

## Ανάπτυξη Προγράμματος Εκτίμησης της Αξιοπιστίας των Δικτύων Διανομής Νερού με Χρήση της Μεθόδου των Ελαχίστων Συνόλων Αποκοπής

**Σ. Γιαννόπουλος, Δ. Βοχαΐτης**

*Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών  
541 24 Θεσσαλονίκη*

### Περίληψη

Η μέθοδος των ελαχίστων συνόλων αποκοπής (cut-set method) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της τοπολογίας ενός δικτύου διανομής νερού και τον εντοπισμό των κρίσιμων στοιχείων αυτού, των οποίων η αστοχία θα επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στην καλή λειτουργία του. Για δίκτυα ύδρευσης με μικρό αριθμό αγωγών, η μέθοδος εφαρμόζεται εύκολα και ο υπολογισμός της μηχανικής αξιοπιστίας αυτών είναι απλός. Σε περίπτωση, όμως, πολύπλοκων δικτύων με μεγάλο αριθμό αγωγών, ο προσδιορισμός των ελαχίστων συνόλων αποκοπής και ο υπολογισμός της μηχανικής αξιοπιστίας τους είναι εξαιρετικά δύσκολος και απαιτεί πολύ χρόνο. Παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός προγράμματος εκτίμησης της αξιοπιστίας δικτύων διανομής νερού με τη χρήση της μεθόδου cut set, το οποίο είναι εύχρηστο και φιλικό στο χρήστη και έχει προγραμματιστεί σε γλώσσα Visual Basic.

## Developing a Computer Program for Estimating Water Distribution Systems Reliability Using the Minimum Cut-Set Method

**S. Yannopoulos, D. Vohaitis**

*Aristotle University of Thessaloniki  
Department of Rural and Surveying Engineering  
54124 Thessaloniki, Greece*

### Abstract

Minimum cut-set method is usually used in order to investigate the topology of a water distribution network and the detection of its critical elements whose failure will effect the network operation. The minimum cut-set method is applied easily to a water distribution network, which is composed of a small number of elements and so the calculation of mechanic reliability is simple. However, in case of a complicated water

distribution network with a large number of elements, the determination of minimum cut-set and the calculation of mechanic reliability of the network are exceptionally difficult and require a lot of time. In the present paper a computer program, which is developed in Visual Basic, is described which is easy to use and friendly to the user.

## 1. Εισαγωγή

Ο συνήθης σχεδιασμός ενός δικτύου ύδρευσης αποτελείται από τη διαμόρφωση του δικτύου, την επιλογή των διαμέτρων των αγωγών, την επιλογή του μεγέθους των δεξαμενών και των διαφόρων εγκαταστάσεων. Σύμφωνα με τους Alperovits and Shamir (1977), Lansey and Mays (1989), Eiger et al. (1994), Savic and Walters (1997), πρόκειται, συνήθως, για μια επαναληπτική διαδικασία με την οποία επιδιώκεται η αναζήτηση μιας βέλτιστης λύσης χαμηλού κόστους κατά το σχεδιασμό. Παρόλα αυτά όμως, δεν είναι βέβαιο το δίκτυο ύδρευσης που θα σχεδιαστεί ότι θα είναι αξιόπιστο (Mays, 1989), καθώς στην πραγματικότητα ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός δικτύου ύδρευσης είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που θα πρέπει να περιλαμβάνει την εξισορρόπηση όλων των σχετικών παραγόντων που αφορούν στο κόστος κατασκευής και στην αξιοπιστία του δικτύου (Xu and Goulter, 1999).

Η κατασκευή ή επέκταση ενός δικτύου ύδρευσης περιλαμβάνει σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίων, αλλά και σημαντικό κόστος για τη συνεχή λειτουργία, τη συντήρηση και την επισκευή του. Γι' αυτό το λόγο, λοιπόν, η μελέτη της αξιοπιστίας ενός δικτύου ύδρευσης πρέπει να είναι αναπόσπαστο τμήμα για αποφάσεις που αφορούν στο σχεδιασμό, στη λειτουργία, στη συντήρηση, στην επέκταση, στην αντικατάσταση και γενικότερα, στη διαχείριση του (Ostefeld, 2001). Όμως, λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, που οφείλεται στο μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων, πρέπει να επιδιώκονται αυτοματοποιημένες διαδικασίες που να οδηγούν σε αξιόπιστο σχεδιασμό του δικτύου με παράλληλη ελαχιστοποίηση του σχετικού κόστους.

## 2. Μηχανική αξιοπιστία - Μαθηματικό μοντέλο

Στα δίκτυα ύδρευσης μπορούν να λάβουν χώρα δύο διαφορετικοί τρόποι αστοχίας:

- α. Μηχανική αστοχία** (mechanical failure) ή *αστοχία εξαρτημάτων* (component failure), η οποία οφείλεται σε αστοχία των σωλήνων, των αντλιών, των βαλβίδων κ.λπ.
- β. Υδραυλική αστοχία** (hydraulic failure) ή *αστοχία απόδοσης* (performance failure), η οποία οφείλεται σε ανικανότητα του δικτύου να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της ζήτησης σχεδιασμού (Goulter et al., 2000). Στην περίπτωση της μηχανικής αξιο-

πιστίας τα μέτρα που χρησιμοποιούνται λαμβάνουν υπόψη τους μόνο τη σύνδεση μεταξύ των κόμβων και όχι τις υπηρεσίες που παρέχονται στους καταναλωτές, οι οποίες λαμβάνονται ως μέτρα κατά τον προσδιορισμό της υδραυλικής αξιοπιστίας. Συνεπώς, η μηχανική αξιοπιστία επικεντρώνεται στην αξιοπιστία των κλάδων ενός δικτύου, ενώ η υδραυλική αξιοπιστία στην αξιοπιστία των κόμβων αυτού.

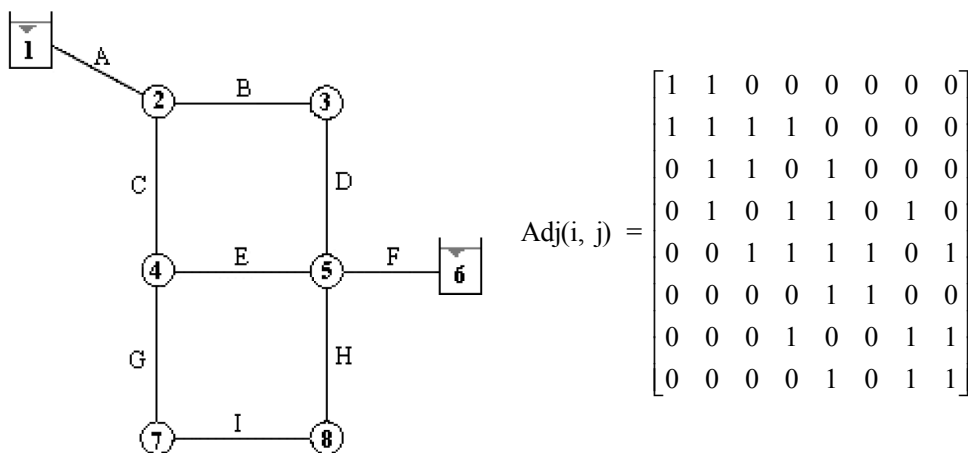
Ο εκτενέστερα χρησιμοποιούμενος τρόπος προσδιορισμού της μηχανικής αξιοπιστίας ενός δικτύου είναι αυτός που βασίζεται στην απαρίθμηση των ελαχίστων συνόλων αποκοπής (Fard and Lee, 1999). Η μέθοδος των ελαχίστων συνόλων αποκοπής εστιάζεται στο αν υφίσταται διαδρομή μεταξύ των κόμβων εισόδου και των κόμβων ζήτησης του δικτύου ύδρευσης και συνεπώς, η συνδετικότητα του δικτύου χρησιμοποιείται ως μέτρο για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του δικτύου.

Η μέθοδος των ελαχίστων συνόλων αποκοπής (minimum cut-set method) περιλαμβάνει την παραγωγή διαφόρων συνδυασμών αστοχίας εξαρτημάτων, οι επιδράσεις των οποίων θεωρείται ότι συμβαίνουν ξεχωριστά στο δίκτυο (Γιαννόπουλος και Βοχαΐτης, 2003), όπου ως αστοχίες του δικτύου θεωρούνται οι αστοχίες των επιμέρους εξαρτημάτων του δικτύου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι τα σύνολα αποκοπής σχετίζονται άμεσα με τους τρόπους αστοχίας του δικτύου και ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό πιθανών καταστάσεων (σεναρίων) στις οποίες το δίκτυο μπορεί να αστοχήσει (Tung, 1985). Για ένα μεγάλο σύστημα με πολλά υποσυστήματα σε αλληλεπίδραση, όπως είναι ένα δίκτυο ύδρευσης, είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσδιοριστούν τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής και να υπολογιστεί η μηχανική αξιοπιστία αναλυτικά. Ο ακριβής υπολογισμός της μηχανικής αξιοπιστίας απαιτεί την ακριβή γνώση της αξιοπιστίας των βασικών υποσυστημάτων και των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται το δίκτυο και τον αντίκτυπο όλων αυτών των πιθανών αστοχιών στην καλή λειτουργία του συστήματος.

### 3. Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος

Η συνδεσμολογία ενός δικτύου ύδρευσης δηλαδή η γειτνίαση των εξαρτημάτων του, αναπαρίσταται με την μορφή ενός πίνακα, που ονομάζεται *πίνακας γεγονότων*  $Adj(i, j)$  (adjacent matrix) και έχει διαστάσεις  $n \times n$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου. Τα στοιχεία, από τα οποία αποτελείται ο πίνακας αυτός, αντιπροσωπεύουν το γεγονός ο κόμβος  $i$  να είναι γειτονικός με τον κόμβο  $j$ , δηλαδή οι δύο κόμβοι να είναι αρχή και πέρασ του ίδιου αγωγού και παίρνουν τιμές  $\{0, 1\}$ . Όταν το γεγονός αυτό είναι αληθές (true), τότε το στοιχείο  $Adj(i, j)$  είναι μονάδα, ενώ στην περίπτωση που είναι ψευδές (false), τότε το στοιχείο αυτό είναι μηδέν. Τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα γεγονότων είναι μονάδες, καθώς όλοι οι κόμβοι θεωρούνται γειτονικοί με τον

εαυτό τους. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται ένα δίκτυο ύδρευσης με δύο βρόγχους και δύο δεξαμενές και ο αντίστοιχος βασικός πίνακας γεγονότων που το περιγράφει.



Σχήμα 1. Δίκτυο ύδρευσης δύο βρόγχων και ο αντίστοιχος πίνακας γεγονότων.

Ο πίνακας γεγονότων είναι πολύ σημαντικός στον προσδιορισμό των ελαχίστων συνόλων αποκοπής, γιατί αν υψωθεί σε δύναμη ίση με τον αριθμό των κόμβων, ο πίνακας που θα προκύψει έχει ως στοιχεία το γεγονός να υπάρχει διαδρομή μεταξύ των κόμβων που ορίζουν τα στοιχεία του. Αν το στοιχείο του πίνακα είναι μη μηδενικό υπάρχει διαδρομή, ενώ αν είναι μηδέν δεν υπάρχει. Επομένως, για να εξεταστεί εάν ένας συνδυασμός αγωγών αποτελεί σύνολο αποκοπής, αρκεί στον αρχικό πίνακα γεγονότων να αφαιρεθούν οι αγωγοί του συνδυασμού, εφόσον είναι σε αστοχία και δεν λειτουργούν, μηδενίζοντας τα κατάλληλα στοιχεία του πίνακα και να υψωθεί ο πίνακας αυτός στην κατάλληλη δύναμη. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται, εάν υφίσταται διαδρομή προς όλους τους κόμβους ζήτησης του δικτύου από τουλάχιστον έναν κόμβο εισόδου.

Το γεγονός ένας κόμβος ζήτησης να συνδέεται τουλάχιστον με ένα κόμβο εισόδου ελέγχεται στα στοιχεία του πίνακα, στα οποία τέμνονται η γραμμή που αντιστοιχεί στον κόμβο ζήτησης με τις στήλες που αντιστοιχούν στους κόμβους εισόδου του δικτύου. Σε περίπτωση που όλα τα στοιχεία είναι μηδενικά, τότε ο εξεταζόμενος συνδυασμός αγωγών είναι σύνολο αποκοπής, ενώ σε αντίθετη περίπτωση δεν είναι. Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία προσδιορισμού εξετάζονται οι παρακάτω δύο περιπτώσεις.

### Περίπτωση 1

Αν στο δίκτυο του Σχήματος 1 πρέπει να εξεταστεί, αν οι αγωγοί E και H αποτελούν ένα σύνολο αποκοπής, τότε στον πίνακα γεγονότων  $\text{Adj}(i, j)$  μηδενίζονται τα στοιχεία

με έντονο τόνο (4,5), (5,4), (5,8) και (8,5), που αντιστοιχούν στις συνδέσεις των δύο αυτών αγωγών (Σχήμα 2). Το δίκτυο έχει 8 κόμβους, οπότε ο πίνακας  $Adj(i, j)$  πρέπει να υψωθεί στην όγδοη δύναμη για να προκύψουν οι υφιστάμενες διαδρομές μέσα σε αυτό. Ο πίνακας που προκύπτει έχει όλα τα στοιχεία του μονάδα, οπότε ο συνδυασμός των αγωγών E και H **δεν αποτελεί σύνολο αποκοπής**.

### Περίπτωση 2

Στο ίδιο δίκτυο πρέπει να εξεταστεί, αν οι αγωγοί B και D αποτελούν ένα σύνολο αποκοπής, τότε στον πίνακα γεγονότων  $Adj(i, j)$  μηδενίζονται τα στοιχεία με έντονο τόνο (2,3), (3,2), (3,5) και (5,3), που αντιστοιχούν στις συνδέσεις των δύο αυτών αγωγών (Σχήμα 3). Το δίκτυο έχει 8 κόμβους, οπότε ο πίνακας πρέπει να υψωθεί στην όγδοη δύναμη για να προκύψουν οι υφιστάμενες διαδρομές μέσα σε αυτό. Οι κόμβοι εισόδου στο δίκτυο είναι οι κόμβοι 1 και 6, οπότε από το Σχήμα 3 φαίνεται ότι δεν υφίσταται διαδρομή που να συνδέει ένα από τους δύο κόμβους εισόδου με τον κόμβο ζήτησης 3. Επομένως ο συνδυασμός των αγωγών B και D **αποτελεί σύνολο αποκοπής**.

$$Adj(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \mathbf{0} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{0} & 1 & 1 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad Adj(i, j)^8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 2. Περίπτωση 1: Δεν αποτελεί σύνολο αποκοπής ο συνδυασμός των αγωγών E και H.

$$Adj(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \mathbf{0} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{0} & 1 & 0 & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{0} & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad Adj(i, j)^8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3. Περίπτωση 2: Ο συνδυασμός των αγωγών B και D αποτελεί σύνολο αποκοπής

Με βάση τη διαδικασία αυτή μπορούν να ελεγχθούν όλοι οι συνδυασμοί των αγωγών του δικτύου, ξεκινώντας από ένα αγωγό, δύο αγωγούς κ.ο.κ. έως τον αριθμό των συνδυαζόμενων αγωγών που έχει οριστεί εξ αρχής. Παράλληλα με τη διαδικασία αυτή εξετάζεται εάν το σύνολο αποκοπής, που προσδιορίζεται, είναι ελάχιστο σύνολο αποκοπής, οπότε και καταγράφεται.

## 4. Το πρόγραμμα Network Reliability

Ο προσδιορισμός των ελαχίστων συνόλων αποκοπής και ο υπολογισμός της μηχανικής αξιοπιστίας ενός πολύπλοκου δικτύου με μεγάλο αριθμό αγωγών είναι εξαιρετικά δύσκολος και απαιτεί πολύ χρόνο. Για το λόγο αυτό η διαδικασία προγραμματίστηκε σε Visual Basic, ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται εύκολα όσο πολύπλοκο και αν είναι το δίκτυο. Το παραθυρικό περιβάλλον στο οποίο τρέχει η εφαρμογή είναι εύχρηστο και φιλικό στο χρήστη και το πρόγραμμα ονομάστηκε *Network Reliability*.

Τα βασικά λειτουργικά αρχεία του προγράμματος είναι:

- α) Το Network Reliability.exe, το οποίο είναι το εκτελέσιμο (executable) αρχείο του προγράμματος.
- β) Το Data.mdb, που είναι η βάση δεδομένων της Access, στην οποία καταχωρούνται τα επεξεργασμένα δεδομένα της εφαρμογής και το οποίο μετά το τρέξιμο του προγράμματος συμπληρώνεται με τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής και τη μηχανική αξιοπιστία του δικτύου ύδρευσης.
- γ) Το Results.txt, το οποίο είναι το αρχείο όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης, δηλαδή τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής του δικτύου και η μηχανική αξιοπιστία αυτού.
- δ) Το Help Document.doc, το οποίο είναι ένα κείμενο βοήθειας, που περιγράφει τη λειτουργία του προγράμματος.

### 4.1. Διαμόρφωση αρχείου δεδομένων

Αρχικά, το δίκτυο απλοποιείται, με τη βοήθεια σχεδιαγράμματος, σε κόμβους και κλάδους, η αρίθμηση των οποίων πρέπει να είναι συνεχής, χωρίς να υπάρχουν κενά μεταξύ των αριθμών, γιατί αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την αναγνώριση της συνδεσμολογίας του δικτύου από το πρόγραμμα. Στη συνέχεια, πριν την εκκίνηση του προγράμματος, διαμορφώνονται τα δεδομένα της συνδεσμολογίας του δικτύου και της αξιοπιστίας των επιμέρους εξαρτημάτων του σε ένα φύλλο Excel, έτσι ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν από αυτό και να αποκλειστεί η πιθανότητα λάθους, που θα επιφέρει εσφαλμένα αποτελέσματα. Το αρχείο δεδομένων είναι ένας πίνακας

στο Excel, του οποίου η μορφή (format) απεικονίζεται στο Σχήμα 4.

|   | A      | B        | C        | D | E                   |
|---|--------|----------|----------|---|---------------------|
| 1 | Αγωγός | Κόμβος A | Κόμβος B |   | Πιθανότητα Αστοχίας |
| 2 | 1      | 1        | 2        | 1 | 0,018708            |
| 3 | 2      | 2        | 3        | 0 | 0,003670            |
| 4 | 3      | 3        | 5        | 0 | 0,003358            |
| 5 | 4      | 3        | 4        | 0 | 0,010409            |
| 6 | 5      | 5        | 6        | 0 | 0,000394            |
| 7 |        |          |          |   |                     |

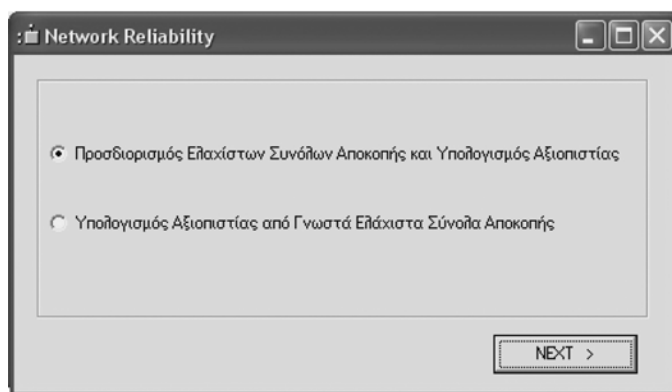
Σχήμα 4. Διαμόρφωση του αρχείου εισαγωγής των δεδομένων

Στην πρώτη στήλη του πίνακα αναγράφεται ο αύξων αριθμός του αγωγού, ενώ στη δεύτερη και τρίτη στήλη αναγράφονται η αρχή (κόμβος A) και το πέρας (κόμβος B) αυτού. Η τέταρτη στήλη συμπληρώνεται με 1, όταν ο κόμβος A (αρχή του αγωγού) είναι κόμβος εισόδου του δικτύου και με 0 σε αντίθετη περίπτωση. Για το λόγο αυτό, οι κόμβοι εισόδου του δικτύου πρέπει να σημειώνονται στη δεύτερη στήλη του αρχείου δεδομένων ως κόμβος A για να μπορεί το πρόγραμμα να τους αναγνωρίσει. Τέλος, στην πέμπτη στήλη του αρχείου εισάγεται η πιθανότητα αστοχίας του αγωγού.

## 4.2. Εκκίνηση του Network Reliability

Με την εκκίνηση του προγράμματος δίνεται η δυνατότητα δύο επιλογών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 δηλαδή:

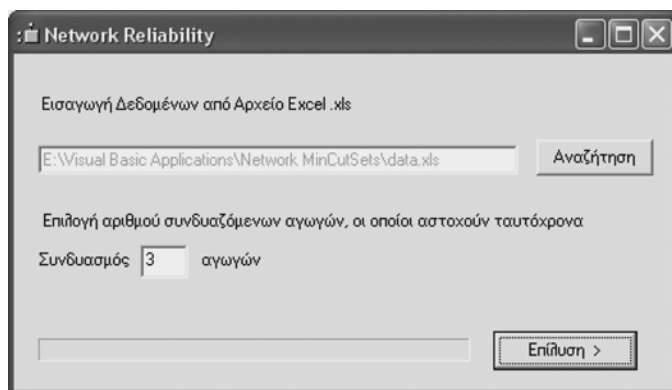
- α)** Προσδιορισμός Ελαχίστων Συνόλων Αποκοπής και Υπολογισμός Αξιοπιστίας, όπου προσδιορίζονται τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής του δικτύου και υπολογίζεται η μηχανική αξιοπιστία αυτού. Τα δεδομένα εισάγονται από το αρχείο δεδομένων .xls και στη συνέχεια, προσδιορίζονται τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής του δικτύου και υπολογίζεται η μηχανική αξιοπιστία του.
- β)** Υπολογισμός Αξιοπιστίας από Γνωστά Ελάχιστα Σύνολα Αποκοπής, όπου η μηχανική αξιοπιστία του δικτύου υπολογίζεται από ήδη γνωστά ελάχιστα σύνολα αποκοπής, τα οποία έχουν προσδιοριστεί με την πρώτη επιλογή. Η επιλογή αυτή είναι χρήσιμη στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να υπολογίσει την αξιοπιστία του δικτύου για διαφορετικές τιμές πιθανότητας αστοχίας των αγωγών δίχως να προσδιορίζονται και πάλι τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής του δικτύου, καθώς αυτό είναι μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία.



Σχήμα 5. Επιλογή διαδικασίας που θα εφαρμοστεί.

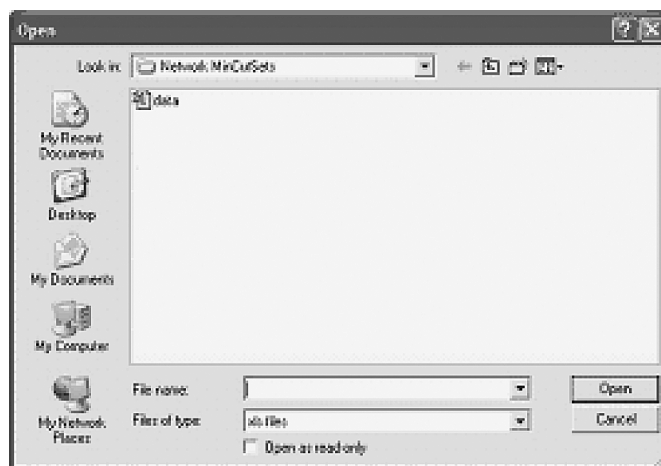
#### 4.2.1 Επιλογή 1<sup>η</sup>: Προσδιορισμός ελαχίστων συνόλων αποκοπής και υπολογισμός αξιοπιστίας

Ενεργοποιώντας την πρώτη επιλογή του Σχήματος 5, εμφανίζεται το παράθυρο εισαγωγής του αρχείου δεδομένων και επιλογής αριθμού συνδυαζόμενων αγωγών (μέχρι πόσοι αγωγοί είναι δυνατό να αστοχήσουν ταυτόχρονα) (Σχήμα 6). Επιλέγοντας *Αναζήτηση (Browse)* εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 7, από το οποίο επιλέγεται το αρχείο .xls (φύλλο Excel) με τα δεδομένα, το οποίο θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας του δικτύου. Το αρχείο .xls μπορεί να είναι αποθηκευμένο σε οποιοδήποτε φάκελο του υπολογιστή και όχι απαραίτητα στο φάκελο που έχει γίνει η εγκατάσταση του προγράμματος.



Σχήμα 6. Εισαγωγή του αρχείου δεδομένων και επιλογή αριθμού συνδυαζόμενων αγωγών που αστοχούν ταυτόχρονα.





Σχήμα 7. Επιλογή του αρχείου των δεδομένων της εφαρμογής.

Επιπλέον, στο παράθυρο του Σχήματος 6 γίνεται επιλογή του αριθμού των συνδυαζόμενων αγωγών, που είναι ο μέγιστος αριθμός αγωγών που θεωρείται ότι είναι δυνατό να βρίσκονται ταυτόχρονα σε κατάσταση αστοχίας. Η επιλογή του αριθμού αυτού επηρεάζει το χρόνο υπολογισμού, καθώς από τον αριθμό αυτό εξαρτώνται:

- α) Το πλήθος των συνδυασμών, που εξετάζονται, αν αποτελούν ελάχιστα σύνολα αποκοπής του δικτύου.
- β) Η ακρίβεια υπολογισμού της αξιοπιστίας του δικτύου.

Το πλήθος των συνδυασμών, οι οποίοι εξετάζονται, δίνεται από τη σχέση:

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των αγωγών του δικτύου και  $r$  είναι ο αριθμός των συνδυαζόμενων αγωγών.

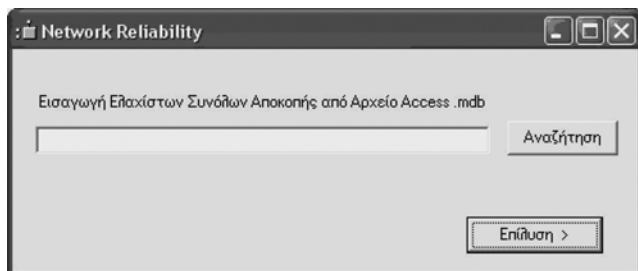
Επομένως, σε ένα δίκτυο 100 αγωγών το πλήθος των εξεταζόμενων συνδυασμών είναι 5.050 για συνδυασμούς έως 2 αγωγούς, 166.750 για συνδυασμούς έως 3 αγωγούς, 4.087.975 για συνδυασμούς έως 4 αγωγούς, κ.ο.κ. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, ότι το πλήθος των εξεταζόμενων συνδυασμών αυξάνεται ραγδαία με τον αριθμό των συνδυαζόμενων αγωγών, έχοντας δε υπόψη ότι για δίκτυο 100 αγωγών πραγματοποιείται περίπου 1,5 έλεγχος/s, είναι προφανές ότι ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται σημαντικά.

Έχοντας υπόψη ότι η διάρκεια επίλυσης ενός μεγάλου δικτύου με αρκετούς κόμβους είναι σημαντική, έχει τοποθετηθεί στο παράθυρο του Σχήματος 6 μια μπάρα προόδου της εφαρμογής (progress bar), η οποία δείχνει την πρόοδο της διαδικασίας.

Επιλέγοντας **Επίλυση** ξεκινάει η διαδικασία προσδιορισμού των ελαχίστων συνόλων αποκοπής και του υπολογισμού της αξιοπιστίας του δικτύου.

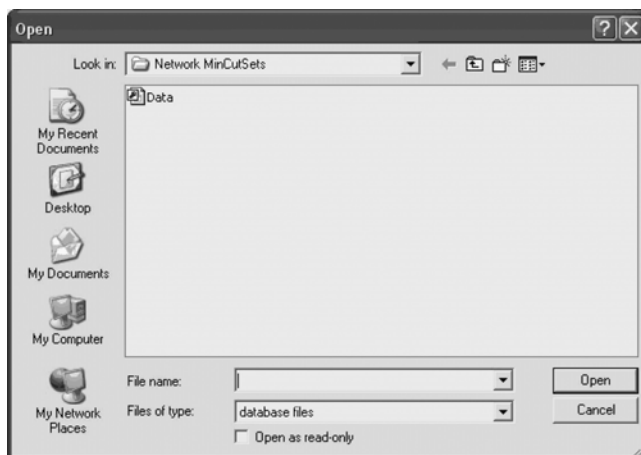
#### 4.2.2 Επιλογή 2<sup>η</sup>: Υπολογισμός αξιοπιστίας από γνωστά ελάχιστα σύνολα αποκοπής

Σε περίπτωση ενεργοποίησης της δεύτερης επιλογής του Σχήματος 5, εμφανίζεται το παράθυρο εισαγωγής του αρχείου της βάσης δεδομένων, στο οποίο είναι καταγεγραμμένα τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής και τα οποία έχουν προσδιοριστεί για το δίκτυο (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Εισαγωγή των ελαχίστων συνόλων αποκοπής από το αρχείο της βάσης δεδομένων.

Επιλέγοντας **Αναζήτηση** εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 9, από το οποίο επιλέγεται το αρχείο .mdb (βάση δεδομένων Access), στο οποίο είναι καταχωρημένα τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής, που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας του δικτύου. Επιλέγοντας **Επίλυση** ξεκινάει η διαδικασία υπολογισμού της αξιοπιστίας του δικτύου από τα ήδη γνωστά ελάχιστα σύνολα αποκοπής.



Σχήμα 9. Επιλογή του αρχείου που περιέχει τα ήδη γνωστά ελάχιστα σύνολα αποκοπής.

### 4.2.3 Υπολογισμός μηχανικής αξιοπιστίας

Τελικά, και από τις δύο περιπτώσεις καταλήγουμε στον υπολογισμό της μηχανικής αξιοπιστίας του δικτύου και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 10.



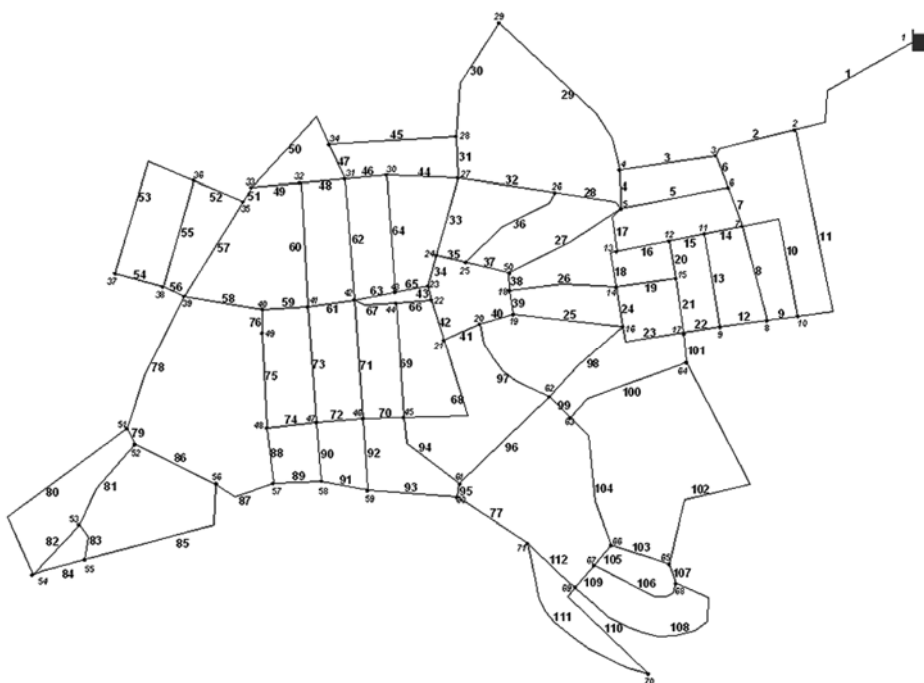
Σχήμα 10. Αποτελέσματα υπολογισμού της αξιοπιστίας του δικτύου.

Στο Σχήμα 10 δίνονται η αξιοπιστία του δικτύου, καθώς και το άνω και κάτω όριο αυτής. Τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής, καθώς και η αξιοπιστία, αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων και στο αρχείο results.txt, το οποίο βρίσκεται στο φάκελο εγκατάστασης του προγράμματος.

## 5. Εφαρμογή

Το πρόγραμμα Network Reliability εφαρμόστηκε στο κλειστό/κυκλοφοριακό δίκτυο του Σχήματος 11, το οποίο αποτελείται από 112 αγωγούς με συνολικό μήκος σωληνώσεων 7,610 km. Οι αγωγοί αυτοί σε ποσοστό 90,85% (6,913 km) είναι από αμιαντοσιμέντο, σε ποσοστό 5,65% (0,430 km) από χυτοσίδηρο και σε ποσοστό 3,50% (0,267 km) από PVC, με πιθανότητα αστοχίας 5,8 αστοχίες/100km/έτος, 35,9 αστοχίες/100 km/έτος και 0,7 αστοχίες/10 0km/έτος, αντίστοιχα.

Εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχίστων συνόλων αποκοπής για μέχρι 3 ταυτόχρονες αστοχίες αγωγών προσδιορίστηκαν 78 ελάχιστα σύνολα αποκοπής (Ε.Σ.Α.), που παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 1 και τα οποία αποτελούνται από συνδυασμό ενός αγωγού (1), δύο αγωγών (7) και τριών αγωγών (70). Η μηχανική αξιοπιστία του δικτύου είναι 0,9918 ή 99,18%.



Σχήμα 11. Δίκτυο ύδρευσης εφαρμογής

Πίνακας 1. Ελάχιστα σύνολα αποκοπής του δικτύου της εφαρμογής

| α/α | Ε.Σ.Α.  | α/α | Ε.Σ.Α.   | α/α | Ε.Σ.Α.   | α/α | Ε.Σ.Α.   | α/α | Ε.Σ.Α.      |
|-----|---------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|-------------|
| 1   | 1       | 17  | 12-13-22 | 33  | 42-43-66 | 49  | 66-67-69 | 65  | 93-95-113   |
| 2   | 2-11    | 18  | 13-14-15 | 34  | 44-46-64 | 50  | 74-75-88 | 66  | 94-95-96    |
| 3   | 29-30   | 19  | 15-16-20 | 35  | 45-47-50 | 51  | 74-76-88 | 67  | 99-100-104  |
| 4   | 52-56   | 20  | 16-17-18 | 36  | 48-49-60 | 52  | 78-79-80 | 68  | 99-101-113  |
| 5   | 53-54   | 21  | 19-20-21 | 37  | 49-50-51 | 53  | 78-85-86 | 69  | 100-101-102 |
| 6   | 75-76   | 22  | 25-39-40 | 38  | 51-52-57 | 54  | 78-88-89 | 70  | 102-103-107 |
| 7   | 78-87   | 23  | 26-38-39 | 39  | 51-56-57 | 55  | 79-80-87 | 71  | 102-104-113 |
| 8   | 110-111 | 24  | 27-37-38 | 40  | 51-58-78 | 56  | 79-81-86 | 72  | 103-104-105 |
| 9   | 2-3-6   | 25  | 28-32-36 | 41  | 51-58-87 | 57  | 80-81-85 | 73  | 105-106-109 |
| 10  | 2-9-10  | 26  | 29-31-45 | 42  | 52-53-55 | 58  | 80-82-84 | 74  | 105-107-113 |
| 11  | 3-4-29  | 27  | 30-31-45 | 43  | 52-54-55 | 59  | 81-82-83 | 75  | 106-107-108 |
| 12  | 3-4-30  | 28  | 33-34-35 | 44  | 53-55-56 | 60  | 83-84-85 | 76  | 108-109-113 |
| 13  | 3-6-11  | 29  | 34-43-65 | 45  | 54-55-56 | 61  | 85-86-87 | 77  | 110-112-113 |
| 14  | 5-6-7   | 30  | 35-36-37 | 46  | 58-59-75 | 62  | 87-88-89 | 78  | 111-112-113 |
| 15  | 8-9-12  | 31  | 40-41-97 | 47  | 58-59-76 | 63  | 89-90-91 |     |             |
| 16  | 9-10-11 | 32  | 41-42-68 | 48  | 63-64-65 | 64  | 91-92-93 |     |             |

## 6. Συμπεράσματα

Ο προσδιορισμός των ελαχίστων συνόλων αποκοπής σε πολύπλοκα δίκτυα ύδρευσης με μεγάλο αριθμό αγωγών είναι πολύ δύσκολος και χρονοβόρος, γι' αυτό η υπολογιστική διαδικασία προγραμματίστηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και προέκυψε το πρόγραμμα *Network Reliability*. Ο προγραμματισμός της μεθόδου είναι σχετικά απλός, βασίζεται στη θεωρία πινάκων και έγινε σε γλώσσα Visual Basic με τη χρήση ως βοηθητικών προγραμμάτων, για την διαχείριση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων, των MS Excel και την MS Access.

Το *Network Reliability* είναι ένα πολύ εύχρηστο πρόγραμμα, που παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να προσδιορίσει τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής και να υπολογίσει την μηχανική αξιοπιστία πολύπλοκων δικτύων. Μοναδικό πρόβλημα της εφαρμογής και γενικότερα της μεθόδου είναι η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου εξαιτίας του μεγάλου αριθμού συνδυασμών που ελέγχονται και ο οποίος μεγαλώνει όσο αυξάνονται ο αριθμός των αγωγών από τους οποίους αποτελείται το δίκτυο και ο αριθμός των στοιχείων των συνδυασμών που ελέγχονται.

### Βιβλιογραφία

1. Alperovits, E. and Shamir, U., 1977. *Design of optimal water distribution systems*. Water Resources Research, 13(6): 885-900.
2. Eiger, G., Shamir, U. and Be-Tal, A., 1994. *Optimal design of water distribution networks*. Water Resources Research, 30(9): 2637-2646.
3. Fard, N. S. and Lee, T.-H., 1999. *Cut set enumeration of network systems with link and node failures*. Reliability Engineering and System Safety, 65: 141-146.
4. Goulter, I., Thomas, M., Mays, W. L., Sakarya, B. Bouchart, F. and Tung, Y.K., 2000. *Reliability Analysis for Design*. In: W.L. Mays (Editor), *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, New York, pp. 18.1-18.51.
5. Lansley, K. E. and Mays, W. L., 1989. *Optimization model for water distribution system design*. Journal of Hydraulic Engineering, 115(10): 1401-1418.
6. Mays, W. L., 1989. *Reliability Analysis of Water Distribution Systems*. ASCE, New York, N.Y., pp. 532.
7. Ostefeld, A., 2001. *Reliability analysis of regional water distribution systems*. Urban Water, 3: 235-260.
8. Savic, D. and Walters, G., 1997. *Genetic algorithms for least-cost design of water distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, 123(2): 67-77.

9. Tung, Y. – K., 1985. *Evaluation of Water Distribution Network Reliability*. Proc. Int. Conf. Hydraulics and Hydrology in the small Computer Age, Vol. 1, ASCE, New York, N.Y., pp. 359-364.
10. Xu, C. and Goulter, C. I., 1999. *Reliability - based optimal design of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, 125(6): 352-362.
11. Γιαννόπουλος Σ. και Βοχαΐτης Δ., 2003. *Εκτίμηση της αξιοπιστίας των δικτύων ύδρευσης με τη μέθοδο των ελαχίστων συνόλων αποκοπής*. Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε, Θεσσαλονίκη: 293-300.