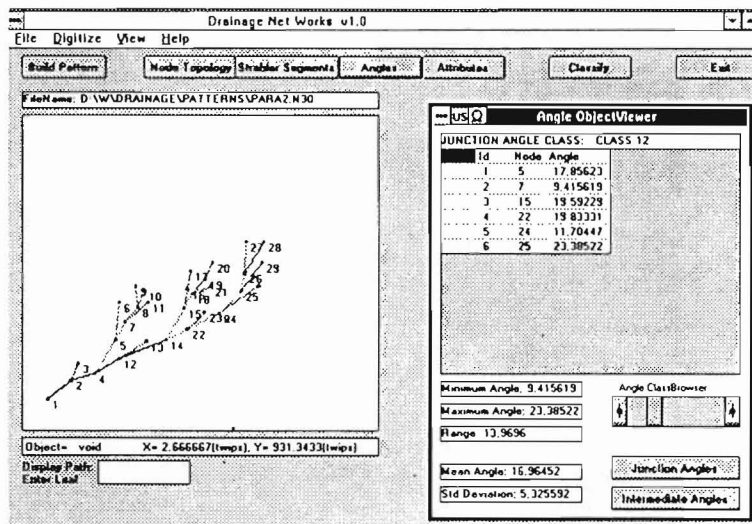
Σχ. 6. Δένδρο απόφασης που δημιουργήθηκε για την ταξινόμηση των υδρογραφικών προτύπων.

3. Εφαρμογή του DPA-PC

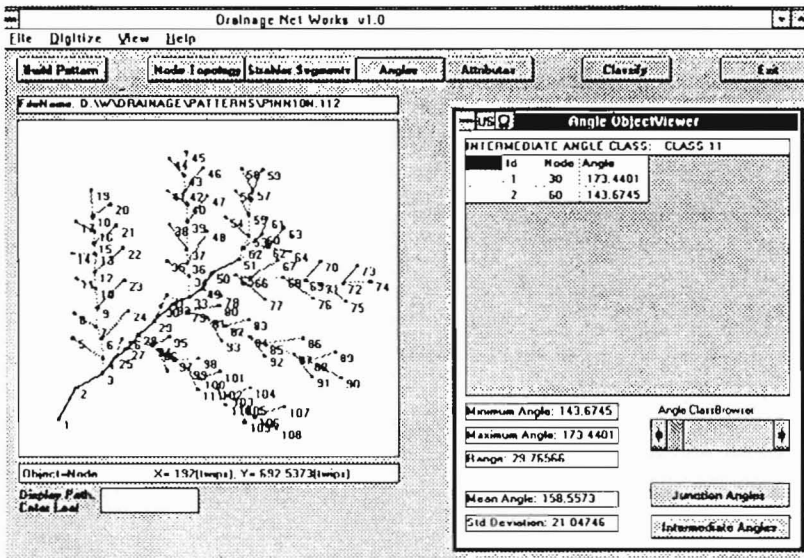
Αυτό το εδάφιο περιγράφει την εφαρμογή του συστήματος δομικής αναγνώρισης υδρογραφικών προτύπων DPA-PC. Παραδείγματα επεξεργασίας του πακέτου δίνονται στα Σχήματα 7 έως 10. Μετά την είσοδο των δεδομένων (επιλογή του menu FILE και μετά OPEN), γίνεται η κατάτμηση του προτύπου, (κουμπί: Build Pattern) στους διάφορους τύπους αντικειμένων του, όπως τα σημασιολογικά αντικείμενα, τα τμήματα Strahler (κουμπί: Strahler Segments), τα γραμικά ευθύγραμμα τμήματα και οι κόμβοι (κουμπί: Node Topology). Επιλέγονται ιδιότητες των προτύπων έτσι ώστε να χαρακτηρίζουν τα κατατμηθέντα αντικείμενα (κου-



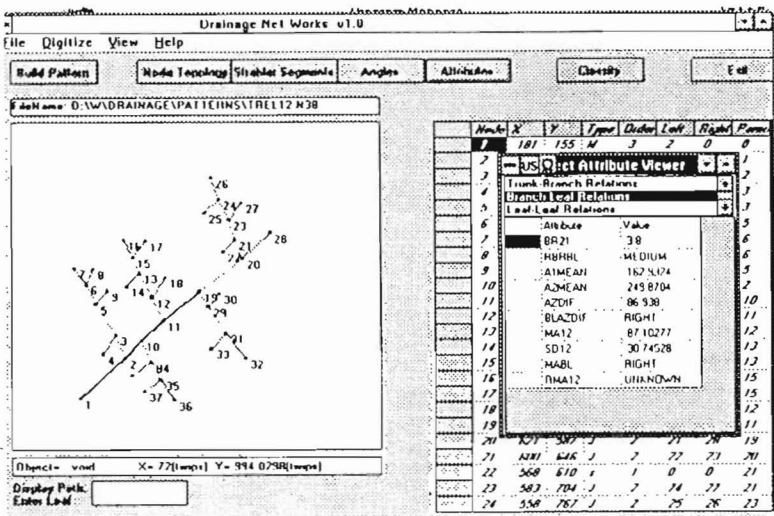
Σχ. 7. Σ' αυτή την οθόνη ο χρήστης έχει επιλέξει από το DPA-PC την παράθεση των κατά Strahler τάξεων (κουμπί: Strahler Segment) ενός δενδριτικού υδρογραφικού προτύπου και την περιγραφή των ιδιοτήτων τους (αύξων αριθμός, τάξη κατά Strahler, μήκος, αζιμουθίο). Το υδρογραφικό πρότυπο έχει χαρακτηριστεί από το DPA-PC ως δενδριτικό.



Σχ. 8. Σ' αυτή την οθόνη ο χρήστης έχει επιλέξει από το DPA-PC την παράθεση των γωνιών (κουμπί: Angles), ειδικότερα δε αυτών που βρίσκονται στις διακλαδώσεις ενός παράλληλου υδρογραφικού προτύπου και την περιγραφή των ιδιοτήτων τους (αύξων αριθμός, κόμβος, γωνία) καθώς και των στατιστικών ποσοτήτων τους (min, max, mean, standard deviation, range). Το υδρογραφικό πρότυπο έχει χαρακτηριστεί από το DPA-PC ως παράλληλο.

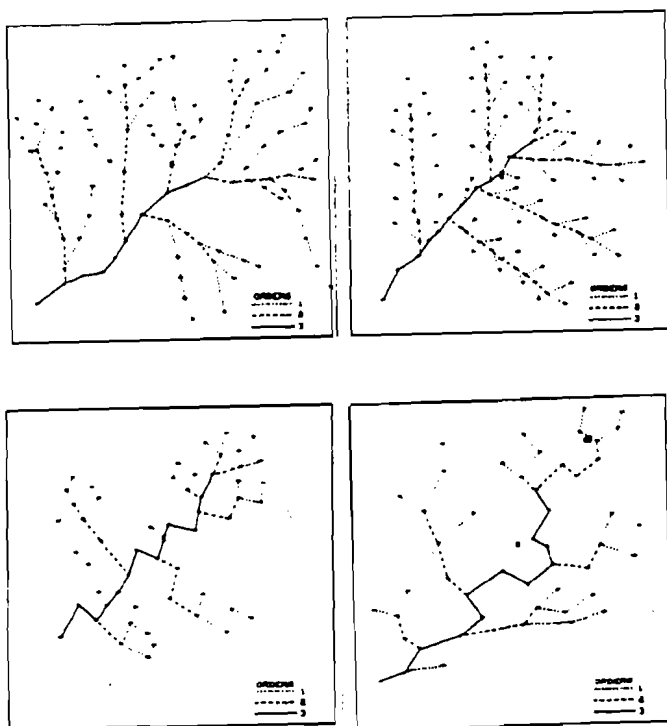


Σχ. 9. Σ' αυτή την οθόνη ο χρήστης έχει επιλέξει από το DPA-PC την παράθεση των γωνιών (κουμπί: Angles), ειδικότερα δε αυτών που βρίσκονται στους ενδιάμεσους κόμβους, ενός φτερωτού υδρογραφικού προτύπου και την περιγραφή των ιδιοτήτων τους (αύξων αριθμός, κόμβος, γωνία) καθώς και των στατιστικών ποσοτήτων τους (min, max, mean, standard deviation, range). Το υδρογραφικό πρότυπο έχει χαρακτηριστεί από το DPA-PC ως φτερωτό.



Σχ. 10. Σ' αυτή την οθόνη ο χρήστης έχει επιλέξει από το DPA-PC την παράθεση των ιδιοτήτων που αφορούν τα φύλλα (κατά Strahler τάξη 1) ενός δικτυωτού υδρογραφικού προτύπου (κουμπί: Attributes με επιλογή: Leaf Objects). Το υδρογραφικό πρότυπο έχει χαρακτηριστεί από το DPA-PC ως δικτυωτό.

μπί: ANGLES με επιλογή: Attributes). Οι ιδιότητες των υδρογραφικών προτύπων υπολογίζονται ως σύνθετες ιδιότητες προτύπων ή συναρτήσεις ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες των προτύπων εκφράζουν τις σχέσεις ανάμεσα στα σημασιολογικά αντικείμενα του προτύπου. Τέλος εφαρμόζεται ένα δέντρο απόφασης για την ταξινόμηση των προτύπων (κουμπί: Classify). Έγινε έλεγχος του συστήματος με πρότυπα ελέγχου και από τις οκτώ τάξεις των προτύπων και απέδωσε ικανοποιητικά (Σχ. 11). Θα χρειαστεί επιπρόσθετος έλεγχος με περισσότερα πρότυπα για να δειχθεί η γενικότητά του.



Σχ. 11. Ταξινόμηση υδρογραφικών προτύπων από το σύστημα DPA-PC. Από πάνω αριστερά, και κατά την ωρολογιακή φορά τα πρότυπα έχουν αναγνωρισθεί ως δενδριτικό, φτερωτό, τετραγωνικό, και γωνιακό.

4. Συμπέρασμα

Παρουσιάζεται μια μέθοδος δομικής αναγνώρισης προτύπων η οποία περιέλαβε ένα ιεραρχικό μοντέλο κατάτμησης του προτύπου σε τάξεις Strahler, την οργάνωση των στοιχείων του δικτύου σε χωρικό μοντέ-

λα, και την ταξινόμηση του με ένα κατάλληλα διαμορφωμένο δένδρο απόφασης. Ειδικότερα δίνονται λεπτομέρειες των αλγόριθμων αναπαράστασης της ιεραρχικής δομής υδρογραφικών προτύπων με δενδριτικές δομές δεδομένων. Η υλοποίηση του πακέτου ανάλυσης και ταξινόμησης υδρογραφικών προτύπων, DPA-PC, σε περιβάλλον Microsoft Windows, με χρήση αντικειμενοστρεφών τεχνικών που στηρίζονται στη γλώσσα Visual Basic απέδωσε ένα πολύ φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον αναγνώρισης υδρογραφικών προτύπων που δείχνει ότι ο προσωπικός υπολογιστής μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά στην ταξινόμηση των υδρογραφικών προτύπων.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούν το μεταπτυχιακό σπουδαστή κ. Γιώργο Μηλιάρεση για εποικοδομητικές συζητήσεις και για τη μετατροπή των σχημάτων (εικόνων) στα απαραίτητα format ώστε να είναι συμβατά μεταξύ των συγγραφέων. Επίσης ευχαριστούμε την κ. Μαρίνα Τρουμπόνη για εύστοχες παρατηρήσεις επί του αρχικού κειμένου.

5. Βιβλιογραφία

- Argialas, D. (1996). Towards Structured Knowledge Models. Zeitschrift für Geomorphologie (accepted, in print).
- Argialas, D. (1986). Computer Assisted Recognition of Drainage Patterns. Technical Paper, Annual Conention of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 4: 435-444.
- Argialas, D. (1985). A Structural Approach Towards Drainage Pattern Recognition, Ph. D. Dissertation, The Ohio State University, Columbus Ohio.
- Argialas, D. and C. Harlow (1990). Computational image interpretation Models: An Overview and a Perspective, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56, No. 6, June, pp. 871-886.
- Argialas, D., Lyon, J. and Mintzer O. (1988). Quantitative Description and Classification of Eight Drainage Pattern Types. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society of photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No4, April, pp. 505-509.
- Αστεριάδης, Γ. (1990). Στοιχεία Φυσικής Γεωγραφίας.
- Coffman, D. and A. Turner (1971). Computer Determination of the Geometry and Topology of Stream Networks, Water Resources Research, 7: 419-423.

- Gudilin, I. (1973). Interpretation of Landscape as an Indicator of Geologic Structure in Chikishev, A., Landscape Indicators, pp. 92-105, Consultants Bureau, New York, New York.
- Hadipriono, F., Lyon, G., Li, T. and Argialas, D. (1990). The Development of a Knowledge-Based Expert System for Analysis of Drainage Patterns, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 56, No. 6, pp 905-909.
- Howard, A. (1967). Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation, American Association of Petroleum Geologists, 51 :2246-2259.
- Lilleland, T., & R. Kiefer (1979). Remote sensing and image processing. John Wiley and Sons, New York.
- Mintzer, O. (1983). Engineering applications. -In: Colwell R. (ed.): Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry. -Falls Church, Virginia.
- Παπαπέτρου - Ζαμάνη, Α. (1993). Γεωμορφολογία.
- Parvis, M. (1950). Drainage Pattern Significance in Airphoto Identification of Soils and Bedrocks, Photogrammetric Engineering, 16:387-409
- Pavlidis, T. (1977). Structural Pattern Recognition, Springer-Verlag.
- Ρούσσος, Ε. (1995). Ένα σύστημα δομικής αναγνώρισης υδρογραφικών προτύπων για προσωπικούς υπολογιστές. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ-ΤΑΤΜ, 98 σελ.
- Way, D. (1978). Terrain analysis. -Mc Graw-Hill. New York.