

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ &
ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**

ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
Δ/ΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ & ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ - ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ
& ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

**MINISTRY OF ENVIRONMENT, REGIONAL
PLANNING & PUBLIC WORKS**

GENERAL SECRETARIAT OF PUBLIC WORKS
SECRETARIAT OF WATER SUPPLY & SEWAGE

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DIVISION OF WATER RESOURCES - HYDRAULIC
& MARITIME ENGINEERING

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΦΑΣΗ Β

ΤΕΥΧΟΣ 14
ΠΙΛΟΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΑΘΗΝΑΣ

RESEARCH PROJECT
EVALUATION AND MANAGEMENT OF THE
WATER RESOURCES OF STEREA HELLAS

PHASE B

VOLUME 14
A PILOT MODEL FOR THE
MANAGEMENT OF THE RESERVOIR
SYSTEM FOR THE WATER SUPPLY
OF ATHENS

ΣΥΝΤΑΞΗ: Γ. ΤΣΑΚΑΛΙΑΣ, Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Θ. ΞΑΝΘΟΠΟΥΛΟΣ
ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

BY: G. TSAKALIAS, D. KOUTSOYIANNIS
SCIENTIFIC DIRECTOR: TH. XANTHOPOULOS
PRINCIPAL INVESTIGATOR: D. KOUTSOYIANNIS

ΑΘΗΝΑ - ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1995

ATHENS - SEPTEMBER 1995

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορικό	1
1.2 Σύντομη περιγραφή του συστήματος γενετικής προσομοίωσης	2
2. Στοχαστική προσομοίωση υδρολογικών μεταβλητών	6
3. Λειτουργική προσομοίωση υδατικού συστήματος	7
3.1 Δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του μοντέλου	7
3.2 Βασικές εξισώσεις λειτουργικής προσομοίωσης	8
3.3 Συναρτήσεις διαρροής	9
3.4 Κανόνες λειτουργίας	10
3.5 Πρόγραμμα Η/Υ	13
4. Γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης	15
4.1 Κωδικοποίηση του γενετικού αλγορίθμου	15
4.2 Η συνάρτηση αξιολόγησης	17
4.3 Διαδικασία αναπαραγωγής	19
4.4 Τελεστές ανασυνδυασμού	20
4.5 Τα βήματα εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου	24
5. Αλγόριθμος προσέγγισης μέγιστης ζήτησης	25
6. Οδηγίες χρήσεως προγράμματος Η/Υ	27
6.1 Κύρια φόρμα Γενετικής Προσομοίωσης	28
6.2 Κύρια φόρμα - σελίδα υδατικού ισοζυγίου	31
6.3 Κύρια φόρμα - σελίδα διαγραμμάτων	32
6.4 Κύρια φόρμα - σελίδα υδατικού συστήματος	33
6.5 Κύρια φόρμα - σελίδα υδατικού ισοζυγίου	34
6.6 Φόρμα δεδομένων ταμιευτήρα	35
6.7 Φόρμα κανόνα απόληψης (Επεξεργασία Κανόνας απόληψης...)	36
6.8 Φόρμα παραμέτρων βέλτιστης ζήτησης (Επεξεργασία Παράμετροι βέλτιστης ζήτησης...)	38
6.9 Φόρμα παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου (Επεξεργασία Παράμετροι γενετικού αλγορίθμου...)	40

7. Αποτελέσματα πιλοτικής χρήσης	43
7.1 Πρώτη εφαρμογή - μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης	43
7.2 Δεύτερη εφαρμογή - γενετικός αλγόριθμος	43
7.3 Τρίτη εφαρμογή - αλγόριθμος προσέγγισης μέγιστης ζήτησης	44
7.4 Διαγράμματα	46

1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό

Το τεύχος αυτό περιγράφει το σύστημα γενετικής προσομοίωσης των ταμιευτήρων Ευήνου-Μόρνου-Υλίκης που αναπτύξαμε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου *“Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας”*. Το ερευνητικό έργο αυτό, ανατέθηκε και χρηματοδοτήθηκε από τη Διεύθυνση Ύδρευσης και Αποχέτευσης του ΥΠΕΧΩΔΕ (απόφαση Δ6/21512/8-9-1993) σε ερευνητική ομάδα του Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων του ΕΜΠ με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή Θ. Ξανθόπουλο και συντονιστή τον επίκουρο καθηγητή Δ. Κουτσογιάννη. Η συγκεκριμένη εργασία την οποία καλύπτει το τεύχος αυτό προδιαγράφεται στο Παράρτημα της απόφασης ανάθεσης (άρθρο 2.2.3, εδάφιο γ και 2.3.3 εδάφιο γ: *“Εναρξη ανάπτυξης έμπειρου συστήματος για τη διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας”*). Πιο συγκεκριμένα καλύπτει την τοποθέτηση του προβλήματος ως προς το σύστημα ταμιευτήρων υδροδότησης της Αθήνας, καθώς και το σχεδιασμό και την πλήρη ανάπτυξη πρωτοτύπου. Το εν λόγω αντικείμενο καλύπτεται μόνο εν μέρει από αυτό το τεύχος, καθώς υπάρχουν και δύο ακόμη τεύχη που ανήκουν στο ίδιο αντικείμενο. Πρόκειται συγκεκριμένα για το τεύχος 15, αναφέρεται στην ανάπτυξη ενός μοντέλου για το σύστημα ταμιευτήρων του Αχελώου, και το τεύχος 17 που καλύπτει βιβλιογραφικά τις μεθόδους βελτιστοποίησης σε προβλήματα υδατικών πόρων.

Το σύστημα γενετικής προσομοίωσης που αναπτύξαμε αξιοποιεί μεθόδους που ανήκουν στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης και πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τους γενετικούς αλγορίθμους, ως εργαλείο βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος των ταμιευτήρων. Το σύστημα γενετικής προσομοίωσης, αξιοποιεί επίσης σύγχρονες μεθόδους της επιχειρησιακής υδρολογίας. Η θεωρητική βάση του συστήματος δεν καλύπτεται από τη βιβλιογραφία αλλά σε μεγάλο μέρος οφείλεται σε πρωτότυπη θεωρητική εργασία. Η περιγραφή του συστήματος γίνεται στα Κεφάλαια 3 - 5 του τεύχους. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι ο χαρακτήρας του συστήματος είναι, όπως το δηλώνει και ο τίτλος του, πιλοτικός. Αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση του πλήρους μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης λειτουργίας του

τεχνητού υδατικού συστήματος της Στερεάς Ελλάδας, το οποίο προδιαγράφεται για την επόμενη φάση του ίδιου ερευνητικού έργου. Περιλαμβάνει την πλήρη μαθηματική προσομοίωση του συστήματος ταμιευτήρων και εξωτερικών υδραγωγείων τροφοδοσίας της Αθήνας, ενώ στην παρούσα φάση δεν καλύπτει την τροφοδοσία από υπόγεια νερά, πράγμα το οποίο προβλέπεται να γίνει στην επόμενη φάση.

Το τεύχος αυτό συνοδεύεται από δισκέτες, οι οποίες περιέχουν το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τη διαχείριση του συστήματος ταμιευτήρων υδροδότησης της Αθήνας, καθώς και τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται για την εκέλευση των προγραμμάτων. Οδηγίες χρήσης για το εν λόγω λογισμικό παρέχονται στο Κεφάλαιο 6 αυτού του τεύχους, ενώ ορισμένα πρώτα αποτελέσματα από τη λειτουργία του δίνονται στο Κεφάλαιο 7.

1.2 Σύνοψη περιγραφή του συστήματος γενετικής προσομοίωσης

Το σύστημα γενετικής προσομοίωσης που παρουσιάζουμε σε αυτό το τεύχος, αναλύονται διεξοδικά στα Κεφάλαια 3 έως 5, όπου ο αναγνώστης μπορεί να βρεί όλη τη θεωρητική ανάπτυξη και λεπτομερείς οδηγίες χρήσης. Σε αυτό το κεφάλαιο, απλώς θα σκιαγραφήσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος δίνοντας την ευκαιρία μιας πρώτης εξοικείωσης, πριν από την καθαρή μαθηματική ανάλυση.

Αντικείμενο

Αντικείμενο του συστήματος γενετικής προσομοίωσης είναι το υδατικό σύστημα της Στερεάς Ελλάδας μέσω του οποίου υδροδοτείται η Αθήνα και αρδεύεται η Κωπαΐδα. Το υδατικό σύστημα αυτό περιλαμβάνει τους ταμιευτήρες Ευήνου, Μόρνου και Υλίκης, καθώς και ένα αριθμό γεωτρήσεων. Περιλαμβάνει επίσης τους κύριους αγωγούς μεταφοράς του νερού από τις θέσεις υδροληψίας προς την Αθήνα. Όπως προαναφέραμε, στην παρούσα δοκιμαστική έκδοση του μοντέλου δεν έχουν ενσωματωθεί οι συνιστώσες του συστήματος που αναφέρονται στα υπόγεια νερά.

Συστατικά

Το σύστημα γενετικής προσομοίωσης ενσωματώνει τέσσερα μοντέλα:

- Το μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης των υδρολογικών μεταβλητών.

- Το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης του υδατικού συστήματος.
- Το γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης παραμέτρων κανόνων λειτουργίας.
- Τον αλγόριθμο προσέγγισης μέγιστης ζήτησης.

Ερωτήματα στα οποία απαντάει το σύστημα

Τα παραπάνω τέσσερα μοντέλα μπορούμε να τα δούμε σαν *εργαλεία* που μας βοηθούν να δώσουμε απαντήσεις που αφορούν στο υδατικό σύστημα, απαντήσεις σε ερωτήσεις όπως: *“Μπορεί να καλυφθεί ζήτηση 650 εκατομμυρίων κυβικών το χρόνο;”, “Τι πιθανότητα υπάρχει να μην καλυφθεί αυτή η ζήτηση;”, “Ποιός κανόνας διαχείρισης θα έπρεπε να εφαρμοστεί ώστε να ικανοποιηθεί με ασφάλεια η ζήτηση;”, “Πόση είναι η ζήτηση που μπορεί να καλυφθεί με κίνδυνο αστοχίας το πολύ 1%;”*.

Τι είναι το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης

Στο κέντρο του συστήματος γενετικής προσομοίωσης βρίσκεται το *μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης* των ταμιευτήρων. Αυτό εκτελεί όλες τις λειτουργίες του υδατικού συστήματος χιλιάδες φορές, εκτελέσεις που αντιστοιχούν σε χιλιάδες προσομοιωμένα έτη λειτουργίας. Οι λειτουργίες που προσομοιώνονται είναι οι απολήψεις από τους ταμιευτήρες για ύδρευση και άρδευση, οι εισροές στους ταμιευτήρες (από τη βροχή και την απορροή) και η μείωση των αποθεμάτων λόγω των διαρροών και της εξάτμισης. Επίσης, το μοντέλο λαμβάνει υπ’ όψη του τις περιπτώσεις υπερχειλίσσης ή κένωσης ενός ταμιευτήρα, καθώς και περιορισμούς που επιβάλλει η δεδομένη παροχαρακτηριστικότητα των υδραγωγείων.

Τι είναι το μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης

Σε κάθε ένα από τα χιλιάδες έτη προσομοιωμένης λειτουργίας, το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης αντιστοιχεί ένα διαφορετικό σύνολο από 12 μηνιαίες τιμές ύψους βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης, για κάθε ταμιευτήρα. Οι χρονοσειρές αυτές είναι υπολογισμένες από το *μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης* υδρολογικών μεταβλητών και, παρ’ ότι είναι συνθετικές (δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ), τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά είναι όμοια με εκείνα των παρατηρημένων χρονοσειρών.

Τι είναι οι κανόνες λειτουργίας

Το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης ρυθμίζει τις απολήψεις από τον κάθε ταμιευτήρα με βάση έναν *κανόνα λειτουργίας*. Ο κανόνας αυτός, λαμβάνει υπ' όψη του την κατάσταση του υδατικού συστήματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (πόσος είναι ο συνολικός όγκος νερού στο σύστημα; πόση είναι η ζήτηση; πώς κατανέμεται το νερό στους ταμιευτήρες; τι εποχή του έτους είναι;) και αποφασίζει για το πόση απόληψη θα γίνει από τον κάθε ταμιευτήρα για κάθε κόμβο ζήτησης (ύδρευση και άρδευση). Δύο από τους βασικούς στόχους ενός κανόνα λειτουργίας είναι η ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων και των διαρροών. Όσο πιο ορθολογικός είναι ο χρησιμοποιούμενος κανόνας λειτουργίας τόσο πιο μεγάλες απολήψεις θα μπορέσουν να γίνουν, τόσο πιο μεγάλη ασφάλεια απέναντι σε πιθανές περιόδους ξηρασίας θα υπάρχει.

Πως ορίζεται η αστοχία

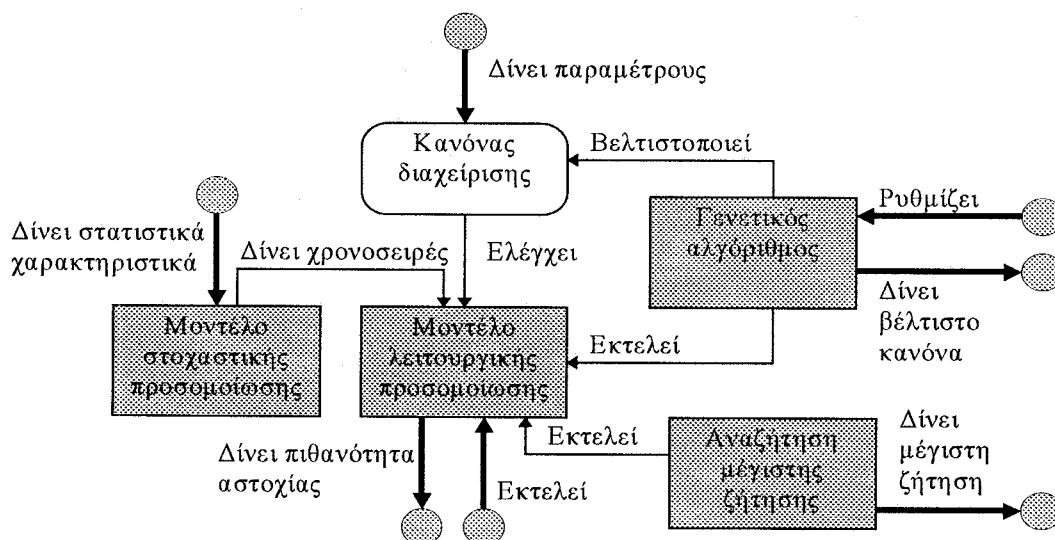
Το πόσο καλός είναι ένας κανόνας, δεν μπορεί να φανεί αμέσως. Πρέπει να προσομοιωθεί η λειτουργία του υδατικού συστήματος για πολλά χρόνια (π.χ., 5000 χρόνια) και να δούμε σε πόσα από αυτά τα χρόνια δεν καλύφθηκε η ζήτηση και έτσι να αξιολογήσουμε τον κανόνα. Το πόσες φορές δεν καλύφθηκε η ζήτηση (π.χ., 200 φορές στα 5000 χρόνια) ορίζει την *πιθανότητα αστοχίας* του συστήματος όταν αυτό διαχειρίζεται από το συγκεκριμένο κανόνα λειτουργίας (π.χ., $p_a = \frac{200}{5000} = 0.04$).

Που χρησιμεύει ο γενετικός αλγόριθμος

Οι κανόνες λειτουργίας έχουν αριθμητικές παραμέτρους, η εκτίμηση των οποίων είναι πολλές φορές δύσκολη ή και αδύνατη με χρήση αναλυτικών μεθόδων. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούμε ένα *γενετικό αλγόριθμο* ο οποίος βελτιστοποιεί αυτές τις παραμέτρους, βρίσκοντας ποιος είναι ο καλύτερος κανόνας διαχείρισης. Σαν βέλτιστος κανόνας ορίζεται αυτός που, για δεδομένη ζήτηση, μας δίνει τη μικρότερη πιθανότητα αστοχίας. Ο γενετικός αλγόριθμος δοκιμάζει διαδοχικά εναλλακτικούς κανόνες (κανόνες με διαφορετικές παραμέτρους) μέχρι να καταλήξει στη βέλτιστη λύση.

Τι κάνει ο αλγόριθμος προσέγγισης μέγιστης ζήτησης

Αφού ο γενετικός αλγόριθμος βρεί τις βέλτιστες παραμέτρους του κανόνα διαχείρισης (που για δεδομένη ζήτηση δίνουν τη μικρότερη πιθανότητα αστοχίας), μπορούμε να αντιστρέψουμε το ερώτημα και να ζητήσουμε από το σύστημα να χρησιμοποιήσει αυτές τις βέλτιστες παραμέτρους, και να υπολογίσει τη μέγιστη ζήτηση που μπορεί να καλυφθεί με δεδομένη πιθανότητα αστοχίας. Αυτό το κάνουμε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο προσέγγισης βέλτιστης ζήτησης που είναι μια εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου Regula-Falsi.



Σχήμα 1: Συστατικά συστήματος γενετικής προσομοίωσης. Με τα γκρίζα τετράγωνα αναπαριστούμε τα τέσσερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα. Με κύκλο συμβολίζουμε το χρήστη του συστήματος. Με τα βέλη συμβολίζουμε τη λειτουργική σχέση μεταξύ των μοντέλων καθώς και την αλληλεπίδραση μοντέλων-χρήστη.

Στο Σχήμα 1 μπορούμε να δούμε τα τέσσερα μοντέλα που συνιστούν το σύστημα γενετικής προσομοίωσης, το πως αυτά αλληλεπιδρούν και το πως ο χρήστης μπορεί να τα ρυθμίσει και να τα αξιοποιήσει. Η παρουσίαση που κάναμε μέχρι τώρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως απλουστευτική, δίνει όμως μία πρώτη εικόνα του συστήματος. Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθεί αναλυτική μαθηματική τεκμηρίωση των χρησιμοποιούμενων μοντέλων, οδηγίες χρήσης του αντίστοιχου προγράμματος, καθώς επίσης και μία σειρά από παραδειγματικές εφαρμογές του.

2. Στοχαστική προσομοίωση υδρολογικών μεταβλητών

Το μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών αναπτύχθηκε σαν τμήμα του ίδιου ερευνητικού έργου, στα πλαίσια της εργασίας των Κουτσογιάννη και Μανέτα [1995], με τίτλο *“Μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης χρονοσειρών επιφανειακής υδρολογίας με απλή τεχνική επιμερισμού - Εγχειρίδιο Χρήσης προγράμματος”*. Λεπτομερής περιγραφή του μοντέλου και του προγράμματος Η/Υ μπορεί να βρεθεί στο αντίστοιχο τεύχος με αριθμό 12.

Η στοχαστική υδρολογία και η μέθοδος της προσομοίωσης προσφέρει τη δυνατότητα λεπτομερούς και ακριβούς μελέτης των συστημάτων υδατικών πόρων, με βάση συνθετικές χρονοσειρές οι οποίες αναπαράγουν τη στατιστική δομή και τις στατιστικές παραμέτρους των ιστορικών δεδομένων. Με βάση τις συνθετικές χρονοσειρές μπορούμε να καταρτίσουμε την πιθανοτική περιγραφή της συμπεριφοράς ενός συστήματος υδατικών πόρων και να αποκτήσουμε εικόνα των μεγεθών που ενδιαφέρουν για ακραία επίπεδα πιθανότητας (πχ. 1:100, 1:1 000 κτλ.) πράγμα που δεν μπορεί να γίνει μόνο με τα ιστορικά δείγματα που κατά κανόνα είναι διαθέσιμα για μικρή μόνο χρονική περίοδο.

Στην πιλοτική εφαρμογή του συστήματος γενετικής προσομοίωσης αξιοποιήθηκαν συνθετικές χρονοσειρές που καταρτίστηκαν από το πρόγραμμα της στοχαστικής προσομοίωσης. Οι χρονοσειρές αυτές αφορούν στις μεταβλητές της βροχής, της απορροής και της εξάτμισης για τις τρεις λεκάνες απορροής (Ευήνου, Μόρνου και Υλίκης-Βοιωτικού Κηφισού). Το χρονικό βήμα των χρονοσειρών είναι ένας μήνας και το μήκος τους είναι 5000 χρόνια. Για λόγους σύγκρισης με παλιότερα αποτελέσματα έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης χρονοσειρές που καταρτίστηκαν στα πλαίσια της Α' φάσης του ερευνητικού έργου από τα αντίστοιχα προγράμματα Η/Υ (βλ. Α' φάση, τεύχος 7, *“Προγράμματα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών”*).

3. Λειτουργική προσομοίωση υδατικού συστήματος

Το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε είναι κατά το θεωρητικό του μέρος παρόμοιο με το μοντέλο που παρουσιάζεται από τον Ναλμπάντη [1990] και το οποίο βρίσκεται στο τεύχος 14 του ερευνητικού έργου “*Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*”.

Θα θέλαμε να επισημάνουμε ότι ο σκοπός της εργασίας που περιγράφουμε δεν είναι η ανάπτυξη μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης αλλά η βελτιστοποίηση των παραμέτρων και κανόνων λειτουργίας του, με χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Έτσι, δεν δώσαμε ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη ενός πιο λεπτομερούς μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης (κάτι που ασφαλώς είναι απαραίτητο στην επόμενη φάση), αλλά, όσον αφορά στο μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης, επικεντρώσαμε σε ζητήματα (1) ταχύτητας των υπολογισμών, (2) δυνατότητας του για ενσωμάτωση νέων κανόνων λειτουργίας και (3) ευκολίας χρήσης του από αλγορίθμους βελτιστοποίησης.

3.1 Δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του μοντέλου

Στο μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης του υδατικού συστήματος έχουν ενταχθεί τα παρακάτω δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του τεχνητού υδατικού συστήματος της Στερεάς Ελλάδας:

- *Χαρακτηριστικά των τριών ταμιευτήρων* (Ευήνου, Μόρνου, Υλίκης). Συνολικός νεκρός και ενεργός όγκος αποθήκευσης, καμπύλες στάθμης-όγκου και στάθμης-επιφανείας.
- *Χαρακτηριστικά των υδραγωγείων*, τα οποία περιλαμβάνουν την ικανότητα μεταφοράς νερού από τα υδραγωγεία Μόρνου και Υλίκης και την καμπύλη στάθμης-παροχτετευτικότητας για το υδραγωγείο του Ευήνου.
- *Χαρακτηριστικά ζήτησης*. Χαρακτηριστικές τιμές και συντελεστές ανισοκατανομής της ζήτησης για την ύδρευση της Αθήνας και για την άρδευση της Κωπαΐδας.
- *Κανόνες ασφαλείας έναντι βλάβης των υδαταγωγών*. Οι κανόνες αυτοί ορίζουν τη

συντήρηση αποθεμάτων ασφαλείας στην Υλίκη, για να καλυφθεί η ζήτηση για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, μέχρι να αποκατασταθεί η βλάβη στον υδαταγωγό Μόρνου-Αθήνας.

- *Κανόνες λειτουργίας υδατικού συστήματος.* Οι κανόνες αυτοί καθορίζουν την κατανομή των απολήψεων από τον κάθε ταμιευτήρα συναρτήσει του αποθηκευμένου στο υδατικό σύστημα όγκου νερού και της ζήτησης της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής.

3.2 Βασικές εξισώσεις λειτουργικής προσομοίωσης

Για κάθε ταμιευτήρα ισχύει η βασική εξίσωση ισοζυγίου:

$$S_i^{k+1} = S_i^k + Q_i^k - R_i^k - SP_i^k - L_i^k \quad k = 1, \dots, M \quad i = 1, \dots, N$$

όπου:

i είναι ο αύξων αριθμός του ταμιευτήρα.

k είναι ο αύξων αριθμός του τρέχοντος μήνα.

N είναι ο αριθμός των ταμιευτήρων (1-Εύηνος, 2-Μόρνος, 3-Υλίκη).

M είναι ο αριθμός των προσομοιωμένων μηνών (π.χ., 60000 μήνες)..

S_i^k είναι το απόθεμα στον ταμιευτήρα i στο τέλος του μήνα k .

Q_i^k είναι η εισροή (απορροή λεκάνης, βροχή στην επιφάνεια της λίμνης και εισροή από άλλο ταμιευτήρα) στον ταμιευτήρα i το μήνα k .

R_i^k είναι η απόληψη από τον ταμιευτήρα i (για ύδρευση και άρδευση) τον μήνα k .

L_i^k είναι οι απώλειες (διαρροή και εξάτμιση) από τον ταμιευτήρα i το μήνα k .

SP_i^k είναι ο όγκος υπερχείλισης από τον ταμιευτήρα i το μήνα k (αν πραγματοποιηθεί υπερχείλιση κατά τον συγκεκριμένο μήνα).

Ο συνολικός όγκος στο σύστημα στην χρονική στιγμή k δίνεται από εξίσωση:

$$V^k = \sum_{i=1}^N S_i^k$$

Υποθέτοντας ότι γνωρίζουμε τις εισροές, τις απώλειες και την υπερχειλίση του κάθε ταμιευτήρα και ότι καλύπτεται όλη η ζήτηση, στο τέλος της περιόδου k ο όγκος αποθήκευσης θα δίνεται από την εξίσωση:

$$V^k = \sum_{i=1}^N (S_i^{k-1} + Q_i^k - R_i^k - SP_i^k) - D^k$$

Όπου:

D^k είναι η συνολική ζήτηση τον μήνα k .

και:

$$D^k = \sum_{i=1}^N R_i^k$$

3.3 Συναρτήσεις διαρροής

Οι ταμιευτήρες Μόρνου και Υλίκης δεν είναι στεγανοί και ο όγκος νερού που διαρρέει δεν μπορεί να αμεληθεί. Ειδικά για την διαρροή στην Υλίκη, υπάρχει η ιδιομορφία της πολύ γρήγορης αύξησης της διαρροής που συνοδεύει την αύξηση της στάθμης της λίμνης. Μαθηματικά οι διαρροές για τους δύο ταμιευτήρες μπορούν να δοθούν από τις παρακάτω εξισώσεις:

Για το Μόρνο έχουμε:

$$G_2^k = 0.022865 (Z_2^k - 390.0) + 0.1327 \quad k = 1, \dots, M$$

όπου:

k είναι ο συγκεκριμένος μήνας της προσομοίωσης.

G_2^k είναι η διαρροή κατά τον μήνα k .

Z_2^k είναι το απόλυτο υψόμετρο της λίμνης του Μόρνου.

Για την Υλίκη και για την περίοδο από Απρίλιο μέχρι Σεπτέμβριο, έχουμε:

$$G_3^k = 88.298 \cdot 10^{-6} \left[Z_2^k \right]^3 - 0.61425 Z_2^k + \varepsilon \quad k = 1, \dots, M$$

όπου:

k είναι ο συγκεκριμένος μήνας της προσομοίωσης.

G_3^k είναι η διαρροή κατά τον μήνα k .

Z_3^k είναι το απόλυτο υψόμετρο της λίμνης.

ε είναι τυχαίος όρος που ακολουθεί κατανομή $N(0, 3.12)$.

Για την Υλίκη και για την περίοδο από Οκτώβριο μέχρι Μάρτιο, έχουμε:

$$G_3^k = 0.012582 \left[Z_2^k \right]^2 - 1.0584 Z_2^k + \varepsilon \quad k = 1, \dots, M$$

όπου:

k είναι ο συγκεκριμένος μήνας της προσομοίωσης.

G_3^k είναι η διαρροή κατά τον μήνα k .

Z_3^k είναι το απόλυτο υψόμετρο της λίμνης.

ε είναι τυχαίος όρος που ακολουθεί κατανομή $N(0, 5.31)$.

3.4 Κανόνες Λειτουργίας

Το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί εναλλακτικούς κανόνες διαχείρισης, δίνοντας στο χρήστη την ευκαιρία να διαλέξει τον κανόνα που κρίνει ότι είναι αποδοτικότερος. Οι διαθέσιμοι στην παρούσα έκδοση κανόνες λειτουργίας είναι πέντε, και περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους. Οι περισσότεροι κανόνες έχουν ένα σύνολο παραμέτρων οι τιμές των οποίων είτε δίνονται από το χρήστη, είτε υπολογίζονται από το μοντέλο μετά από

βελτιστοποίηση, όπως θα δούμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Απόλυτη προτεραιότητα Υλίκης

Όταν είναι ενεργός αυτός ο κανόνας, το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης προσπαθεί να καλύψει όλη τη ζήτηση από τα αποθέματα της Υλίκης. Αν κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό τότε καλύπτει το έλλειμα από το Μόρνο. Παράλληλα, το νερό μεταφέρεται από τον Εύηνο προς το Μόρνο με συνεχή και πλήρη λειτουργία του υδαταγωγού Ευήνου-Μόρνου. Στόχος αυτού του κανόνα είναι να διατηρούνται οι ταμειωτήρες Υλίκης και Ευήνου όσο το δυνατόν πιο άδειοι ώστε, στην Υλίκη να ελαχιστοποιηθούν οι υπόγειες διαφυγές ενώ στον Εύηνο να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα υπερχειλίσσης. Διευκρινίζεται ότι το νερό του Ευήνου δεν μεταφέρεται αναγκαστικά στην Αθήνα, αλλά πολλές φορές παραμένει στο Μόρνο για αρκετό διάστημα, ακριβώς λόγω της προτεραιότητας της Υλίκης. Ο κανόνας αυτός δεν έχει καμμία παράμετρο.

Απόλυτη προτεραιότητα Υλίκης με κατώφλι στο Μόρνο για τις εισροές από τον Εύηνο

Η διαφορά από τον προηγούμενο κανόνα είναι ότι το νερό μεταφέρεται από τον Εύηνο στο Μόρνο μόνο όταν το απόθεμα στο Μόρνο είναι κάτω από ένα καθορισμένο κατώφλι S_b . Η μοναδική παράμετρος του κανόνα είναι αυτό το κατώφλι του αποθέματος στο Μόρνο.

Σχετική προτεραιότητα Υλίκης

Εάν το απόθεμα στο Μόρνο είναι κάτω από ένα δεδομένο κατώφλι S_a , η απόληψη γίνεται από την Υλίκη. Εάν το απόθεμα στο Μόρνο είναι πάνω από το συγκεκριμένο κατώφλι, η απόληψη γίνεται από το Μόρνο μέχρι να φτάσει το απόθεμα του σε αυτό το κατώφλι. Το νερό μεταφέρεται από τον Εύηνο προς το Μόρνο με συνεχή και πλήρη λειτουργία του υδαταγωγού Ευήνου-Μόρνου. Η παράμετρος του κανόνα είναι μία, το καθορισμένο κατώφλι στο Μόρνο.

Σχετική προτεραιότητα Υλίκης με κατώφλι στο Μόρνο για τις εισροές από τον Εύηνο

Η διαφορά από τον προηγούμενο κανόνα είναι ότι το νερό μεταφέρεται από τον Εύηνο στο Μόρνο μόνο όταν το απόθεμα στο Μόρνο είναι κάτω από ένα καθορισμένο κατώφλι S_b . Οι παράμετροι του κανόνα είναι δύο, όσα και τα κρίσιμα κατώφλια του αποθέματος του Μόρνου.

Τροποποιημένος χωρικός κανόνας

Οι προηγούμενοι κανόνες είναι απλοί και καθαρά εμπειρικοί. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα συνοψίσουμε ένα πιο γενικευμένο και λιγότερο εμπειρικό κανόνα, τον καλούμενο *τροποποιημένο χωρικό κανόνα*. Η θεωρητική ανάπτυξη του τροποποιημένου χωρικού κανόνα δίνεται από τους Nalbantis and Koutsoyiannis [1995]. Στο πρόγραμμα της γενετικής προσομοίωσης έχει ενσωματωθεί μία προσαρμοσμένη έκδοση αυτού του κανόνα, η οποία συνοπτικά περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$T_i^* = \begin{cases} 0 & 1 + \varphi (1 - T_i / K_i) < 0 \\ b_i V & 0 \leq 1 + \varphi (1 - T_i / K_i) \leq K_i / T_i \\ K_i & 1 + \varphi (1 - T_i / K_i) > K_i / T_i \end{cases}$$

όπου:

$$T_i = \begin{cases} 0 & b_i V < 0 \\ b_i V & 0 \leq b_i V \leq K_i \\ K_i & b_i V > K_i \end{cases}$$

και:

V είναι ο συνολικός όγκος στο σύστημα μία δεδομένη χρονική στιγμή (ο δείκτης k που εκφράζει το μήνα έχει παραλειφθεί για λόγους αναγνωσιμότητας).

T_i^* είναι το διορθωμένο απόθεμα-στόχος για τον ταμιευτήρα i .

T_i είναι το αρχικό απόθεμα-στόχος για τον ταμιευτήρα i .

K_i είναι η καθαρή χωρητικότητα του ταμιευτήρα i .

b_i είναι οι παράμετροι του κανόνα απόληψης, οι οποίες τηρούν τον περιορισμό:

$$\sum_{i=1}^N b_i = 1$$

φ είναι συντελεστής διόρθωσης που δίνεται από τον τύπο:

$$\varphi = \frac{V - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N T_i (1 - T_i / K_i)}$$

και χρησιμοποιείται για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός:

$$\sum_{i=1}^N T_i = V$$

Το πλεονέκτημα αυτού του κανόνα είναι ότι έχει μόνο δύο ανεξάρτητες παραμέτρους (δύο από τις b_1, b_2, b_3) οι οποίες δεν ταυτίζονται με τα εμπειρικά επιλεγμένα “κατώφλια” αποθέματος των προηγούμενων κανόνων. Ανάλογα με αυτές τις παραμέτρους και το συνολικό απόθεμα στο σύστημα (V), καθορίζεται το απόθεμα που αποτελεί το στόχο για κάθε ταμιευτήρα (T_i^*). Ανάλογα με τη διαφορά του πραγματικού αποθέματος (S_i^k) από τον απόθεμα-στόχο, ρυθμίζονται οι απολήψεις του κάθε ταμιευτήρα, έτσι ώστε να προσεγγίζεται, κατά το δυνατόν, το απόθεμα-στόχος.

3.5 Πρόγραμμα H/Y

Το πρόγραμμα H/Y για την λειτουργική προσομοίωση του υδατικού συστήματος συντάχθηκε έχοντας να καλύψει τρεις στόχους:

- Ενσωμάτωση εναλλακτικών κανόνων λειτουργίας.
- Ευκολία χρησιμοποίησης του από το γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
- Υψηλή ταχύτητα εκτέλεσης.

Από όλους τους στόχους ο πιο κρίσιμος είναι ο τρίτος. Η τελική ταχύτητα εκτέλεσης που επιτεύχθηκε είναι τέτοια που να επιτρέπει την επαναληπτική εκτέλεση του μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης σε μικρό χρονικό διάστημα. Κατι τέτοιο είναι αναγκαίο αφού, όπως θα δούμε παρακάτω, ο γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης εκτελεί χιλιάδες προσομοιώσεις μέχρι να βρεί τις βέλτιστες παραμέτρους των κανόνων λειτουργίας.

4. Γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσομοιώνουν τη λειτουργία της εξέλιξης των ζωντανών οργανισμών για να επιτύχουν την βελτιστοποίηση ενός "είδους". Το είδος στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο κανόνας λειτουργίας του υδατικού συστήματος και ζητούμενο είναι η εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του. Ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί από την κωδικοποίηση του, τους τελεστές ανασυνδυασμού, τη διαδικασία αναπαραγωγής και τη συνάρτηση αξιολόγησης. Κατά τη συγγραφή αυτού του τεύχους, υποθέσαμε ότι ο αναγνώστης είναι εξοικειωμένος με τις βασικές έννοιες της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων. Η αναφορά στις περισσότερες έννοιες γίνεται χωρίς επεξηγήσεις, μπορούμε όμως προκαταβολικά να πούμε ότι ο γενετικός αλγόριθμος που θα περιγράψουμε παρακάτω είναι συγγενής με τον γενετικό αλγόριθμο του συστήματος GENOCOP που περιγράφεται από τον Michalewicz, [1992]. Επίσης, στο βιβλίο αυτό του Michalewicz ο αναγνώστης μπορεί να βρει μία έγκυρη περιγραφή των βασικών στοιχείων της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων όπως και έναν αριθμό από τις πιο σημαντικές εφαρμογές τους.

4.1 Κωδικοποίηση του γενετικού αλγορίθμου

Ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύξαμε χρησιμοποιεί σαν "γονίδια" πραγματικούς αριθμούς. Για παράδειγμα, όταν αναζητούμε τις βέλτιστες τιμές για τα δύο κατώφλια στον Μόρνο τα γονίδια του γενετικού αλγορίθμου είναι δύο αριθμοί που αντιπροσωπεύουν τα δύο κατώφλια του αποθέματος στο Μόρνο.

Ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να θέτει γραμμικούς περιορισμούς στα γονίδια. Για παράδειγμα, όταν ο αλγόριθμος έχει τρία γονίδια που αντιπροσωπεύουν τις τρεις παραμέτρους b του τροποποιημένου χωρικού κανόνα, έχει κωδικοποιημένο τον περιορισμό ότι το άθροισμα των b_i πρέπει να ισούται με μονάδα.

Αναπαράσταση πληθυσμού

Μαθηματικά, η κωδικοποίηση του γενετικού αλγορίθμου μπορεί να αναπαρασταθεί με τις παρακάτω εκφράσεις:

$$P_t = \{v_1^t, \dots, v_A^t\}$$

$$v_i^t = [g_1^{ti}, \dots, g_F^{ti}]$$

όπου:

P_t είναι ο πληθυσμός του γενετικού αλγορίθμου κατά τη γενεά t .

A είναι η το μέγεθος του πληθυσμού.

v_i^t $i = 1, \dots, A$ είναι τα χρωμοσώματα (ή άτομα) τα οποία αποτελούν τον πληθυσμό P_t . Κάθε άτομο είναι μια πλήρης λύση του προβλήματος δηλαδή ένα σύνολο από παραμέτρους του κανόνα διαχείρισης.

g_k^{ti} $k = 1..F$ είναι τα γονίδια του αλγορίθμου με τις τιμές που έχουν στο άτομο i που ανήκει στη γενεά t .

F είναι ο αριθμός των γονιδίων (παραμέτρων).

Κωδικοποίηση περιορισμών

Στην περίπτωση των κανόνων όπου τα γονίδια αντιπροσωπεύουν κατώφλια του αποθέματος στο Μόρνο, για κάθε χρωμόσωμα ισχύει ο περιορισμός.

$$0 \leq g_i \leq K_i$$

Στην περίπτωση του τροποποιημένου χωρικού κανόνα ισχύει ο περιορισμός.

$$\sum_{i=1}^3 g_i = 1$$

Κάνοντας μία γενίκευση των παραπάνω περιορισμών, παρατηρούμε ότι για κάθε γονίδιο μπορούμε να ορίσουμε ένα άνω και ένα κάτω όριο μέσα στα οποία το γονίδιο μπορεί να παίρνει τιμές. Αυτά τα όρια μπορεί να είναι στατικά ή μπορεί να καθορίζονται από τις τιμές των άλλων γονιδίων μέσα σε ένα χρωμόσωμα. Μαθηματικά, έχουμε:

$$l_i^k \leq g_i^k \leq u_i^k \quad i = 1, \dots, F$$

όπου ο δείκτης k αναφέρεται στο χρωμόσωμα v_k του τρέχοντος πληθυσμού.

Στην περίπτωση των κανόνων με παραμέτρους τα κατώφλια στο Μόρνο έχουμε:

$$\begin{aligned} l_1^k &= l_2^k = 0 \\ u_1^k &= K_1 \\ u_2^k &= K_2 \end{aligned}$$

Στην περίπτωση του τροποποιημένου χωρικού κανόνα έχουμε:

$$\begin{aligned} l_1^k &= l_2^k = 0 \\ u_1^k &= 1 - g_2^k \\ u_2^k &= 1 - g_1^k \\ l_3^k &= u_3^k = 1 - g_1^k - g_2^k \end{aligned}$$

4.2 Η συνάρτηση αξιολόγησης

Η συνάρτηση αξιολόγησης εκφράζει το “σκοπό” του γενετικού αλγορίθμου. Στη συγκεκριμένη φάση, έχει επιλεγεί σαν σκοπός η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας του υδροδοτικού συστήματος για δεδομένη ζήτηση. Αυτός ο σκοπός δίνεται σε αυτήν την εργασία μόνο σαν παράδειγμα. Ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιήσει συναρτήσεις αξιολόγησης που λαμβάνουν υπ’όψη τους παραμέτρους κόστους (οικονομικού και μη οικονομικού), ποιότητας νερού (επιφανειακού και υπογείου) και οποιεσδήποτε άλλες παραμέτρους δίνουν μια ρεαλιστική εικόνα του υδατικού συστήματος. Η συνάρτηση αξιολόγησης μπορεί να είναι πολυδιάστατη, σε ένα γενετικό αλγόριθμο που εκτελεί πολύ-αντικειμενική βελτιστοποίηση. Μία συνάρτηση αξιολόγησης, που λαμβάνει υπ’όψη της περισσότερη πληροφορία απαιτεί και ένα αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης, κάτι που προδιαγράφεται σαν αντικείμενο της επόμενης φάσης του ερευνητικού έργου.

Η έννοια της αστοχίας μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους σε ένα μοντέλο

προσομοίωσης. Σε αυτήν την εργασία, η αστοχία μετριέται σε ετήσια βάση. Αστοχία συμβαίνει σε ένα συγκεκριμένο έτος αν, έστω και σε έναν μήνα του, δεν ικανοποιείται το σύνολο της ζήτησης για ύδρευση της Αθήνας.

Η συνάρτηση αξιολόγησης ενός χρωμοσώματος v_i , του γενετικού αλγορίθμου δίνεται από την εξίσωση:

$$eval(v_i) = 1 - q$$

όπου q είναι η υπολογιζόμενη από το μοντέλο προσομοίωσης πιθανότητα αστοχίας, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$q = \frac{\sum_{y=1}^Y Q_y}{Y}$$

όπου:

y είναι το τρέχον έτος της προσομοίωσης.

Y είναι το σύνολο των ετών της προσομοίωσης λειτουργίας των ταμιευτήρων.

η συνάρτηση Q_y δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_y = \begin{cases} 1 & D_k = R_1^k + R_2^k \quad \forall k = 12(y-1) + 1, \dots, 12(y-1) + 12 \\ 0 & D_k < R_1^k + R_2^k \quad \forall k = 12(y-1) + 1, \dots, 12(y-1) + 12 \end{cases}$$

και:

k είναι ο τρέχων μήνας του τρέχοντος έτους y της προσομοίωσης.

$R_1^k + R_2^k$ είναι οι απολήψεις για ύδρευση από το Μόρνο και την Υλίκη κατά το μήνα

k , απολήψεις που υπολογίζονται με βάση τον κανόνα που προκύπτει από τις παραμέτρους $gm \quad m=1, \dots, F$ του ατόμου v_i (και πάλι για λόγους απλότητας παραλείψαμε το δείκτη της τρέχουσας γενεάς και το δείκτη του τρέχοντος ατόμου).

D_k είναι η ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας το μήνα k η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$D_k = H_k D$$

όπου:

D είναι η ετήσια ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας.

H_k είναι συντελεστής ανισοκατανομής της ύδρευσης κατά τον μήνα k που παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 1]$.

Στην παραπάνω αναπαράσταση παρατηρούμε ότι η συνάρτηση αξιολόγησης του γενετικού αλγορίθμου είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα του μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης του συστήματος των τριών ταμιευτήρων.

4.3 Διαδικασία αναπαραγωγής

Ο γενετικός αλγόριθμος ξεκινάει τη λειτουργία του με ένα αρχικό πληθυσμό που αποτελείται από άτομα με γονίδια παραγμένα τυχαία (μέσα στα δυναμικά καθοριζόμενα όρια τους). Σε κάθε γενεά, τα άτομα αξιολογούνται και, με βάση τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, γίνεται η επιλογή του ενεργού πληθυσμού. Μετά, τα άτομα του ενεργού πληθυσμού, ανασυνδυάζονται μεταξύ τους για να παραχθούν τα άτομα της επόμενης γενεάς. Η διαδικασία αναπαραγωγής στηρίζεται στην αρχή ότι καλύτερες λύσεις έχουν αυξημένη πιθανότητα επιλογής για αναπαραγωγή και άρα, επικράτησης στις επόμενες γενεές. Μαθηματικά μπορούμε να περιγράψουμε την επιλογή σαν μία συνάρτηση που από τον υπάρχοντα πληθυσμό, με χρήση μίας συνάρτησης αξιολόγησης, παράγει τον ενεργό πληθυσμό.

$$E_t = rep(P_t, eval)$$

όπου:

t είναι η τρέχουσα γενεά.

P_t είναι ο τρέχων πληθυσμός.

E_t είναι ο ενεργός πληθυσμός.

$eval$ είναι η συνάρτηση αξιολόγησης.

rep είναι η συνάρτηση επιλογής.

Ας σημειωθεί ότι, ο ενεργός πληθυσμός έχει την ίδια πληθυκότητα με τον τρέχοντα πληθυσμό. Η διάφορα έγκειται στο ότι μερικά άτομα του τρέχοντα πληθυσμού δεν

περιλαμβάνονται στον ενεργό πληθυσμό ενώ μερικά άλλα άτομα περιλαμβάνονται σε αυτόν πάνω από μία φορά. Το πόσο ισχυρή είναι η πιθανότητα ένα άτομο να συμπεριληφθεί (μία ή περισσότερες φορές) στον ενεργό πληθυσμό εξαρτάται από την αξιολόγηση του και από τη μέθοδο επιλογής. Στο σύστημα γενετικής προσομοίωσης έχουν ενσωματωθεί δύο μέθοδοι επιλογής, η αναλογική και η γραμμική, οι οποίες περιγράφονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

Αναλογική επιλογή

Η πιθανότητα επιλογής ενός ατόμου για αναπαραγωγή (ένταξη στον ενεργό πληθυσμό E) είναι ανάλογη της προσαρμοστικότητας του ατόμου $eval(v)$.

Γραμμική επιλογή

Η πιθανότητα επιλογής ενός ατόμου για αναπαραγωγή είναι ανάλογη της τροποποιημένης προσαρμοστικότητας του ατόμου

$$eval'(v_i) = a \cdot eval(v_i) + b$$

όπου:

a και b είναι κατάλληλοι συντελεστές έτσι ώστε:

$$eval'(v_i) \geq 0 \quad i = 1, \dots, A$$

και:

$$[\max eval'(v_j), j = 1..A] = f \cdot \frac{\sum_{i=1}^A eval'(v_i)}{A}$$

όπου:

f είναι θετική παράμετρος που ρυθμίζει το πόσο δραστική η συντηρητική θα είναι η επιλογή (κατά πόσο τα καλύτερα άτομα πολλαπλασιάζονται πιο γρήγορα από τα υπόλοιπα).

4.4 Τελεστές ανασυνδυασμού

Στο σύστημα γενετικής προσομοίωσης έχουν ενσωματωθεί οι τελεστές

ανασυνδυασμού που περιγράφονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

Ομοιόμορφη μετάλλαξη

Για κάθε άτομο που ανήκει στον ενεργό πληθυσμό της τρέχουσας γενεάς t ($v_j^t \in E_t$), παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $r = U(0,1)$ (ομοιόμορφα κατανεμημένος στο διάστημα $[0,1]$).

Αν:

$$r < p_m$$

όπου:

p_m είναι η δεδομένη πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης.

Τότε:

Επιλέγεται με τυχαίο τρόπο ένα γονίδιο g_i^k του χρωμοσώματος v_j^t και η τιμή του αλλάζει σε:

$$g_i^k = U(l_i^k, u_i^k)$$

Το άτομο του v_j^{t+1} του νέου πληθυσμού P_{t+1} περιέχει το μεταλλαγμένο γονίδιο g_i^k .

Μη ομοιόμορφη μετάλλαξη

Για κάθε άτομο που ανήκει στον ενεργό πληθυσμό της τρέχουσας γενεάς t ($v_j^t \in E_t$), παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $r = U(0,1)$ (ομοιόμορφα κατανεμημένος στο διάστημα $[0,1]$).

Αν:

$$r < p_n$$

όπου:

p_n είναι η δεδομένη πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης.

Τότε:

Επιλέγεται με τυχαίο τρόπο ένα γονίδιο g_i^k του χρωμοσώματος και η τιμή του αλλάζει σε:

$$g_i^k = \begin{cases} g_i^k + \Delta(t, u_i^k - g_i^k) & \text{εάν ένα τυχαίο ψηφίο είναι 0} \\ g_i^k - \Delta(t, g_i^k - l_i^k) & \text{εάν ένα τυχαίο ψηφίο είναι 1} \end{cases}$$

όπου:

t είναι ο αύξοντας αριθμός της τρέχουσας γενεάς.

και:

$$\Delta(t, x) = x \left[1 - r \left(1 - \frac{t}{T} \right)^b \right]$$

όπου:

T είναι ο συνολικός αριθμός των γενεών (επαναλήψεων του αλγορίθμου).

b είναι παράμετρος που καθορίζει το βαθμό της μη ομοιομορφίας του τελεστή.

Το άτομο του v_j^{t+1} του νέου πληθυσμού P_{t+1} περιέχει το μεταλλαγμένο γονίδιο g_i^k .

Διασταύρωση

Για κάθε δύο άτομα που ανήκουν στον ενεργό πληθυσμό της τρέχουσας γενεάς t ($v_\xi^t, v_\omega^t \in E_t$), παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $r = U(0,1)$ (ομοιόμορφα κατανεμημένος στο διάστημα $[0,1]$).

Αν:

$$r < p_x$$

όπου:

p_x είναι η δεδομένη πιθανότητα διασταύρωσης.

Τότε:

τα δύο άτομα του ενεργού πληθυσμού συνδυάζονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν δύο άτομα του νέου πληθυσμού.

Συμβολικά, τα άτομα:

$$v_{\xi}^t = \{\xi_1, \dots, \xi_F\} \text{ και } v_{\omega}^t = \{\omega_1, \dots, \omega_F\}$$

διασταυρώνονται στο k -στο γονίδιο και δίνουν τα άτομα:

$$v_{\xi}^{t+1} = \{\xi_1, \dots, \xi_k, \omega_{k+1} \cdot \alpha + \xi_{k+1} \cdot (1-\alpha), \dots, \omega_F \cdot \alpha + \xi_F \cdot (1-\alpha)\}$$

$$v_{\omega}^{t+1} = \{\omega_1, \dots, \omega_k, \xi_{k+1} \cdot \alpha + \omega_{k+1} \cdot (1-\alpha), \dots, \xi_F \cdot \alpha + \omega_F \cdot (1-\alpha)\}$$

όπου:

α είναι δυναμικά καθοριζόμενη παράμετρος του τελεστή που παίρνει κατάλληλα επιλεγμένες τιμές στο διάστημα $[0, 1]$.

Πλήρης γραμμική αριθμητική διασταύρωση

Για κάθε δύο άτομα που ανήκουν στον ενεργό πληθυσμό της τρέχουσας γενεάς t ($v_{\xi}^t, v_{\omega}^t \in E_t$), παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $r = U(0,1)$ (ομοιόμορφα κατανομημένος στο διάστημα $[0,1]$).

Αν:

$$r < p_W$$

όπου:

p_W είναι η δεδομένη πιθανότητα πλήρους γραμμικής αριθμητικής διασταύρωσης.

Τότε:

τα δύο άτομα του ενεργού πληθυσμού συνδυάζονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν δύο άτομα του νέου πληθυσμού.

Συμβολικά, τα άτομα:

$$v_{\xi}^t = \{\xi_1, \dots, \xi_F\} \text{ και } v_{\omega}^t = \{\omega_1, \dots, \omega_F\}$$

διασταυρώνονται παράγοντας τα άτομα:

$$v_{\xi}^{t+1} = \{\xi_1 \cdot \alpha + \omega_1 \cdot (1-\alpha), \dots, \xi_F \cdot \alpha + \omega_F \cdot (1-\alpha)\}$$

$$v_{\omega}^{t+1} = \{\omega_1 \cdot \alpha + \xi_1 \cdot (1-\alpha), \dots, \omega_F \cdot \alpha + \xi_F \cdot (1-\alpha)\}$$

όπου:

α είναι παράμετρος του τελεστή που παίρνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι τα δύο νέα άτομα αποτελούν γραμμικούς συνδιασμούς των γονέων τους και επομένως δεν παραβιάζεται κανένας γραμμικός περιορισμός στον οποίο υπόκεινται οι γονείς. Έτσι ο τελεστής μπορεί να εφαρμόζεται χωρίς κανένα ιδιαίτερο έλεγχο, μιας και παράγει πάντοτε εφικτές λύσεις.

4.5 Τα βήματα εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου

Ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να αναπαρασταθεί από την αναπαραγωγική έκφραση:

$$P_{t+1} = \text{rec}(E_t) \quad t = 1, \dots, T$$

όπου:

t είναι ο αύξων αριθμός της τρέχουσας γενεάς.

T είναι ο αριθμός της τελευταίας γενεάς (καθοριζόμενος από το χρήστη).

E_t είναι ο ενεργός πληθυσμός που αντιστοιχεί στη γενεά t .

P_{t+1} είναι ο πληθυσμός που αντιστοιχεί στη γενεά $t + 1$.

και:

ο τελεστής rec αναπαριστά την εφαρμογή στον ενεργό πληθυσμό της γενεάς t των τελεστών ανασυνδυασμού που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5. Αλγόριθμος προσέγγισης μέγιστης ζήτησης

Ο αλγόριθμος αυτός προσεγγίζει τη μέγιστη ετήσια ζήτηση D για την οποία το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης δίνει την προκαθορισμένη πιθανότητα αστοχίας p_α . Η αναζήτηση για τη βέλτιστη ζήτηση γίνεται με χρήση της αριθμητικής μεθόδου Regula-Falsi προσεγγίζοντας μία ρίζα της εξίσωσης:

$$f(D) = q - p_\alpha = 0$$

όπου:

D είναι η ετήσια ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας.

p_α είναι η προκαθορισμένη πιθανότητα αστοχίας.

q είναι η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος που δίνεται από την εξίσωση:

$$q = \frac{\sum_{y=1}^Y Q_y}{Y}$$

όπου:

y είναι το τρέχον έτος της προσομοίωσης.

Y είναι το σύνολο των ετών της προσομοίωσης λειτουργίας των ταμιευτήρων.

η συνάρτηση Q_y δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_y = \begin{cases} 1 & D_k = R_1^k + R_2^k \quad \forall k = 12(y-1)+1, \dots, 12(y-1)+12 \\ 0 & D_k < R_1^k + R_2^k \quad \forall k = 12(y-1)+1, \dots, 12(y-1)+12 \end{cases}$$

και:

k είναι ο τρέχων μήνας του τρέχοντος έτους y της προσομοίωσης.

$R_1^k + R_2^k$ είναι οι απολήψεις για ύδρευση από το Μόρνο και την Υλίκη κατά το μήνα k .

D_k είναι η ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας το μήνα k η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$D_k = H_k D$$

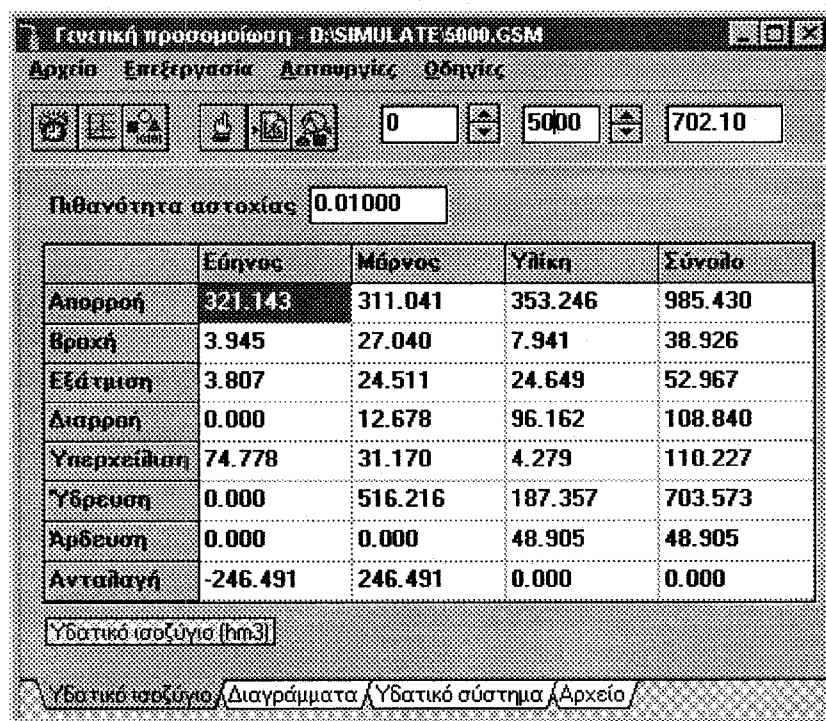
όπου:

H_k είναι συντελεστής ανισοκατανομής της ύδρευσης κατά το μήνα k .

6. Οδηγίες χρήσεως προγράμματος Η/Υ

Το πρόγραμμα γενετικής προσομοίωσης είναι αναπτυγμένο σε περιβάλλον Windows 95. Το προσαρμοστικό χρήσης του τηρεί όλα τα γνωστά εμπορικά πρότυπα. Το πρόγραμμα είναι εντελώς πρωτότυπο, έχει αναπτυχθεί στις γλώσσες προγραμματισμού C, C++ και Object Pascal, ενώ για το προσαρμοστικό χρήσης έχει χρησιμοποιηθεί το περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών Delphi. Η ελάχιστη υπολογιστική πλατφόρμα στην οποία το πρόγραμμα έχει ικανοποιητική απόδοση είναι ο υπολογιστής Pentium με 16MB RAM. Υπάρχει διαθέσιμη έκδοση του προγράμματος για λειτουργικό σύστημα UNIX, η οποία τρέχει σε περιβάλλον χαρακτήρων (όχι παραθυρικό). Η ταχύτητα εκτέλεσης των μοντέλων σε πλατφόρμα UNIX μπορεί να είναι (ανάλογα με τη μηχανή) μία έως τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερη από την αντίστοιχη σε πλατφόρμα PC.

Το πρόγραμμα έχει ενσωματωμένες οδηγίες χρήσης οι οποίες περιέχουν και το κείμενο αυτού του τεύχους. Για την ευκολότερη εκμάθηση της λειτουργίας του προγράμματος συνιστούμε την πειραματική λειτουργία του και την ανάγνωση των ενσωματωμένων οδηγιών.



Εικόνα 1: Κύρια φόρμα προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Σελίδα υδατικού ισοζυγίου.

6.1 Κύρια φόρμα Γενετικής Προσομοίωσης

Δημιουργία νέου αρχείου (Αρχείο|Νέο)

Εκτελώντας την επιλογή αυτή, ένα καινούργιο αρχείο προσομοίωσης δημιουργείται, με προκαθορισμένες τιμές για όλες τις παραμέτρους και κενά όλα τα πεδία που περιέχουν αποτελέσματα και διαγράμματα.

Άνοιγμα υπάρχοντος αρχείου (Αρχείο|Άνοιγμα...)

Μπορείτε να ανοίξετε ένα αρχείο που υπάρχει ήδη στο δίσκο.

Αποθήκευση αρχείου (Αρχείο|Αποθήκευση)

Μπορείτε να αποθηκεύσετε τα δεδομένα και αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως είναι διαμορφωμένα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Αποθήκευση αρχείου με άλλο όνομα (Αρχείο|Αποθήκευση σαν...)

Μπορείτε να αποθηκεύσετε τα δεδομένα και τα μέχρι εκείνη τη στιγμή αποτελέσματα σε ένα αρχείο με διαφορετικό από το ισχύον όνομα.

Έξοδος από το πρόγραμμα (Αρχείο|Έξοδος)

Το πρόγραμμα τερματίζεται. Αν υπάρχουν δεδομένα που δεν έχουν σωθεί, θα εμφανιστεί προειδοποιητικό μήνυμα.

Αλλαγή δεδομένων κανόνα απόληψης (Επεξεργασία|Κανόνας απόληψης...)

Εμφανίζεται η φόρμα του κανόνα απόληψης στην οποία μπορείτε να αλλάξετε τον τύπο και τις παραμέτρους του κανόνα.

Αλλαγή δεδομένων αναζήτησης βέλτιστης ζήτησης (Επεξεργασία|Παράμετροι βέλτιστης ζήτησης...)

Εμφανίζεται η φόρμα της αναζήτησης βέλτιστης ζήτησης όπου μπορείτε να αλλάξετε τις παραμέτρους.

Αλλαγή παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου (Επεξεργασία|Γενετικός

αλγόριθμος...)

Εμφανίζεται η φόρμα του γενετικού αλγορίθμου όπου μπορείτε να αλλάξετε τις παραμέτρους.

Εκτέλεση προσομοίωσης (Λειτουργίες|Προσομοίωση)

Εκτελείται μία φορά η λειτουργική προσομοίωση του υδατικού συστήματος. Ο ισχύων κανόνας είναι αυτός που καθορίζεται στη φόρμα του κανόνα διαχείρισης. Η ζήτηση και τα έτη προσομοίωσης είναι αυτά που καθορίζονται στην κύρια φόρμα του προγράμματος. Αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας, το υδατικό ισοζύγιο για το σύνολο των ετών της προσομοίωσης και τα αντίστοιχα διαγράμματα και αρχεία κειμένου.

Αναζήτηση βέλτιστης ζήτησης (Λειτουργίες|Αναζήτηση βέλτιστης λύσης...)

Εκτελείται ο αλγόριθμος Regula-Falsi με τον οποίο υπολογίζεται η ζήτηση για την οποία η πιθανότητα αστοχίας είναι αυτή που καθορίζεται στη φόρμα βέλτιστης ζήτησης.

Αναζήτηση παραμέτρων με χρήση του γενετικού αλγορίθμου (Λειτουργίες|Γενετική αναζήτηση παραμέτρων...)

Εκτελείται ο γενετικός αλγόριθμος και υπολογίζονται οι βέλτιστες παράμετροι του κανόνα απόληψης.

Περιεχόμενα κειμένου οδηγιών (Οδηγίες|Περιεχόμενα)

Εμφανίζονται τα περιεχόμενα των κειμένων οδηγιών του προγράμματος.

Οδηγίες που αφορούν σε κάποιο θέμα (Οδηγίες|Αναζήτηση θέματος...)

Εμφανίζεται φόρμα στην οποία μπορείτε να εισάγετε τον τίτλο ενός θέματος για το οποίο θα αναζητηθεί κείμενο οδηγιών.

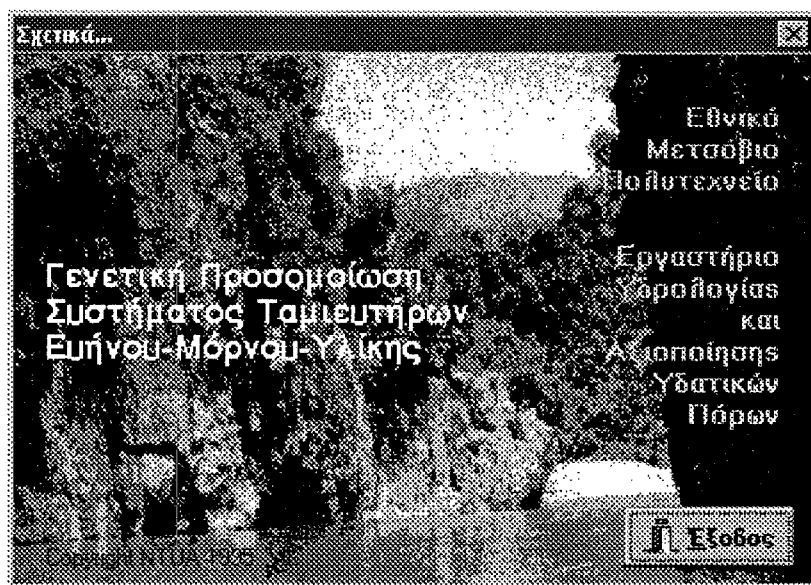
Εμφάνιση ή απόκρυψη ιπτάμενων οδηγιών (Οδηγίες|Ιπτάμενες οδηγίες)

Όταν αυτή η επιλογή είναι ενεργοποιημένη, κάθε φορά που ο δείκτης του ποντικιού

μένει πάνω από ένα πεδίο πάνω από ένα δευτερόλεπτο, εμφανίζεται ένα μικρό κείμενο οδηγιών ακριβώς από κάτω από το πεδίο. Αν κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό, απενεργοποιήστε την επιλογή.

Εμφάνιση πληροφοριών σχετικά με την έκδοση του προγράμματος (Οδηγίες|Σχετικά...)

Εμφανίζεται μία φόρμα με πληροφορίες σχετικές με την έκδοση και τα δικαιώματα χρήσης του προγράμματος της γενετικής προσομοίωσης.



Εικόνα 2: Πληροφορίες σχετικά με την έκδοση του προγράμματος γενετικής προσομοίωσης.

Πεδίο ζήτησης

Σε αυτό το πεδίο μπορείτε να ορίσετε την ετήσια ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας σε εκατομύρια κυβικά μέτρα. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα λειτουργικής προσομοίωσης. Σε περίπτωση που εκτελεστεί αναζήτηση βέλτιστης ζήτησης, το πρόγραμμα θα αλλάξει την τιμή αυτού του πεδίου αμέσως μόλις υπολογίσει τη ζήτηση για την οποία το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης δίνει τη δεδομένη πιθανότητα αστοχίας.

Πεδίο αρχικού έτους προσομοίωσης

Το πρόγραμμα γενετικής προσομοίωσης έχει διαθέσιμες μηνιαίες χρονοσειρές

απορροής, βροχής και εξάτμισης μήκους 5000 ετών. Σε αυτό το πεδίο μπορείτε να ορίσετε το αρχικό έτος προσομοίωσης.

Πεδίο ετών διάρκειας προσομοίωσης

Το πρόγραμμα γενετικής προσομοίωσης έχει διαθέσιμες μηνιαίες χρονοσειρές απορροής, βροχής και εξάτμισης μήκους 5000 ετών. Σε αυτό το πεδίο μπορείτε να ορίσετε τα έτη που θα διαρκέσει η προσομοίωση. Όσο πιο επιμήκης είναι η προσομοίωση τόσο πιο μεγάλη βεβαιότητα υπάρχει για την υπολογιζόμενη πιθανότητα αστοχίας.

Πεδίο αλλαγής σελίδων

Στο κάτω μέρος της κύριας φόρμας της γενετικής προσομοίωσης μπορείτε να επιλέξετε μία από τέσσερις σελίδες που περιέχουν άλλα πεδία, ομαδοποιημένα στις ακόλουθες κατηγορίες: *Υδατικό ισοζύγιο, Διαγράμματα, Υδατικό σύστημα, Αρχείο.*

6.2 Κύρια φόρμα - σελίδα υδατικού ισοζυγίου

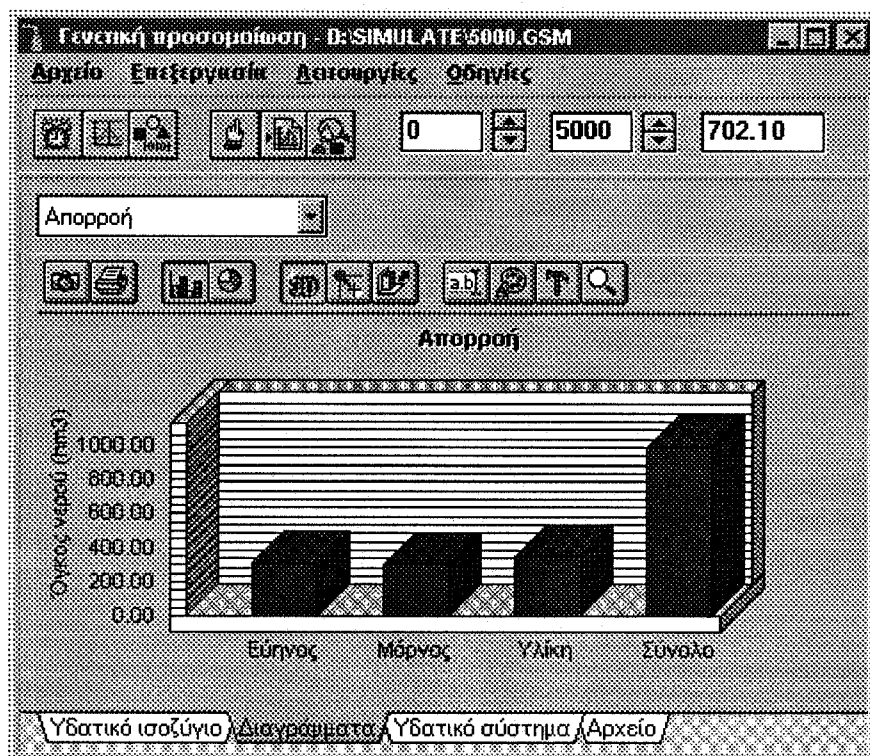
Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφουμε τα πεδία που εμφανίζονται όταν στην κύρια φόρμα του προγράμματος είναι ορατή η σελίδα υδατικού ισοζυγίου.

Πιθανότητα αστοχίας

Σε αυτό το πεδίο το πρόγραμμα δείχνει την υπολογισμένη από το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης πιθανότητα αστοχίας.

Πίνακας υδατικού ισοζυγίου

Σε αυτόν τον πίνακα το πρόγραμμα δείχνει το υπερετήσιο υδατικό ισοζύγιο των τριών ταμιευτήρων σαν αποτέλεσμα της εκτέλεσης του μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης. Ο πίνακας αφορά επτά μεγέθη για κάθε ένα από τους τρεις ταμιευτήρες: απορροή της λεκάνης, βροχή στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, εξάτμιση από την επιφάνεια του ταμιευτήρα, διαρροή, απώληση για ύδρευση, απώληση για άρδευση, και ανταλλαγή νερού μεταξύ ταμιευτήρων. Όλα τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε κυβικά εκατόμετρα.



Εικόνα 3: Σελίδα διαγραμμάτων.

6.3 Κύρια φόρμα - σελίδα διαγραμμάτων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφουμε τα πεδία που εμφανίζονται όταν στην κύρια φόρμα του προγράμματος είναι ορατή η σελίδα διαγραμμάτων.

Κατάλογος επιλογής τύπου διαγράμματος

Με χρήση αυτού του καταλόγου μπορείτε να αλλάξετε τον τύπο του τρέχοντος διαγράμματος.

Διάγραμμα ισοζυγίου

Στο διάγραμμα ισοζυγίου απεικονίζεται μία γραμμή του πίνακα ισοζυγίου. Το ποιά είναι αυτή η γραμμή καθορίζεται από την τιμή του καταλόγου επιλογής τύπου διαγράμματος. Το διάγραμμα ισοζυγίου μπορεί να αλλάξει μορφή (να γίνει τρισδιάστατο ή να γίνει ευθεία γραμμη κλπ) με χρήση των πλήκτρων που βρίσκονται ακριβώς από πάνω του. Επίσης το διάγραμμα ισοζυγίου μπορεί να εκτυπωθεί ή να σωθεί σε αρχείο.



Εικόνα 4: Σελίδα υδατικού συστήματος.

6.4 Κύρια φόρμα - σελίδα υδατικού συστήματος

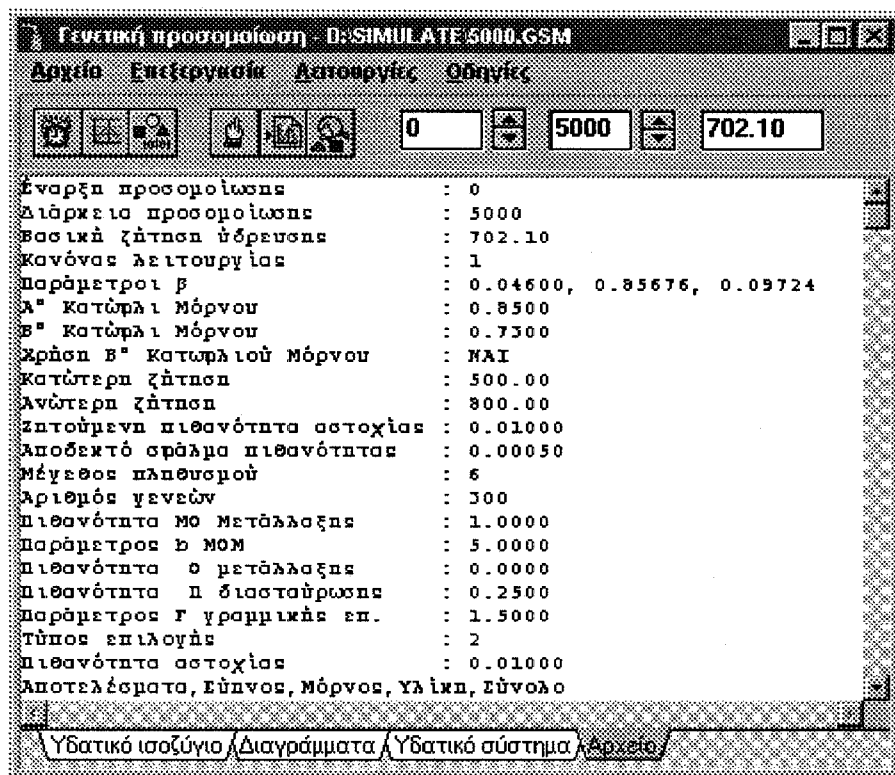
Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφουμε τα πεδία που εμφανίζονται όταν στην κύρια φόρμα του προγράμματος είναι ορατή η σελίδα υδατικού συστήματος.

Χάρτης υδατικού συστήματος

Στο χάρτη αυτό απεικονίζεται η Στερεά Ελλάδα και τονίζονται οι θέσεις των τριών ταμιευτήρων (Ευήνου, Μόρνου και Υλίκης) και οι χώροι των δύο κύριων καταναλώσεων που είναι η Αθήνα (ύδρευση) και η Κωπαΐδα (άρδευση).

Πλήκτρα ταμιευτήρων

Πατώντας το πλήκτρο ενός ταμιευτήρα εμφανίζεται η φόρμα με τα δομικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα (καμπύλες στάθμης-όγκου, χωρητικότητες κλπ).



Εικόνα 5: Σελίδα αρχείου.

6.5 Κύρια φόρμα - σελίδα υδατικού ισοζυγίου

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφουμε τα πεδία που εμφανίζονται όταν στην κύρια φόρμα του προγράμματος είναι ορατή η σελίδα αρχείου.

Πεδίο αρχείου κειμένου

Στο πεδίο αυτό εμφανίζεται το αρχείο κειμένου που δημιουργεί το πρόγραμμα γενετικής προσομοίωσης. Το αρχείο αυτό δεν περιέχει πληροφορίες που δεν δίνονται σε άλλο πεδίο του προγράμματος. Όμως διατίθεται στο χρήστη για να του δοθεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης του κειμένου και χρήσης του σε άλλα έγγραφα.

Δεδομένα ταμιευτήρα

Ταμιευτήρας: **Εύηνος**

Χωρητικότητα (hm³): **131.40**

Νεκρός όγκος (hm³): **27.70**

Καμπύλη:

- ☐ Στάθμης - Όγκου
- ☐ Στάθμης - Επιφανείας
- ☒ Στάθμης - Παροχής

Στάθμη (m)	Παροχή (m ³ /s)
455.00	0.00
460.00	15.00
470.00	18.80
480.00	21.60
490.00	24.70

Εξόδος

Εικόνα 6: Φόρμα δεδομένων ταμιευτήρα.

6.6 Φόρμα δεδομένων ταμιευτήρα

Στη φόρμα αυτή εμφανίζονται τα δομικά χαρακτηριστικά των τριών ταμιευτήρων (Ευήνου, Μόρνου και Υλίκης).

Κατάλογος επιλογής ταμιευτήρα

Στον κατάλογο αυτό μπορείτε να επιλέξετε τον ταμιευτήρα του οποίου τα δομικά χαρακτηριστικά θέλετε να δείτε.

Χωρητικότητα

Στο πεδίο αυτό εμφανίζεται η συνολική χωρητικότητα του ταμιευτήρα, εκφρασμένη σε εκατομύρια κυβικά μέτρα.

Νεκρός όγκος

Στο πεδίο αυτό εμφανίζεται ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα εκφρασμένος σε εκατομύρια κυβικά μέτρα.

Καμπύλη

Στο πεδίο αυτό μπορείτε να επιλέξετε τον τύπο της καμπύλης που εμφανίζεται στον αντίστοιχο πίνακα. Υπάρχουν διαθέσιμα τρία είδη καμπύλης: Στάθμης-Όγκου, Στάθμης-Επιφάνειας και Στάθμης-Παροχεταιυτικότητας.

Πίνακας καμπύλης

Στον πίνακα αυτόν εμφανίζονται οι τεταγμένες της επιλεγμένης καμπύλης του ταμιευτήρα. Η στάθμη εκφράζεται σε μέτρα, ο όγκος εκφράζεται σε εκατομμύρια κυβικά μέτρα, ενώ η παροχαρακτηριστικότητα εκφράζεται σε κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο.

	b[i]
Εύηνος	0.046000
Μόρνος	0.856760
Υάλη	0.097240

Εικόνα 7: Φόρμα παραμέτρων κανόνα απόληψης.

6.7 Φόρμα κανόνα απόληψης (Επεξεργασία|Κανόνας απόληψης...)

Στη φόρμα του κανόνα απόληψης μπορείτε να επιλέξετε τον τύπο και τις παραμέτρους του κανόνα απόληψης. Υπάρχουν τρεις διαθέσιμες κατηγορίες κανόνων. Μπορείτε να επιλέξετε μία από τις αμοιβαία αποκλειόμενες επιλογές: *Τροποποιημένος χωρικός κανόνας*, *Προτεραιότητα Υλίκης* και *Α' βαθμίδα στο Μόρνο*. Η επιλογή *Προτεραιότητα Υλίκης* οδηγεί (ανάλογα με τιμές άλλων πεδίων) σε δύο δυνατούς τύπους κανόνα: την *Απόλυτη προτεραιότητα Υλίκης* και την *Απόλυτη προτεραιότητα Υλίκης με κατώφλι στο Μόρνο* για τις εισροές από τον *Εύηνο*.

Αντίστοιχα, η επιλογή *Α' βαθμίδα στο Μόρνο* οδηγεί σε δύο δυνατούς τύπους κανόνα, τη *Σχετική προτεραιότητα Υλίκης με κατώφλι στο Μόρνο* για τις εισροές από τον *Εύηνο* και τη *Σχετική προτεραιότητα Υλίκης*.

Τροποποιημένος χωρικός κανόνας

Η επιλογή αυτής της κατηγορίας οδηγεί πάντα στον τροποποιημένο χωρικό κανόνα,

του οποίου τη θεωρητική τεκμηρίωση μπορείτε να βρείτε στο Κεφάλαιο 3.

Παράμετροι b τροποποιημένου χωρικού κανόνα

Στον πίνακα των παραμέτρων του τροποποιημένου χωρικού κανόνα μπορείτε να τροποποιήσετε τους συντελεστές b για κάθε ταμιευτήρα. Θεωρητική ανάλυση των παραμέτρων b και του τροποποιημένου χωρικού κανόνα μπορείτε να βρείτε στο Κεφάλαιο 3. Εδώ απλώς θα υπενθυμίσουμε ότι το άθροισμα των b_i πρέπει να ισούται με μονάδα και ότι, γενικά, όσο μικρότερο είναι το b ενός ταμιευτήρα τόσο το σύστημα λειτουργικής προσομοίωσης αποπειράται να κάνει μεγαλύτερες απολήψεις από αυτόν.

Προτεραιότητα Υλίκης

Αυτή η επιλογή κατηγορίας οδηγεί σε δύο κανόνες:

Εάν είναι επιλεγμένη η B' βαθμίδα στο Μόρνο τότε ο ισχύων κανόνας είναι η *Απόλυτη προτεραιότητα Υλίκης με κατώφλι στο Μόρνο για τις εισροές από τον Εύηνο*.

Εάν δεν είναι επιλεγμένη η B' βαθμίδα στο Μόρνο τότε ο ισχύων κανόνας είναι η *Απόλυτη προτεραιότητα Υλίκης*.

Και οι δύο κανόνες περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

A' βαθμίδα στο Μόρνο

Αυτή η επιλογή κατηγορίας οδηγεί σε δύο κανόνες:

Εάν είναι επιλεγμένη η B' βαθμίδα στο Μόρνο τότε ο ισχύων κανόνας είναι η *Σχετική προτεραιότητα Υλίκης με κατώφλι στο Μόρνο για τις εισροές από τον Εύηνο*.

Εάν δεν είναι επιλεγμένη η B' βαθμίδα στο Μόρνο τότε ο ισχύων κανόνας είναι η *Σχετική προτεραιότητα Υλίκης*.

Και οι δύο κανόνες περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Το πεδίο που περιέχει την αριθμητική τιμή της A' βαθμίδας στο Μόρνο δέχεται τιμές στο διάστημα $[0, 1]$ και εκφράζει ποσοστό του ενεργού όγκου του Μόρνου. Όταν το απόθεμα στο Μόρνο ξεπερνάει το ποσοστό της A' βαθμίδας τότε η απόληψη για την ύδρευση της Αθήνας γίνεται από τα αποθέματα του Μόρνου, διαφορετικά γίνεται

από την Υλίκη. Ο παραπάνω κανόνας μπορεί να παραβιαστεί από το πρόγραμμα λειτουργικής προσομοίωσης μετά από έλεγχο υπερχειλίσης στο Μόρνο και την Υλίκη.

B' βαθμίδα στο Μόρνο

Η επιλογή ή όχι της B' βαθμίδας στο Μόρνο προσθέτει ή αφαιρεί στον κανόνα απόληψης το *κατώφλι στο Μόρνο για τις εισροές από τον Εύηνο*. Λεπτομέρειες για τους κανόνες απόληψης θα βρείτε στο Κεφάλαιο 3.

Το πεδίο που περιέχει την αριθμητική τιμή της B' βαθμίδας στο Μόρνο δέχεται τιμές στο διάστημα [0, 1] και εκφράζει ποσοστό του ενεργού όγκου του Μόρνου. Όταν το απόθεμα στο Μόρνο ξεπερνάει το ποσοστό της B' βαθμίδας, τότε σταματάει η ροή νερού από τον Εύηνο προς το Μόρνο, διαφορετικά η ροή νερού από τον Εύηνο προς το Μόρνο πραγματοποιείται αξιοποιώντας όλη την μεταφορική ικανότητα του αντίστοιχου υδραγωγείου. Ο παραπάνω κανόνας μπορεί να παραβιαστεί από το πρόγραμμα λειτουργικής προσομοίωσης μετά από έλεγχο υπερχειλίσης στο Μόρνο και στον Εύηνο.

Εικόνα 8: Φόρμα παραμέτρων αλγορίθμου προσέγγισης βέλτιστης ζήτησης.

6.8 Φόρμα παραμέτρων βέλτιστης ζήτησης (Επεξεργασία|Παράμετροι βέλτιστης ζήτησης...)

Στη φόρμα αυτή μπορείτε να ρυθμίσετε τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί η αριθμητική μέθοδος Regula-Falsi για να προσεγγίσει την ζήτηση για ύδρευση της

Αθήνας που αντιστοιχεί σε δεδομένη πιθανότητα. Λεπτομέρειες για τον ορισμό της πιθανότητας αστοχίας και την μέθοδο προσέγγισης της μπορείτε να βρείτε στο Κεφάλαιο 4.2 που αναφέρεται στη συνάρτηση αξιολόγησης του γενετικού αλγορίθμου και το Κεφάλαιο 6 που αναφέρεται στον αλγόριθμο προσέγγισης μέγιστης ζήτησης.

Ζητούμενη πιθανότητα αστοχίας

Σε αυτό το πεδίο ορίζεται η πιθανότητα αστοχίας που ζητούμε να δίνει το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε τη ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας που αντιστοιχεί σε αυτήν την πιθανότητα αστοχίας.

Αποδεκτό σφάλμα

Σε αυτό το πεδίο ορίζεται η αποδεκτή διαφορά στην προσέγγιση της ζητούμενης πιθανότητας αστοχίας.

Κατώτερη ζήτηση

Η μέθοδος Regula-Falsi ξεκινά την αναζήτηση υπολογίζοντας την πιθανότητα αστοχίας για μία δεδομένη ανώτερη και κατώτερη ζήτηση.

Ανώτερη ζήτηση

Η μέθοδος Regula-Falsi ξεκινά την αναζήτηση υπολογίζοντας την πιθανότητα αστοχίας για μία δεδομένη ανώτερη και κατώτερη ζήτηση.

Παράμετροι γενετικού αλγορίθμου

Μέγεθος πληθυσμού: 16

Αριθμός γενεών: 2000

Πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης: 1.0000

Παράμετρος b MDM: 5.00

Πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης: 0.0000

Πιθανότητα παράλληλης διασποράς: 0.2500

Παράμετρος F γραμμικής επιλογής: 1.50

☐ Αναλογική επιλογή ☒ Γραμμική επιλογή

☒ Αποδοχή ☐ Αγώρωση ☐ Οδηγίες

Εικόνα 9: Φόρμα παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου.

6.9 Φόρμα παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου

(Επεξεργασία|Παράμετροι γενετικού αλγορίθμου...)

Στη φόρμα αυτή μπορείτε να καθορίσετε τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος. Λεπτομερής περιγραφή των παραμέτρων αυτών δίνεται στο κεφάλαιο των γενετικών αλγορίθμων.

Μέγεθος πληθυσμού

Στο πεδίο αυτό δίνεται το μέγεθος του πληθυσμού του γενετικού αλγορίθμου. Όσο πιο μεγάλος είναι ο πληθυσμός τόσο περισσότερη ώρα διαρκεί η εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου. Δεν υπάρχει μονοσήμαντη σχέση μεταξύ του πληθυσμού και της ποιότητας της τελικής λύσης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο πληθυσμός τόσο μικρότερο γίνεται αυτό που στην ορολογία των γενετικών αλγορίθμων ονομάζεται *επιλεκτική πίεση*, το βέλτιστο μέγεθος όμως του πληθυσμού εξαρτάται και από τον αριθμό γενεών και από τις παραμέτρους των τελεστών ανασυνδυασμού.

Αριθμός γενεών

Στο πεδίο αυτό ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων του γενετικού αλγορίθμου.

Όσο περισσότερες επαναλήψεις τόσο πιο καλή θα είναι η τελική λύση και τόσο περισσότερη ώρα θα διαρκέσει η εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου.

Πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης

Σε αυτό το πεδίο ορίζεται η πιθανότητα με την οποία εφαρμόζεται ο τελεστής της μη ομοιόμορφης μετάλλαξης. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η πιθανότητα τόσο πιο μεγάλο είναι αυτό που στην ορολογία των γενετικών αλγορίθμων λέγεται *διαφορετικότητα του πληθυσμού*. Η διαφορετικότητα του πληθυσμού αποτελεί τον αντίποδα της επιλεκτικής πίεσης.

Παράμετρος b μη ομοιόμορφης μετάλλαξης

Η παράμετρος αυτή μας δίνει το βαθμό της μη ομοιομορφίας του τελεστή. Όσο πιο μεγάλη τιμή έχει αυτή η παράμετρος τόσο ο αλγόριθμος, με την πάροδο των γενεών, εκτελεί πιο λεπτομερειακή έρευνα.

Πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης

Σε αυτό το πεδίο ορίζεται η πιθανότητα με την οποία εφαρμόζεται ο τελεστής της ομοιόμορφης μετάλλαξης. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η πιθανότητα τόσο πιο μεγάλη είναι η διαφορετικότητα του πληθυσμού, η οποία αποτελεί τον αντίποδα της επιλεκτικής πίεσης. Η πιθανότητα αυτή δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη (συνήθως τιμή <0.01) γιατί αλλιώς παραβιάζεται ο θεμέλιος λίθος της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων που είναι το *θεώρημα του σχήματος*.

Πιθανότητα πολλαπλής διασταύρωσης

Σε αυτό το πεδίο ορίζεται η πιθανότητα εφαρμογής του τελεστή διασταύρωσης πολλαπλών σημείων. Η πιθανότητα αυτή δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη γιατί αλλιώς παραβιάζεται το *θεώρημα του σχήματος*.

Παράμετρος F γραμμικής επιλογής

Όταν η μέθοδος επιλογής είναι η γραμμική τότε η τιμή αυτού του πεδίου μας δίνει την αναμενόμενη τιμή του αριθμού των αντιγράφων του καλύτερου μέλους της κάθε γενεάς που επιλέγονται για ένταξη στον ενεργό πληθυσμό. Τα αντίγραφα αυτά

χρησιμοποιούνται για την αναπαραγωγή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτού του πεδίου τόσο μεγαλύτερη είναι η επιλεκτική πίεση και τόσο γρηγορότερη είναι η σύγκλιση του αλγορίθμου. Να υπενθυμίσουμε εδώ, ότι η υπερβολικά γρήγορη και η υπερβολικά αργή σύγκλιση δεν οδηγούν σε καλές λύσεις. Μία τιμή της παραμέτρου F στο διάστημα $[1.2 \ 1.8]$ δίνει μία λογική ταχύτητα σύγκλισης.

Αναλογική επιλογή

Ο γενετικός αλγόριθμος εκτελεί αναλογική επιλογή, έτσι όπως αυτή περιγράφεται το Κεφάλαιο 4 που αναφέρεται στο γενετικό αλγόριθμο.

Γραμμική επιλογή

Ο γενετικός αλγόριθμος εκτελεί γραμμική επιλογή, έτσι όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 που αναφέρεται στο γενετικό αλγόριθμο.

7. Αποτελέσματα πιλοτικής χρήσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δώσουμε μερικά παραδείγματα χρήσης του προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Τα παραδείγματα θα στηριχτούν στα αρχεία κειμένου τα οποία παράγονται από το πρόγραμμα. Το αρχεία αυτά τα έχουμε ενσωματώσει σχεδόν όπως είναι, με ελάχιστες παρεμβάσεις ως προς την παρουσίασή τους.

7.1 Πρώτη εφαρμογή - μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης

Στον Πίνακα 1 βλέπουμε το αρχείο με τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν από την πρώτη πιλοτική εφαρμογή.

Παράμετρος	Τιμή
Έναρξη προσομοίωσης	Έτος 0
Διάρκεια προσομοίωσης	Έτος 5000
Βασική ζήτηση ύδρευσης	705.0 hm^3 /έτος
Κανόνας λειτουργίας	Τροποποιημένος χωρικός
Παράμετροι b τροποποιημένου χωρικού κανόνα	0.20000, 0.55000, 0.25000
Πιθανότητα αστοχίας	0.05320

Πίνακας 1: Αρχείο κειμένου, αποτελεσμάτων προγράμματος γενετικής προσομοίωσης για την πρώτη εφαρμογή.

Στο παράδειγμα αυτό ορίσαμε το αρχικό έτος της προσομοίωσης και τη διάρκεια της. Κατόπιν ορίσαμε την ετήσια ζήτηση σε 705.0 hm^3 /έτος. Επιλέξαμε τον τροποποιημένο χωρικό κανόνα και ορίσαμε τις παραμέτρους του. Εκτελέσαμε το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης το οποίο υπολόγισε την πιθανότητα αστοχίας σε 0.05320. Η τιμή αυτή είναι εξαιρετικά υψηλή και για αυτό χρειάζεται να τροποποιηθούν οι παράμετροι του κανόνα. Αν και πάλι δεν είναι ικανοποιητική η πιθανότητα, θα πρέπει να ελαττωθεί η βασική ετήσια ζήτηση.

7.2 Δεύτερη εφαρμογή - γενετικός αλγόριθμος

Στο παράδειγμα αυτό, θελήσαμε να βρούμε τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του κανόνα του προηγούμενου παραδείγματος, χρησιμοποιώντας το γενετικό αλγόριθμο.

Παράμετρος	Τιμή
Έναρξη προσομοίωσης	Έτος 0
Διάρκεια προσομοίωσης	Έτος 5000
Βασική ζήτηση ύδρευσης	705.0 hm ³ /έτος
Κανόνας λειτουργίας	Τροποποιημένος χωρικός
Παράμετροι b τροποποιημένου χωρικού κανόνα	0.04600, 0.85676, 0.09724
Μέγεθος πληθυσμού	16
Αριθμός γενεών	400
Πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης	1.0000
Παράμετρος b μη ομοιόμορφης μετάλλαξης	5.0000
Πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης	0.0000
Πιθανότητα πολλαπλής διασταύρωσης	0.2500
Παράμετρος F γραμμικής επιλογής	1.5000
Τύπος επιλογής	Γραμμική
Πιθανότητα αστοχίας	0.01020

Πίνακας 2: Αρχείο κειμένου, αποτελεσμάτων προγράμματος γενετικής προσομοίωσης για τη δεύτερη εφαρμογή.

Ορίσαμε τις παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου: μέγεθος πληθυσμού, αριθμό γενεών, πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης, παράμετρος b μη ομοιόμορφης μετάλλαξης, πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης, πιθανότητα πολλαπλής διασταύρωσης, τύπο επιλογής και παράμετρο F γραμμικής επιλογής. Επιλέξαμε τον τροποποιημένο χωρικό κανόνα αλλά δεν ορίσαμε τις παραμέτρους του (αφήσαμε τυχαίες τιμές). Κατόπιν εκτελέσαμε το γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος υπολόγισε τις τιμές των παραμέτρων που βλέπουμε στον Πίνακα 2. Επίσης υπολόγισε ότι, για αυτές τις παραμέτρους του τροποποιημένου χωρικού κανόνα, το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης δίνει πιθανότητα αστοχίας 0.0102 που είναι σημαντικά μικρότερη από την πιθανότητα που μας έδιναν οι προηγούμενες παράμετροι. Παρ' όλα αυτά, θα θέλαμε η πιθανότητα αστοχίας να μην υπερβαίνει το 1%.

7.3 Τρίτη εφαρμογή - αλγόριθμος προσέγγισης μέγιστης ζήτησης

Σε αυτή την εφαρμογή, υπολογίσαμε την ετήσια ζήτηση που αντιστοιχεί στον κανόνα με τις παραμέτρους που βρήκε ο γενετικός αλγόριθμος και σε πιθανότητα αστοχίας

1% ακριβώς.

Παράμετρος	Τιμή
Έναρξη προσομοίωσης	Έτος 0
Διάρκεια προσομοίωσης	Έτος 5000
Βασική ζήτηση ύδρευσης	702.1 hm ³ /έτος
Κανόνας λειτουργίας	Τροποποιημένος χωρικός
Παράμετροι b τροποποιημένου χωρικού κανόνα	0.04600, 0.85676, 0.09724
Κατώτερη ζήτηση	500.00 hm ³ /έτος
Ανώτερη ζήτηση	800.00 hm ³ /έτος
Ζητούμενη πιθανότητα αστοχίας	0.01000
Αποδεκτό σφάλμα πιθανότητας	0.00050
Πιθανότητα αστοχίας	0.01000

Πίνακας 3: Αρχείο κειμένου, αποτελεσμάτων προγράμματος γενετικής προσομοίωσης για την τρίτη εφαρμογή.

Ορίσαμε τη ζητούμενη πιθανότητα αστοχίας, το αποδεκτό σφάλμα, την ανώτερη και κατώτερη ζήτηση. Κατόπιν, εκτελέσαμε τον αλγόριθμο προσέγγισης μέγιστης ζήτησης, ο οποίος υπολόγισε την τιμή της ζήτησης (702.1 hm³/έτος) που αναγράφεται στον Πίνακα 3. Για αυτήν τη ζήτηση το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης δίνει πιθανότητα αστοχίας ακριβώς 1%.

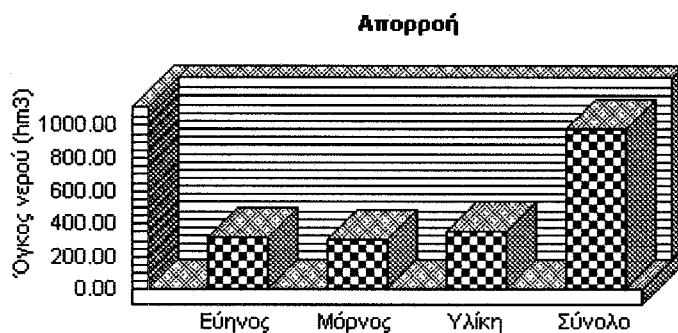
Υδατικό ισοζύγιο (hm ³)				
	Εύηνος	Μόρνος	Υλίκη	Σύνολο
Απορροή	321.143	311.041	353.246	985.430
Βροχή	3.945	27.040	7.941	38.926
Εξάτμιση	3.807	24.511	24.649	52.967
Διαρροή	0.000	12.678	96.162	108.840
Υπερχείλιση	74.778	31.170	4.279	110.227
Ύδρευση	0.000	516.216	187.357	703.573
Άρδευση	0.000	0.000	48.905	48.905
Ανταλλαγή	-246.491	246.491	0.000	0.000

Πίνακας 4: Αρχείο κειμένου με τα αποτελέσματα του υδατικού ισοζυγίου για την τρίτη εφαρμογή.

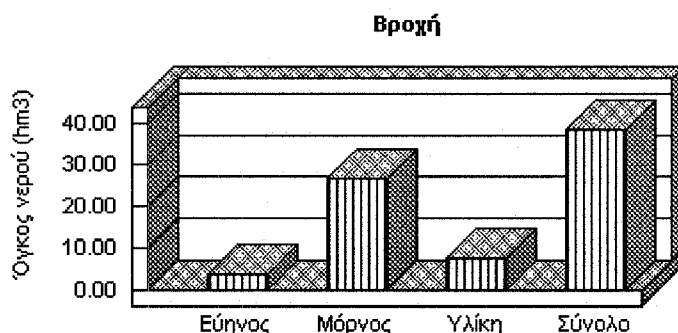
Στον Πίνακα 4 δίνουμε τα αποτελέσματα του υδατικού ισοζυγίου που προκύπτει από την λειτουργική προσομοίωση, με χρήση των παραμέτρων του κανόνα που βρήκε ο γενετικός αλγόριθμος και της ετήσιας ζήτησης που υπολόγισε ο αλγόριθμος προσέγγισης μέγιστης ζήτησης.

7.4 Διαγράμματα

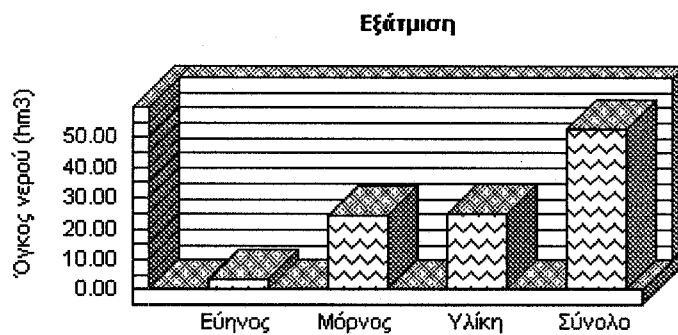
Ακολουθεί μία σειρά από διαγράμματα που αφορούν στο υδατικό ισοζύγιο του Πίνακα 4 που προκύπτει από την τρίτη πιλοτική εφαρμογή.



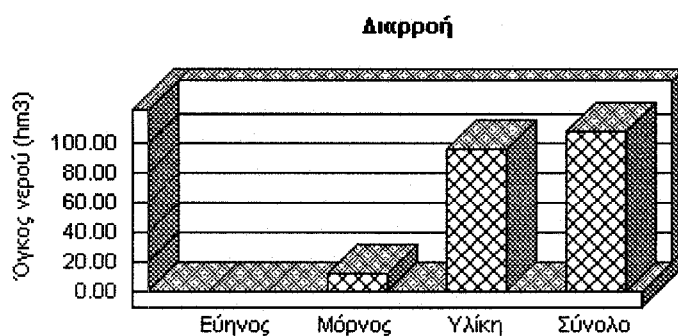
Διάγραμμα 1: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση 702.1 hm³/έτος, πιθανότητα αστοχίας 0.01.



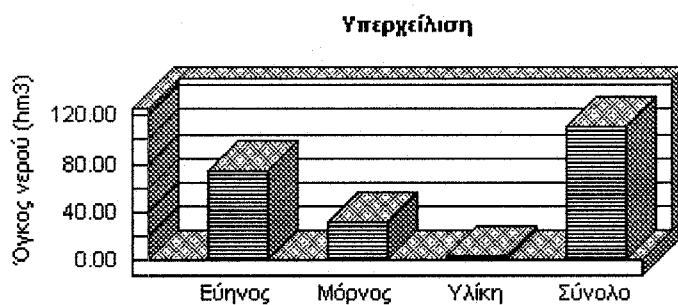
Διάγραμμα 2: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση 702.1 hm³/έτος, πιθανότητα αστοχίας 0.01.



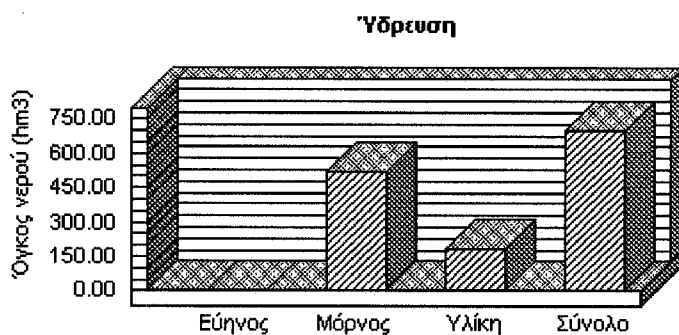
Διάγραμμα 3: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση $702.1 \text{ hm}^3/\text{έτος}$, πιθανότητα αστοχίας 0.01.



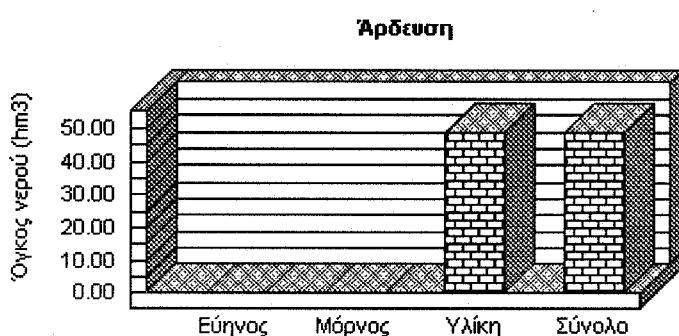
Διάγραμμα 4: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση $702.1 \text{ hm}^3/\text{έτος}$, πιθανότητα αστοχίας 0.01.



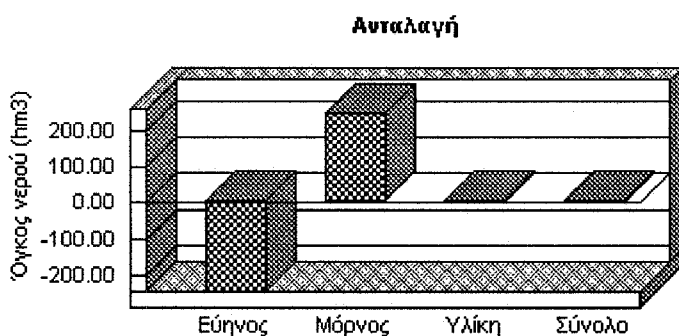
Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση $702.1 \text{ hm}^3/\text{έτος}$, πιθανότητα αστοχίας 0.01.



Διάγραμμα 6: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση $702.1 \text{ hm}^3/\text{έτος}$, πιθανότητα αστοχίας 0.01.



Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση $702.1 \text{ hm}^3/\text{έτος}$, πιθανότητα αστοχίας 0.01.



Διάγραμμα 8: Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογή προγράμματος γενετικής προσομοίωσης. Ζήτηση $702.1 \text{ hm}^3/\text{έτος}$, πιθανότητα αστοχίας 0.01.

Αναφορές

- Κουτσογιάννης, Δ., Μανέτας, Α., Μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών χρονοσειρών με απλή τεχνική επιμερισμού – Εγχειρίδιο χρήσης προγραμμάτος, Τεύχος 12 του ερευνητικού έργου “*Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*”, 1995.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1992.
- Nalbantis, I., and Koutsoyiannis, D., A heuristic rule for planning and management of multiple reservoir systems, submitted for publication in *Water Resour. Res.*, 1995.
- Ναλμπάντης, Ι., Μοντελοποίηση υδροδοτικού συστήματος, Τεύχος 14 του ερευνητικού έργου “*Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*”, Αθήνα, 1990.