

## **Κασταλία**

Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών

*Δ. Κουτσογιάννης*

*Α. Ευστρατιάδης*

**Κασταλία**

Φεβρουάριος 2002

## Εισαγωγή

Το υπολογιστικό σύστημα Κασταλία είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό πακέτο στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών, το οποίο αναπτύχθηκε στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, με στόχο την υποστήριξη μελετών διαχείρισης υδατικών πόρων. Το πρόγραμμα εφαρμόζει πρωτότυπες και διεθνώς καταξιωμένες μεθοδολογίες στοχαστικής ανάλυσης για τη γέννηση συνθετικών υδρολογικών χρονοσειρών που είναι στατιστικά συνεπείς με τις αντίστοιχες ιστορικές. Η Κασταλία λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα, το οποίο υποστηρίζεται από μια βάση δεδομένων και συνεργάζεται με το υπολογιστικό σύστημα προσομοίωσης και βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων Υδρονομίας.

Το λογισμικό Κασταλία χρησιμοποιείται επιχειρησιακά για τη στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση των υδρολογικών εισροών και απωλειών του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (ΕΥΔΑΠ). Ακόμη, έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες σχεδιασμού και λειτουργίας ταμιευτήρων (ΥΠΕΧΩΔΕ, Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Καρδίτσας - Δήμος Καρδίτσας).

## Λειτουργίες του προγράμματος

Οι λειτουργίες που επιτελεί η Κασταλία είναι:

- Ανάκτηση ιστορικών και διαχείριση συνθετικών χρονοσειρών·
- Στατιστική ανάλυση ιστορικών υδρολογικών χρονοσειρών·
- Προσαρμογή μαθηματικών μοντέλων στοχαστικής προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών·
- Γέννηση ετήσιων και μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών σε μία ή περισσότερες θέσεις·
- Γραφική παρουσίαση δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων.

Τα στοιχεία εισόδου και εξόδου του προγράμματος, που είναι οι ιστορικές και συνθετικές χρονοσειρές καθώς και ορισμένες άλλες πληροφορίες που αφορούν το υδρολογικό σενάριο, αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων. Η Κασταλία υποστηρίζει σχεσιακές βάσεις, όπως MS Access και Oracle, ενώ είναι συμβατή με το σύστημα Υδρογώνων.

Επισκόπηση χρονοσειρών													
Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2	Μεταβλητή 3	Μεταβλητή 4	Μεταβλητή 5	Μεταβλητή 6	Μεταβλητή 7	Μεταβλητή 8						
Ιστορική χρονοσειρά βροκόπτωσης στη θέση Μαραθώνας (Υδρολογικά έτη: 1933 - 2000)													
Έτος	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Άπρ.	Μαι.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	ΕΤΗΣΙΑ
1933	17.1	24.5	152.0	219.0	172.2	48.1	9.2	0.0	5.6	37.2	0.0	0.0	684.9
1934	19.1	130.3	134.3	135.0	52.4	76.3	1.8	1.3	8.9	5.8	0.0	1.3	566.5
1935	39.5	38.2	100.0	82.9	81.3	28.0	16.2	71.5	34.3	39.3	16.5	5.1	552.8
1936	114.6	142.3	173.7	71.2	70.4	19.1	29.4	34.7	0.0	19.8	0.0	5.1	680.3
1937	167.3	87.6	140.7	44.4	177.8	63.3	143.7	6.6	0.0	1.0	6.4	35.7	874.5
1938	64.4	63.0	190.2	108.7	95.0	181.6	13.8	5.0	153.3	0.0	12.8	41.2	929.0
1939	27.4	71.4	142.4	148.8	57.6	40.8	41.8	80.6	35.2	52.2	2.8	0.0	701.0
1940	27.8	99.4	141.8	76.8	74.4	21.8	18.0	17.2	32.0	0.0	0.0	4.3	513.5
1941	142.8	51.8	88.0	156.0	121.6	39.0	25.2	1.0	33.8	0.0	11.0	1.0	671.2
1942	127.1	83.6	26.0	57.2	51.0	74.0	52.8	52.2	11.2	0.0	0.0	41.2	576.3
1943	11.4	30.6	38.8	68.2	105.4	83.4	30.8	24.8	1.2	1.2	86.2	0.0	482.0
1944	85.6	13.0	137.4	86.2	68.7	40.8	14.4	0.4	5.6	0.0	0.4	29.0	481.5
1945	25.6	90.3	185.4	115.2	40.2	73.2	40.7	45.7	0.0	11.9	0.0	0.0	628.2
1946	54.2	21.7	234.1	183.3	22.5	9.6	3.8	2.3	14.7	0.0	0.0	9.9	556.1
1947	54.0	72.3	77.3	63.3	136.5	30.6	74.2	15.3	48.3	1.3	0.0	100.8	673.9
1948	10.0	139.8	96.3	130.1	56.9	58.5	19.2	10.7	23.2	25.7	0.5	40.9	611.8
1949	67.4	77.1	50.8	49.7	9.5	106.8	36.6	18.8	4.0	0.0	0.0	34.5	455.2

## **Η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης και η εφαρμογή της στη διαχείριση υδατικών πόρων**

Η υδρολογική αβεβαιότητα αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων υδατικών πόρων, η οποία καθιστά τη διαχείρισή τους ιδιαίτερα δύσκολη. Η αδυναμία περιγραφής των υδρολογικών διεργασιών με χρήση συμβατικών μεθόδων προσδιοριστικής υδρολογικής ανάλυσης έχει οδηγήσει στην εναλλακτική θεώρησή τους ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπισή τους με τη θεωρία πιθανοτήτων. Η πιθανοτική-στοχαστική θεώρηση δίνει απαντήσεις ως προς τη χρονική πρόγνωση των φαινομένων, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξή τους.

Τα στοχαστικά μοντέλα προσομοιώνουν τη χωρική και χρονική αλληλεξάρτηση των υδρολογικών μεταβλητών. Η χωρική εξάρτηση οφείλεται στην κοινή υδρολογική δίαιτα γειτονικών θέσεων ή λεκανών, ενώ η χρονική εξάρτηση οφείλεται στην αυτοσυσχέτιση όλων των υδρολογικών (και γενικότερα των γεωφυσικών) διεργασιών. Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται από παραμέτρους, οι οποίες εκτιμώνται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών υδρολογικών χρονοσειρών.

Τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη γέννηση μεγάλου μήκους συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες αναπαράγουν τη στατιστική δομή και τα χαρακτηριστικά των ιστορικών δεδομένων. Η χρήση συνθετικών χρονοσειρών σε προγράμματα διαχείρισης υδατικών συστημάτων επιτρέπει τη διερεύνηση της λειτουργίας τους για μεγάλο πλήθος υδροκλιματικών καταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη της φυσικής διαθεσιμότητας του νερού και παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων ως προς την επίδοση και αξιοπιστία του υπό εξέταση υδροσυστήματος.

### **Μεθοδολογία στοχαστικής προσομοίωσης**

Στο πρόγραμμα Κασταλία έχει υλοποιηθεί μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία στοχαστικής προσομοίωσης, τα κύρια χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

*Πολυμεταβλητή προσομοίωση:* Στην Κασταλία έχει υιοθετηθεί ένα σχήμα πολλών μεταβλητών, οι οποίες αναφέρονται είτε σε διαφορετικές υδρολογικές διεργασίες που επιτελούνται στην ίδια θέση (π.χ., απορροή και βροχόπτωση ταμειυτήρα) είτε σε κοινές διεργασίες που επιτελούνται σε διαφορετικές θέσεις (π.χ., απορροή γειτονικών λεκανών) είτε σε συνδυασμό των δύο. Η πολυμεταβλητή προσομοίωση επιτρέπει την ταυτόχρονη περιγραφή διεργασιών που συσχετίζονται εξαιτίας της κοινής τους υδρολογικής δίαιτας.

*Ανάλυση σε ετήσια και μηνιαία κλίμακα:* Στο πρόγραμμα χρησιμοποιούνται διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα για τη στοχαστική προσομοίωση των ετήσιων και μηνιαίων υδρολογικών διεργασιών, έτσι ώστε να αναπαράγονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, που είναι η εμμονή και η περιοδικότητα αντίστοιχα. Κατά τη διαδικασία παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών, οι ετήσιες και οι μηνιαίες τιμές των μεταβλητών γεννώνται ανεξάρτητα. Στη συνέχεια εφαρμόζονται κατάλληλες τεχνικές επιμερισμού, έτσι ώστε να διατηρείται η συνέπεια μεταξύ των ετήσιων και μηνιαίων μεγεθών.

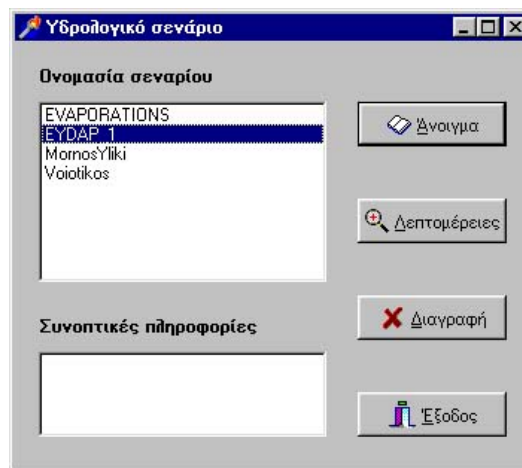
*Διατήρηση των περιθώριων συναρτήσεων κατανομής:* Οι ουσιώδεις περιθώριες στατιστικές παράμετροι είναι η μέση τιμή, η διασπορά και η ασυμμετρία. Για τη διατήρηση των ασυμμετριών στα πολυμεταβλητά στοχαστικά σχήματα (ετήσιο και μηνιαίο), εφαρμόζονται εξελιγμένες τεχνικές αριθμητικής ανάλυσης και μη γραμμικής βελτιστοποίησης.

*Διατήρηση των από κοινού συναρτήσεων κατανομής:* Οι ουσιώδεις από κοινού στατιστικές παράμετροι είναι οι αυτοσυσχετίσεις πρώτης τάξης και οι ετεροσυσχετίσεις μηδενικής τάξης, οι οποίες σχετίζονται με τη χρονική και χωρική εξάρτηση των υδρολογικών μεγεθών.

*Αναπαραγωγή των φαινόμενων έμμονης ξηρασίας:* Το φαινόμενο της υδρολογικής εμμονής, της τάσης δηλαδή ομαδοποίησης των περιόδων χαμηλής και υψηλής υδροφορίας, παρατηρείται σε όλες τις γεωφυσικές διεργασίες και είναι άμεσα σχετιζόμενο με τις παρατεταμένες ξηρασίες και την κλιματική μεταβλητότητα που παρατηρείται σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Η προσομοίωση της εμμονής επιτυγχάνεται με την προσαρμογή μιας κατάλληλης συνάρτησης αυτοσυσχέτισης στις ετήσιες υδρολογικές μεταβλητές. Με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της συνάρτησης, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της εμμονής για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με μακρές ή όχι περιόδους ξηρασίας.

### Δημιουργία υδρολογικού σεναρίου

Η βασική οντότητα της Κασταλίας είναι το υδρολογικό σενάριο, δηλαδή το σύνολο των πληροφοριών που συνιστούν ένα πλήρες πρόβλημα σύνθεσης χρονοσειρών. Κάθε σενάριο περιλαμβάνει μία τουλάχιστον μεταβλητή, η οποία αναφέρεται σε συγκεκριμένη υδρολογική διεργασία και σε συγκεκριμένη γεωγραφική θέση. Οι ιστορικές χρονοσειρές των μεταβλητών από τις οποίες αποτελείται το σενάριο ανακτώνται από τη βάση δεδομένων.



### Στατιστική ανάλυση ιστορικών χρονοσειρών

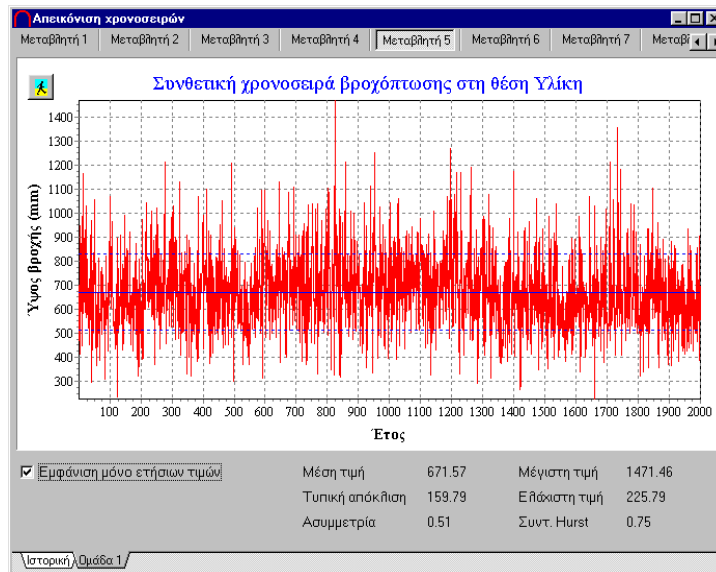
Με την ανάκτηση των ιστορικών χρονοσειρών από τη βάση δεδομένων, το πρόγραμμα υπολογίζει τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά καθώς και τον συντελεστή Hurst. Επιπλέον, προσαρμόζει στα ιστορικά δείγματα κατάλληλες στατιστικές κατανομές, με ή χωρίς ασυμμετρία.

## Προσαρμογή μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης

Το πρόγραμμα εκτιμά αυτόματα τις παραμέτρους του ετήσιου και μηνιαίου στοχαστικού μοντέλου, με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων. Ο χρήστης μπορεί να επέμβει στα στοιχεία εισόδου του μοντέλου, μεταβαίνοντας στις οθόνες τροποποίησης των δεδομένων.

## Γέννηση συνθετικών χρονοσειρών

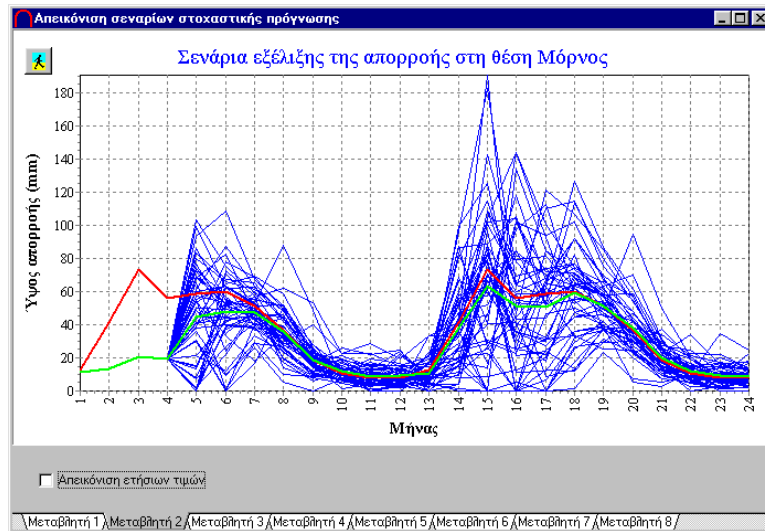
Η κύρια λειτουργία του προγράμματος είναι η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες είναι στατιστικά συνεπείς με τις ιστορικές. Οι χρονοσειρές αυτές είναι κατά κανόνα μεγάλου μήκους, και αναπαράγουν το σύνολο των ουσιωδών ιστορικών στατιστικών χαρακτηριστικών καθώς και το φαινόμενο της εμμονής.



## Λειτουργία του συστήματος υπό μορφή πρόγνωσης

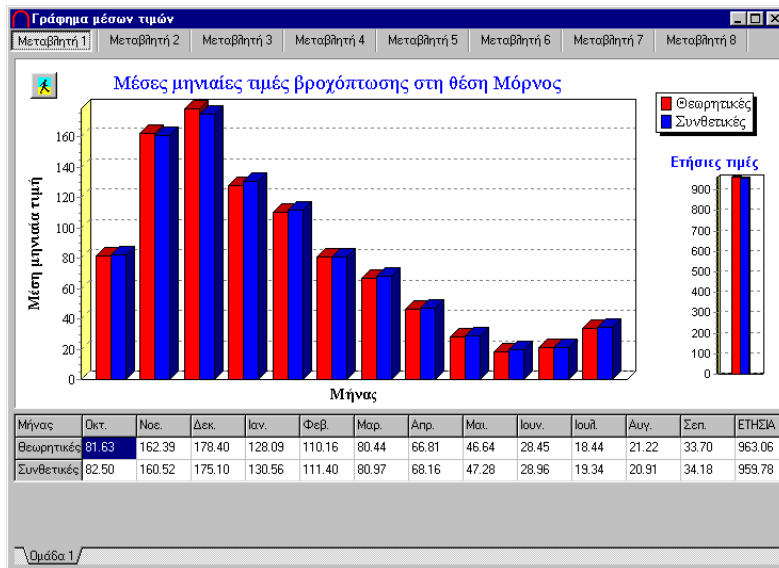
Κατά τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους δεν λαμβάνονται υπόψη οι ιστορικές χρονοσειρές καθαυτές, παρά μόνο τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά. Αυτό συμβαίνει διότι, εξαιτίας του μεγάλου (θεωρητικά άπειρου) μήκους προσομοίωσης, η επίδραση της ακολουθίας των τιμών του παρελθόντος είναι πρακτικά αμελητέα. Οι μακρού μήκους χρονοσειρές χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση υδατικών συστημάτων υπό καθεστώς *μόνιμης κατάστασης*, με στόχο τη διερεύνηση της μακροχρόνιας επίδοσής τους.

Μια άλλη μορφή προσομοίωσης είναι η *καταληκτική*, κατά την οποία εξετάζεται η μελλοντική συμπεριφορά ενός υδροσυστήματος σε ορίζοντα λίγων μηνών ή ετών, οπότε αυτό που ενδιαφέρει είναι η βραχυχρόνια εξέλιξη των υδρολογικών μεγεθών, κατά την οποία η επίδραση των αρχικών συνθηκών είναι σημαντική. Η Κασταλία παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής του σχήματος γέννησης συνθετικών χρονοσειρών και υπό μορφή στοχαστικής πρόγνωσης. Στην περίπτωση αυτή, το πρόγραμμα παράγει πολλαπλά σενάρια στοχαστικής πρόγνωσης, τα οποία περιγράφουν ισοπίθανες ακολουθίες της διαχρονικής εξέλιξης των αντίστοιχων υδρολογικών μεγεθών. Τα σενάρια αυτά λαμβάνουν υπόψη τους την ακολουθία των πρόσφατων ιστορικών τιμών των χρονοσειρών, υπό μορφή μαθηματικής δέσμευσης.



### Παρουσίαση δεδομένων

Τα δεδομένα που ανακτώνται από τη βάση και τα αποτελέσματα των πάσης φύσεως επεξεργασιών οπτικοποιούνται υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι τιμές των ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών και τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους, καθώς οι παράμετροι των στοχαστικών μοντέλων για τις ετήσιες και μηνιαίες μεταβλητές.



### Απαιτήσεις εξοπλισμού Η/Υ

Το λογισμικό εγκαθίσταται σε προσωπικό υπολογιστή με επεξεργαστή τύπου Pentium III ή μεταγενέστερο και με λειτουργικό σύστημα Windows 95/98/ME/NT/2000/XP.

#### Επικοινωνία

Δημήτρης Κουτσογιάννης και Ανδρέας Ευστρατιάδης  
 Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων  
 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157-72, Ζωγράφου  
 Τηλέφωνα: (+30)-010-7722831, (+30)-010-7722861  
 Ηλεκτρονική διεύθυνση: [dk@itia.ntua.gr](mailto:dk@itia.ntua.gr), [andreas@itia.ntua.gr](mailto:andreas@itia.ntua.gr)  
 Διεύθυνση ιστοσελίδας: <http://itia.ntua.gr/g/softinfo/2/>