



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μοντελοποίηση της αποτελεσματικότητας συστημάτων
τεχνητού εμπλουτισμού SAT με χρήση Μπεϋζιανού
Δικτύου Πεποίθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δάβαρη Μαρία-Ελένη

Επιβλέπων: Δαμίγος Δημήτριος, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μοντελοποίηση της αποτελεσματικότητας
συστημάτων τεχνητού εμπλουτισμού SAT με χρήση
Μπεϋζιανού Δικτύου Πεποίθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δάβαρη Μαρία-Ελένη

Επιβλέπων: Δαμίγος Δημήτριος, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / /2018

Δαμίγος Δημήτρης, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Μενεγάκη Μαρία, Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Καλλιώρας Ανδρέας, Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

Copyright © Δάβαρη Μαρία-Ελένη, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων.....	2
1.3 Συστήματα SAT	6
2 Χρήση δικτύων σε ζητήματα λήψης απόφασης	10
2.1 Γνωστικοί Χάρτες	10
2.2 Ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα.....	12
2.3 Μπεϋζιανά δίκτυα πεποίθησης.....	14
2.3.1 Ορισμός.....	14
2.3.2 Εκμάθηση δομής.....	15
2.3.3 Συμπερασμός μη παρατηρήσιμων μεταβλητών.....	16
2.4 Προσεγγιστική επαγωγή συμπερασμάτων.....	17
2.4.1 Θεώρημα του Bayes.....	17
2.4.2 Μπεϋζιανή συμπερασματολογία	17
2.4.3 Παράδειγμα απλού BBN	19
2.5 Συγκριτική ανάλυση μεταξύ των τριών τύπων δικτύων	21
2.5.1 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ CM και BBN	22
2.5.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ CM και QPN	22
2.5.3 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ QPN και BBN	23
3 Σχεδιασμός γραφικών συστημάτων βασισμένων στη γνώση	24
3.1 Περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής.....	25
3.1.1 Φάση 1η: Κατασκευή του αρχικού γνωστικού χάρτη.....	25
3.1.2 Φάση 2η: Από το γνωστικό χάρτη στα ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα.....	27
3.1.3 Φάση 3η: Από τα ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα στα BBN	31
4 Εισαγωγή στο GeNIe	33
4.1 Βασικά στοιχεία του χώρου εργασίας	34
4.1.1 Τύποι κόμβων	35
4.1.2 Τόξα.....	36
4.1.3 Εικονίδια κατάστασης κόμβων	37

4.2	Απεικόνιση στοιχείων	40
4.3	Δύναμη επιρροής.....	41
4.4	Έλεγχος τιμών των μεταβλητών	42
4.5	Ανάλυση ευαισθησίας σε BBN.....	45
5	Κατασκευή απλοποιημένου BBN για έργα SAT	50
5.1	Δομικά στοιχεία του BBN του έργου SAT	50
5.2	Δομή και ανάπτυξη του BBN του έργου SAT	51
5.2.1	Δομή του μοντέλου.....	51
5.2.2	Ανάπτυξη του μοντέλου	52
5.2.3	Χρήση του μοντέλου BBN στην εξαγωγή συμπερασμάτων.....	54
5.2.4	Ανάλυση ευαισθησίας με χρήση του μοντέλου BBN.....	64
6	Συμπεράσματα.....	70
	Βιβλιογραφία.....	72
	Πηγές διαδικτύου.....	73
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	74

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί η μελέτη και η κατανόηση της επιτυχίας συστημάτων SAT στον τεχνητό εμπλουτισμό υδροφορέων, καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων με τη βοήθεια των Μπεϋζιανών δικτύων πεποίθησης.

Η διπλωματική εργασία δομείται ως ακολούθως:

- Στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρονται βασικά στοιχεία για τον τεχνητό εμπλουτισμό, εφαρμογές αυτού και μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα, με ειδικότερη αναφορά στα συστήματα SAT.
- Στο 2^ο κεφάλαιο αναφέρονται τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στη λήψη αποφάσεων με χρήση μεθόδων δικτύων, εστιάζοντας στα Μπεϋζιανά δίκτυα.
- Το 3^ο κεφάλαιο, κάνοντας χρήση των μεθόδων που περιγράφηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, παρουσιάζει τη γενική διαδικασία κατασκευής ενός αιτιώδους Μπεϋζιανού δικτύου, αξιοποιώντας τη γνώση και εμπειρία ενός ή περισσότερων ειδικών.
- Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά το λογισμικό GeNIe, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την ανάπτυξη του Μπεϋζιανού δικτύου.
- Στο 5^ο κεφάλαιο, που αποτελεί την «καρδιά» της διπλωματικής εργασίας, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του απλοποιημένου BBN για έργα SAT. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζονται οι παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη και οι μεταξύ τους σχέσεις. Ακολούθως, το μοντέλο χρησιμοποιείται για να εξαχθούν συμπεράσματα αναφορικά με το ρόλο κάθε παράγοντα στην επιτυχία του συστήματος SAT. Τέλος, πραγματοποιείται με τη βοήθεια του λογισμικού ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων, προκειμένου να εντοπιστούν οι κρισιμότερες εξ αυτών.
- Στο 6^ο κεφάλαιο η εργασία ολοκληρώνεται με τα κυριότερα συμπεράσματα.

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Δαμίγο Δημήτριο, Αναπλ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., και τον κ. Καλλιώρα Ανδρέα, Επίκ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, τη συνεχή καθοδήγηση τους και την συνεργασία που ανέπτυξαν μαζί μου. Ευχαριστώ επίσης την κα. Μενεγάκη Μαρία, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., μέλος της επιτροπής εξέτασης της διπλωματικής, για το χρόνο που διέθεσε για την αξιολόγηση της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λήψη μιας απόφασης αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Συχνά, υπάρχει ανάγκη γνώσης των παραμέτρων που επιδρούν στο πρόβλημα και κριτικής ανάλυσης αυτών. Αυτό το έργο δεν είναι καθόλου εύκολο καθώς στις μέρες μας τα προβλήματα γίνονται ολοένα και πιο σύνθετα. Σημαντική βοήθεια στον τομέα αυτόν μπορούν να προσφέρουν τα μοντέλα νοερής απεικόνισης, τα οποία κυρίως μέσω της κατασκευής δικτύων, παρέχουν δυνατότητα διαμόρφωσης και εξέτασης πολλών σεναρίων, συχνά και με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης. Ως εκ τούτου διευκολύνεται η διαδικασία λήψης απόφασης αν και προκύπτουν ερωτηματικά αναφορικά με την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου.

Στην παρούσα εργασία, αναγνωρίζοντας τη σημασία του τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων στην προστασία και ορθή διαχείριση των υπόγειων νερών, επιχειρείται η κατασκευή ενός μοντέλου λήψης απόφασης για έργα τεχνητού εμπλουτισμού με τη μέθοδο SAT. Το μοντέλο βασίζεται σε πέντε κύριους παράγοντες, την κοκκομετρία, την υδραυλική αγωγιμότητα, το πορώδες και το φυσικό δυναμικό απορρύπανσης της ακόρεστης ζώνης και την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων λυμάτων. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν το ρυθμό κατεΐσδυσης και την αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης και, συνεπακόλουθα, την επιτυχή έκβαση του προγράμματος του τεχνητού εμπλουτισμού.

Το μοντέλο αναπτύσσεται με τη βοήθεια ενός Μπεϋζιανού δικτύου πεποίθησης (Bayesian Belief Network – BBN), χρησιμοποιώντας το εξειδικευμένο λογισμικό GeNIe. Αν και το μοντέλο προσφέρει μια σχετικά απλοποιημένη απεικόνιση της σύνθετης πραγματικότητας, επιτρέπει τη μελέτη της επίδρασης των επιμέρους παραγόντων στο τελικό αποτέλεσμα και, συνεπώς, μπορεί να προσφέρει βοήθεια στη λήψη της τελικής απόφασης εκτιμώντας το βαθμό επιτυχίας έργων SAT υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

ABSTRACT

Decision-making processes hold certain difficulties, especially when dealing with difficult issues. Often, there is a need to know the parameters that affect the problem and critically analyze them. This work is not an easy task, as modern problems are becoming more and more complex. Significant help in this area can be provided by graph models, within which the relations between the elements of the model offer a "mental landscape" and provide the ability to configure and test many scenarios, often with the help of artificial intelligence. To this end, the decision-making process is facilitated, although questions arise as to the choice of the appropriate model.

The thesis, recognizing the importance of the artificial recharge of underground aquifers in the protection and proper management of groundwater resources, attempts to construct a decision-making model for managed aquifer recharge projects by means of Soil Aquifer Treatment (SAT) systems. The model is based on five key factors, namely particle size, hydraulic conductivity, porosity and geopurification potential of the unsaturated zone, as well as the quality of sewage used. These factors influence the infiltration rate and the effectiveness of natural decontamination process and, consequently, the successful outcome of the SAT system.

The model is developed based on Bayesian Belief Networks (BBNs) through a specialized software, namely GeNIe. Although the model offers a relatively simplified representation of the complex reality, it allows the study of the impact of individual factors on the final result and can therefore provide help in the decision-making process by assessing the degree of success of SAT projects under certain conditions.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το νερό αποτελεί τη βάση της ζωής στη Γη και, ως εκ τούτου, αναπόσπαστο παράγοντα καλής λειτουργίας του οικοσυστήματος. Παράλληλα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των υδατικών αποθεμάτων, επιφανειακών και υπόγειων, καταναλώνεται για ανθρώπινες χρήσεις, π.χ. άρδευση, ύδρευση, ψύξη βιομηχανικών μονάδων, κ.λπ. Επίσης, παρέχει στον άνθρωπο υπηρεσίες να αναψυχής, αθλητισμού, κ.ά.

Ωστόσο τα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα είναι περιορισμένα, καθώς μόλις το 2,5% των υδατικών πόρων είναι γλυκό νερό. Μάλιστα, το 68,7% του γλυκού νερού συναντάται σε μορφή πάγου στους πόλους και στις ορεινές περιοχές, το 29,9% είναι υπόγεια νερά και μόνο το 0,26% βρίσκεται επιφανειακά σε λίμνες, ποτάμια και ταμιευτήρες (Gleick, 1996). Έτσι, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων για νερό έχει αναγκάσει τη σύγχρονη κοινωνία να αντιμετωπίζει το νερό ως έναν πόρο υψηλής ζήτησης και όχι απλά ως ένα φυσικό που συντηρεί το οικοσύστημα από το οποίο εξαρτόμαστε (Πλιάκας και Διαμαντής, 1998).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, από πλευράς χρήσης, το υπόγειο νερό καλύπτει το 20% των ανθρώπινων αναγκών κατά μέσο όρο. Ωστόσο, πολλές περιοχές χρησιμοποιούν περισσότερο υπόγεια παρά επιφανειακά νερά ενώ άλλες βασίζονται αποκλειστικά στα υπόγεια νερά για την κάλυψη όλων των αναγκών τους. Έστω και περιστασιακά, το 70% της αντλούμενης ποσότητας των υπόγειων νερών χρησιμοποιείται στην αγροτική παραγωγή, ενώ εκτιμάται ότι τα υπόγεια νερά καλύπτουν επίσης το 50% των αστικών αναγκών (Giordano, 2009). Μάλιστα, σε ορισμένες περιοχές, όπως η Δανία, το Βέλγιο, η Αυστρία και η Σαουδική Αραβία, πάνω από το 90% του νερού προέρχεται από υδροφορείς (Zektser και Everett, 2004). Εκτιμάται δε ότι η βελτίωση των τεχνολογιών όρυξης και άντλησης θα αυξήσουν περαιτέρω τη χρήση των υπόγειων νερών.

Σε αντίθεση με τα επιφανειακά νερά, τα υπόγεια νερά είναι «αφανή» και τα προβλήματά τους αργούν να εκφραστούν με εύκολα αντιληπτό τρόπο (Γεωργίου-Γεωργιανάκος, 2017). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών αλλά και της ποσότητας αυτών, λόγω της υπεράντλησης.

Αυτές οι επιπτώσεις επηρεάζουν το σύνολο του των οικοσυστημάτων που βασίζονται στα υπόγεια νερά, καθώς και την ανθρώπινη ευημερία. Γίνεται επομένως εμφανές, ειδικά στο πλαίσιο της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και των παραγωγικών και καταναλωτικών απαιτήσεών του, ότι απαιτείται ορθολογική χρήση μέσα από βιώσιμες λύσεις, με αμοιβαία κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, που θα ικανοποιούν παρούσες και μελλοντικές ανάγκες (Γεωργίου-Γεωργιανάκος, 2017).

1.2 ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Μία διαφαινόμενη λύση στο ζήτημα της ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων και δη των υπόγειων φαίνεται να είναι η αποθήκευση ποσοτήτων νερού σε περιόδους που αυτό περισσεύει. Μέχρι σήμερα τα φράγματα αποτελούν την πιο διαδεδομένη λύση αποθήκευσης. Ωστόσο, η επιφανειακή αποθήκευση σε φράγματα αντιμετωπίζει διάφορα τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα (π.χ. τα φράγματα δεν μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλες πεδινές ή επίπεδες επιφάνειες και οι κατάλληλες θέσεις έχουν λιγοστέψει). Επομένως είναι ανάγκη να ενταθεί η υπόγεια αποθήκευση του νερού, αυξάνοντας έτσι τις διαθέσιμες ποσότητές του, με διαδικασίες εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός (Τ.Ε.) δίνει δυναμική λύση στο πρόβλημα εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών, προλαμβάνοντας ή ελαχιστοποιώντας την υπεράντληση και τα επακόλουθά της. Ο Τ.Ε. των υπόγειων νερών ή όπως λέγεται πλέον τα τελευταία χρόνια, η διαχείριση του εμπλουτισμού των υδροφόρων (MAR, management of aquifer recharge) μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια διαδικασία αύξησης της φυσικής ροής του επιφανειακού νερού προς τους υπόγειους υδροφορείς με την κατασκευή κατάλληλων έργων, την κατάκλιση με νερό ή τη μεταβολή των φυσικών συνθηκών (Todd and Mays, 2005).

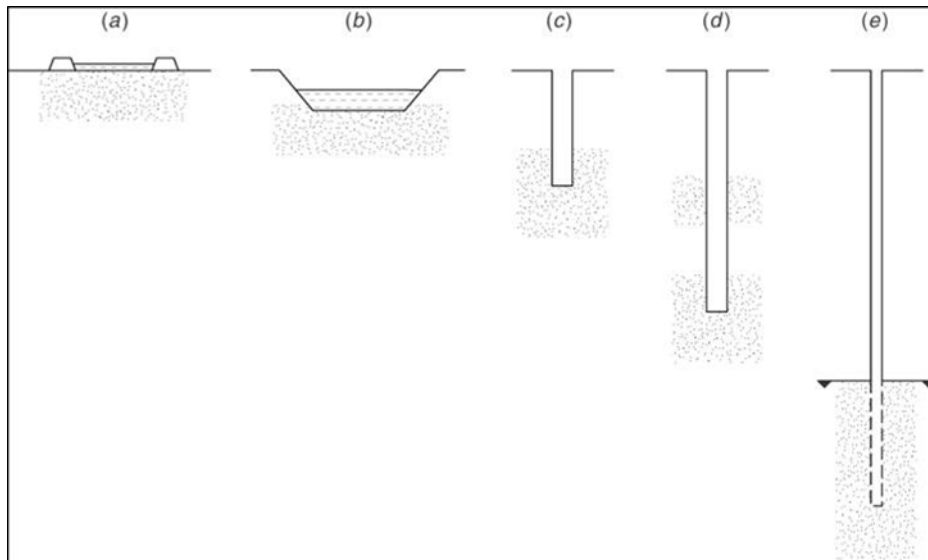
Ο Τ.Ε. έχει χρησιμοποιηθεί στο διεθνή κυρίως χώρο εδώ και 200 χρόνια περίπου, με ελάχιστες εφαρμογές στην Ελλάδα κατά τις τελευταίες δεκαετίες, σ' ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων, όπως (Franson, 1989) (Harraz, 1971) (Iihola, 1989) (Walton, 1970) (Wilson, 1985) (Todd and Mays, 2005) (Καλλέργης, 1986) (Aronovici et al, 1972):

- τη συνδυασμένη διαχείριση υπόγειων και επιφανειακών νερών,
- την αντιμετώπιση προβλημάτων που έχουν σχέση με την ποσότητα και την ποιότητα του υπόγειου νερού και τη διεύθυνση της θάλασσας,
- την αντιμετώπιση προβλημάτων καθίζησης του εδάφους,
- την επεξεργασία και αποθήκευση χρησιμοποιούμενων νερών προκειμένου να ξαναχρησιμοποιηθούν,
- τη διατήρηση ή αύξηση του φυσικού υπόγειου νερού ως οικονομικού πόρου,
- τη δημιουργία υπόγειας αποθήκευσης για τα εισαγόμενα στην κατά περίπτωση περιοχή νερά,
- την εξοικονόμηση ή παραγωγή ενέργειας με τη μορφή ζεστού ή κρύου νερού, τον έλεγχο των πλημμυρών,
- την άντληση πετρελαίου με μικρότερο κόστος,
- την ανάπτυξη καλλιεργειών,
- την αύξηση των ποσοτήτων ροής των υδρορρευμάτων,
- την αύξηση τροφοδοσίας των υδροφόρων στρωμάτων μετά από έμμεσα επιζήμια ανθρώπινη παρέμβαση (κατασκευή δρόμων ή αεροδρομίων, διευθετήσεις χειμάρρων, καταστροφές δασών).

Πολλές μέθοδοι Τ.Ε. έχουν αναπτυχθεί, όπως (Todd and Mays, 2005):

- Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στην επιφάνεια
 - Μέθοδος λεκάνης (basin method)
 - Μέθοδος τάφρων και αυλάκων (ditch and furrow method)
 - Μέθοδος πλημμύρας (flooding method)
 - Μέθοδος διευθέτησης υδρορρέυματος (stream-channel modification)
 - Επανενεργοποίηση ή αύξηση της ροής υδρορρέυματος (stream flow reactivation or augmentation)
 - Μέθοδος άρδευσης (irrigation method)
- Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στο υπέδαφος
 - Μέθοδος με φυσικά ανοίγματα (natural openings method)
 - Μέθοδος ορυγμάτων (pit method)
 - Μέθοδος αντίστροφης αποστράγγισης (reverse drainage method)

- Μέθοδος με γεωτρήσεις εμπλουτισμού (recharge well method)
- Μέθοδος με γεωτρήσεις αποθήκευσης - άντλησης (aquifer storage and recovery-ASR-wells)
- Μέθοδος με πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη (vadose zone wells)
- Συνδυασμοί επιφανειακού και υπεδάφικου εμπλουτισμού
 - Συνδυασμός λεκάνης εμπλουτισμού και αποστραγγιστικού δικτύου (combination of surface – subsurface recharge)
 - Συνδυασμός λεκανών και ορυγμάτων, εκσκαφών ή γεωτρήσεων (basins with pits, shafts, or wells)
- Μέθοδοι έμμεσου εμπλουτισμού
 - Επαγωγικός εμπλουτισμός (induce recharge)
 - Συμπτωματικός εμπλουτισμός (incidental recharge)
 - Διευθέτηση υδροφορέων (aquifer modification)
- Μέθοδοι εμπλουτισμού με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα
 - Συστήματα φυσικής επεξεργασίας μέσω του εδάφους-υδροφορέα (Soil-Aquifer Treatment Systems, SAT)
 - Γεωτρήσεις μετά από προηγμένες διαδικασίες καθαρισμού (Advanced Wastewater Treatment, AWT)

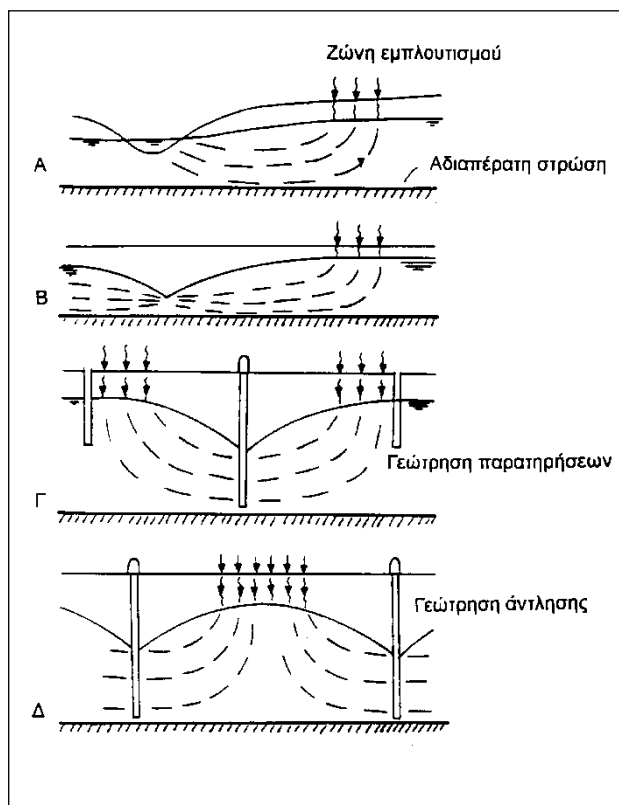


Σχήμα 1. Συστήματα εμπλουτισμού υδροφόρων σε διάφορα βάθη: (a) επιφανειακή λεκάνη κατάκλυσης, (b) λεκάνη κατάκλυσης μετά από εκσκαφή, (c) τάφος εμπλουτισμού, (d) φρεάτιο εμπλουτισμού στην ακόρεστη ζώνη, (e) γεώτρηση εμπλουτισμού (Todd and Mays, 2005) (Bouwer, Role of Groundwater Recharge in Treatment and Storage of Wastewater for Reuse., 1991).

Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου είναι συνάρτηση των γεωλογικών, μορφολογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της ευρύτερης περιοχής, της διαθεσιμότητας της περιοχής εφαρμογής του Τ.Ε., της προέλευσης, διαθεσιμότητας, φυσικής και χημικής ποιότητας του νερού εμπλουτισμού, της ύπαρξης ή δυνατότητας κατασκευής των βασικών απαραίτητων έργων υποδομής όπως και του κόστους χρήσης και συντήρησής τους, διαφόρων οικονομικών και νομικών παραγόντων και κριτηρίων (Καλλιώρας, 2016). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ωστόσο, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται αποκλειστικά στα συστήματα φυσικής επεξεργασίας μέσω του εδάφους-υδροφορέα (Soil-Aquifer Treatment Systems, SAT), τα οποία και περιγράφονται εκτενέστερα.

1.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SAT

Τα συστήματα SAT σχεδιάζονται και διαχειρίζονται έτσι ώστε ολόκληρη η ποσότητα του επεξεργασμένου λύματος που διηθείται μέσω των λεκανών διήθησης να ανακτάται με άντληση από γεωτρήσεις, μέσω στράγγισης ή μέσω διείσδυσης σε επιφανειακά νερά (Σχ. 2).



Σχήμα 2. Σχηματική παράσταση συστήματος SAT με φυσική ανάκτηση του νερού σε χειμάρρο ή άλλο υδατόρεμα, λίμνη ή υδρολεκάνη χαμηλότερου υψομέτρου (Α), συλλογή του νερού με υπόγεια στράγγιση (Β), άντληση μέσω κεντρικού φρέατος (Γ) άντληση μέσω περιφερειακών φρεάτων (Bouwer, Role of Groundwater Recharge in Treatment and Storage of Wastewater for Reuse., 1991).

Οι λεκάνες διήθησης πληρούνται διακεκομμένα και καθαρίζονται περιοδικά. Ο ρυθμός διήθησης είναι τυπικά μερικά δέκατα του μέτρου ανά ημέρα κατά την διάρκεια της κατάκλισης, και σε ετήσια βάση ο μέσος ρυθμός διήθησης είναι περίπου 50-100 m³ ανά έτος. Με αυτό τον ρυθμό διήθησης, μια λεκάνη διήθησης

έκτασης ενός εκταρίου μπορεί να διηθήσει από 0,5 έως 1,0 Mm³/έτος (Bouwer, 1993).

Η λειτουργία ενός συστήματος SAT εξαρτάται από την περιοχή εφαρμογής και έχει σχέση με την ποιότητα που αποβλήτου, το έδαφος, την υδρογεωλογία και το κλίμα. Οι δυνατές επιπτώσεις στην υγεία που μπορεί να έχει η χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων, αξιολογήθηκαν σε μια έρευνα που έγινε στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ τη δεκαετία του 80 με σκοπό να αναπτυχθούν κριτήρια για την επεξεργασία των αποβλήτων όταν χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό των υδροφορέων. Η έρευνα περιελάμβανε την ποιότητα του νερού, τη διήθηση, την ύπαρξη δεδομένων από την έκθεση του πληθυσμού και την επιδημιολογία. Το κυριότερο συμπέρασμα από την έρευνα ήταν ότι δεν αναφέρθηκαν μετρούμενες αρνητικές επιπτώσεις στα υπόγεια νερά ή στην υγεία του πληθυσμού, από την εφαρμογή επεξεργασμένων αποβλήτων για εμπλουτισμό (Asano and Levine, 1996). Γι' αυτό σε περιοχές στις οποίες δεν έχει εφαρμοσθεί ποτέ ένα σύστημα SAT, είναι αναγκαία η εγκατάσταση πιλοτικών ή πειραματικών μονάδων πριν την εγκατάσταση των μονάδων ευρείας εφαρμογής, για να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής και να σχεδιαστεί το σύστημα SAT για optimum λειτουργία. Πολύ προσοχή πρέπει να δοθεί στο σωστό σχεδιασμό και λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας των αποβλήτων.

Με βάση τα αποτελέσματα ερευνών για τυχόν επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία, έχει προταθεί στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ κανονισμός για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων ειδικά για εμπλουτισμό των υδροφορέων (Αγγελάκης κ.α. 1996). Ο προτεινόμενος κανονισμός αντιμετωπίζει το θέμα με βάση τις βραχυχρόνιες αλλά και τις μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία. Λεπτομερής αναφορά δίδεται σε μια σειρά αντικειμένων, όπως: (α) έλεγχος της πηγής, (β) διαδικασία επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων (γ) τα standards της μεθόδου επεξεργασίας (δ) τη μέθοδο εμπλουτισμού (ε) την περιοχή εμπλουτισμού (στ) την απόσταση διάνοιξης γεωτρήσεων και (ζ) τα φρεάτια ελέγχου ποιότητας. Ο κανονισμός καθορίζει ένα σύνολο συνθηκών που απαιτούνται για ένα αποδεκτό σχέδιο τεχνητού εμπλουτισμού με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Το βασικό στοιχείο που κυριαρχεί στην εφαρμογή του εμπλουτισμού των υδροφορέων με επεξεργασμένα

υγρά απόβλητα είναι οι πιθανές αρνητικές επιδράσεις στην υγεία από εισαγωγή παθογόνων ή ιχνοστοιχείων ή τοξικών στοιχείων στα υπόγεια νερά τα οποία καταναλώνονται ως πόσιμα από το κοινό (Asano and Levine, 1996).

Τα συστήματα SAT εκμεταλλεύονται τους φυσικούς μηχανισμούς των υπόγειων υδροφορέων για επεξεργασία, αποθήκευση και διακίνηση των επεξεργασμένων αποβλήτων. Το έδαφος και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα είναι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιβίωση των παθογόνων. Γι' αυτό η εκλογή της θέσης εφαρμογής ενός συστήματος SAT θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη ορισμένες συνθήκες κατάλληλες για το έδαφος και τον υδροφορέα.

Η βελτίωση της ποιότητας του νερού που προέρχεται από επεξεργασμένα λύματα επιτυγχάνεται καθώς το νερό κινείται δια μέσου της ακόρεστης ζώνης (vadose) του υδροφορέα προς τα υδρομαστευτικά έργα (Bouwer, 1993). Όταν το έδαφος έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά, με τη διαδικασία της διήθησης απομακρύνονται όλα τα στερεά, BOD και οι μικροοργανισμοί, η πλειονότητα των μετα-φωσφορικών και σημαντική ποσότητα αζώτου. Η διαδικασία απομάκρυνσης του αζώτου και των μικροοργανισμών πραγματοποιείται στο διηλεκές, ενώ άλλα συστατικά, όπως τα μέταλλα και τα φωσφορικά, μπορεί να συγκεντρώνονται στο έδαφος και στην ακόρεστη ζώνη. Ωστόσο, ο ρυθμός συγκέντρωσης είναι μάλλον αργός και ίσως να απαιτούνται δεκαετίες ή και αιώνες για να επηρεάσουν το πορώδες και την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους και επομένως την ικανότητα διήθησης της ακόρεστης ζώνης. Για αυτούς του λόγους τα συστήματα SAT έχουν συνήθως μακρά διάρκεια ζωής (Bouwer, 1991).

Τα συστήματα SAT απαιτούν διαπερατά εδάφη με υψηλή διηθητικότητα, ακόρεστη ζώνη χωρίς περιοριστικές στρώσεις ή άλλα προβλήματα, όπως ρυπασμένες ζώνες ή με ανεπιθύμητες χημικές ουσίες που είναι δυνατόν να υποστούν έκπλυση. Ο υδροφορέας πρέπει να είναι απεριόριστος με καλή ποιότητα νερού στην ανώτερη στάθμη. Μια ιδανική επιφάνεια εδάφους είναι ομοιόμορφη, με χονδρόκοκκο δομή ώστε να έχει υψηλή διηθητικότητα αλλά και με λεπτόκοκκα συστατικά για να έχει ικανοποιητική φίλτρανση. Τιμές διηθητικότητας από 25 mm/h ή υψηλότερες είναι αναγκαίες για ταχεία διήθηση. Γι' αυτό επιφανειακά εδάφη από αμμώδη πηλό, πηλό ή λεπτόκοκκο άμμο και

χαλίκια είναι προτιμότερα για τα συστήματα SAT. Πολύ χονδρόκοκκος άμμος και χαλίκια δεν είναι κατάλληλα, διότι επιτρέπουν τα απόβλητα να διέρχονται πολύ γρήγορα από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους, στο οποίο υπάρχει η κύρια βιολογική και χημική δραστηριότητα. Ομοιόμορφα εδάφη με βάθος πάνω από 3 m είναι τα πλέον κατάλληλα (Reed et al., 1995). Οριζόντια ή υπο-οριζόντια εδάφη είναι επιθυμητά για χρήση στις λεκάνες διήθησης, διότι ανασκαφές-επιχώσεις μπορεί να επηρεάσουν αντίστροφα την διηθητικότητα του επιφανειακού εδάφους (συνιστάται η κλίση να είναι μικρότερη του 5%).

Η επιβεβαίωση εδαφικών παραμέτρων και κυρίως της διηθητικότητας στην υπό σχεδιασμό θέση με επιτόπιες μετρήσεις είναι υποχρεωτικά για τον ορθό σχεδιασμό των συστημάτων SAT. Για να είναι δυνατός ο έλεγχος του επεξεργασμένου αποβλήτου μετά την επιφανειακή διήθηση και διείσδυση δια μέσου του μητρικού εδάφους, η σύσταση του υπεδάφους και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα πρέπει να είναι γνωστά. Η γνώση των μηχανισμών κυκλοφορίας του νερού στο εδαφικό προφίλ και στον υδροφορέα είναι αναγκαία πριν από το σχεδιασμό του συστήματος διήθησης (Reed et al., 1995).

2 ΧΡΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

Η λήψη αποφάσεων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς απαιτεί συχνά γνώσεις από διάφορους κλάδους, συμμετοχή από πολλούς εμπλεκόμενους φορείς, δεδομένα από ποικίλες πηγές και διαφορετικές επιστήμες. Αρκετές φορές τα σημαντικότερα προβλήματα οφείλονται στην ύπαρξη διαφορετικών συμφερόντων και απόψεων μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, με συνέπεια τη διαφορετική οπτική γωνία των προβλημάτων που πρόκειται να αντιμετωπιστούν και των λύσεων που προτείνονται προς την κατεύθυνση αυτή. Σε άλλες περιπτώσεις, οι δυσκολίες μπορεί να προκύπτουν από την πολυπλοκότητα του προβλήματος και την ανάγκη συνεκτίμησης μιας πλειάδας παραμέτρων.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον στη χρήση γραφικών μοντέλων για την αναπαράσταση των προβλημάτων και τη διευκόλυνση στη λήψη μιας απόφασης. Ακολουθως αναφέρονται εν συντομία τις τρεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην κατεύθυνση αυτή: οι γνωστικοί χάρτες (Cognitive Maps), τα ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα (Qualitative Probability Networks) και τα μπεϋζιανά δίκτυα πεποίθησης (Bayesian Belief Networks).

2.1 ΓΝΩΣΤΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ

Οι γνωστικοί χάρτες (εν συντομία CM) είναι διασυνδεδεμένα, κατευθυνόμενα, λογικά γραφήματα που αποτελούνται από κόμβους και ακμές / βέλη, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση απόψεων ενός ατόμου ή μιας ομάδας, διερευνώντας αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ σχετικών εννοιών (Kosko, 1986), Kandasamy and Smarandache, 2003) και έχουν ως βάση έχουν την Θεωρία Γράφων που διατύπωσε ο Euler το 1736 (Hasiloglu and Cinar, 2008). Ως εκ τούτου, οι γνωστικές χάρτες παρέχουν μια εικόνα των σχέσεων ανάμεσα στις σκέψεις και τα γεγονότα σε ένα συστηματικό πλαίσιο (Chandra & Newburry, 1997).

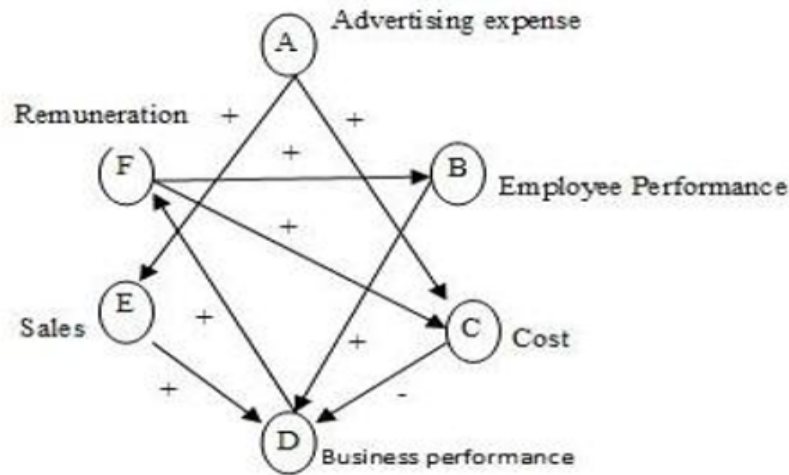
Οι γνωστικοί χάρτες είναι χρήσιμοι στην:

- Γνωστοποίηση-Ανταλλαγή ιδεών
- Σχεδίαση μιας πολύπλοκης δομής (μακροσκελή κείμενα, υπερμέσα, μεγάλες ιστοσελίδες κ.λπ.)

- Επικοινωνία μιας σύνθετης ιδέας
- Υποβοήθηση της εκμάθησης ενσωματώνοντας τη νέα με την παλιά γνώση
- Αξιολόγηση κατανόησης και διάγνωση της μη κατανόησης

Όπως αναφέρθηκε, οι γνωστικοί χάρτες αποτελούνται από μεταβλητές (κόμβοι) και αιτιώδεις σχέσεις (βέλη). Κάθε μεταβλητή συνδέεται με μία άλλη με θετική ή αρνητική πολικότητα στο χάρτη. Η πολικότητα μιας σχέσης μπορεί να καθοριστεί θέτοντας την ακόλουθη ερώτηση: η αιτία έχει θετική ή αρνητική επίδραση επί του αποτελέσματος; Μια θετική τιμή μεταξύ των εννοιών 1 και 2 σημαίνει ότι μια αύξηση στην έννοια 1 αυξάνει αιτιολογικά την έννοια 2, ενώ μία αρνητική τιμή μεταξύ των εννοιών 1 και 2 σημαίνει ότι μια αύξηση στην έννοια 1 μειώνει αιτιολογικά την έννοια 2. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να αναπτυχθεί μια δυαδική φόρμα σύγκρισης του γνωστικού χάρτη, όπου κάθε μεταβλητή συγκρίνεται με μια άλλη σύμφωνα με αιτιώδεις σχέσεις (βλ. π.χ. Σχ. 3).

Το μοντέλο ενός γνωστικού χάρτη ορίζει επίσης έναν μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων που συνίσταται στην διάδοση των επιδράσεων. Αυτή η διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων αποτελεί τη βάση της διαδικασίας υποστήριξης αποφάσεων. Ωστόσο, οι γνωστικοί χάρτες μπορούν να αναπαρασταθούν μόνο γραφικά και δε προάγουν μια αποτελεσματική αιτιολογία καθώς οι υπολογιστικές αναλύσεις δεν υποστηρίζονται όταν το μοντέλο δεν επεκτείνεται με μαθηματικές συναρτήσεις και ποσοτικά στοιχεία. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα βασικά μειονεκτήματα των γνωστικών χαρτών (ανάγκη για αναλυτικότερη αιτιολογία), υπήρξε ένας από τους λόγους όπου σχεδιάστηκαν τα ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα (Qualitative Probabilistic Networks) (Axelrod, 1976).



Σχήμα 3. Παράδειγμα γνωστικού χάρτη (Allard-Poesi, 1996)

2.2 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τα ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα (QPN για συντομία) είναι βασικά ποιοτικές αποδόσεις των BBN, τα οποία περιγράφονται αργότερα. Σχεδιάστηκαν για να διευκολύνουν τη γνωστική χαρτογράφηση μέσω της εξαγωγής συμπερασμάτων με αιτιολογικά διαγράμματα που βασίζονται σε σημάδια. Τα QPN χρησιμοποιήθηκαν και για να βελτιώσουν την ταχύτητα κατασκευής και τον υπολογισμό των μπεϋζιανών δικτύων, με γνώμονα το συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Τα QPN εισήχθησαν από τον Wellman (1990) και σχηματικά είναι ένα κατευθυνόμενο, λογικό γράφημα που αποτελείται από κόμβους και ακμές που περιγράφουν τις μεταξύ τους σχέσεις (Wellman, 1990).

Ένα QPN αποτελείται από ένα ακυκλικό διάγραμμα $G = (V(G) \cdot A(G))$ όπου το V είναι το σύνολο κόμβων στο γράφημα που αντιπροσωπεύει τις μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τον υπό εξέταση τομέα μελέτης. Το σύνολο των ακμών $A(G)$ μοντελοποιεί τις ανεξάρτητες σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών, ορίζοντας τα QPN ως διαγράμματα επίδρασης όπου οι αριθμητικοί πίνακες πιθανότητας αντικαθίστανται από ποιοτικές πιθανολογικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Αυτό το μοντέλο είναι ο συνδυασμός μεταξύ των ποιοτικών επιδράσεων και των συνεργειών που αντιπροσωπεύονται στο γράφημα με τις άμεσες ακμές και τις υπέρ-ακμές αντίστοιχα, στο γράφημα. Για να προσδιοριστεί ένα QPN, πρέπει να διακριθούν τρεις τύποι ποιοτικής πιθανοτικής σχέσης: οι ποιοτικές επιδράσεις, οι συνέργειες πρόσθετων και οι συνέργειες προϊόντων (Wellman, 1990).

Όλες οι ποιοτικές σχέσεις έχουν τη μορφή συνθηκών στη συγκριτική κατανομή πιθανοτήτων μιας μεταβλητής που παίρνει διάφορες τιμές. Έτσι, κάθε μεταβλητή έχει μια αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας ως συνάρτηση των προηγούμενων μεταβλητών. Στα δίκτυα QPN, μια ποιοτική σχέση περιέχει την τιμή αυτής της συνάρτησης χωρίς να την προσδιορίζει με ακρίβεια. Αυτός ο τύπος που ονομάζεται ποιοτική επίδραση, περιορίζει τις σχετικές τιμές μιας σωρευτικής εξαρτημένης συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων μιας μεταβλητής κατά την μεταβολή μιας από τις προηγούμενες.

Μια σχέση πρόσθετων συνεργειών αποσκοπεί στο να συνεκτιμήσει το γεγονός ότι μια αύξηση σε δύο μεταβλητές μαζί έχει μεγαλύτερη επίδραση σε υψηλότερο επίπεδο. Με άλλα λόγια, η συνδυασμένη επίδραση της αύξησης των μεταβλητών είναι μεγαλύτερη από τη λήψη των δύο ανεξάρτητων αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, η κοινή επίδραση των A και B στο C υποδηλώνει ότι η θετική συνέργεια των κόμβων A και B σε ένα κοινό κόμβο C (child) είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των ξεχωριστών επιπτώσεών τους, ανεξάρτητα από οποιαδήποτε άλλη άμεση επίδραση επί του C.

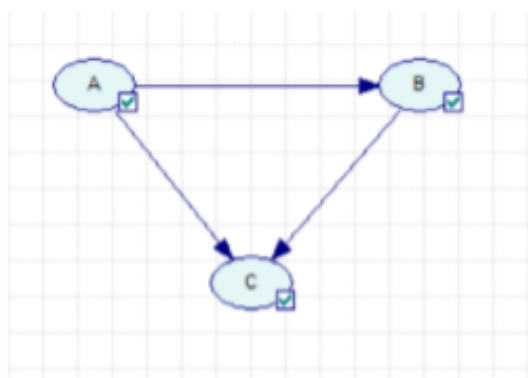
Τέλος, μια συνέργεια προϊόντος αποσκοπεί στο να καταγράψει το γεγονός ότι μια αύξηση σε μια μεταβλητή έχει μεγαλύτερη επίδραση στις τιμές ενός άλλου κόμβου, σε υψηλότερα επίπεδα πιθανοτήτων, όταν είναι γνωστή η τιμή για ένα κοινό κόμβο (child) στο δίκτυο. Για παράδειγμα, σε μια συνέργεια αρνητικού προϊόντος που εμφανίζεται από τους κόμβους A και B σχετικά με τη δοθείσα τιμή c_0 για τον κοινό κόμβο C θα παρατηρηθεί ότι υψηλότερες τιμές για τον κόμβο A καθιστούν τις υψηλότερες τιμές για τον κόμβο B λιγότερο πιθανές, ανεξάρτητα από οποιεσδήποτε άλλες επιδράσεις στο B και αντίστροφα.

2.3 ΜΠΕΥΪΖΙΑΝΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΠΟΙΘΗΣΗΣ

2.3.1 Ορισμός

Τα μπεύζιανά δίκτυα πεποίθησης (συνοπτικά BBN) είναι κατευθυνόμενα ακυκλικά γραφήματα που παρέχουν μια οπτική αναπαράσταση των άμεσων και έμμεσων αιτιωδών δεσμών μεταξύ των συνολικών μεταβλητών. Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τυχαίες μεταβλητές και συνδέονται με βέλη, οι οποίες αναπαριστούν άμεσες πιθανοτικές¹ εξαρτήσεις μεταξύ των μεταβλητών, προς μία κατεύθυνση. Αναλόγως με το πόσες μεταβλητές επηρεάζει μία ενδεχόμενη μεταβολή της τιμής της μιας μεταβλητής και του αντικτύπου που έχει στο τελικό αποτέλεσμα, προσδιορίζεται αν η μεταβλητή έχει μεγάλη ή μικρή δύναμη επιρροής (strength of influence) (Pearl,1988). Με λίγα λόγια η δομή ενός Bayesian δικτύου είναι μια γραφική, ποιοτική απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συνολικών μεταβλητών που διαμορφώνουν το δίκτυο.

Για παράδειγμα, στο Σχ. 4, ο κόμβος A επηρεάζει τον κόμβο B και ο κόμβος A και B επηρεάζουν τον κόμβο C. Ο κόμβος A επηρεάζει τον κόμβο C άμεσα και έμμεσα μέσω του κόμβου B. Το A αναφέρεται ως γονέας του κόμβου B και Γ, το B αναφέρεται ως παιδί του κόμβου A και γονέας του κόμβου C, το C είναι το παιδί των A και B. Ο κόμβος A είναι ο κόμβος εισόδου, ο κόμβος C η έξοδος.



Σχήμα 4. Παράδειγμα αλληλεπίδρασης BBN

¹ Πιθανοτικός: σχετικός με τις πιθανότητες, που αφορά δυνητικά εφικτό εύρος μελλοντικών εκδοχών γεγονότος, που αφορά εύρος πιθανών εκβάσεων βάσει αλγορίθμου ή βάσει συμπεράσματος από προηγούμενα αντίστοιχα γεγονότα, ο βασισμένος στην πιθανοτική θεωρία (θεωρία πιθανοτήτων) ή την πιθανοτική συλλογιστική (λογική, φιλοσοφία, επιστήμες) (μαθ.πιθανολογικός)

2.3.2 Εκμάθηση δομής

Τα πιθανοτικά γραφικά μοντέλα αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία μοντέλων πρόβλεψης δομής. Ειδικότερα, τα BBN και τα τυχαία πεδία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα για την επίλυση προβλημάτων πρόβλεψης δομής σε ένα ευρύ φάσμα τομέων εφαρμογών. Άλλοι αλγόριθμοι και μοντέλα πρόβλεψης δομής περιλαμβάνουν επαγωγικό λογικό προγραμματισμό, λογική των δικτύων Markov, υπό περιορισμούς υπό συνθήκη μοντέλα κ.ά. Παρομοίως με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως για εμποτευόμενη μάθηση, τα μοντέλα πρόβλεψης δομής συνήθως εκπαιδεύονται μέσω παρατηρούμενων δεδομένων, στα οποία η τιμή πραγματικής πρόβλεψης χρησιμοποιείται για να ορισθούν οι παράμετροι του μοντέλου. Λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου και τις αμοιβαίες σχέσεις των προβλεπόμενων μεταβλητών, η διαδικασία της πρόβλεψης με χρήση ενός εκπαιδευμένου μοντέλου και της κατάρτισης του εαυτού του είναι συχνά, υπολογιστικά, ανέφικτο και χρησιμοποιούνται μέθοδοι προσεγγιστικής επαγωγής συμπερασμάτων και μαθησιακές μέθοδοι (Αρβανίτης, 2015).

Τα BBN έχουν γίνει δημοφιλή για την ικανότητά τους να ενσωματώνουν την γνώση ειδικών σε ένα έμπειρο σύστημα. Μάλιστα, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που επιτυγχάνουν τη μάθηση των BBN από δεδομένα που είναι αρκετά αποτελεσματικές σε ορισμένα προβλήματα ανάλυσης δεδομένων. Υπάρχουν παρόλα αυτά αρκετοί τρόποι αναπαράστασης για ένα πρόβλημα ανάλυσης δεδομένων, όπως τα δέντρα, τα νευρωνικά δίκτυα, καθώς και αρκετές μέθοδοι για ανάλυση δεδομένων όπως η εκτίμηση πυκνότητας και η παλινδρόμηση. Τα χαρακτηριστικά όμως που διαχωρίζουν τα BBN από τις υπόλοιπες μεθόδους είναι ότι:

1. Τα BBN μπορούν εύκολα να αντιμετωπίσουν τα ελλιπή σύνολα δεδομένων. Όταν κάποιες παρατηρήσεις δεν είναι γνωστές, τότε οι περισσότερες μέθοδοι δίνουν μια λανθασμένη εκτίμηση γιατί δεν μπορούν να ενσωματώσουν το συσχετισμό μεταξύ των επεξηγηματικών μεταβλητών. Αντίθετα τα BBN προσφέρουν ένα φυσικό τρόπο να αντιμετωπίζουν τέτοιες εξαρτήσεις.
2. Τα BBN επιτρέπουν να εξετάσει κάποιος τις αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί βοηθά αφενός στην καλύτερη κατανόηση ενός προβλήματος και αφετέρου στο να γίνονται

προβλέψεις κατά τη διάρκεια παρεμβάσεων. Η σημασία της πρότερης γνώσης είναι μεγάλη, ειδικά όταν τα δεδομένα είναι σπάνια ή ακριβά. Κάποια συστήματα μπορούν μάλιστα να φτιαχτούν αποκλειστικά από πρότερη γνώση.

3. Οι Bayesian μέθοδοι σε συνδυασμό με τα BBN και άλλους τύπους μοντέλων προσφέρουν μια ικανοποιητική και βασική προσέγγιση ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική χρήση δεδομένων.

2.3.3 Συμπερασμός μη παρατηρήσιμων μεταβλητών

Επειδή ένα BBN είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τις μεταβλητές και τις μεταξύ τους σχέσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απαντήσει σε μια σειρά από ερωτήματα σχετικά με την πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων καταστάσεων. Για παράδειγμα, το BBN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η ενημερωμένη γνώση της κατάστασης ενός υποσυνόλου των μεταβλητών όταν παρατηρούνται συγκεκριμένες καταστάσεις σε άλλες μεταβλητές. Αυτή η διαδικασία υπολογισμού της εκ των υστέρων κατανομής των μεταβλητών βάσει αποδείξεων, ονομάζεται πιθανολογικός συμπερασμός. Η εκ των υστέρων κατανομή δίνει μια καθολική επαρκή στατιστική για εφαρμογές ανίχνευσης, όταν κάποιος θέλει να επιλέξει τιμές για ένα υποσύνολο μεταβλητών, οι οποίες ελαχιστοποιούν κάποια συνάρτηση αναμενόμενης απώλειας, όπως για παράδειγμα η πιθανότητα εσφαλμένης απόφασης. Ένα BBN, μπορεί να θεωρηθεί ένας μηχανισμός που εφαρμόζει αυτόματα το θεώρημα του Bayes σε σύνθετα προβλήματα.

Η χρήση των αιτιωδών BBN έχει έναν σημαντικό στόχο: γνωρίζοντας την αιτιώδη δομή ενός προβλήματος το BBN δίνει τη δυνατότητα υπολογισμών των πιθανοτήτων διαφόρων καταστάσεων. Στα BBN οι αιτιώδεις δομές βοηθούν στη λήψη χρήσιμων πληροφοριών, όπως τι θα συνέβαινε αν μεταβαλλόταν η κατάσταση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου. Αυτό επιτυγχάνεται με την αλλαγή της τιμής των υπό εξέταση μεταβλητών και την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων με τη βοήθεια της Bayesian στατιστικής, όπως περιγράφεται ακολούθως.

2.4 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

2.4.1 Θεώρημα του Bayes

Το θεώρημα (ή κανόνας) του Bayes για ένα διαμερισμό γεγονότων A_i , $i = 1, 2, \dots, N$, και ένα γεγονός B δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)} = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_{i=1}^N P(A_i|B)}$$

όπου: $P(A_i|B)$ είναι η δεσμευμένη πιθανότητα του A_i δεδομένου του B ή αλλιώς εκ των υστέρων πιθανότητα αφού εξαρτάται από τη δεδομένη τιμή του B , $P(B|A_i)$ είναι η δεσμευμένη πιθανότητα του B δεδομένου του A_i και $P(A_i)$ και $P(B)$ είναι η εκ των προτέρων γνωστές πιθανότητες του A_i και του B που είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.

2.4.2 Μπεϋζιανή συμπερασματολογία

Πριν από τον καθορισμό της Μπεϋζιανής συμπερασματολογίας θα πρέπει να εξεταστεί το ευρύτερο ζήτημα της στατιστικής συμπερασματολογίας. Πολλοί ορισμοί είναι δυνατοί, αλλά οι περισσότεροι καταλήγουν στην αρχή ότι η επαγωγική στατιστική είναι η επιστήμη της λήψης συμπερασμάτων σχετικά με τον «πληθυσμό» από ένα «δείγμα», για στοιχεία που προέρχονται από τον πληθυσμό αυτό. Αυτό από μόνο του εγείρει πολλά ερωτήματα σχετικά με το τι σημαίνει ο όρος 'πληθυσμός', πώς το δείγμα συνδέεται με τον πληθυσμό, πώς θα πρέπει να γίνει δειγματοληψία κ.λπ. (Μελιγκοτζίδου, 2008).

Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, ας υποθεθεί ότι εξετάζεται ένας πληθυσμός σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό. Επειδή δεν μπορεί να ληφθούν μετρήσεις του χαρακτηριστικού από όλο τον πληθυσμό, επιλέγεται ένα δείγμα μόνο από n άτομα αυτού με τυχαία δειγματοληψία, θεωρώντας ότι, αν θ είναι η αναλογία των ατόμων του πληθυσμού που έχουν το χαρακτηριστικό, τότε κάθε άτομο στο δείγμα θα έχει το χαρακτηριστικό, ανεξάρτητα από όλα τα άλλα, με πιθανότητα θ . Συμβολίζοντας με X την τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί στον αριθμό των ατόμων του δείγματος που έχουν το χαρακτηριστικό, θα χρησιμοποιήσει η παρατηρηθείσα τιμή $X = x$, για να εξαχθεί

ένα συμπέρασμα σχετικά με την παράμετρο θ του πληθυσμού. Αυτό το συμπέρασμα θα μπορούσε να λάβει τη μορφή εκτίμησης σημείου κι ενός διαστήματος εμπιστοσύνης (συνήθως 95%) ότι το θ βρίσκεται στο διάστημα αυτό. Επίσης, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ένας έλεγχος στατιστικής υπόθεσης (hypothesis test) ότι θ είναι μεγαλύτερο, μικρότερο ή ίσο με κάποια τιμή. Σε κάθε περίπτωση, η γνώση της παρατηρούμενης τιμής, του δείγματος, $X = x$, χρησιμοποιείται για να εξαχθούν συμπεράσματα για τον πληθυσμό ως προς το χαρακτηριστικό θ . Αυτά τα συμπεράσματα γίνονται καθορίζοντας ένα μοντέλο πιθανοτήτων, $f(x | \theta)$, το οποίο ορίζει τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται οι πιθανότητες των διαφορετικών τιμών του X .

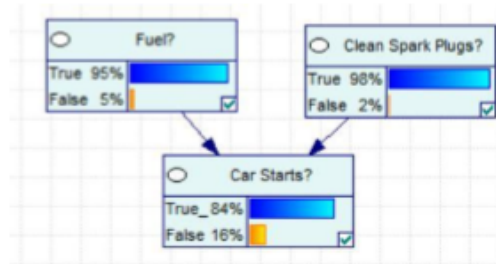
Σχετικά με την κλασική προσεγγιστική επαγωγή το πιο βασικό σημείο είναι ότι η παράμετρος θ , η οποία ενώ δεν είναι γνωστή αντιμετωπίζεται ως τέτοια παρά ως τυχαία. Το μόνο τυχαίο στοιχείο σε αυτό το μοντέλο πιθανοτήτων είναι τα δεδομένα. Αν εφαρμοστεί η διαδικασία 'πολλές φορές', τότε τα διαστήματα εμπιστοσύνης που κατασκευάζονται θα περιέχουν το θ στο 95% των περιπτώσεων.

Το γενικό πλαίσιο στο οποίο η Μπεϋζιανή συμπερασματολογία λειτουργεί είναι ταυτόσημο με το παραπάνω. Υπάρχει μια παράμετρος πληθυσμού θ για την οποία πρέπει να εξαχθούν συμπεράσματα, και ένας μηχανισμός πιθανότητας $f(x|\theta)$, ο οποίος καθορίζει την πιθανότητα παρατήρησης διαφορετικών καταστάσεων x , κάτω από διαφορετικές τιμές της παραμέτρου θ . Η θεμελιώδης διαφορά είναι, ωστόσο, ότι το θ αντιμετωπίζεται ως μια τυχαία μεταβλητή, οδηγώντας σε μια ουσιαστικά διαφορετική προσέγγιση στη στατιστική μοντελοποίηση και συμπερασματολογία.

Στην ουσία, το συμπέρασμα θα βασίζεται στο $f(\theta|x)$ αντί του $f(x|\theta)$, δηλαδή στην κατανομή πιθανότητας της παραμέτρου δεδομένων των στοιχείων, παρά σε αυτήν των στοιχείων δεδομένης της παραμέτρου. Για να επιτευχθεί αυτό, ωστόσο, είναι απαραίτητο να καθοριστεί μια εκ των προτέρων κατανομή πιθανότητας, $f(\theta)$, η οποία θα αντιπροσωπεύει τις πεποιθήσεις σχετικά με την κατανομή του θ πριν υπάρξει οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με τα δεδομένα. Αυτή η έννοια της εκ των προτέρων κατανομής για την παράμετρο θ βρίσκεται στο επίκεντρο της στατιστικής συμπερασματολογίας κατά Bayes.

2.4.3 Παράδειγμα απλού BBN

Το Σχ. 5 απεικονίζει ένα απλό BBN το οποίο προβλέπει αν ένα αυτοκίνητο θα ξεκινήσει ή όχι μέσα από μία απλοποιημένη εκδοχή της πραγματικότητας. Σε αυτό το παράδειγμα, η εκκίνηση του κινητήρα έχει δύο κόμβους-γονείς: (1) Υπάρχει καύσιμο και (2) Τα μπουζί είναι καθαρά. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε μεταβλητή έχει δύο καταστάσεις (π.χ. αληθής και ψευδής). Θα μπορούσαν όμως να υπάρχουν κόμβοι / μεταβλητές με περισσότερες καταστάσεις όπως για παράδειγμα η μεταβλητή «Καύσιμο» θα μπορούσε να πάρει χαμηλή μεσαία και υψηλή τιμή. Στο παράδειγμα για το αν θα ξεκινήσει το αυτοκίνητο γίνεται η παραδοχή ότι στο 95% των περιπτώσεων το αυτοκίνητο έχει επαρκές καύσιμο και ότι στο 98% τα μπουζί είναι καθαρά. Κάθε κόμβος-παιδί (σε αυτό το παράδειγμα υπάρχει μόνο ένας) συνδέεται με ένα σύνολο πιθανοτήτων, προσδιορίζοντας την πεποίθηση ή την πιθανότητα ότι μια μεταβλητή βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση δεδομένης της κατάστασης των κόμβων-γονέων.



Σχήμα 5. Απλό παράδειγμα Bayesian δικτύου

Ο Πίν.1 παρουσιάζει το σύνολο πιθανοτήτων που αναφέρεται ως πίνακας πιθανοτήτων (CPT) του κόμβου εκκίνησης.

Πίνακας 1. Πίνακας πιθανοτήτων (CPT) Bayesian δικτύου

Καθαρά μπουζί	Αληθές		Ψευδές	
	Αληθές	Ψευδές	Αληθές	Ψευδές
Καύσιμο				
Εκκίνηση: Ναι	0,9	0	0	0
Εκκίνηση: Όχι	0,1	1	1	1

Μόλις κατασκευαστεί ένα δίκτυο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων δεδομένης μιας συγκεκριμένης κατάστασης εισόδου ή σεναρίου. Στο παράδειγμα εκκίνησης του αυτοκινήτου, το αυτοκίνητο θα ξεκινήσει (δηλ. η κατάσταση είναι "αληθής") κατά 90% εάν το αυτοκίνητο έχει καύσιμο και τα μπουζί είναι καθαρά. Υπάρχει και μία πιθανότητα 10% ότι δεν θα ξεκινήσει ακόμα κι αν έχει καύσιμο και τα μπουζί είναι καθαρά λόγω άλλων συνθηκών (π.χ. μπορεί να είναι χειμώνας και να μην έχει μπαταρία). Το αυτοκίνητο δεν θα ξεκινήσει (δηλαδή 100% πιθανότητα η κατάσταση να μη ξεκινήσει το αυτοκίνητο να είναι "ψευδής"), εάν δεν έχει καύσιμο ή τα μπουζί είναι βρώμικα. Το Σχ. 5 δείχνει ότι η πιθανότητα έναρξης του αυτοκινήτου, υπολογιζόμενη από τον πίνακα CPT και τη γνώση μας για το αυτοκίνητο (στο 95% ότι το αυτοκίνητο έχει καύσιμο και στο 98% ότι τα μπουζί είναι καθαρά) βάσει των Bayesian πιθανοτήτων είναι 84%.

Ένα ολοκληρωμένο δίκτυο ή μοντέλο αποτελείται από το δομικό σχεδιασμό των κόμβων και των αιτιωδών συνδέσμων, των παραμέτρων (δηλαδή των καταστάσεων) και τους ολοκληρωμένους πίνακες πιθανοτήτων. Οι CPTs αυξάνουν εκθετικά με τον αριθμό των κόμβων-γονέων, τον αριθμό των καταστάσεων κάθε κόμβου-γονέα και τον αριθμό των καταστάσεων του κόμβου-παιδιού. Οι πιθανότητες μπορούν να εισαχθούν απευθείας στον πίνακα από έναν ειδικό, από τη βιβλιογραφία ή από κάποια άλλα άμεσα διαθέσιμα δεδομένα ή μπορούν να εξαχθούν μέσω ενός αλγόριθμου εκμάθησης από ακατέργαστα δεδομένα, καθώς οι αριθμοί είναι μια αναπαράσταση των κοινών κατανομών πιθανοτήτων αυτών των δεδομένων.

Στη βιβλιογραφία, ένα βασικό BBN αναφέρεται επίσης και ως διάγραμμα επιρροής, και έχει επιπλέον τύπους κόμβων, κυρίως κόμβους απόφασης και χρησιμότητας και επιτρέπει την επιλογή μιας εναλλακτικής απόφασης που έχει τη μεγαλύτερη ωφέλεια.

2.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ των τριών τύπων δικτύων (CM, QNM και BBN). Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι σημαντικότερες ομοιότητες και διαφορές ως προς τη δομή, το περιεχόμενο, τη φύση των κόμβων και των συνδέσμων. Ακολούθως, παρουσιάζονται εκτενέστερα οι διαφορές αυτές.

Πίνακας 2. Κυριότερες ομοιότητες και διαφορές των τριών τύπων δικτύων

	CM	QPN	Bayes Nets
Δομή	Δίκτυο	Δίκτυο	Δίκτυο
Περιεχόμενα	Προσωπική κατανόηση των επιρροών των εννοιών ενός προβλήματος	Προσωπική κατανόηση των επιρροών των εννοιών ενός προβλήματος	Προσωπική κατανόηση των υποθετικών ανεξαρτησιών των εννοιών ενός προβλήματος
Χαρακτηριστικά των κόμβων	Οι κόμβοι αναπαριστούν έννοιες	Οι κόμβοι αναπαριστούν διατεταγμένες μεταβλητές	Οι κόμβοι αναπαριστούν τυχαίες μεταβλητές
Χαρακτηριστικά των συνδέσμων	Σύνδεσμοι επιρροών	Σύνδεσμοι επιρροών	Σύνδεσμοι για υποθετικές ανεξαρτησίες. Για αιτιώδη δίκτυα Bayes έχουμε αιτιώδεις συνδέσεις
Κατανόηση δυσκολιών	Κατανόηση προβλήματος: Τάση για παροχή προσωπικής οπτικής	Κατανόηση προβλήματος: Τάση για παροχή προσωπικής οπτικής	Οι πιθανότητες κάνουν την κατανόηση ευκολότερη
Δομή δυσκολιών	Εύκολη (λίγες αναφορές)	Σύλληψη από ειδικό	Σύνθετη καθώς αρκετές αντιπροσωπευτικές μπορούν να κατασκευαστούν

(El abri, 2013)

2.5.1 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ CM και BBN

Οι CM είναι ισχυρά γραφικά μοντέλα που μπορούν να απεικονίσουν τις κρίσεις, σκέψεις ή πεποιθήσεις ενός ατόμου ή μιας ομάδας για ένα δεδομένο πρόβλημα. Ωστόσο, η εξαγωγή συμπερασμάτων από CM, ειδικά όταν το πρόβλημα είναι πολύπλοκο, μπορεί να μην είναι εύκολο έργο. Ο κύριος λόγος αυτού του περιορισμού στους CM είναι ότι δεν μπορεί εύκολα να γίνει απευθείας ποσοτική εκτίμηση της πιθανότητας παρατήρησης μιας συγκεκριμένης κατάστασης. Αν ο στόχος της ανάλυσης είναι αυτός, τότε τα BBN, που αποτελούν μια γραφική αναπαράσταση της γνώσης ενός ή περισσότερων ειδικών χρησιμοποιώντας τη θεωρία των πιθανοτήτων αποτελούν μια προτιμότερη επιλογή (Nadkarni & Shenoy, 2001, Sedki & Bonneau De Beaufort, 2012).

2.5.2 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ CM και QPN

Ο Van Kouwen (2009) πρότεινε μια νέα προσέγγιση για την υποστήριξη λήψης αποφάσεων, το εργαλείο Quasta, ως συντομογραφία της φράσης «ποιοτική εκκίνηση» με βάση τα QPN. Ο στόχος είναι να διερευνηθεί η συμμετοχική διάρθρωση στην επίλυση προβλημάτων μέσω της γνωστικής χαρτογράφησης που υποστηρίζεται από υπολογιστή. Το εργαλείο επιτρέπει ποιοτική εξερεύνηση σεναρίων με ταυτόχρονη πρόβλεψη και backcasting². Το εργαλείο Quasta βοηθά τα ενδιαφερόμενα μέρη να συνειδητοποιήσουν τις αιτιώδεις σχέσεις και επιτρέπει τη διερεύνηση πιθανών σεναρίων. Επιπλέον, προσδιορίζει την ανάγκη για περαιτέρω (ποσοτική) γνώση. Το Quasta συνδυάζει την απρόσκοπτη δομή της λειτουργικότητας των CM με την αναλυτική αξία της τεχνικής μοντελοποίησης των QPN. Έτσι, αντί να υπάρχουν αρκετές διαφορετικές ερμηνείες από μια απλή ανάγνωση ενός CM, το εργαλείο αυτό ορίζει μια μοναδική κατεύθυνση ανάγνωσης αλλάζοντας τις κατευθύνσεις των επιδράσεων των μεταβλητών αυτόματα (Le Dorze et al., 2013).

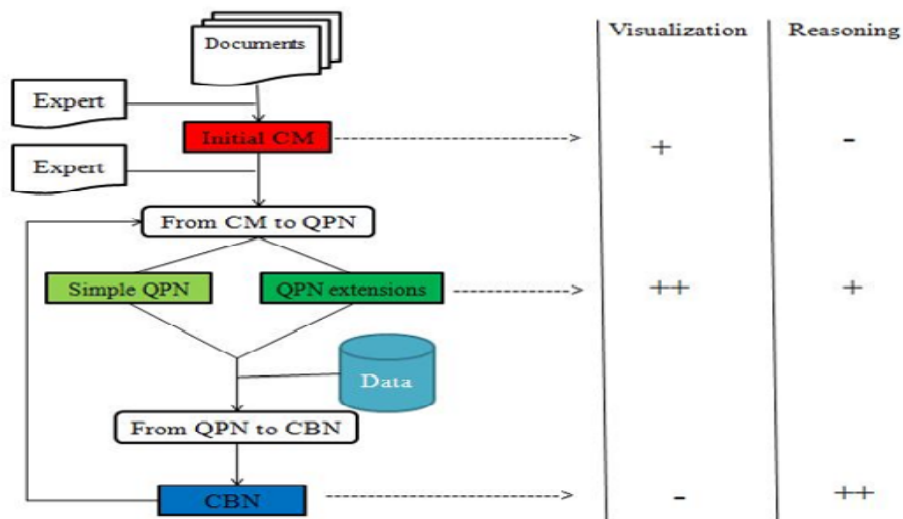
² Μέθοδος προγραμματισμού (planning) που ξεκινά με τον προσδιορισμό ενός επιθυμητού μελλοντικού πλάνου και έπειτα πηγαίνει προς τα πίσω για να αναγνωρίσει τις πολιτικές και τα προγράμματα που θα συνδέσουν το συγκεκριμένο μέλλον με το παρόν.

2.5.3 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ QPN και BBN

Οι Doan et al. (1999) παρουσίασαν έναν τύπο δικτύων, τα υβριδικά Bayesian δίκτυα, που συνδυάζει τον τυπικό φορμαλισμό των BBN με εκείνον των QPN. Η μορφή τους επιτρέπει στον ερευνητή να ξεκινήσει με τον καθορισμό μόνο των ποιοτικών σχέσεων και, στη συνέχεια, να προσθέσει ποσοτικές πληροφορίες εφόσον είναι διαθέσιμες. Το μοντέλο μπορεί να συνάγει κατανομές σε τιμές μη προσδιοριζόμενων πιθανοτήτων βασιζόμενες σε εκείνες που καθορίζονται και επί του τύπου της ποιοτικής επίδρασης, με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων. Το 2005, ο Lucas αξιοποίησε τόσο την αιτιώδη ανεξαρτησία όσο και τα QPN στην ανάπτυξη και ανάλυση μιας συλλογής ποιοτικών, αιτιωδών επιδράσεων αλληλεπίδρασης, που ονομάζονται πρότυπα QC. Αυτά είναι εμπλουτισμένα με ορισμένη ποιοτική σημασιολογία και αποσκοπούν να προσφέρουν στους ερευνητές ένα σημείο εκκίνησης υψηλού επιπέδου κατά την ανάπτυξη Bayesian δικτύων (Lucas, 2005).

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΓΝΩΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά μια μέθοδος για την ανάπτυξη κατευθυνόμενων γραφημάτων βασισμένων στη γνώση. Στην κατεύθυνση αυτή χρησιμοποιούνται μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, κάθε μία εκ των οποίων έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Η γενική αρχιτεκτονική δομή, περιλαμβάνει την κατασκευή ενός γνωστικού χάρτη αξιοποιώντας τη γνώση και εμπειρία ενός ή περισσότερων ειδικών στον τομέα μελέτης και καταλήγει στην κατασκευή ενός αιτιώδους BBN. Το Σχ. 6 συνοψίζει την προσέγγιση αυτή, προσδιορίζοντας και την καταλληλότητα της κάθε φάσης ως προς την αιτιολογία ή την οπτικοποίηση του προβλήματος.



Σχήμα 6. Σχηματική αναπαράσταση της προσέγγισης (Le Dorze et al., 2013)

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

3.1.1 Φάση 1η: Κατασκευή του αρχικού γνωστικού χάρτη

Η διαδικασία συνίσταται πρωτίστως στην κατασκευή ενός γνωστικού χάρτη. Υπάρχουν δύο σημαντικά βήματα για την κατασκευή γνωστικών χαρτών. Πρώτον, η επιλογή της πηγής πληροφοριών. Αυτό το βήμα περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων από τη βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό των διαφόρων εννοιών, προκειμένου να γίνει κατανοητό σε βάθος το πεδίο έρευνας. Ακολουθεί η συλλογή των αιτιακών σχέσεων από εμπειρογνώμονες, οι οποίες περιέχουν ρητά μια σχέση αιτίου-αποτελέσματος και συνδέουν δύο διαφορετικές έννοιες μέσω ενός αιτιώδους συνδέσμου όπως «εάν», «γιατί», «έτσι», «ως» κλπ. Μόλις προσδιοριστούν οι αιτιώδεις σχέσεις, μετατρέπονται σε αιτιώδεις φράσεις για να περιγράψουν την επίδραση μεταξύ των εννοιών με τη γλώσσα που χρησιμοποιεί ο ειδικός, αύξηση(+), μείωση(-), καμία επίδραση) και ακολούθως, το σχήμα κωδικοποίησης που προέρχεται από τις φράσεις αιτίας και αποτελέσματος.

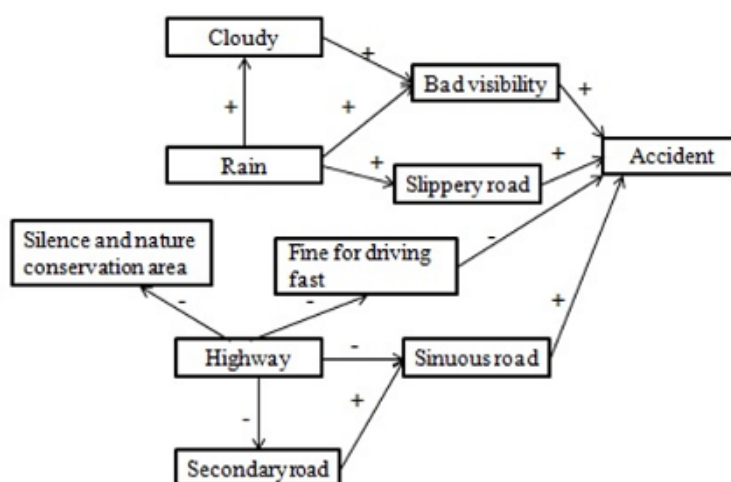
Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, ακολουθεί ένα παράδειγμα CM, ο οποίος στηρίζεται αιτιώδεις συνδέσεις που παρουσιάζονται στον Πιν. 3. Ο CM του Σχ. 7, καταγράφει τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τον κίνδυνο ενός αυτοκινητιστικού ατυχήματος. Με βάση τους ειδικούς, θεωρείται ότι με την κατασκευή μιας νέας οδού θα μειωθεί ο αριθμός των ατυχημάτων, αλλά θα δημιουργηθούν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτοκινητόδρομος μπορεί να διαταράξει τη σιωπή στην περιοχή της φύσης. Επίσης, εκτιμάται ότι οι στροφές θα μειωθούν με την κατασκευή της νέας εθνικής οδού, δρώντας θετικά στη μείωση των ατυχημάτων, καθώς οι δρόμοι με στροφές αυξάνουν την πιθανότητα ατυχημάτων. Τα ατυχήματα μπορούν επιπλέον να μειωθούν με την αύξηση των προστίμων για παραβίαση του ορίου ταχύτητας κ.ο.κ.

Ο CM παρέχει μια ποιοτική συλλογιστική. Ωστόσο, από την απλή ανάγνωση του CM μπορούν να προκύψουν πολλές διαφορετικές επιδράσεις και σενάρια που καθιστούν την ανάλυση πιο δύσκολη, ειδικά σε ένα πολύπλοκο CM, δυσχεραίνοντας τη λήψη αποφάσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Αυτό συμβαίνει, σε μεγάλο βαθμό, γιατί όλες οι μεταβλητές τους έχουν το ίδιο επίπεδο βαρύτητας, είτε θετικό είτε αρνητικό. Επομένως, είναι απαραίτητο να αποδοθεί στις μεταβλητές ένας συγκεκριμένος βαθμός βεβαιότητας.

Πίνακας 3. Κατάλογος αιτιολογικών συνδέσμων στο CM του παραδείγματος

<i>Cause</i>	<i>causal connector</i>	<i>Effect</i>
cloudy	lead to + →	bad visibility
rain	if-then + →	bad visibility
rain	if-then + →	slippery road
rain	because of + →	cloudy
highway	so - →	sinuous road
highway	reduced by - →	secondary road
highway	negatively affect - →	silence,nature conservation area
highway	reduced by - →	fine for drinving fast
secondary road	can cause + →	sinuous road
Bad visibility	can cause + →	accident
slippery road	can cause + →	accident
fine for drinving fast	increase + →	accident
sinuous road	can cause + →	accident

(Chauvin & Loiseau, 2011)



Σχήμα 7. Παράδειγμα που αφορά τη διαδικασία κατασκευής ενός αρχικού γνωστικού χάρτη (Πηγή: Chauvin, 2011)

3.1.2 Φάση 2η: Από το γνωστικό χάρτη στα ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα

Από τον CM μπορεί να γίνει κατασκευή ενός QPN τροποποιώντας τον αρχικό CM. Για τη μετάβαση στο QPN ζητείται από τους ειδικούς να διευκρινίσουν τις σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος εξαλείφοντας τυχόν κυκλικούς βρόχους στο χάρτη. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα να δημιουργηθούν νέες επεκτάσεις της απλής δομής του QPN προσθέτοντας πρόσθετες πληροφορίες με βάση την πρώτη συνέντευξη.

Βήμα 1: Εξάλειψη των κυκλικών σχέσεων

Όπως αναφέρθηκε, τα QPN είναι κατευθυνόμενα ακυκλικά γραφήματα. Αντιθέτως, στους CM υπάρχει δυνατότητα διαμόρφωσης κυκλικών σχέσεων. Αυτές οι κυκλικές σχέσεις παραβιάζουν την ακυκλική γραφική δομή που απαιτείται στα QPN κι, επομένως, είναι επομένως απαραίτητο να εξαλειφθούν. Προκειμένου να γίνουν αυτά είναι απαραίτητη η διάκριση δύο προσεγγίσεων που περιγράφονται παρακάτω: οι επαγωγικές και οι απαγωγικές προσεγγίσεις.

❖ **Διάκριση μεταξύ επαγωγικής και απαγωγικής συλλογιστικής:**

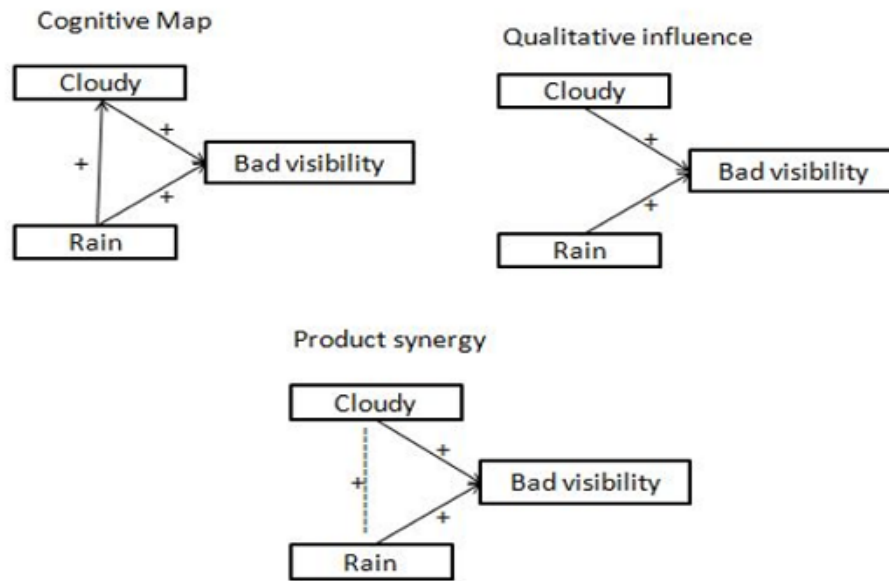
Η επαγωγική συλλογιστική ξεκινά με την επιβεβαίωση ενός γενικού κανόνα και προχωρά από εκεί σε ένα συγκεκριμένο συμπέρασμα. Η λογική κινείται από τις αιτίες στα αποτελέσματα, δηλαδή στην κατεύθυνση της αιτιώδους συνάφειας. Για παράδειγμα, η βροχή στο παράδειγμα του CM είναι η αιτία και ο ολισθηρός δρόμος το αποτέλεσμα. Άρα στην επαγωγική συλλογιστική «η βροχή δικαιολογεί το ότι ο δρόμος είναι ολισθηρός». Η απαγωγή είναι μια μέθοδος συλλογιστικής στην οποία κάποιος επιλέγει την υπόθεση που θα μπορούσε, αν είναι αλήθεια, να εξηγήσει καλύτερα τα σχετικά αποτελέσματα. Δηλαδή, η συλλογιστική κινείται από το αποτέλεσμα στην αιτία. Για παράδειγμα, όταν παρατηρούμε ότι ο δρόμος είναι ολισθηρός και υγρός, συμπεραίνεται ότι βρέχει. Στην απαγωγική συλλογιστική οι καταστάσεις δεν εγγυώνται το αποτέλεσμα.

Από πλευρά γραφικής παράστασης, η διαφορά μεταξύ των δύο συλλογισμών είναι ότι η κατεύθυνση της συλλογιστικής είναι προς την κατεύθυνση των βέλων, καθώς και προς την αντίθετη κατεύθυνση. Με λίγα λόγια αυτό σημαίνει ότι, όταν χρησιμοποιούν την τεχνοτροπία αυτή για την εξερεύνηση σεναρίων, τα QPN μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για πρόβλεψη όσο και για

backcasting. Η backcasting είναι μια συλλογιστική από τους στόχους προς τα σχέδια δράσης: ξεκινώντας από τον προσδιορισμό ορισμένων στόχων για το μέλλον και τον καθορισμό των δράσεων που πρέπει να γίνουν για την επίτευξη αυτών των στόχων (Van Kouwen et al., 2009). Οι αιτιώδεις δηλώσεις που αφορούν την απαγωγική συλλογιστική υποβάλλονται εσφαλμένα σε έναν γνωστικό χάρτη από ένα τόξο από την επίδραση στην αιτία. Μια τέτοια παραπλανητική παράσταση μπορεί επίσης να οδηγήσει σε περιττές κυκλικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών στον αιτιώδη χάρτη που δημιουργεί βρόχους.

❖ **Διάκριση μεταξύ άμεσων και έμμεσων σχέσεων:**

Κατά τη διάρκεια της πρώτης συνέντευξης με τους ειδικούς, πολλές δεν γίνεται διάκριση μεταξύ των άμεσων και έμμεσων σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Ωστόσο, η διάκριση αυτή είναι σημαντική για τον προσδιορισμό των ανεξάρτητων προϋποθέσεων για τη δεύτερη δομή του δικτύου. Η έλλειψη διάκρισης μεταξύ άμεσης και έμμεσης σχέσης μπορεί να δημιουργήσει κυκλική δομή όπως φαίνεται στο Σχ. 8 και για το λόγο αυτό είναι σημαντική η διάκριση μεταξύ άμεσων και έμμεσων σχέσεων, προκειμένου να προσδιοριστούν οι υποθετικές ανεξαρτησίες μεταξύ των μεταβλητών του προβλήματος. Δηλαδή, η κυκλική μορφή σε ένα CM μπορεί να αναπαρασταθεί από μια ποιοτική επίδραση αν η σχέση μεταξύ μεταβλητών είναι άμεση και εάν μια δεδομένη μεταβλητή επηρεάζει μια δεύτερη μεταβλητή μόνο μέσω μιας τρίτης μεταβλητής, και τότε μπορούμε να αναπαρασταθεί με ένα διακεκομμένο βέλος που αντικατοπτρίζει μια συνέργεια προϊόντος (Sedki et al., 2012).

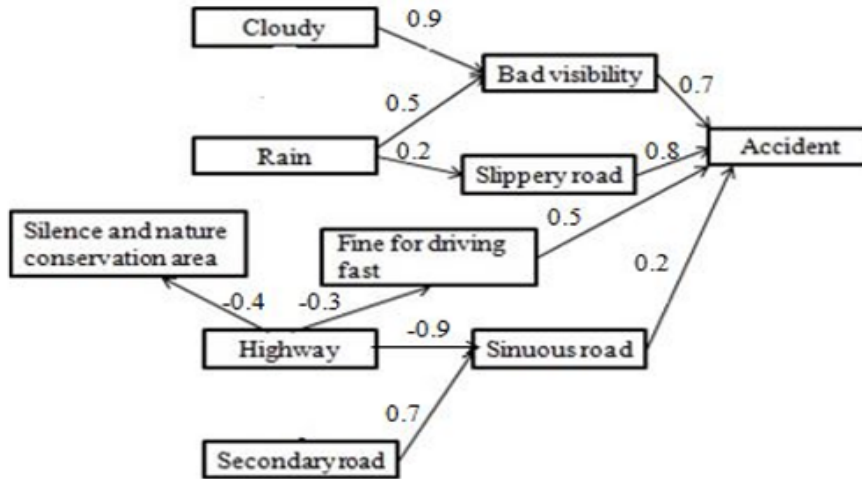


Σχήμα 8. Διάκριση μεταξύ άμεσων και έμμεσων σχέσεων (El abri, 2013)

Στο Σχ. 8 παρουσιάζονται δύο πιθανές περιπτώσεις όπου κάθε περίπτωση εξαρτάται καθαρά από τον ειδικό που προσδιορίζει τις σχέσεις. Εάν η σχέση μεταξύ «βροχής» και «συννεφιάς» είναι περιπτή, μπορεί να αφαιρεθεί το βέλος μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών δημιουργώντας μια ποιοτική επίδραση. Αν η «βροχή» επηρεάζει τη «συννεφιά» μόνο μέσω της μεταβλητής «κακή ορατότητα», τότε δημιουργείται μια συνέργεια προϊόντων. Το Σχ. 8 δείχνει ξεχωριστά απλά QPN με μόνο ποιοτικές επιδράσεις.

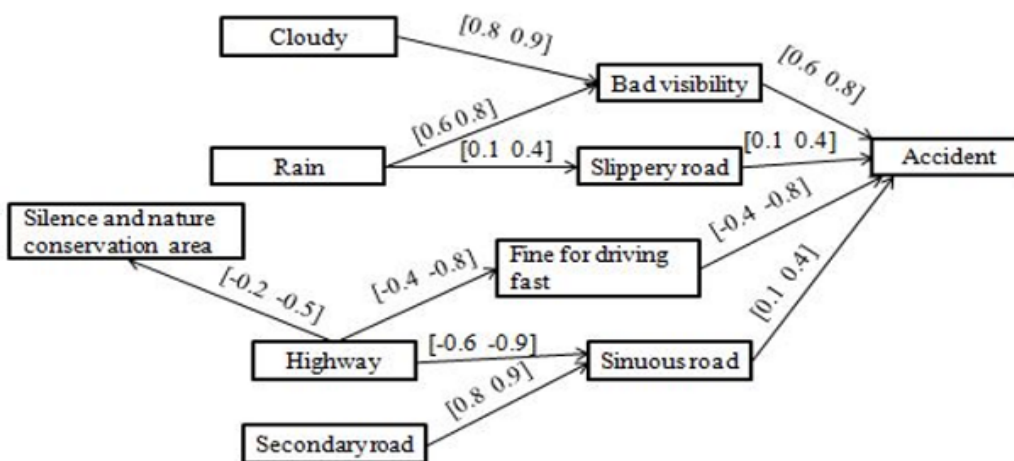
Βήμα 2: Διάφορες επεκτάσεις των ποιοτικά πιθανοτικών δικτύων

Για να κατασκευαστεί το Σχ. 9 καθορίζεται το αρνητικό ή θετικό ενός παράγοντα επί των άλλων, με μια ασαφή τιμή για κάθε διασύνδεση, αφού έχει θεωρηθεί ότι υπάρχει κάποιος βαθμός αιτιότητας μεταξύ των παραγόντων. Για να υπάρξουν καλύτερα αποτελέσματα στη σχεδίαση του βελτιωμένου QPN (Σχ. 10), μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι από έναν ειδικούς. Κατά την αντιστοίχιση των τιμών πρέπει να εξετάζεται πόσο ισχυρά επηρεάζει ένας παράγοντας X_i από έναν άλλο X_j . Κάθε σχέση μεταξύ των παραγόντων έχει εύρος που κυμαίνεται μεταξύ [-1, 1].



Σχήμα 9. Δίκτυο QPN με δυνάμεις επιρροής μεταξύ των κόμβων (El abri, 2013)

Στο Σχ. 10 η δομή του αρχικού συστήματος είναι πιο βελτιωμένη καθώς έχουν καθοριστεί οι συντελεστές από μία ομάδα ειδικών στα διαστήματα $[0, 1]$ για θετική επίδραση, $[0, 0]$ για μηδενική επίδραση και $[-1, 0]$ για αρνητική επίδραση (Nadkarni & Shenoy, 2001).



Σχήμα 10. Κατασκευή βελτιωμένου QPN (El abri, 2013)

3.1.3 Φάση 3η: Από τα ποιοτικά πιθανολογικά δίκτυα στα BBN

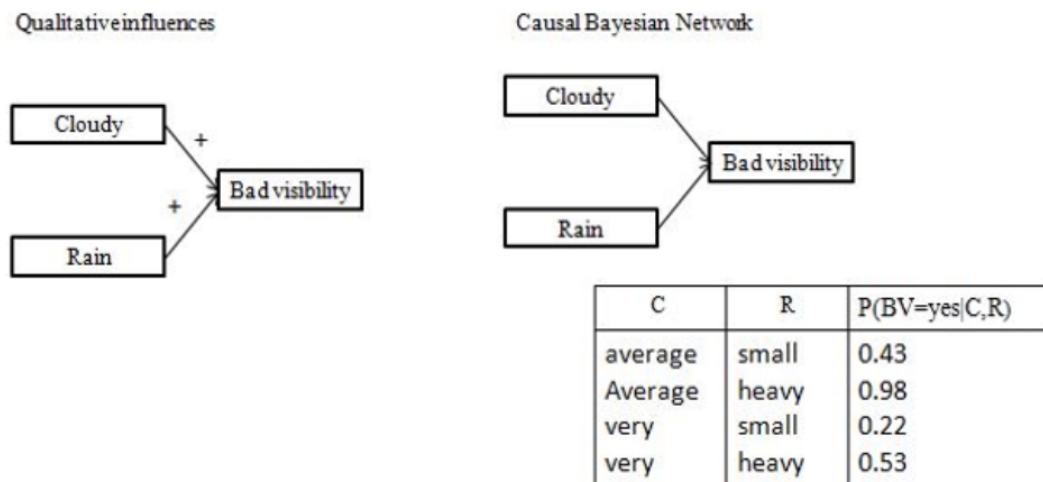
Για να προσδιοριστούν οι παράμετροι ενός BBN, στην περίπτωση που είναι διαθέσιμα όλα τα δεδομένα, υπάρχουν δύο μέθοδοι. Η μέθοδος που παρουσιάζεται ακολούθως είναι η απλούστερη και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και καλείται στατιστική εκτίμηση. Συγκεκριμένα, είναι η εκτίμηση της πιθανότητας ενός συμβάντος βασιζόμενη στη συχνότητα εμφάνισης του συμβάντος σε μια βάση δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι απαραίτητη η εκτίμηση από ειδικούς. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται μέγιστη πιθανότητα:

$$\hat{P}(X_i = x_k | pa(X_i) = x_j) = \hat{\theta} MV_{i,j,k} = \frac{N_{i,j,k}}{\sum_k N_{i,j,k}} \quad |$$

όπου $N_{i,j,k}$ είναι ο αριθμός των συμβάντων στη βάση δεδομένων για τα οποία η μεταβλητή X_i βρίσκεται στην κατάσταση x_k και οι γονείς-κόμβοι βρίσκονται στο διαμορφωμένο x_j .

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής ενός BBN, η οποία αποτελείται από δύο σημαντικά βήματα. Στο πρώτο βήμα προτείνεται να οικοδομηθεί το BBN από το μετασχηματισμό του QPN που έχει ήδη κατασκευαστεί. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες που παρέχει ο ειδικός για τη δημιουργία του QPN (όπως επιρροές, τύποι, βαθμοί σπουδαιότητας κλπ.). Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν ήδη αρκετές υποπερίπτώσεις ανάλογα με τον τύπο QPN που πρόκειται να μετατραπεί. Η πρώτη υποπερίπτωση είναι να μετατραπεί το απλό QPN μόνο με τις επιδράσεις (+) και (-). Αυτή η διαδικασία είναι παρόμοια με τους υπάρχοντες αλγορίθμους για υπολογισμό ορίων ή διαστημάτων των επιθυμητών κατανομών πιθανότητας. Αλλά αυτές οι μέθοδοι είτε προτείνουν έναν ορισμό της πολλαπλασιασμένης επίπτωσης όταν οι πληροφορίες σχετικά με τη δύναμη μιας επίδρασης ερμηνεύονται ως μια τιμή πιθανότητας, είτε βασίζονται στον υπολογισμό των ορίων των δεδομένων που λείπουν, σε ένα CPT με δύο κόμβους και τον τύπο της επίπτωσης. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω Σχ. 11. Η μεταβλητή βροχή = 'R' έχει δύο καταστάσεις: ασθενής και έντονη, η μεταβλητή Cloudy = 'C' έχει δύο καταστάσεις: μέτρια και πυκνή, και η μεταβλητή κακή ορατότητα = 'BV' έχει δύο καταστάσεις: ναι και όχι. Κατά τη μετατροπή του QPN

σε BBN πρέπει να προσδιοριστούν οι πιθανότητες όλων των δυνητικών καταστάσεων στον πίνακα CPT.



Σχήμα 11. Μετατροπή QPN σε BBN

Η δεύτερη υποπερίπτωση παρουσιάζεται όταν το BBN δημιουργείται από ένα βελτιωμένο QPN, δηλαδή ένα QPN εμπλουτισμένο με πρόσθετες πληροφορίες όπως: impact strength (+/- n), πιθανότητες διαστημάτων, συνεργίες προϊόντων και πρόσθετων. Οι ερευνητές εξετάζουν την περίπτωση συνέργων οποιουδήποτε υποσυνόλου κόμβων-γονέων, επειδή αυτή η εργασία είναι μάλλον περίπλοκη. Στο δεύτερο βήμα χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων στην οποία έχουν αποθηκευτεί τα δεδομένα από τη μετατροπή του QPN σε BBN, τα οποία αξιοποιούνται για να δημιουργηθούν οι Bayesian προσεγγίσεις. Το BBN του δεύτερου βήματος είναι πλουσιότερο και πιο ακριβές και επιτρέπει πιο αποτελεσματική συλλογιστική. Αφού η δομή και οι παράμετροι του BBN είναι καλά καθορισμένες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο για να εξαχθούν συμπεράσματα και να ληφθούν αποφάσεις για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος με βάση μεθόδους και αλγόριθμους συλλογιστικής (Renooij et al., 2003).

4 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ GENIE

Το GeNIE είναι ένα περιβάλλον εργασίας για τη δημιουργία γραφικών αποφάσεων-θεωρητικών μοντέλων και είναι το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής. Το GeNIE δημιουργήθηκε και αναπτύχθηκε στο εργαστήριο συστημάτων αποφάσεων του Πανεπιστημίου του Pittsburgh μεταξύ 1995 και 2015. Το 2015 δημιουργήθηκε η εταιρεία BayesFusion LLC αποκτώντας την άδεια για το GeNIE από το Πανεπιστήμιο του Pittsburgh. Παρέχεται δωρεάν στην ακαδημαϊκή κοινότητα για ερευνητικούς και διδακτικούς σκοπούς για την προώθηση θεωρητικών μεθόδων λήψης αποφάσεων στα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Το GeNIE αναπτύχθηκε αρχικά ως βασικό εργαλείο διδασκαλίας και έρευνας σε ακαδημαϊκά περιβάλλοντα και έχει χρησιμοποιηθεί σε εκατοντάδες πανεπιστήμια παγκοσμίως.

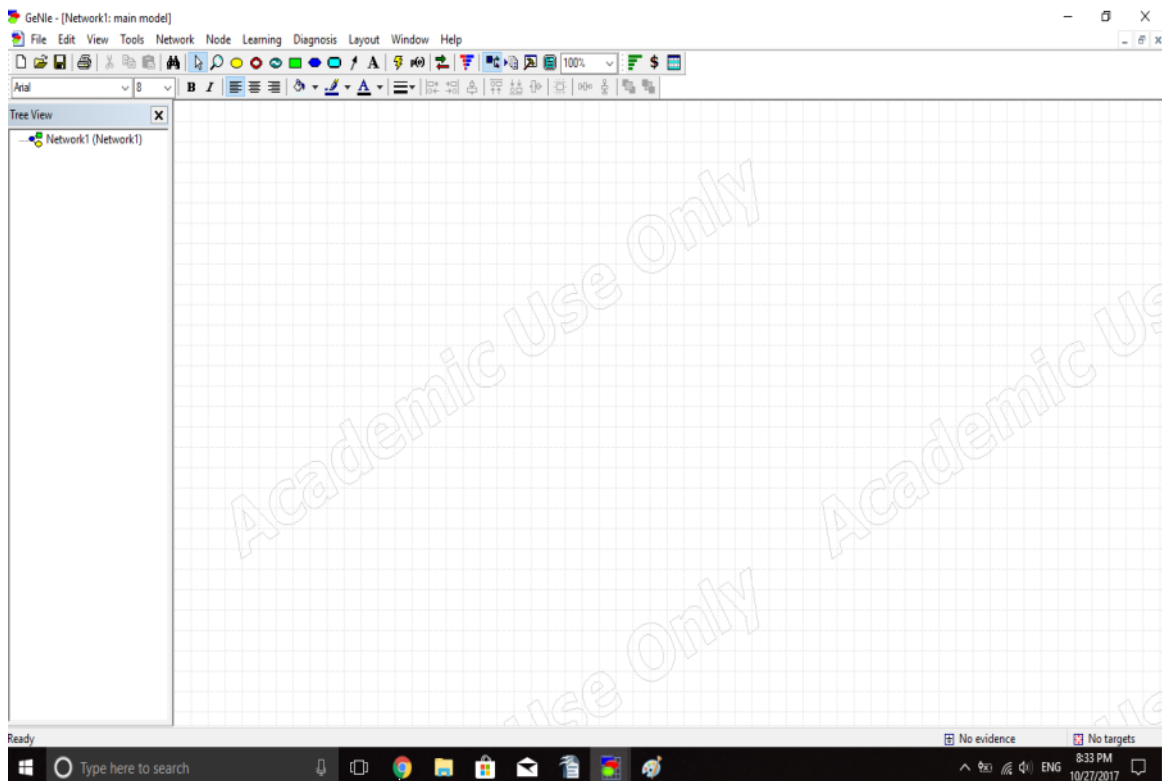
Το ισχυρότερο στοιχείο του GeNIE, το οποίο το διακρίνει από ένα μεγάλο αριθμό άλλων γραφικών εργαλείων μοντελοποίησης, είναι η διεπαφή με το χρήστη. Το GeNIE επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων οποιουδήποτε μεγέθους και πολυπλοκότητας. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται με χρήση του GeNIE μπορούν να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε εφαρμογή και να εκτελεστούν σε οποιαδήποτε υπολογιστική πλατφόρμα. Λόγω της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του, το GeNIE είναι ιδιαίτερα δημοφιλές, ειδικά στον ακαδημαϊκό χώρο, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και από πολλούς άλλους φορείς.

4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο χώρος εργασίας του GeNIe περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στοιχεία που επιτρέπουν την κατασκευή και εποπτεία BBN με πολλούς εναλλακτικούς τρόπους. Οι βασικές επιλογές προβολής είναι:

- Προβολή γραφήματος
- Δενδροειδής προβολή

Στην προβολή γραφήματος το μοντέλο μπορεί να διαρθρωθεί ιεραρχικά σε υποομάδες. Το μενού διάταξης και τα κουμπιά στη γραμμή εργαλείων μορφοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αλλάξουν τις αισθητικές ιδιότητες της προβολής γραφημάτων. Οι εντολές για την εμφάνιση ή την απόκρυψη του πλέγματος και την ευθυγράμμιση των στοιχείων στο γράφημα μπορούν να βρεθούν στο μενού Layout. Η Γραμμή εργαλείων μορφοποίησης έχει κουμπιά για την αλλαγή της γραμματοσειράς, του χρώματος και του μεγέθους των ετικετών των κόμβων και κουμπιά για την εκτέλεση των εργασιών ευθυγράμμισης σε κείμενο και στα στοιχεία του γραφήματος.



Σχήμα 12. Αρχική οθόνη του GeNIe

Στην προβολή γραφήματος μπορούν να εισαχθούν τα ακόλουθα στοιχεία μοντέλου:

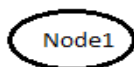
- Κόμβοι
- Υπομοντέλα
- Τόξα
- Κουτιά κειμένου

Όπως αναφέρθηκε, το GeNIe παρέχει μια εναλλακτική μέθοδο πλοήγησης μοντέλου γνωστή ως δενδροειδή προβολή. Η προβολή αυτή είναι πολύ παρόμοια με την αυτή των Windows. Εμφανίζει μια ιεραρχική λίστα, με αλφαβητική σειρά, όλων των δικτύων που είναι ανοιχτά και όλων των κόμβων του δικτύου. Οι περισσότερες λειτουργίες που είναι διαθέσιμες στην προβολή γραφήματος μπορούν να εκτελεστούν και στη δενδροειδή προβολή. Οποιοσδήποτε αλλαγές γίνονται στην προβολή αυτή, εμφανίζονται αμέσως στην προβολή γραφήματος. Η δενδροειδής προβολή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για πλοήγηση στην προβολή γραφήματος, για παράδειγμα για να ανοίξουμε παράθυρα υπομονάδας. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της δενδροειδούς προβολής είναι ότι μπορούν να μεταφερθούν κόμβοι μεταξύ διαφορετικών υπομονάδων και δικτύων.

4.1.1 Τύποι κόμβων

Το GeNIe υποστηρίζει τους ακόλουθους τύπους κόμβων:

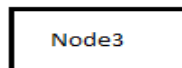
1. Τους κόμβους πιθανότητας, που έχουν σχήμα ωοειδές και υποδηλώνουν αβέβαιες μεταβλητές.



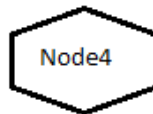
2. Τους προσδιοριστικούς κόμβους, που συνήθως σχεδιάζονται ως διπλοί ωοειδείς κύκλοι και αντιπροσωπεύουν είτε σταθερές τιμές είτε τιμές που καθορίζονται αλγεβρικά από τις καταστάσεις των γονέων τους. Με άλλα λόγια, εάν οι αξίες των γονέων τους είναι γνωστές, τότε η αξία ενός προσδιοριστικού κόμβου είναι επίσης γνωστή με βεβαιότητα. Οι προσδιοριστικοί κόμβοι προσδιορίζονται αριθμητικά όμοια με τους κόμβους πιθανότητας. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι πίνακες πιθανοτήτων τους περιέχουν μόνο μηδέν και ένα.



3. Τους κόμβους απόφασης, που έχουν ορθογώνιο σχήμα και υποδηλώνουν μεταβλητές που ελέγχονται από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων και χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των επιλογών σε μια απόφαση. Οι κόμβοι απόφασης στο GeNIe είναι πάντα διακριτοί και καθορίζονται από μια λίστα με πιθανές καταστάσεις / ενέργειες.



4. Τους αριθμητικούς κόμβους που έχουν εξαγωνικό σχήμα και υποδηλώνουν μεταβλητές που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τους στόχους του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων. Εκφράζουν τις προτιμήσεις αυτών των ατόμων σχετικά με τα αποτελέσματα έναντι των προηγούμενων.



4.1.2 Τόξα

Κανονικά, ένα τόξο σε ένα BBN ή ένα διάγραμμα επιρροής υποδηλώνει μια επίδραση, δηλαδή το γεγονός ότι ο κόμβος στην ουρά του τόξου επηρεάζει την τιμή (ή την κατανομή πιθανοτήτων στις πιθανές τιμές) του κόμβου στην κεφαλή του τόξου. Τα τόξα αυτά σχεδιάζονται ως συμπαγείς γραμμές. Ορισμένα τόξα στα διαγράμματα επιρροής έχουν καθαρά αιτιώδη σημασία. Συγκεκριμένα, μια κατευθυνόμενη διαδρομή από έναν κόμβο απόφασης σε έναν τυχαίο κόμβο σημαίνει ότι η συγκεκριμένη απόφαση (δηλ. ένας χειρισμός του γραφήματος) θα επηρεάσει αυτόν τον τυχαίο κόμβο αλλάζοντας την κατανομή της πιθανότητας του.

Τα τόξα που εισέρχονται στους κόμβους απόφασης έχουν διαφορετικό νόημα. Επειδή οι κόμβοι αποφάσεων είναι υπό τον έλεγχο του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων, αυτά τα τόξα δεν υποδηλώνουν επιρροές αλλά μάλλον χρονική προτεραιότητα (υπό την έννοια της ροής πληροφοριών). Τα αποτελέσματα όλων των κόμβων στην ουρά των πληροφοριακών τόξων θα είναι γνωστά προτού

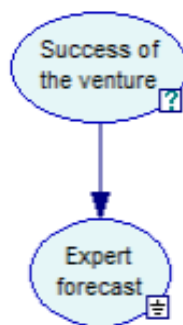
ληφθεί η απόφαση. Συγκεκριμένα, εάν υπάρχουν πολλαπλοί κόμβοι αποφάσεων, πρέπει να συνδεθούν όλοι με τέτοια τόξα. Αυτό αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται με σειρά και το αποτέλεσμα κάθε απόφασης είναι γνωστό πριν από την επόμενη απόφαση. Τα τόξα πληροφοριών σχεδιάζονται με διακεκομμένες γραμμές.

4.1.3 Εικονίδια κατάστασης κόμβων

Κάθε κόμβος στην προβολή γραφήματος επισημαίνεται με ένα ή περισσότερα εικονίδια κατάστασης κόμβου. Αυτά είναι τα μικρά εικονίδια που εμφανίζονται στην κάτω δεξιά γωνία του εικονιδίου κόμβου. Υπάρχουν έξι διαφορετικά εικονίδια κατάστασης κόμβων: παρατηρούμενα (observed), επισημασμένα (implied), ελεγχόμενα (controlled), στοχοθετημένα (targeted), έγκυρα (valid) και μη έγκυρα (invalid). Παρακάτω επεξηγείται το νόημά τους σε απλά παραδείγματα.

4.1.3.1 Παρατηρούμενο εικονίδιο κατάστασης – Observed status icon

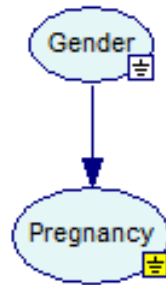
Το παρατηρούμενο εικονίδιο κατάστασης εμφανίζεται όταν ο χρήστης εισάγει στοιχεία σε έναν κόμβο και υποδηλώνει ότι ο κόμβος είναι ένας κόμβος στοιχείων (evidence node). Ο κόμβος Expert forecast στο παρακάτω μοντέλο είναι ένας κόμβος στοιχείων και επισημαίνεται με το εικονίδιο κατάστασης παρατήρησης:



4.1.3.2 Επισημασμένο εικονίδιο κατάστασης – Implied status icon

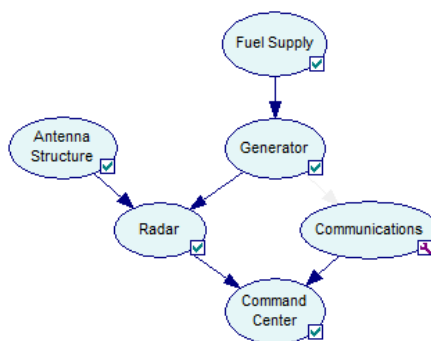
Μερικές φορές, η παρατήρηση ενός κόμβου υποδηλώνει τις τιμές άλλων κόμβων. Παραδείγματος χάριν, παρατηρώντας ότι ένας ασθενής είναι άνδρας σε ιατρικό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, θα σημαίνει ότι δεν είναι έγκυος. Αυτό είναι δυνατό επειδή το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται ότι για έναν άνδρα η εγκυμοσύνη είναι αδύνατη. Το GeNIe σηματοδοτεί τους κόμβους των οποίων οι

τιμές υπονοούνται από τις παρατηρήσεις άλλων κόμβων από το εικονίδιο κατάστασης Implied. Το σύμβολο της Εμφανιζόμενης κατάστασης είναι το ίδιο με το εικονίδιο κατάστασης παρατήρησης, αλλά έχει κίτρινο χρώμα. Στο ακόλουθο παράδειγμα, το φύλο του ασθενούς έχει παρατηρηθεί ότι είναι αρσενικό και η τιμή της μεταβλητής pregnancy έχει καθοριστεί από το GeNIe να είναι ψευδής.



4.1.3.3 Ελεγχόμενο εικονίδιο κατάστασης – *Controlled status icon*

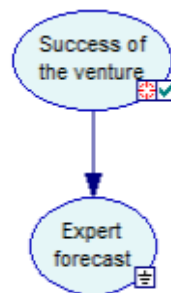
Ο έλεγχος της τιμής ενός κόμβου είναι διαφορετικός από την παρατήρηση του (διαφορές στη συνέχεια). Όταν ελέγχεται ένας κόμβος, το GeNIe το επισημαίνει με το εικονίδιο κατάστασης ελεγχόμενης ρύθμισης. Ο κόμβος *Communications* στο παρακάτω μοντέλο έχει τροποποιηθεί και έχουν επισημανθεί ως ελεγχόμενος.



4.1.3.4 Στοχοθετούμενο εικονίδιο κατάστασης – *Target status icon*

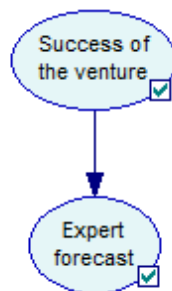
Πολύ συχνά σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, μόνο ένας μικρός αριθμός μεταβλητών ενδιαφέρει τον χρήστη. Όταν το μοντέλο που χρησιμοποιείται από το σύστημα είναι μεγάλο, το πλήθος των υπολογισμών για την ενημέρωση όλων των μεταβλητών μπορεί να είναι απαγορευτικό και σε μεγάλο μέρος άχρηστο. Το GeNIe επιτρέπει να τεθούν οι μεταβλητές που

ενδιαφέρουν τον χρήστη ως στόχοι. Οι κόμβοι που στοχοθετούνται ενημερώνονται από το πρόγραμμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενημέρωσης. Άλλοι κόμβοι, δηλ. κόμβοι που δεν έχουν οριστεί ως στόχοι, μπορεί να ενημερώνονται ή όχι, ανάλογα με τα εσωτερικά στοιχεία του χρησιμοποιούμενου αλγορίθμου. Όταν δεν οριστούν κόμβοι ως στόχοι, το GeNIe υποθέτει ότι όλες οι μεταβλητές στο μοντέλο ενδιαφέρουν τον χρήστη, δηλαδή όλοι είναι στόχοι. Ο κόμβος *Success of the venture* έχει επισημανθεί ως στόχος στο ακόλουθο μοντέλο:



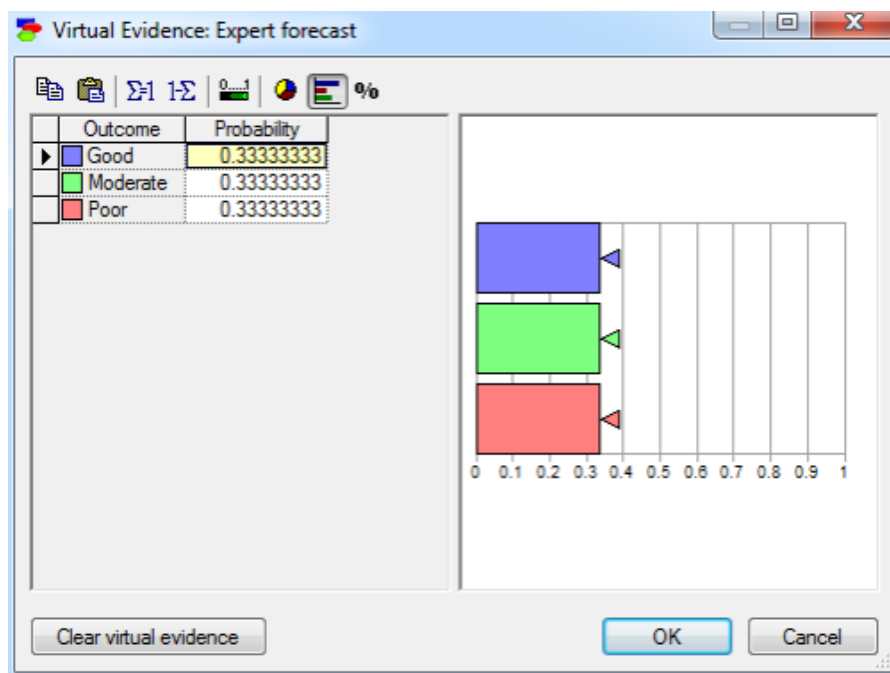
4.1.3.5 Έγκυρο/Άκυρο εικονίδιο κατάστασης – *Valid status icon*

Το μη έγκυρο εικονίδιο κατάστασης σηματοδοτεί αυτούς τους κόμβους που χρειάζονται ενημέρωση, δηλαδή οι τιμές τους (ή οι κατανομές πιθανοτήτων) είναι άκυρες. Το μη έγκυρο σήμα μπορεί να εμφανιστεί μαζί με το σήμα Target, αλλά ποτέ με τα παρατηρημένα και υποδηλωμένα σήματα (να σημειωθεί ότι όταν παρατηρείται ένας κόμβος, η τιμή του είναι γνωστή). Για να γίνει έγκυρη η τιμή, απλώς χρειάζεται να ενημερωθεί το μοντέλο. Ένας κόμβος θέλει ενημέρωση όταν στο σημάκι κάτω δεξιά έχει ερωτηματικό (?), ενώ όταν ενημερωθεί λαμβάνει το σήμα ✓.



4.2 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η εισαγωγή εικονικών παρατηρήσεων είναι παρόμοια με την απλή εισαγωγή στοιχείων. Η κύρια διαφορά είναι ότι αντί να παρατηρείται η κατάσταση ενός κόμβου, εισάγεται μια κατανομή πιθανότητας για όλες τις καταστάσεις του κόμβου. Η απεικόνιση στην πράξη πραγματοποιείται κάνοντας δεξί κλικ στον εν λόγω κόμβο (Expert forecast) και επιλέγοντας το Set Evidence εμφανίζεται η επιλογή Virtual Evidence (Σχ. 13) . Το αποτέλεσμα θα είναι το εξής:

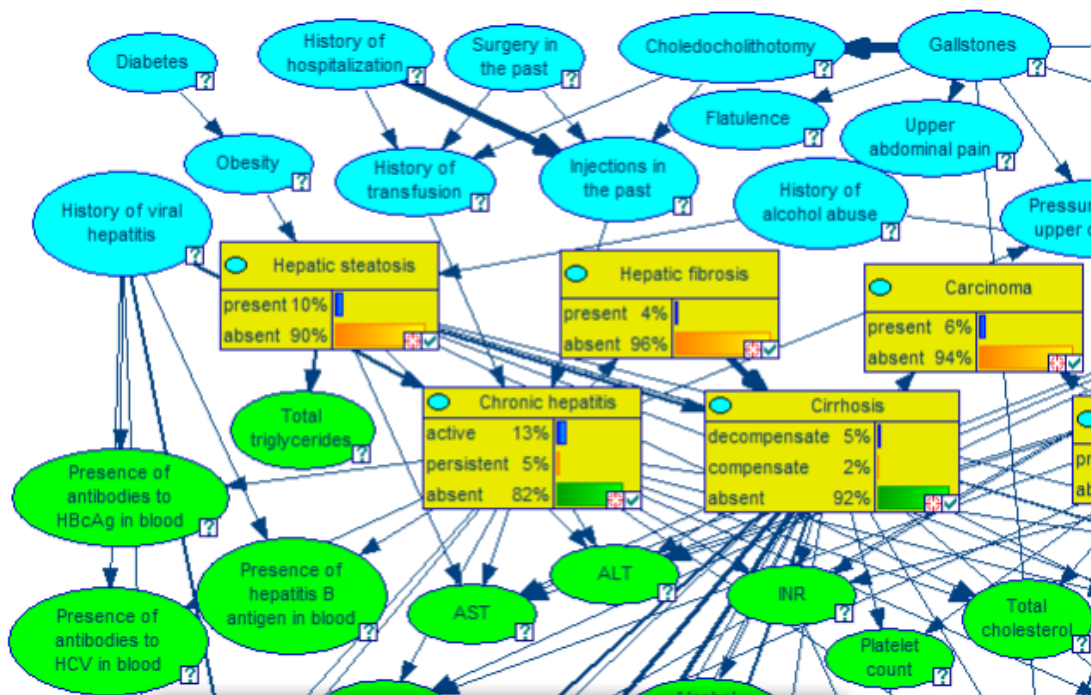


Σχήμα 13. Απεικόνιση στοιχείων για τον κόμβο πρόβλεψης του ειδικού (expert forecast)

Η απεικόνιση των στοιχείων μπορεί να γίνει αριθμητικά ή γραφικά, χρησιμοποιώντας έναν τροχό πιθανοτήτων ή ένα διάγραμμα ράβδων (όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 13). Οι εικονικές απεικονίσεις είναι μια κατανομή πιθανότητας για τις καταστάσεις της παρατηρούμενης μεταβλητής. Οι ατομικές πιθανότητες πρέπει να έχουν άθροισμα μονάδα.

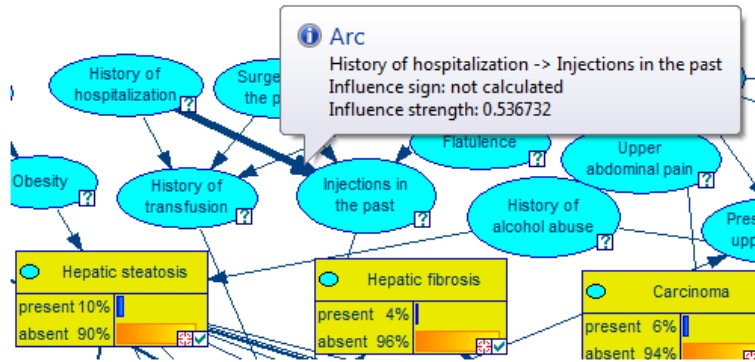
4.3 ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ

Με το εργαλείο strength of influence, εμφανίζεται η γραμμή εργαλείων επιρροής (Influence Toolbar) και αλλάζει η εμφάνιση των τόξων στο δίκτυο. Το τόξο έχει διαφορετικό πάχος, ανάλογα με τη δύναμη επιρροής μεταξύ των κόμβων που συνδέονται (Σχήμα 14). Η δύναμη της επιρροής υπολογίζεται πάντα από τον πίνακα κατανομής πιθανότητας του κόμβου-παιδί και ουσιαστικά εκφράζει κάποια μορφή διάστασης μεταξύ των κατανομών πιθανότητας του κόμβου-παιδί που εξαρτάται από την κατάσταση του γονικού κόμβου.



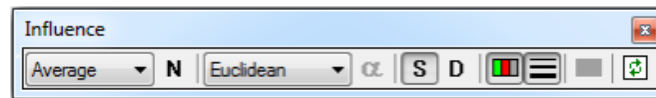
Σχήμα 14. Διαφορετικά πάχη βελών ανάλογα με τη δύναμη επιρροής των συνδεδεμένων κόμβων.

Αν το ποντίκι είναι τοποθετημένο στην κεφαλή του βέλους, οι πληροφορίες σχετικά με τη δύναμη της επιρροής εμφανίζονται σε ένα πλαίσιο σχολίων όπως φαίνεται παρακάτω (Σχ. 15).



Σχήμα 15. Πληροφορίες σχετικές με τη δύναμη επιρροής.

Η γραμμή εργαλείων επιρροής εμφανίζεται με το πάτημα της επιλογής Strength of Influence και έχει την μορφή όπως στο Σχήμα 16.

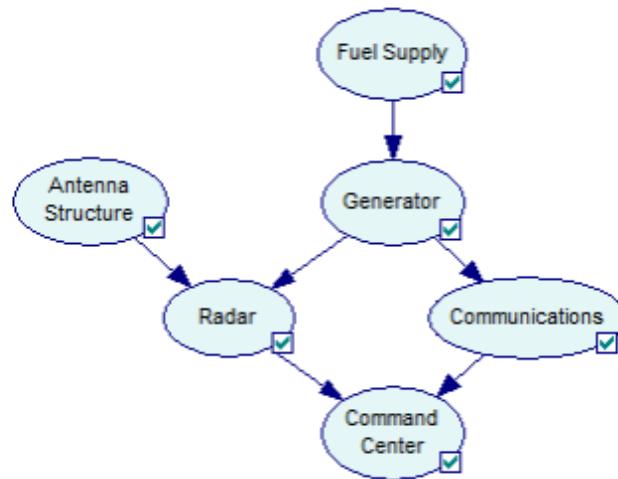


Σχήμα 16. Γραμμή εργαλείων επιρροής (Influence Toolbar).

4.4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Στα πιθανολογικά μοντέλα υπάρχει μια πρόσθετη κατηγορία συμπερασμάτων που αφορά στις προβλέψεις των επιπτώσεων της εξωτερικής παρέμβασης. Στο πλαίσιο των BBN, ο υπολογισμός των επιδράσεων των παρατηρήσεων επιτυγχάνεται με ενημέρωση του δικτύου (update) αφού οριστούν τα στοιχεία αποτελέσματος (set evidence) για τις παρατηρούμενες μεταβλητές δικτύου. Το αποτέλεσμα της παρέμβασης, από την άλλη πλευρά, είναι μια αλλαγή στη δομή του δικτύου, που σχετίζεται με τον εξωτερικό χειρισμό του συστήματος που σχεδιάστηκε από το δίκτυο, ακολουθούμενη από τον καθορισμό των τιμών των χειρισμένων κόμβων και των ενημερωτικών πεποιθήσεων.

Στο παράδειγμα του Σχ. 17 εξετάζεται ένα μοντέλο για την κατάσταση λειτουργίας ενός κέντρου διοίκησης. Το κέντρο διοίκησης εξαρτάται από την κατάσταση των επικοινωνιών και του ραντάρ. Το ραντάρ εξαρτάται από την κεραία και την ισχύ που παρέχει η γεννήτρια. Οι επικοινωνίες βασίζονται στην ισχύ που παρέχεται από τη γεννήτρια. Η γεννήτρια βασίζεται στην παροχή καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας.

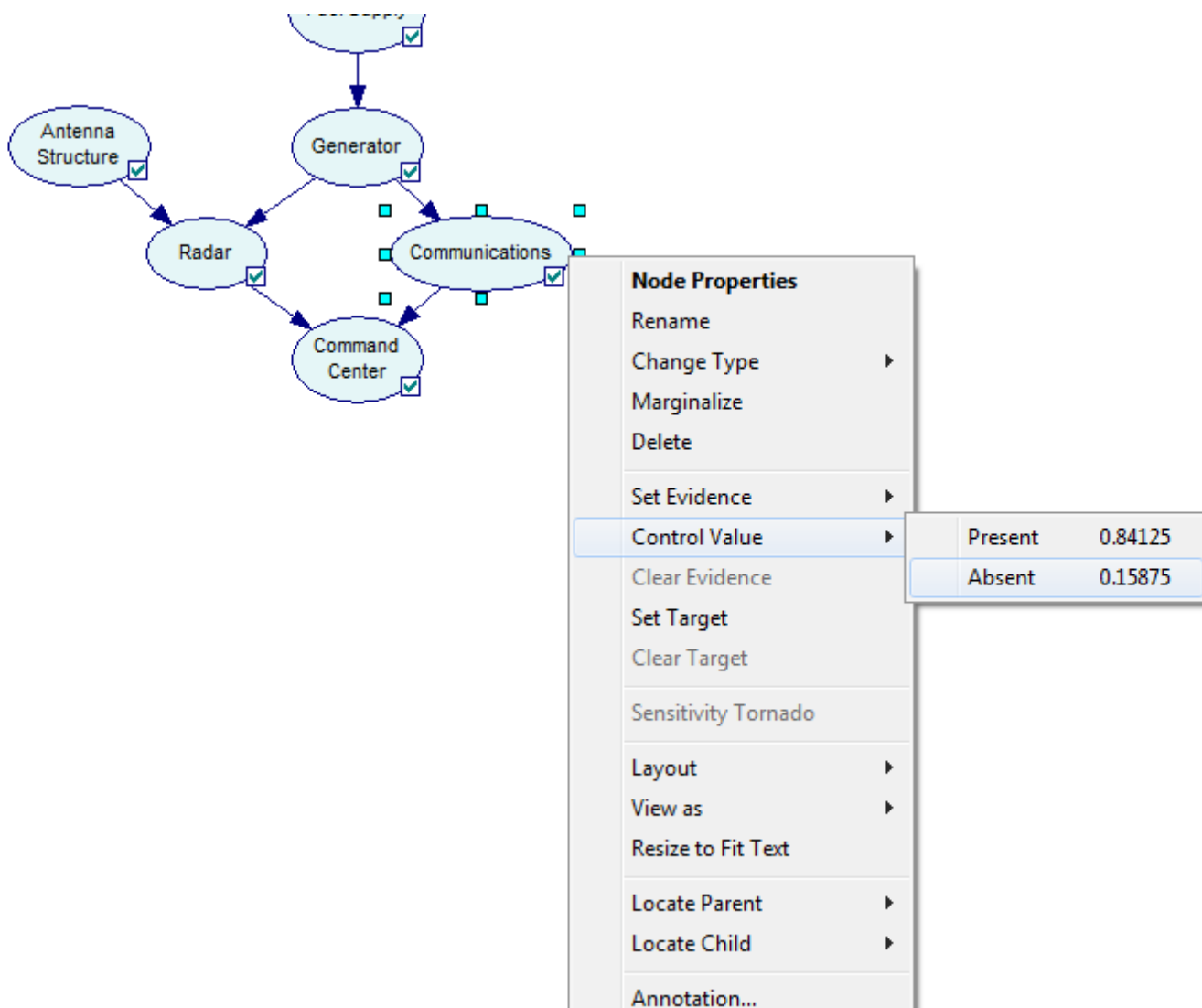


Σχήμα 17. Bayesian δίκτυο για την κατάσταση λειτουργίας ενός Κέντρου Διοίκησης.

Θεωρώντας ότι το μοντέλο είναι κέντρο διοίκησης ενός εχθρού και ο στόχος του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων είναι να διαταράξει τις λειτουργίες του, η παρέμβαση στις επικοινωνίες, για παράδειγμα, μπορεί να πραγματοποιηθεί παρεμποδίζοντας το εξερχόμενο σήμα με θόρυβο. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια εξωτερική παρέμβαση που έχει ως αποτέλεσμα οι επικοινωνίες να μην λειτουργούν, δηλ. ουσιαστικά να τεθεί η τιμή της μεταβλητής «Επικοινωνίες» στην κατάσταση «απουσία».

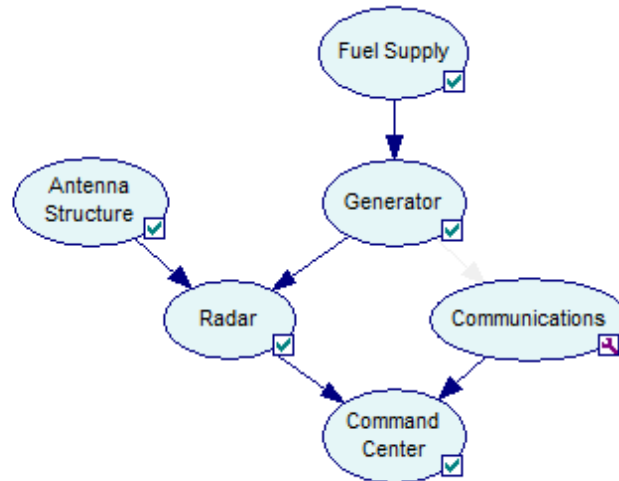
Οι επικοινωνίες θα είναι «απουσίες» ανεξάρτητα από τις τιμές άλλων μεταβλητών στο δίκτυο (και, ειδικότερα, τη μητρική μεταβλητή, «Γεννήτρια»). Η τιμή ελέγχου χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τέτοιου είδους καταστάσεις. Για τον έλεγχο της τιμής του κόμβου «Επικοινωνίες» για την κατάσταση «απουσία», ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα (Σχ. 18):

1. Στον κόμβο «Επικοινωνίες» επιλέχθηκε η επιλογή Control Value από το αναδυόμενο μενού του κόμβου που εμφανίζεται.
2. Επιλέγεται η τιμή «Απουσία» από το υπομενού Control Value.



Σχήμα 18. Διαδικασία ελέγχου τιμής της μεταβλητής «Επικοινωνίες»

Δεδομένου ότι η κατάσταση ενός ελεγχόμενου κόμβου δεν εξαρτάται από την τιμή των κόμβων γονέων του, υπάρχει μια προσωρινή αλλαγή στη δομή του δικτύου. Στο GeNIe αυτό φαίνεται με τη μείωση της φωτεινότητας του τόξου που συνδέει τους γονικούς κόμβους με τον ελεγχόμενο κόμβο. Στην περίπτωση του παραδείγματος, το τόξο που συνδέει τον κόμβο «Γεννήτρια» και τον κόμβο «Επικοινωνίες» είναι αχνό όπως φαίνεται παρακάτω Σχ. 19.



Σχήμα 19. Bayesian δίκτυο για την κατάσταση λειτουργίας ενός Κέντρου Διοίκησης έπειτα από την εκτέλεση της ενέργειας ελέγχου τιμής της μεταβλητής «Επικοινωνίες».

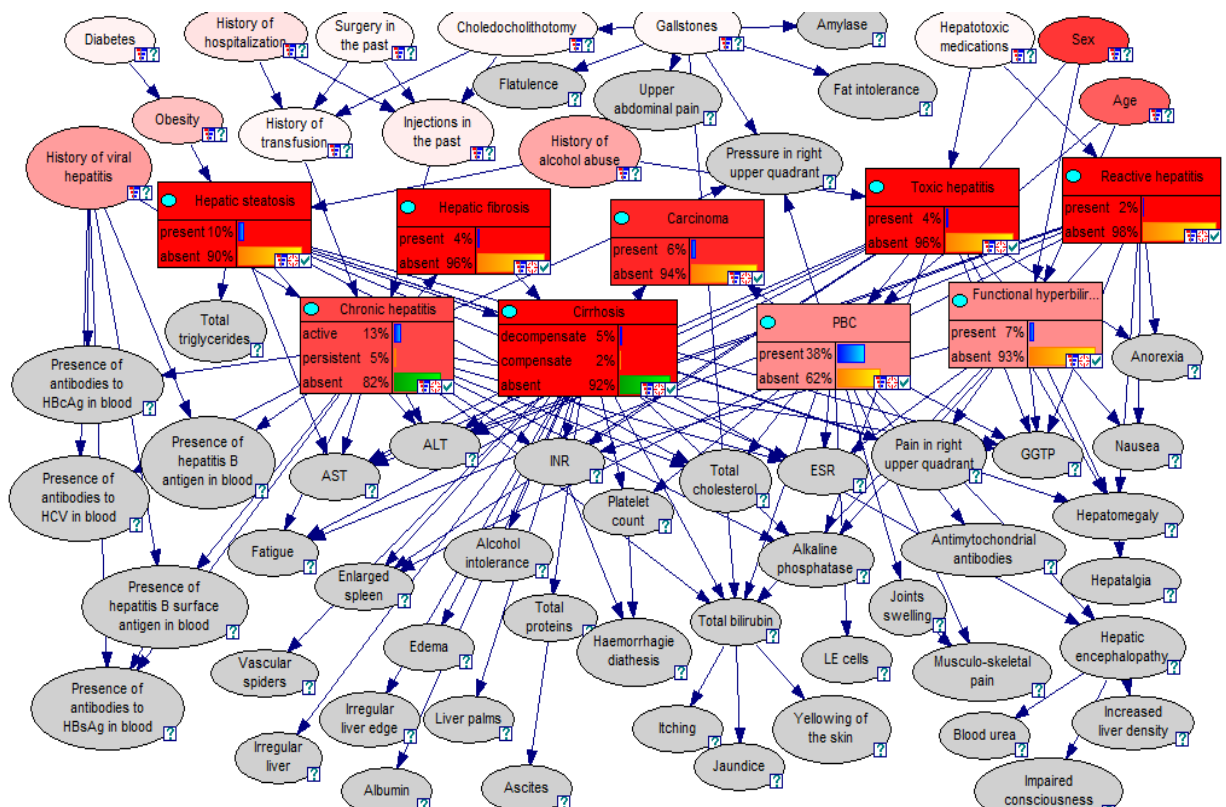
Μετά τον έλεγχο στην τιμή του κόμβου «Επικοινωνίες», το GeNIe ορίζει την τιμή του ελεγχόμενου κόμβου στην τιμή που καθορίζεται από το χειρισμό. Επομένως, η τιμή των Επικοινωνιών έχει οριστεί σε «Απούσες». Για να φανεί ότι ο κόμβος είναι ελεγχόμενος, το GeNIe εμφανίζει το εικονίδιο κατάστασης (κάτω δεξιά) στον κόμβο. Για να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων της παρέμβασης, θα χρειαστεί να ενημερωθεί το μοντέλο. Μετά την ενημέρωση του μοντέλου, φαίνονται οι τιμές κάθε κόμβου.

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΕ BBN

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ουσιαστικά μια διαδικασία με την οποία αναζητούνται οι σημαντικότερες παράμετροι για το μοντέλο. Το GeNIe εφαρμόζει έναν αλγόριθμο που προτείνεται από τους Kjaerulff και van der Gaag (2000) που εκτελεί απλή ανάλυση ευαισθησίας στα BBN. Σε γενικές γραμμές, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο στοχοθετημένων κόμβων, ο αλγόριθμος υπολογίζει ένα πλήρες σύνολο παραγώγων των ύστερων κατανομών πιθανοτήτων των στοχοθετημένων κόμβων για κάθε μία από τις αριθμητικές παραμέτρους του BBN. Αυτές οι παράγωγοι δίνουν μια ένδειξη της σπουδαιότητας της ακρίβειας των αριθμητικών παραμέτρων του δικτύου για τον υπολογισμό των προηγούμενων πιθανοτήτων των στόχων. Αν η παράγωγος είναι μεγάλη για μια

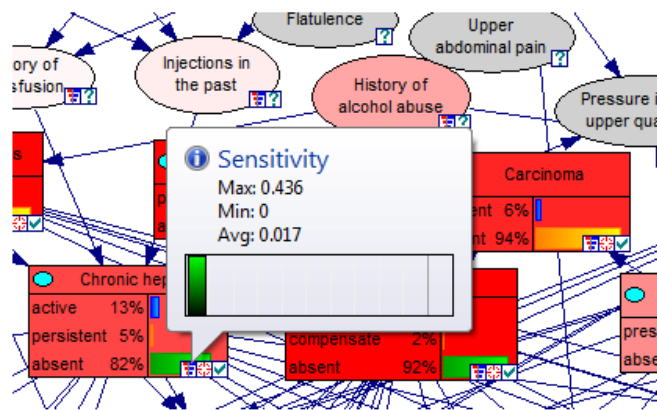
παράμετρο p , τότε μια μικρή απόκλιση στο p μπορεί να οδηγήσει σε μια μεγάλη διαφορά στις μεταγενέστερες πιθανοτικές κατανομές των στοχοθετημένων κόμβων. Εάν το παράγωγο είναι μικρό, τότε ακόμη και μεγάλες αποκλίσεις στην παράμετρο προκαλούν μικρή διαφορά.

Η ανάλυση ευαισθησίας ενεργοποιείται με το πάτημα της επιλογής Sensitivity analysis της γραμμής εργαλείων και ακολουθεί ο χρωματισμός του δικτύου σε κόκκινο χρώμα (Σχ. 20).



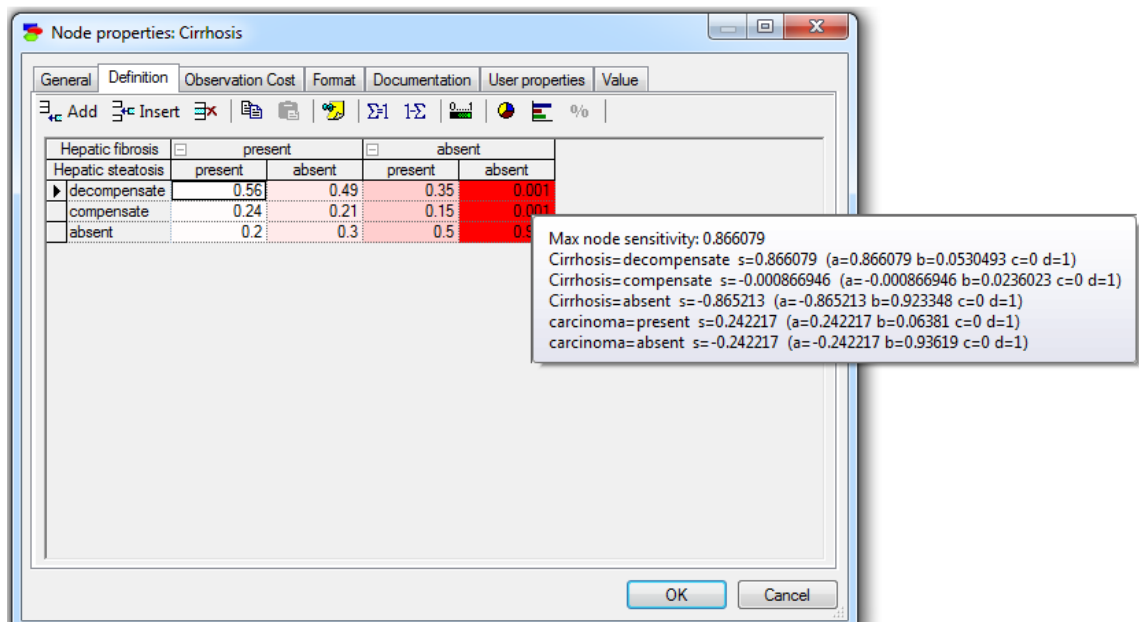
Σχήμα 20. Μορφή του δικτύου έπειτα από Ανάλυση Ευαισθησίας.

Οι κόμβοι που έχουν κόκκινο χρώμα περιέχουν σημαντικές παραμέτρους. Η τοποθέτηση του δείκτη πάνω από τους μεμονωμένους κόμβους εμφανίζει συνοπτικές πληροφορίες (Σχ. 21).



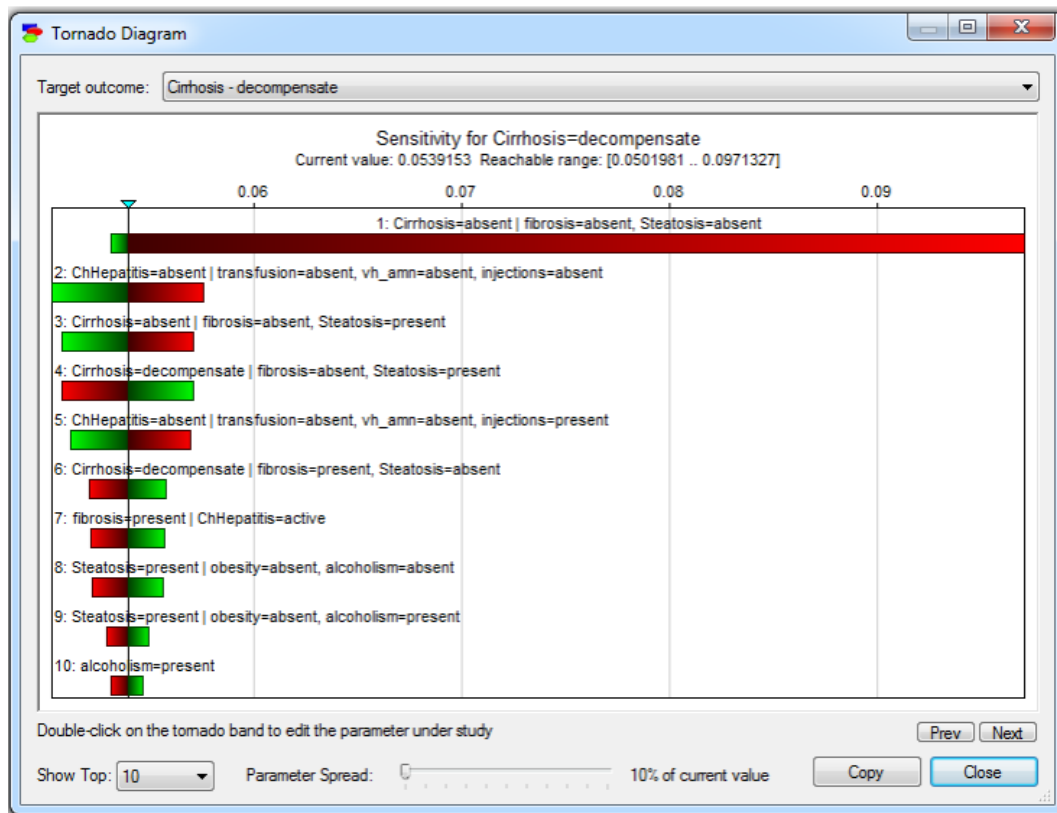
Σχήμα 21. Πληροφορίες σχετικές με το βαθμό ευαισθησίας των συνδεδεμένων μεταβλητών.

Για παράδειγμα, με διπλό-κλικ στον κόμβο Cirrhosis εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα (Σχ. 22). Ο χρωματισμός των μεμονωμένων στοιχείων δείχνει μεμονωμένα τις παραμέτρους που είναι σημαντικές. Η τοποθέτηση του δείκτη πάνω από οποιαδήποτε από τις ράβδους δείχνει τις ακριβείς αριθμητικές ευαισθησίες για τη συγκεκριμένη μπάρα. Στο Σχ. 22, το γκρι ορθογώνιο δείχνει τις παραμέτρους για την πρώτη μπάρα από την κορυφή: (Cirrhosis = absent | fibrosis = absent, Steatosis = absent).



Σχήμα 22. Καρτέλα ορισμού της μεταβλητής Cirrhosis με χρωματισμό της σημαντικότερης παραμέτρου και με εμφάνιση αριθμητικών τιμών υπολογισμένων παραγώγων

Οι πιο ευαίσθητες παράμετροι εμφανίζονται αναλυτικά με την ενεργοποίηση του Tornado diagram όπως φαίνεται παρακάτω (Σχ. 23).



Σχήμα 23. Tornado diagram για την πιο ευαίσθητη μεταβλητή (Cirrhosis).

Το διάγραμμα δείχνει τις πιο ευαίσθητες παραμέτρους για μια επιλεγμένη κατάσταση του κόμβου «Cirrhosis» ταξινομημένη από τις πιο ευαίσθητες στις λιγότερο ευαίσθητες. Ο ρυθμιστής στο κάτω μέρος του παραθύρου διαλόγου επιτρέπει να προσδιοριστεί το ποσοστό μεταβολής σε όλες τις παραμέτρους (η προεπιλογή είναι 10%). Ο οριζόντιος άξονας δείχνει την απόλυτη μεταβολή στην πιθανότητα που εξετάζεται όταν κάθε μία από τις παραμέτρους αλλάζει κατά το ποσοστό αυτό.

Το στοχοθετούμενο εύρος τιμών δείχνει τις ελάχιστες και τις μέγιστες μεταγενέστερες (posterior) τιμές πιθανότητας για το επιλεγμένο αποτέλεσμα (στο Σχ. 23, είναι η κατάσταση «decompensate» του κόμβου στόχου «Cirrhosis»). Αυτές οι ελάχιστες και οι μέγιστες εκ των υστέρων τιμές πιθανότητας εξαρτώνται άμεσα από το επιλεγμένο έκταση της παραμέτρου (Parameter Spread, βλ. Σχ. 23). Το εύρος της παραμέτρου (Parameter range) εμφανίζει την ελάχιστη και τη

μέγιστη τιμή παραμέτρου. Πάλι, αυτές οι τιμές έχουν άμεση εξάρτηση από την έκταση της παραμέτρου.

5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ BBN ΓΙΑ ΈΡΓΑ SAT

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός BBN, με την βοήθεια του προγράμματος GeNle, για την εκτίμηση της επιτυχία ενός έργου SAT.

5.1 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ BBN ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ SAT

Οι βασικές παράμετροι που επιδρούν στην **(success)** ενός έργου τεχνητού εμπλουτισμού της συγκεκριμένης κατηγορίας και οι οποίες λήφθηκαν υπόψη στο απλοποιημένο μοντέλου είναι ο **ρυθμός κατεΐσδυσης (infiltration rate)** και η **αποτελεσματική απορρύπανση (effective purification)** των δευτερογενών λυμάτων που επιτυγχάνεται στην ακόρεστη ζώνη.

Οι δύο αυτές παράμετροι εξαρτώνται με τη σειρά τους από τους ακόλουθους **πέντε (5) βασικούς παράγοντες**, οι οποίοι και αποτελούν τους κόμβους-γονείς του απλοποιημένου BBN:

- **Υδροπερατότητα (Hydraulic conductivity):** Η υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα (k) χρησιμοποιείται στην υδρογεωλογία γιατί το ρευστό είναι το νερό. Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την εσωτερική τριβή, την αντίσταση δηλ. του υγρού στη ροή. Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy.
- **Πορώδες (Porous):** Το πορώδες (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_k) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος/εδάφους ($V_{ολ}$): $n = V_k / V_{ολ}$. Το πορώδες χαρακτηρίζεται σαν πρωτογενές δηλ. το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και ως δευτερογενές δηλ. το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά. Το πρωτογενές πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων.

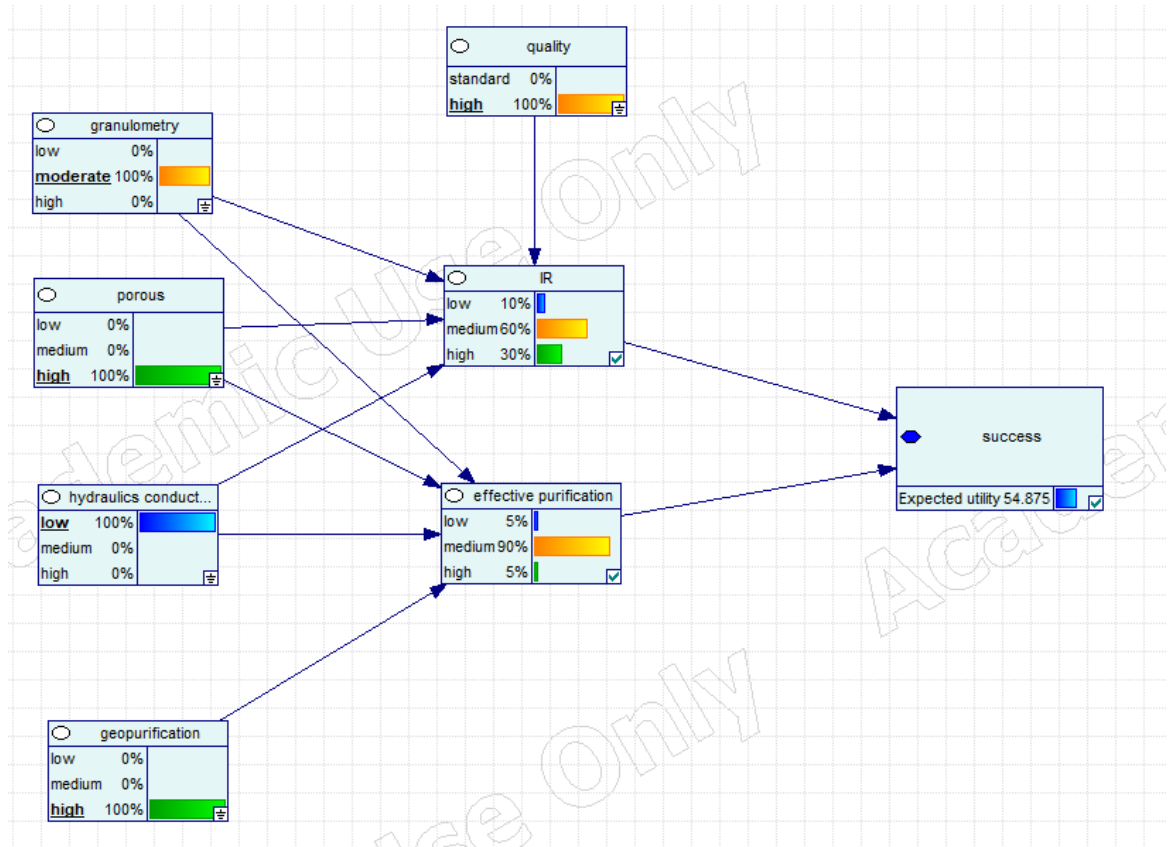
- **Κατείσδυση (infiltration):** Η κατείσδυση αποτελεί τη σημαντικότερη διεργασία για τον καθορισμό της υδρο-οικονομίας μιας περιοχής γιατί συμβάλλει στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων. Αντιπροσωπεύει το μέρος εκείνο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους (αφού κάποια ποσότητα δεσμευτεί ως νερό και φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες προστιθέμενο στα αποθέματα των υπόγειων νερών και μετέχει στις κινήσεις του υπόγειου νερού. Η ικανότητα κατείσδυσης (infiltration capacity) εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, τη λιθολογία, την κλίση και τον τύπο του εδάφους, τη βλάστηση, την ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων κ.λπ. Μέτρο της κατείσδυσης είναι ο συντελεστής κατείσδυσης, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεισδύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση κ.ά.).
- **Φυσικό δυναμικό απορρύπανσης (Geopurification):** το φυσικό δυναμικό απορρύπανσης αναφέρεται, στο παρόν μοντέλο, κυρίως στα χημικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά της ακόρεστης ζώνης που επηρεάζουν τους μηχανισμούς του φυσικού αυτοκαθαρισμού (π.χ. προσρόφηση, απορρόφηση, ιοντοεναλλαγή, κ.λπ.).
- **Ποιότητα λυμάτων (Quality):** αναφέρεται στην ποιότητα των λυμάτων που αποτίθενται στη λεκάνη (λύματα δευτεροβάθμιας ή τριτοβάθμιας επεξεργασίας).

5.2 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ BBN ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ SAT

5.2.1 Δομή του μοντέλου

Στο ακόλουθο Σχ. 24, παρουσιάζεται η συνολική δομή του απλοποιημένου BBN για την εκτίμηση της επιτυχίας έργων τεχνητού εμπλουτισμού SAT. Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα και απεικονίζεται και στο Σχ. 24, ο βαθμός της επιτυχίας του έργου, εξαρτάται από το ρυθμό κατείσδυσης και την αποτελεσματικότητα της απορρύπανσης στην ακόρεστη ζώνη. Ο ρυθμός κατείσδυσης με τη σειρά του επηρεάζεται από την κοκκομετρία, το πορώδες, την υδραυλική αγωγιμότητα και την ποιότητα των λυμάτων (η τελευταία επιδρά στα φαινόμενα clogging). Αντίστοιχα, η αποτελεσματικότητα της απορρύπανσης στην

ακόρεστη ζώνη εξαρτάται από την κοκκομετρία, το πορώδες, την υδραυλική αγωγιμότητα και το φυσικό δυναμικό απορρόπησης.



Σχήμα 24. Τελική δομή του απλοποιημένου BBN για τα έργα SAT

5.2.2 Ανάπτυξη του μοντέλου

Η ανάπτυξη του μοντέλου BBN, ως προς τις επιμέρους επιλογές των κόμβων, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις ακόλουθες παραδοχές:

- Ο τελικός κόμβος της επιτυχίας του έργου SAT ορίστηκε ως ένας κόμβος χρησιμότητας (utility node), ο οποίος δύναται να λαμβάνει τιμές από 0 έως 100.
- Ο κόμβος του ρυθμού κατείδυσης μπορεί να εμφανιστεί με τρεις διαφορετικές καταστάσεις: υψηλός, μέσος και χαμηλός.
- Ο κόμβος της αποτελεσματικότητας της φυσικής απορρόπησης στην ακόρεστη ζώνη εμφανίζεται με τρεις καταστάσεις: υψηλή, μέση και χαμηλή.

- Ο κόμβος της ποιότητας των λυμάτων εμφανίζεται με δύο καταστάσεις: στάνταρτ ποιότητα (δευτεροβάθμια επεξεργασία) και ανώτερη ποιότητα (τριτοβάθμια επεξεργασία).
- Ο κόμβος της κοκκομετρίας μπορεί να εμφανιστεί με τρεις καταστάσεις: μεγάλη, μέση και χαμηλή κοκκομετρία.
- Ο κόμβος του πορώδους μπορεί να εμφανιστεί με τρεις καταστάσεις: μεγάλο, μέσο και χαμηλό πορώδες.
- Ο κόμβος της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να εμφανιστεί με τρεις καταστάσεις: μεγάλη, μέση και χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα.
- Ο κόμβος του δυναμικού φυσικής απορρύπανσης μπορεί να εμφανιστεί με τρεις καταστάσεις: μεγάλο, μέσο και χαμηλό δυναμικό απορρύπανσης.

Οι πιθανότητες εμφάνισης και οι τιμές κάθε κόμβου-παιδιού εισήχθησαν μέσω πινάκων πιθανοτήτων (CPTs). Έτσι, για την επιτυχία του έργου SAT ο αντίστοιχος πίνακας CPT περιλαμβάνει 9 κελιά, καθώς εξαρτάται από δύο κόμβους-γονείς κάθε ένας εκ των οποίων έχει τρεις πιθανές καταστάσεις (3^2). Ο πίνακας CPT του κόμβου του ρυθμού κατείδυσης περιλαμβάνει συνολικά 162 διαφορετικά κελιά, καθώς έχει τρεις διαφορετικές καταστάσεις, κάθε μία εκ των οποίων προσδιορίζεται από τέσσερις διαφορετικές παραμέτρους, τρεις εκ των οποίων εμφανίζονται με τρεις καταστάσεις και μία με δύο καταστάσεις ($3^3 * 2^1$). Τέλος, ο πίνακας CPT του κόμβου του δυναμικού φυσικής απορρύπανσης περιλαμβάνει συνολικά 243 διαφορετικά κελιά, καθώς έχει τρεις διαφορετικές καταστάσεις, κάθε μία εκ των οποίων προσδιορίζεται από τέσσερις διαφορετικές παραμέτρους, οι οποίες εμφανίζονται με τρεις καταστάσεις (3^4).

Τόσο ο τύπος και οι καταστάσεις κάθε μεταβλητής όσο και οι πίνακες CPT κάθε κόμβου-παιδιού, καθορίστηκαν με τη βοήθεια ειδικών στα έργα τεχνητού εμπλουτισμού SAT και ελέγχθηκαν ως προς τη συνέπεια των αποτελεσμάτων του BBN. Οι πίνακες CPT παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα της διπλωματικής εργασίας

5.2.3 Χρήση του μοντέλου BBN στην εξαγωγή συμπερασμάτων

Έχοντας κατασκευάσει το BBN για την εκτίμηση της επιτυχίας ενός έργου τεχνητού εμπλουτισμού SAT υπό το πρίσμα των συγκεκριμένων παραμέτρων, υπάρχει δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα για μια σειρά σεναρίων, υποθετικών ή και πραγματικών. Ακολούθως, παρατίθενται, για λόγους παρουσίασης των δυνατοτήτων του μοντέλου, τα αποτελέσματα της εκτιμώμενης επιτυχίας του έργου για τις εξής οκτώ διαφορετικές περιπτώσεις (σενάρια):

Περίπτωση Α:

- Ποιότητας λυμάτων: σπάνταρτ.
- Κοκκομετρία: μεγάλη.
- Πορώδες: μεγάλο.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: μεγάλη.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: μεγάλο

Περίπτωση Β:

- Ποιότητας λυμάτων: ανώτερη.
- Κοκκομετρία: μεγάλη.
- Πορώδες: μεγάλο.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: μεγάλη.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: μεγάλο

Περίπτωση Γ:

- Ποιότητας λυμάτων: σπάνταρτ.
- Κοκκομετρία: χαμηλή.
- Πορώδες: χαμηλό.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: χαμηλή.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: χαμηλό.

Περίπτωση Δ:

- Ποιότητας λυμάτων: ανώτερη.
- Κοκκομετρία: χαμηλή.

- Πορώδες: χαμηλό.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: χαμηλή.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: χαμηλό.

Περίπτωση Ε:

- Ποιότητας λυμάτων: σπάνταρτ.
- Κοκκομετρία: μέση.
- Πορώδες: μέσο.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: μέση.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: χαμηλό.

Περίπτωση ΣΤ:

- Ποιότητας λυμάτων: σπάνταρτ.
- Κοκκομετρία: μέση.
- Πορώδες: μέσο.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: μέση.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: υψηλό.

Περίπτωση Ζ:

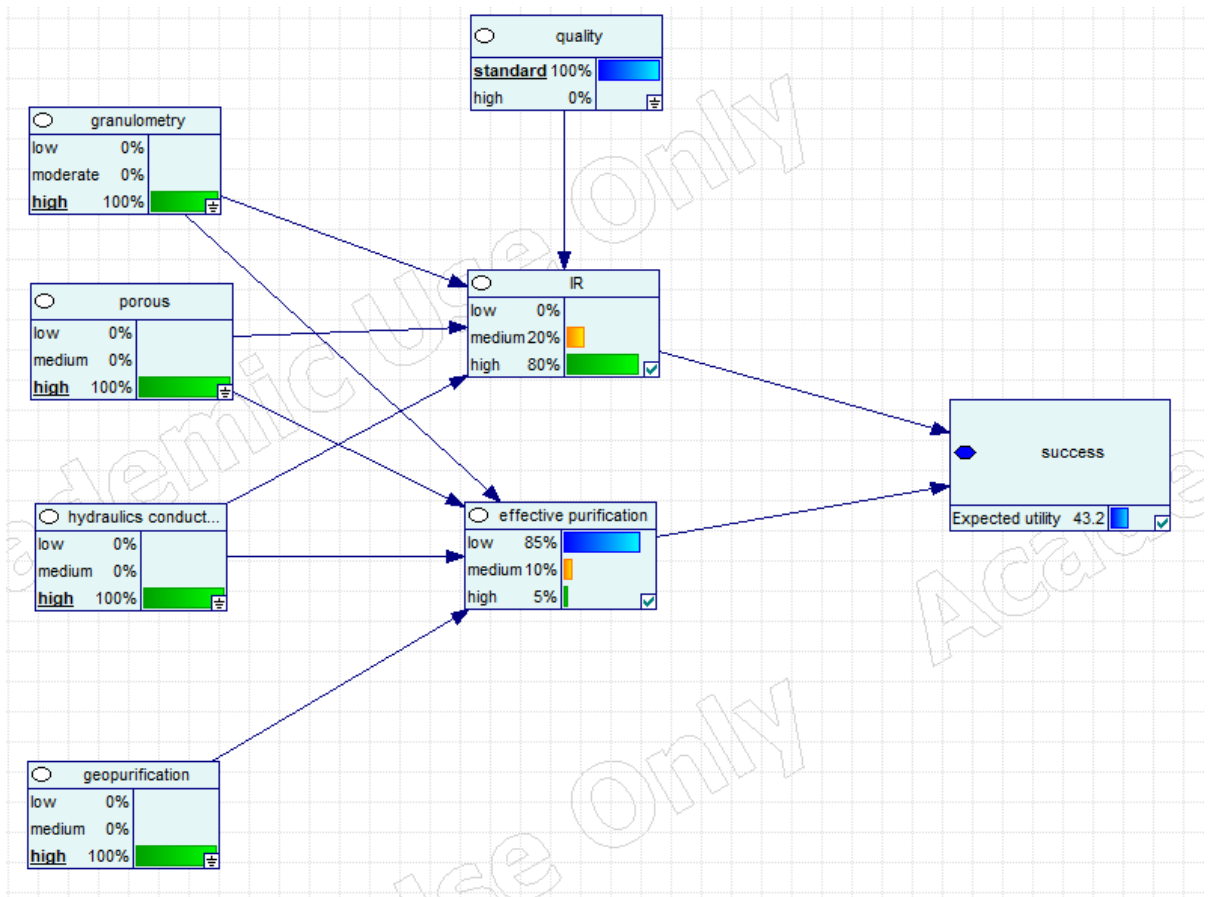
- Ποιότητας λυμάτων: υψηλή.
- Κοκκομετρία: μέση.
- Πορώδες: μέσο.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: μέση.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: χαμηλό.

Περίπτωση Η:

- Ποιότητας λυμάτων: υψηλή.
- Κοκκομετρία: μέση.
- Πορώδες: μέσο.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: μέση.
- Δυναμικό φυσικής απορρύπανσης: υψηλό.

5.2.3.1 Περίπτωση A

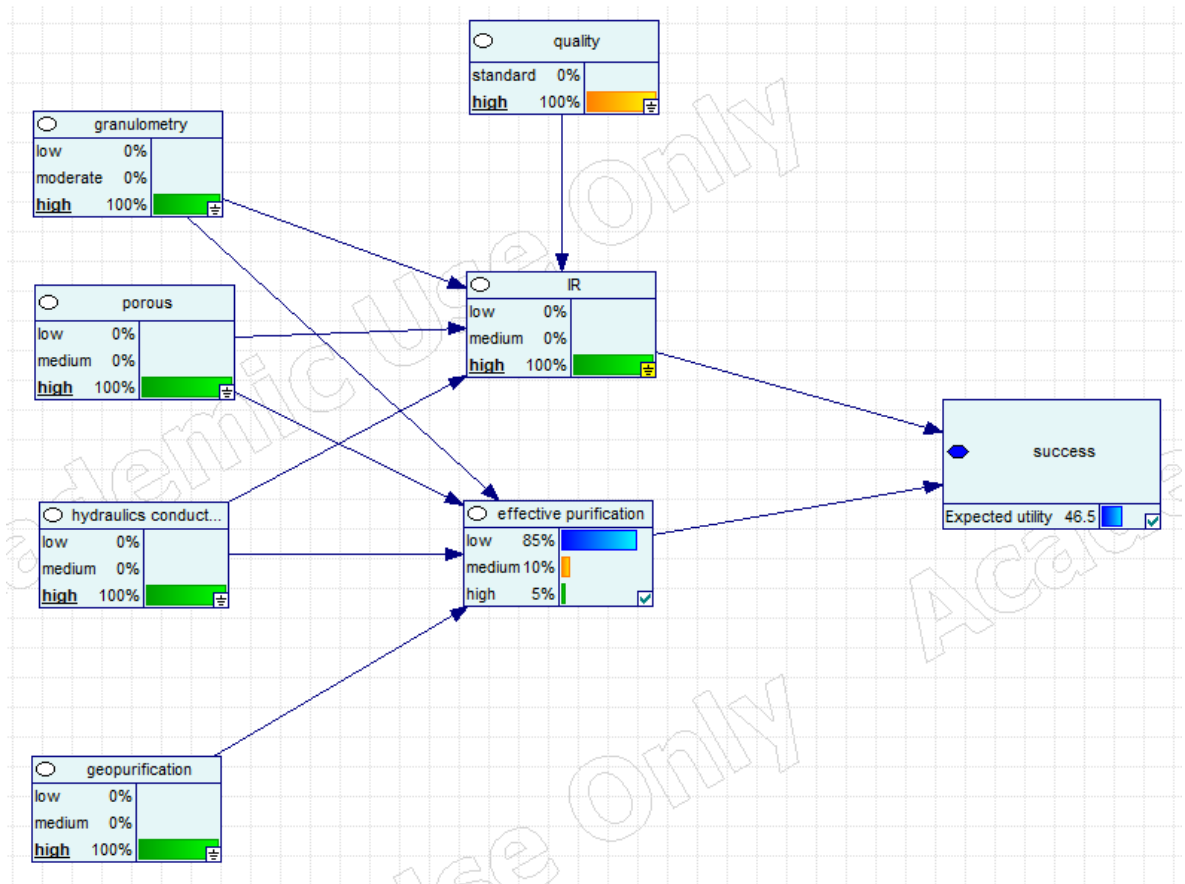
Στην περίπτωση A, θέτοντας την κοκκομετρία, το πορώδες, την υδραυλική αγωγιμότητα και το δυναμικό φυσικής απορρύπανσης στις μέγιστες τιμές που μπορούν να πάρουν, χρησιμοποιώντας παράλληλα μια τυπική ποιότητα δευτερογενών λυμάτων, η πιθανότητα να κυμαίνεται ο ρυθμός κατείσδυσης σε υψηλά επίπεδα είναι μεγάλη (80%) ενώ υπάρχει και μία μικρότερη πιθανότητα (20%) να κυμαίνεται σε μέτριες τιμές. Αντιθέτως, η αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης έχει πιθανότητα 85% να βρεθεί σε χαμηλά επίπεδα. Το συνδυαστικό αποτέλεσμα των δύο αυτών παραμέτρων αντανακλάται τελικά στη μέτρια επίδοση του συστήματος ως προς την επιτυχία του (Success = 43,2).



Σχήμα 25. Εφαρμογή Περίπτωσης A στο GeNIe

5.2.3.2 Περίπτωση Β

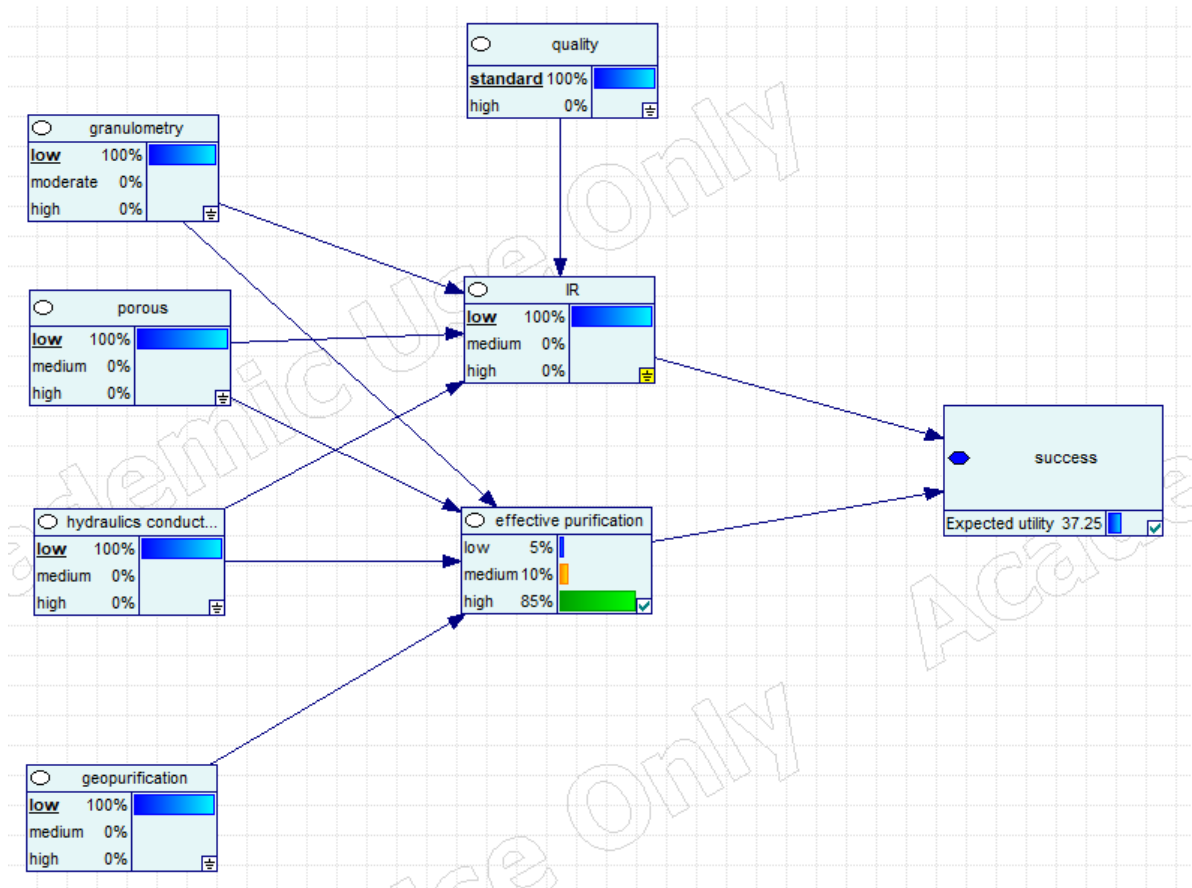
Η Περίπτωση Β διαφοροποιείται ως προς την Περίπτωση Α μόνο στην ποιότητα των λυμάτων. Θέτοντας όμοιες με προηγούμενως τιμές στις υπόλοιπες παραμέτρους, σε συνδυασμό με μία άριστη ποιότητα λυμάτων (τριτοβάθμια επεξεργασία), η πιθανότητα για το ρυθμό κατείδυσης να φτάσει τη μέγιστη τιμή του είναι 100%. Ωστόσο, όπως και στην Περίπτωση Α, η πιθανότητα να βρεθεί η αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης σε χαμηλά επίπεδα είναι 85%, καθώς είναι ανεξάρτητη από την ποιότητα των λυμάτων. Ως τελικό αποτέλεσμα, η επιτυχία του συστήματος SAT αυξάνει κατά 10% περίπου, και λαμβάνει τιμή 46,5.



Σχήμα 26. Εφαρμογή Περίπτωσης Β στο GeNIe

5.2.3.3 Περίπτωση Γ

Στην περίπτωση Γ, η κοκκομετρία, το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα και το δυναμικό φυσικής απορρύπανσης στις χαμηλότερες καταστάσεις, διατηρώντας παράλληλα μια τυπική ποιότητα δευτερογενών λυμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση χαμηλής κατάστασης στο ρυθμό κατείδυσης με πιθανότητα 100%. Αντιθέτως όμως, η αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης ευνοείται από τις χαμηλές τιμές της κοκκομετρίας, του πορώδους και της υδραυλικής αγωγιμότητας κι εμφανίζει πιθανότητα 85% να λάβει υψηλή τιμή, 10% να λάβει μέτρια τιμή και 5% να λάβει χαμηλή (η πιθανότητα δεν είναι μηδενική καθώς το δυναμικό φυσικής απορρύπανσης λαμβάνει χαμηλή τιμή).

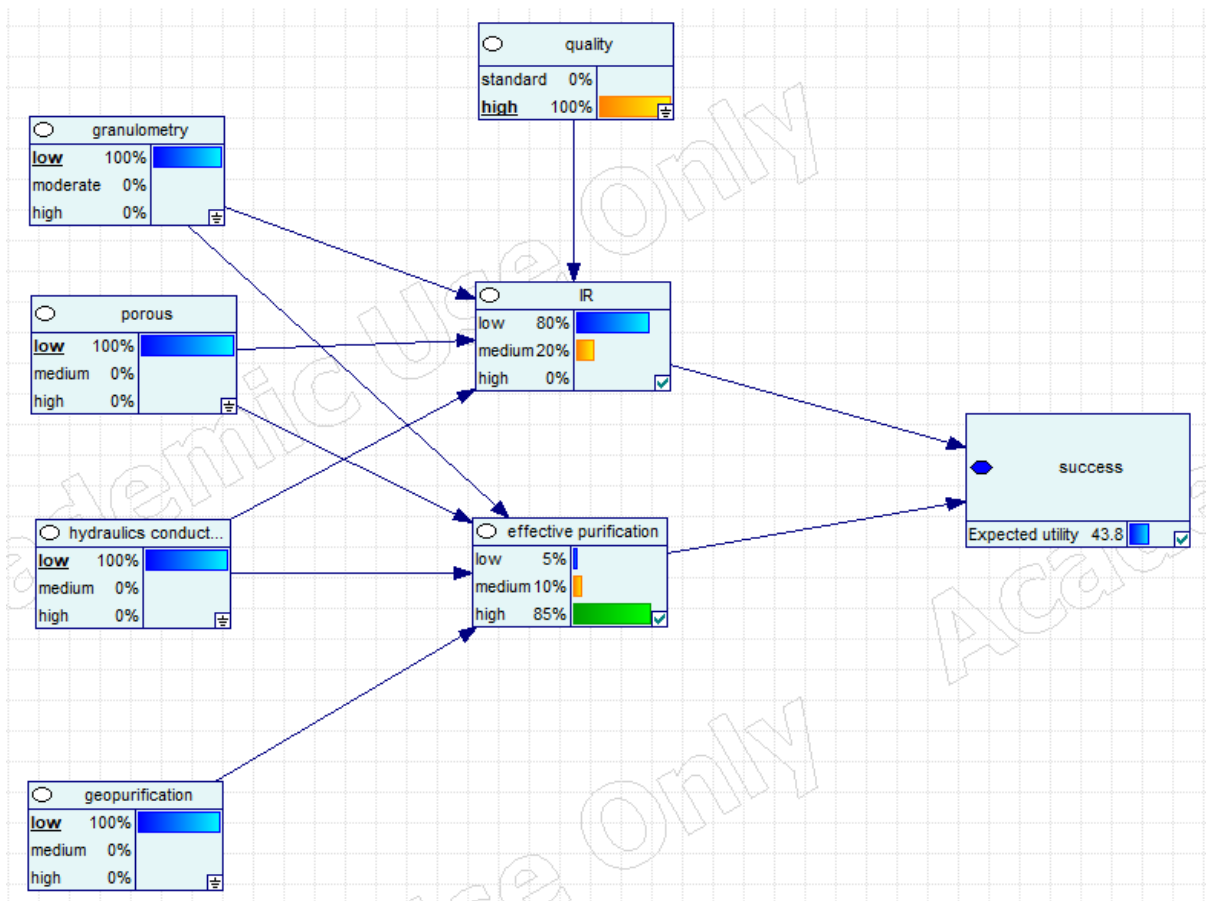


Σχήμα 27. Εφαρμογή Περίπτωσης Γ στο GeNIe

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η πιθανότητα επιτυχίας του συστήματος SAT περιορίζεται στο 37,25.

5.2.3.4 Περίπτωση Δ

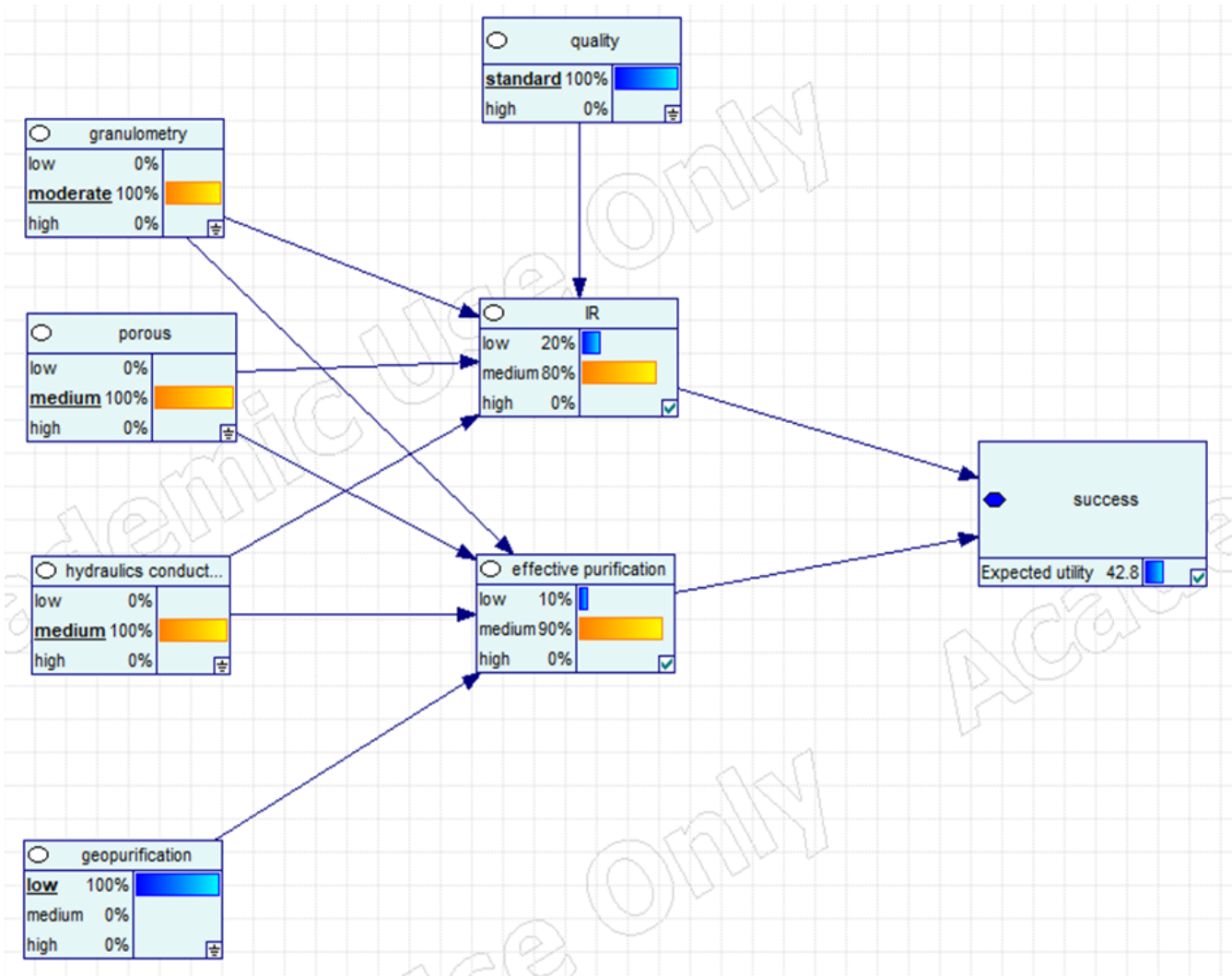
Η Περίπτωση Δ διαφέρει ως προς την Περίπτωση Γ στην ποιότητα των χρησιμοποιούμενων λυμάτων, τα οποία θεωρείται ότι προέρχονται από τριτοβάθμια επεξεργασία. Διατηρώντας όλες τις άλλες μεταβλητές στα χαμηλότερα επίπεδα τιμών και διαφοροποιώντας την ποιότητα των λυμάτων, προκύπτει μία μικρή βελτίωση στο ρυθμό κατείσδυσης, καθώς αυξάνεται στο 20% η πιθανότητα να παρατηρηθεί μια μέση κατάσταση. Η αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης παραμένει αμετάβλητη, καθώς είναι ανεξάρτητη της ποιότητας των λυμάτων. Ο συνδυασμός των δύο μεταβλητών, του ρυθμού κατείσδυσης και της αποτελεσματικότητας της φυσικής απορρύπανσης, οδηγεί σε αύξηση της τιμής της επιτυχίας του συστήματος SAT σε 43,8 (βελτίωση κατά 18% περίπου).



Σχήμα 28. Εφαρμογή Περίπτωσης Δ στο GeNIe

5.2.3.5 Περίπτωση E

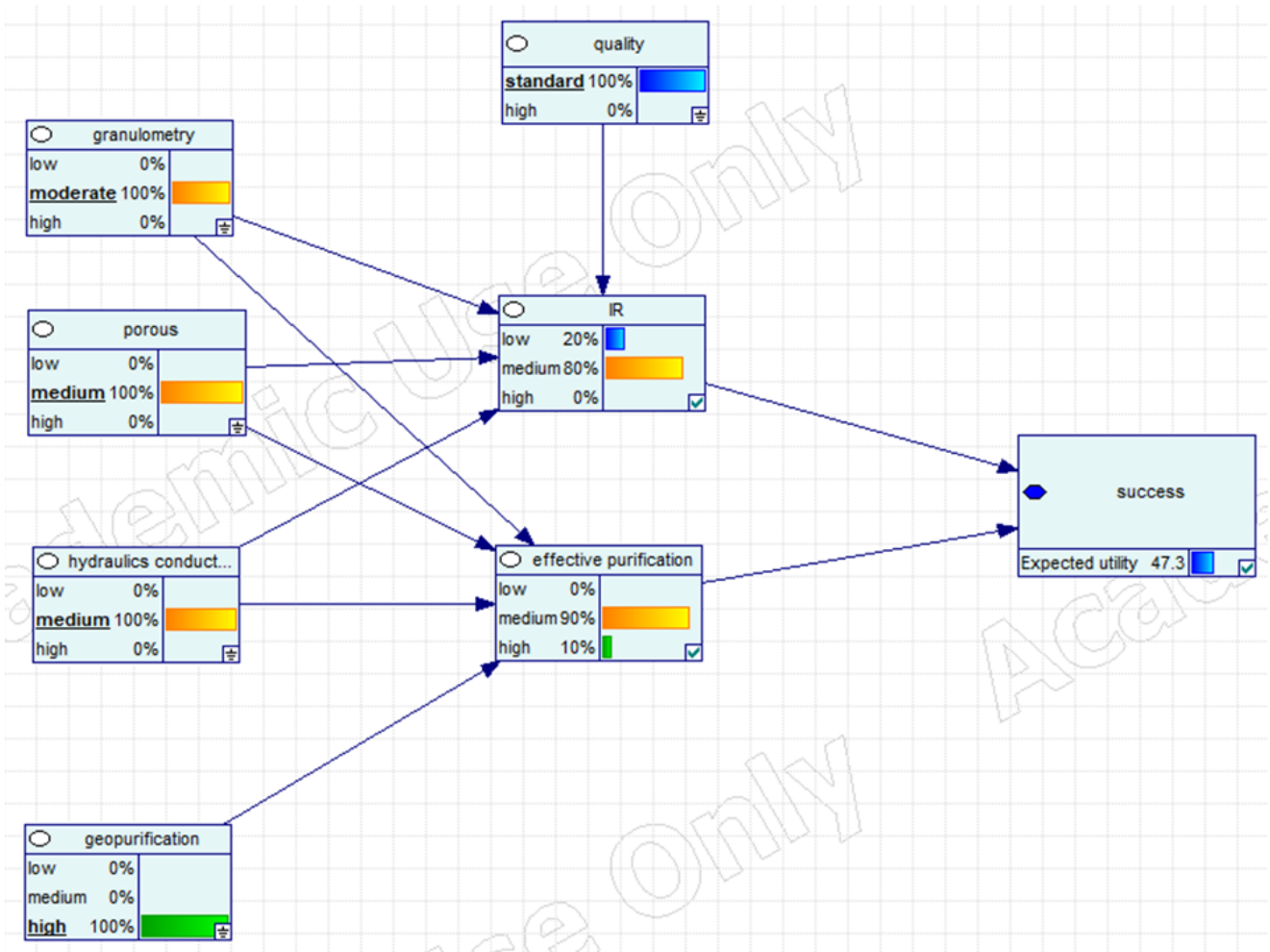
Στην περίπτωση E, η κοκκομετρία, το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρείται ότι βρίσκονται σε μέση κατάσταση και το δυναμικό φυσικής απορρύπανσης σε χαμηλό επίπεδο, και παράλληλα χρησιμοποιείται μια τυπική ποιότητα δευτερογενών λυμάτων. Αυτά τα δεδομένα έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μέσης κατάστασης στο ρυθμό κατείδυσης με πιθανότητα 80% και χαμηλής με πιθανότητα 20%. Η αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης έχει πιθανότητα 90% να λάβει μέση τιμή και 10% να λάβει χαμηλή τιμή. Ο συνδυασμός αυτών των αποτελεσμάτων δίνει μέτρια επιτυχία του συστήματος SAT (τιμή = 42,8).



Σχήμα 29. Εφαρμογή Περίπτωσης E στο GeNIe

5.2.3.6 Περίπτωση ΣΤ

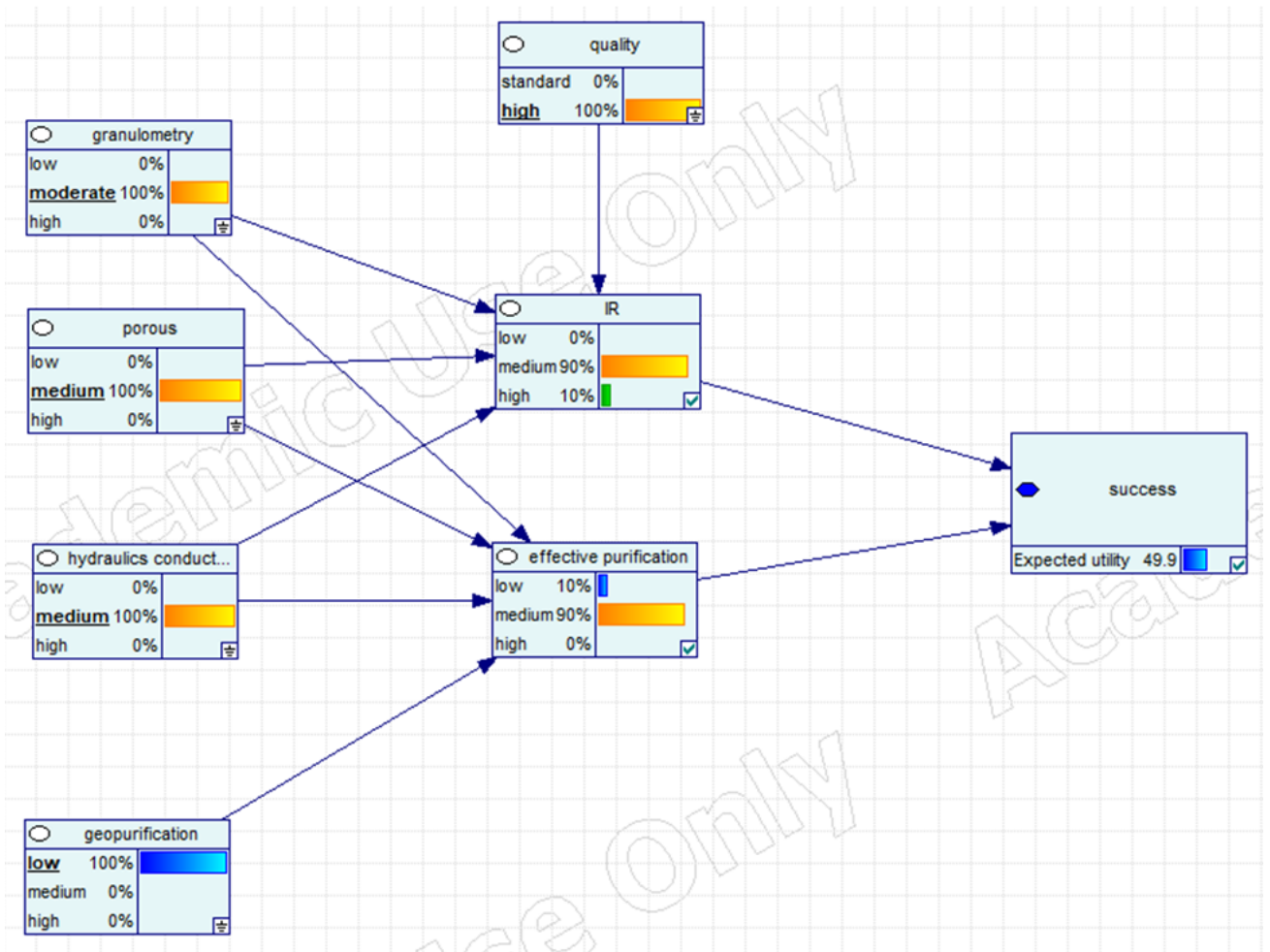
Η Περίπτωση ΣΤ διαφέρει από την Περίπτωση Ε ως προς την τιμή του φυσικού δυναμικού απορρύπανσης που θεωρείται ότι βρίσκεται σε υψηλό επίπεδο. Καθώς το φυσικό δυναμικό απορρύπανσης επηρεάζει μόνο την αποτελεσματικότητα του δυναμικού φυσικής απορρύπανσης, ο ρυθμός κατείσδυσης παραμένει αμετάβλητος, ενώ η αποτελεσματικότητα φυσικής απορρύπανσης εμφανίζει 10% πιθανότητα να λάβει υψηλή τιμή και 90% να λάβει μέτρια. Η επιτυχία του συστήματος SAT αυξάνει κατά 8% περίπου, και λαμβάνει τιμή 47,3.



Σχήμα 30. Εφαρμογή Περίπτωσης ΣΤ στο GeNle

5.2.3.7 Περίπτωση Z

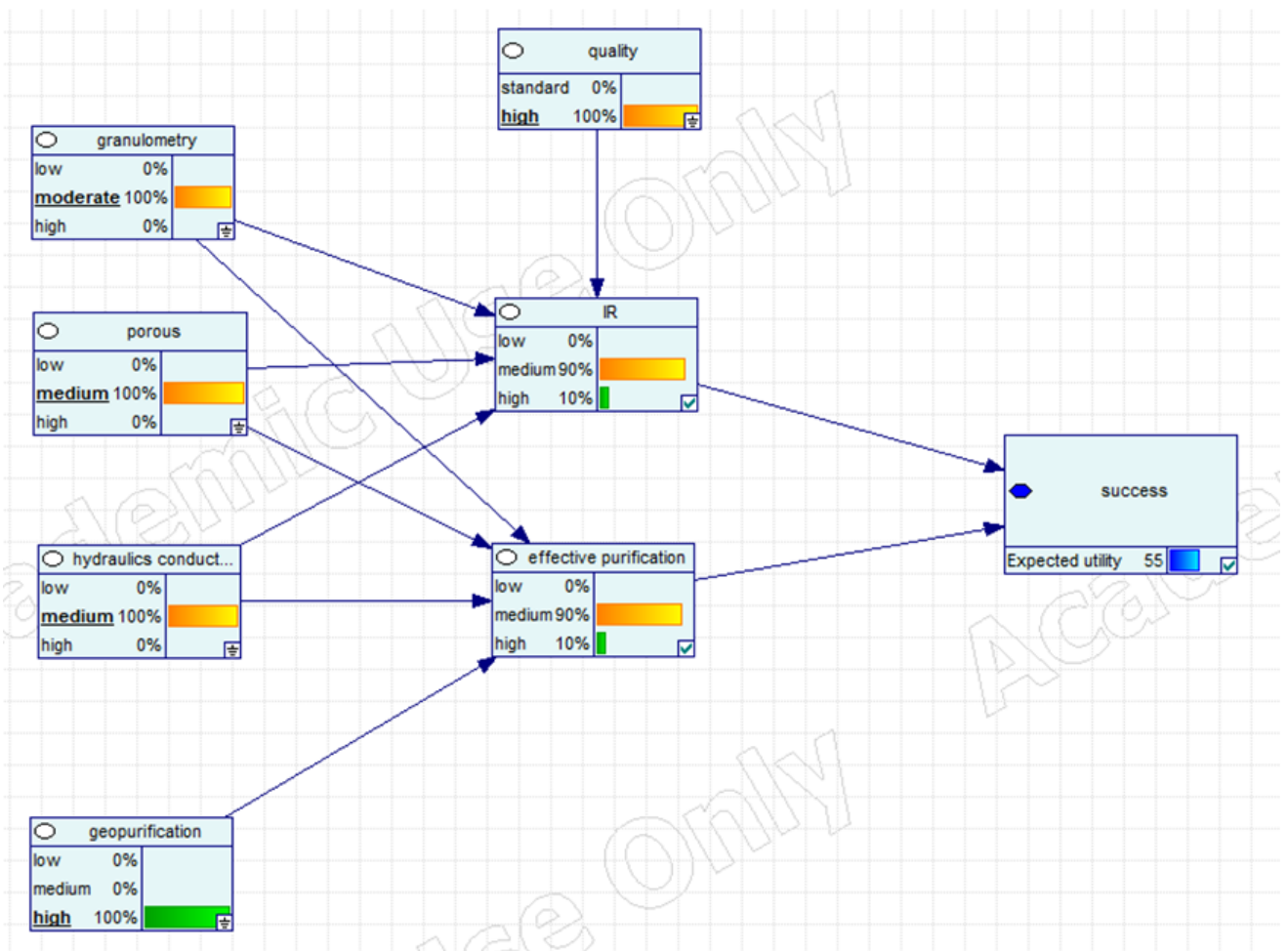
Στην Περίπτωση Z, η κοκκομετρία, το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα βρίσκονται σε μέση κατάσταση και το δυναμικό φυσικής απορρύπανσης σε χαμηλό επίπεδο, ενώ η ποιότητα των λυμάτων θεωρείται υψηλή, καθώς προέρχονται από τριτοβάθμια επεξεργασία. Η αποτελεσματικότητα του δυναμικού φυσικής απορρύπανσης εμφανίζει 90% πιθανότητα να βρίσκεται σε μέτρια επίπεδα και 10% σε χαμηλή. Ο ρυθμός κατείσδυσης εμφανίζει 10% πιθανότητα να λάβει υψηλή τιμή και 90% πιθανότητα να λάβει μέτρια. Συνολικά, η επιτυχία του συστήματος SAT αυξάνει και λαμβάνει τιμή 49,9.



Σχήμα 31. Εφαρμογή Περίπτωσης Z στο GeNIe

5.2.3.8 Περίπτωση Η

Η Περίπτωση Η διαφέρει από την περίπτωση Ζ ως προς το δυναμικό φυσικής απορρύπανσης, το οποίο θεωρείται υψηλό. Ο ρυθμός κατείδυσης εμφανίζει 10% πιθανότητα να λάβει υψηλή τιμή και 90% πιθανότητα να λάβει μέτρια και η αποτελεσματικότητα του δυναμικού φυσικής απορρύπανσης εμφανίζει 90% πιθανότητα να βρίσκεται σε μέτρια επίπεδα και 10% σε υψηλά. Ως τελικό αποτέλεσμα, η επιτυχία του συστήματος SAT κυμαίνεται σε μέτρια προς υψηλά επίπεδα και λαμβάνει τιμή 55.



Σχήμα 32. Εφαρμογή Περίπτωσης Η στο GeNIe

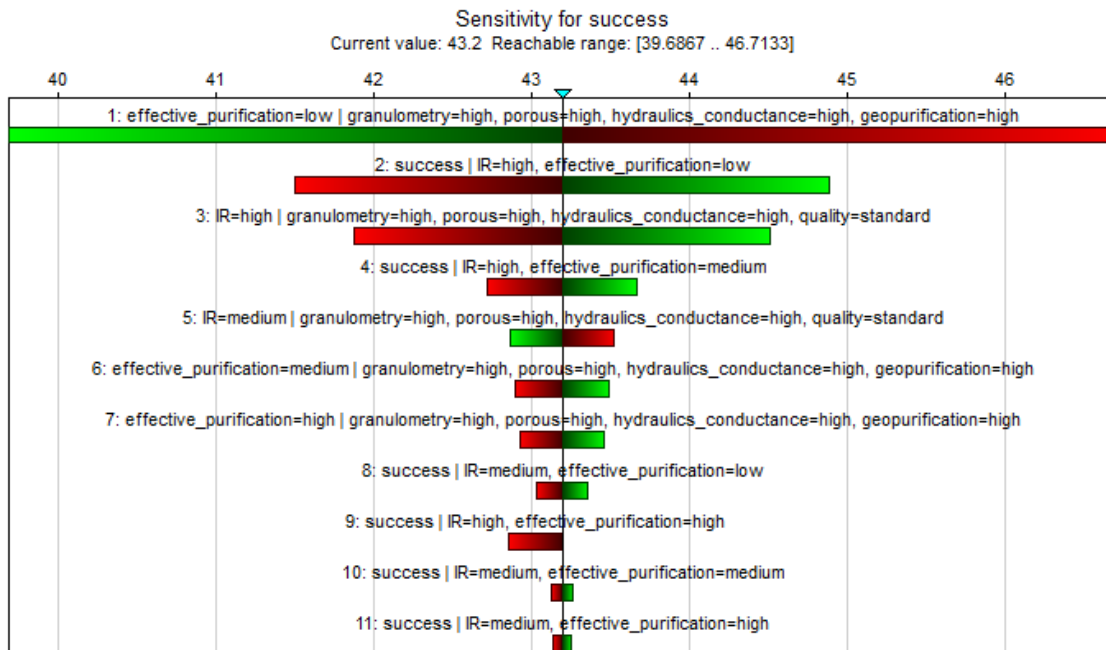
5.2.3.9 Εύρεση συνθηκών βέλτιστης απόδοσης

Και στις οκτώ περιπτώσεις η πιθανότητα επιτυχίας του τεχνητού εμπλουτισμού κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς η κοκκομετρία, το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα δημιουργούν αντίρροπες δυνάμεις στις μεταβλητές του ρυθμού κατείσδυσης και της αποτελεσματικότητας της φυσικής απορρύπανσης (δηλ. όταν εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές του ρυθμού κατείσδυσης, εμφανίζονται οι ελάχιστες τιμές στην αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης και το αντίστροφο). Ωστόσο, μεταξύ των περιπτώσεων που εξετάστηκαν εμφανίζονται διαφορές, οι οποίες, μεταξύ της χαμηλότερης και της υψηλότερης τιμής κυμαίνονται σε επίπεδα άνω του 30%.

5.2.4 Ανάλυση ευαισθησίας με χρήση του μοντέλου BBN

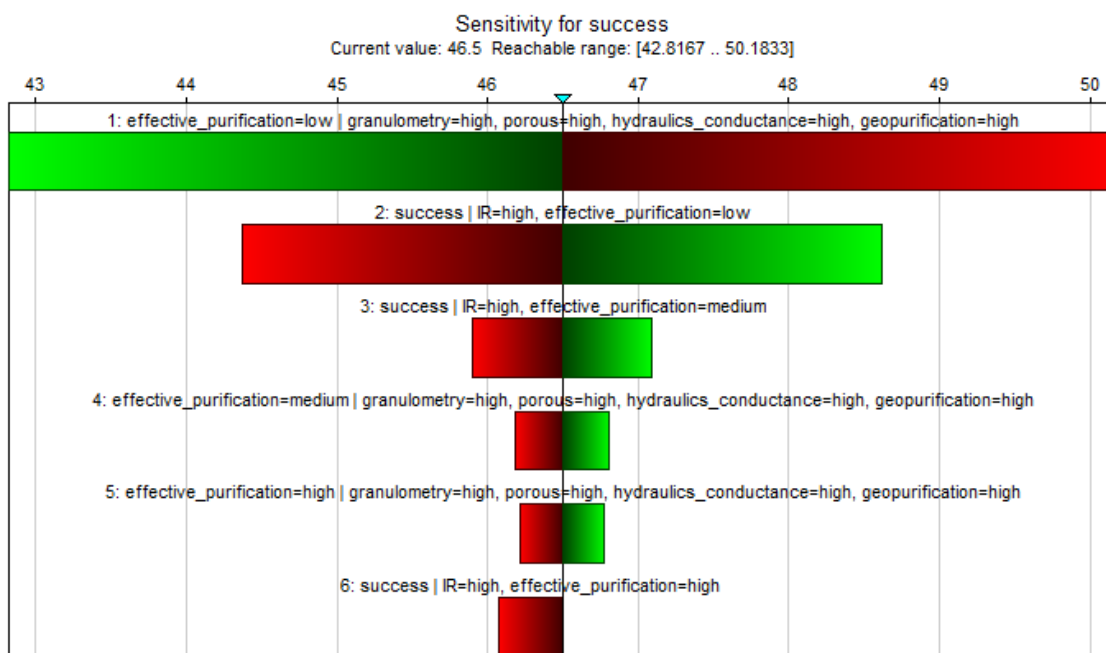
Πέραν της εκτίμησης της επιτυχίας ενός έργου SAT υπό το πρίσμα συγκεκριμένων συνθηκών για τις μεταβλητές εισόδου, το μοντέλο, με τη βοήθεια που παρέχει το λογισμικό GeNIe, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση αναλύσεων ευαισθησίας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση κάνοντας ανάλυση ευαισθησίας σε κάθε μια από τις Περιπτώσεις προκύπτουν τα εξής οκτώ διαγράμματα, τα οποία απεικονίζονται στα Σχ. 33 έως 40.



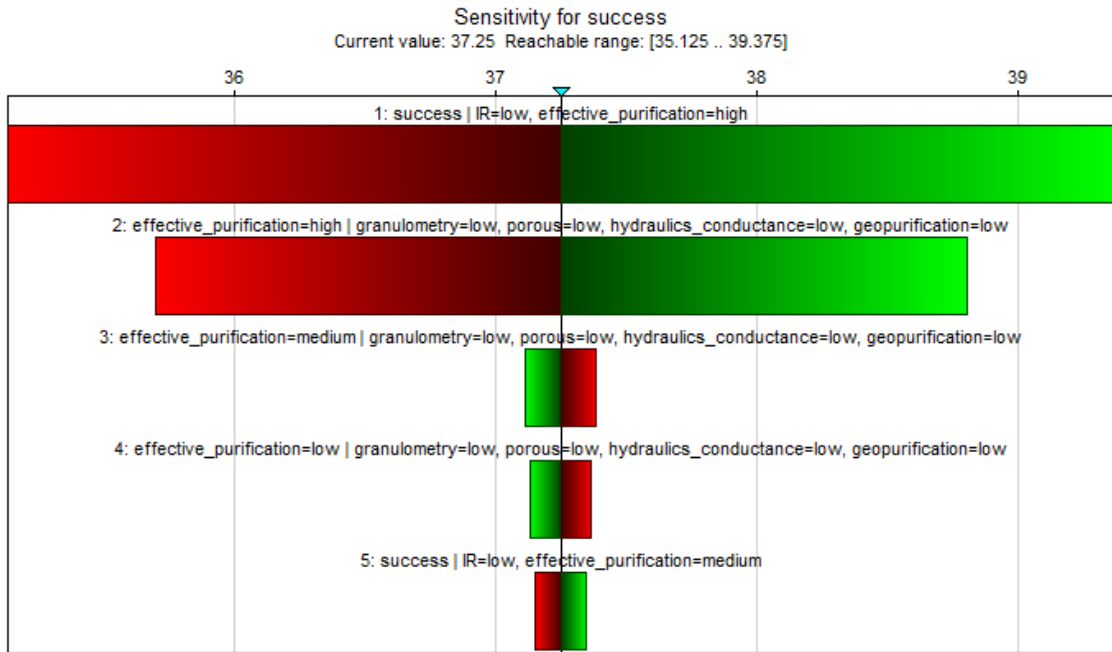
Parameter Spread: 10%

Σχήμα 33. Διάγραμμα ευαισθησίας Tornado Περίπτωσης A



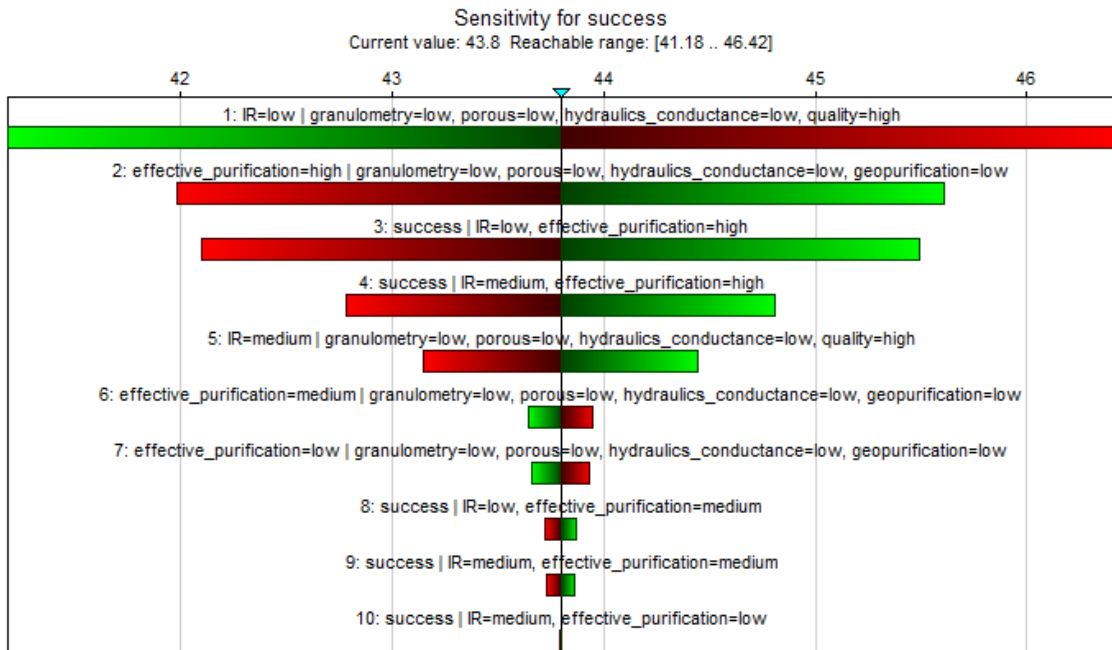
Parameter Spread: 10%

Σχήμα 34. Διάγραμμα ευαισθησίας Tornado Περίπτωσης B



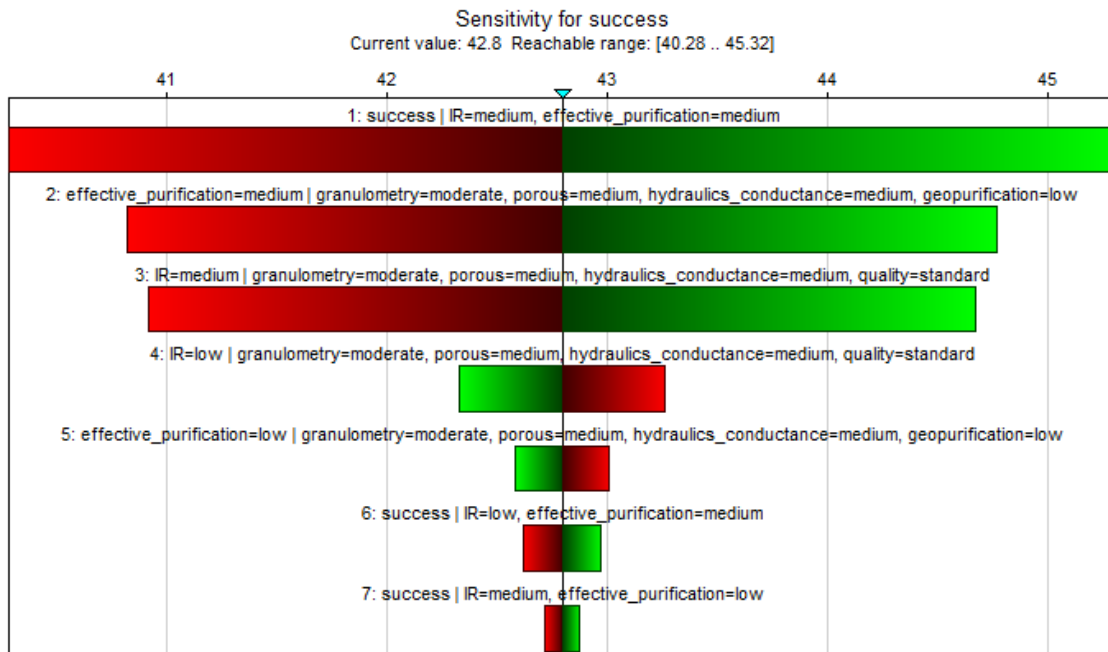
Parameter Spread: 10%

Σχήμα 35. Διάγραμμα ευαισθησίας Tornado Περίπτωσης Γ



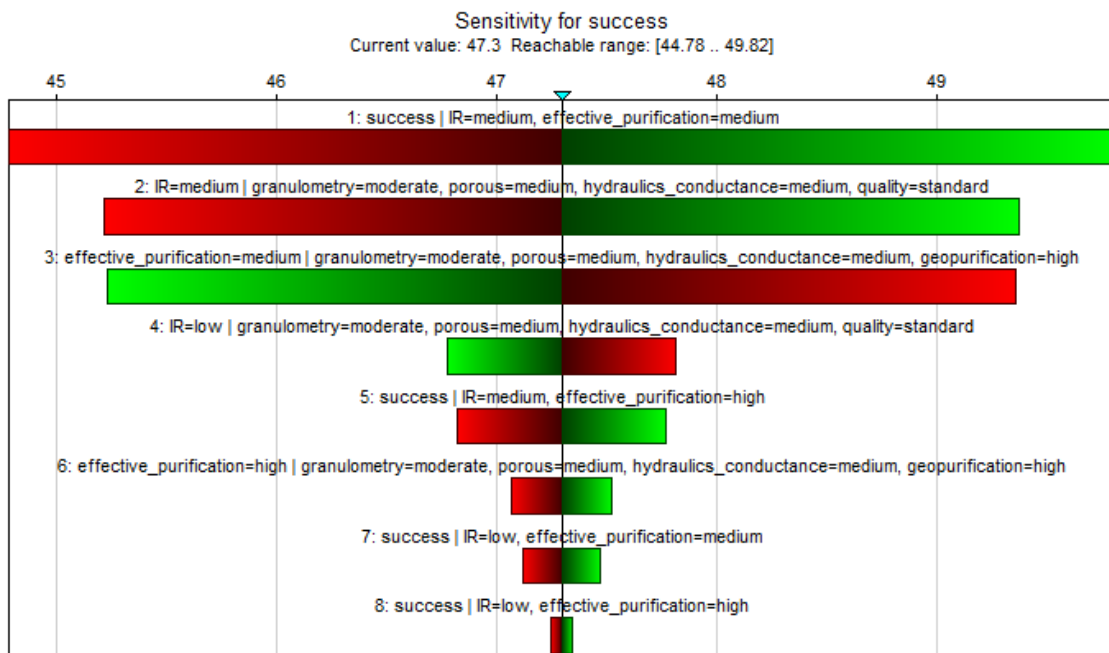
Parameter Spread: 10%

Σχήμα 36. Διάγραμμα ευαισθησίας Tornado Περίπτωσης Δ



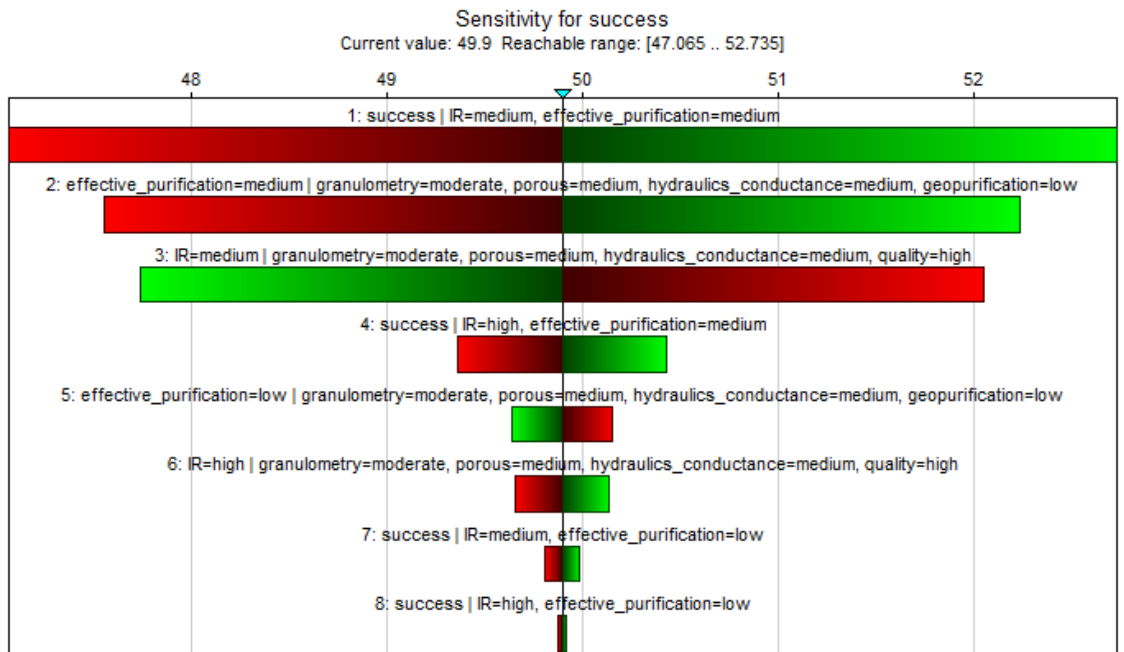
Parameter Spread: 10%

Σχήμα 37. Διάγραμμα ευαισθησίας (Tornado diagram) Περίπτωσης Ε.



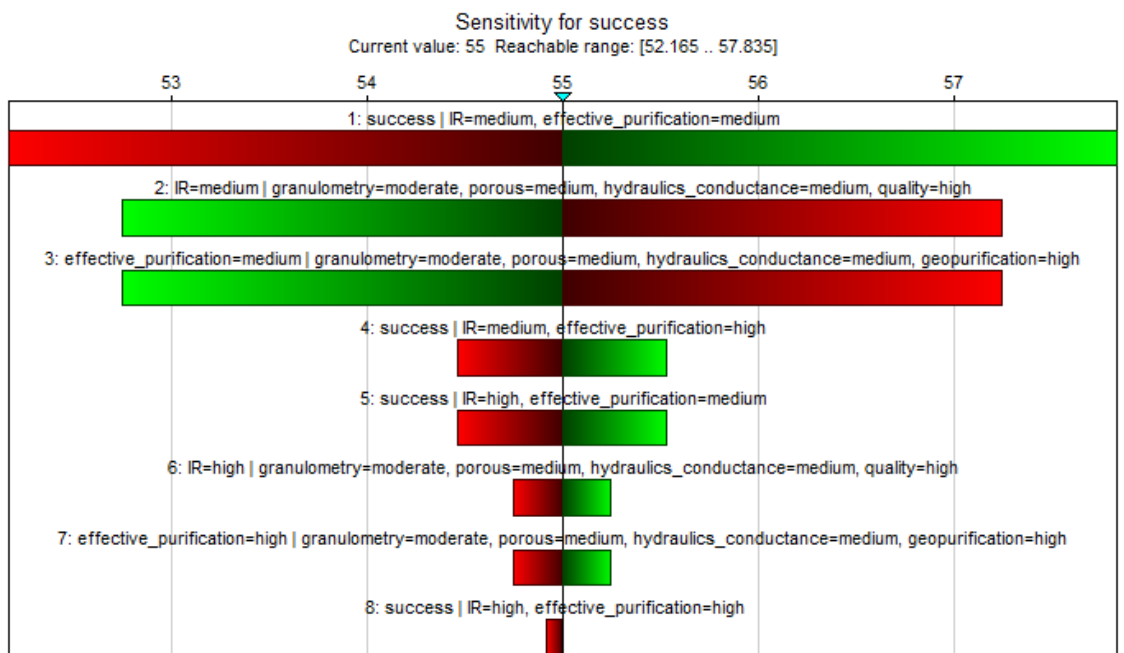
Parameter Spread: 10%

Σχήμα 38. Διάγραμμα ευαισθησίας (Tornado diagram) Περίπτωσης ΣΤ.



Parameter Spread: 10%

Σχήμα 39. Διάγραμμα ευαισθησίας (Tornado diagram) Περίπτωσης Ζ.



Parameter Spread: 10%

Σχήμα 40. Διάγραμμα ευαισθησίας (Tornado diagram) Περίπτωσης Η.

Το διάγραμμα Tornado δείχνει πόσο μεταβάλλεται το εύρος της μεταβλητής «Επιτυχία», για τη συγκεκριμένη επιθυμητή κατάσταση (η οποία εκφράζεται από την τιμή που λαμβάνει στο σενάριο βάσης). Το εύρος της κάθε οριζόντιας μπάρας δείχνει το ποσοστό μεταβολής της μεταβλητής «Επιτυχία», όταν μεταβάλλεται η τιμή των υπολοίπων παραμέτρων. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος, τόσο πιο ευαίσθητη είναι η «Επιτυχία» στη συγκεκριμένη μεταβλητή. Οι μπάρες είναι τοποθετημένες από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη από πάνω προς τα κάτω, εξ ου και το όνομα του γραφήματος. Εάν πρέπει να γίνει σύγκριση οπτικά πολλών μεταβλητών και είναι ανάγκη να προσδιοριστούν οι σημαντικότερες εξ αυτών, το διάγραμμα tornado απεικονίζει τις μεταβλητές που συμβάλλουν περισσότερο στο εύρος του αποτελέσματος, και ως εκ τούτου είναι αυτές στις οποίες θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια ασκούνται ολοένα και μεγαλύτερες πιέσεις στα αποθέματα των υπόγειων νερών ανά τον κόσμο, είτε λόγω ποιοτικής υποβάθμισης, από σημειακές και διάχυτες πηγές ρύπανσης, είτε λόγω υπεράντλησης. Μία διαφαινόμενη λύση στο ζήτημα της ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων και δη των υπόγειων φαίνεται να είναι η αποθήκευση ποσοτήτων νερού, σε περιόδους που αυτό περισσεύει, σε υπόγειους υδροφορείς, μία διαδικασία γνωστή ως τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων νερών. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού. Ωστόσο, η καταλληλότητα κάθε μεθόδου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως π.χ. το είδος και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, η ποιότητα των νερών που χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό, κ.λπ.

Η παρούσα διπλωματική εργασία δίνει έμφαση στα συστήματα τεχνητού εμπλουτισμού με τη μέθοδο SAT. Πιο συγκεκριμένα, στόχος είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της δυνητικής επιτυχίας του συστήματος SAT, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του γεωλογικού περιβάλλοντος (κυρίως της ακόρεστης ζώνης) και της ποιότητας του νερού που διατίθεται στις λεκάνες κατείσδυσης. Το μοντέλο αναπτύσσεται με τη μορφή ενός BBN. Τα BBN, όπως γενικότερα τα μοντέλα νοερής απεικόνισης με τη μορφή δικτύων, παρέχουν δυνατότητα διαμόρφωσης και εξέτασης πολλών σεναρίων και διευκολύνουν σημαντικά τη διαδικασία λήψης απόφασης.

Το BBN που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, με τη βοήθεια του εξειδικευμένου λογισμικού GeNIe, βασίζεται σε πέντε βασικούς παράγοντες: την κοκκομετρία, την υδραυλική αγωγιμότητα, το πορώδες και το φυσικό δυναμικό απορρύπανσης της ακόρεστης ζώνης και την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων λυμάτων. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν το ρυθμό κατείσδυσης και την αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης και, συνεπακόλουθα, την επιτυχή έκβαση του προγράμματος του τεχνητού εμπλουτισμού.

Συνολικά εξετάστηκαν οκτώ διαφορετικές περιπτώσεις συνδυασμών των βασικών παραγόντων. Σε όλες τις περιπτώσεις η πιθανότητα επιτυχίας του τεχνητού εμπλουτισμού κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα. Το αποτέλεσμα αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η κοκκομετρία, το πορώδες, η υδραυλική

αγωγιμότητα δημιουργούν αντίρροπες δυνάμεις στις μεταβλητές του ρυθμού κατείσδυσης και της αποτελεσματικότητας της φυσικής απορρύπανσης (δηλ. όταν εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές του ρυθμού κατείσδυσης, εμφανίζονται οι ελάχιστες τιμές στην αποτελεσματικότητα της φυσικής απορρύπανσης και το αντίστροφο). Ωστόσο, μεταξύ των περιπτώσεων που εξετάστηκαν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές, οι οποίες, μεταξύ της χαμηλότερης και της υψηλότερης τιμής κυμαίνονται σε επίπεδα άνω του 30%.

Συμπερασματικά, αν και το μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτελεί μια απλοποιημένη μορφή της σύνθετης και πολύπλοκης πραγματικότητας, αναδεικνύει τις δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν τα μοντέλα BBN στη διαδικασία λήψης απόφασης, σε μια σειρά από προβλήματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια στην κατεύθυνση αυτή και υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης με την προσθήκη επιπρόσθετων παραμέτρων, τον προσδιορισμό περισσότερων καταστάσεων για κάθε παράγοντα, κ.λπ. Επίσης, σε μελλοντικές ερευνητικές εργασίες θα μπορούσε να εξεταστεί η διαμόρφωση αντίστοιχων μοντέλων για άλλες μεθόδους τεχνητού εμπλουτισμού ή ακόμη και η κατασκευή ενός μοντέλου για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού συναρτήσει των επικρατουσών συνθηκών σε κάθε περίπτωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Allard-Poesi, F. (1996). *Cartes cognitives: pour ne pas jeter le bebe avec l' eau du bain*.
- Aronovici, V.S. ,et al. (1972). *Basin Recharge of the Ogallala aquifer*. Civil Engineers Proc.
- Axelrod, R. (1976). *Structure of decision: the cognitive maps of political elites*. Princeton, N.J.
- Bouwer, H. (1991). Role of Groundwater Recharge in Treatment and Storage of Wastewater for Reuse. *Water Science & Technology, Volume 24*.
- Bouwer, H. (1993). "From sewage farm to zero discharge". *European Water Poll. Contr.*
- Chauvin, L., Genest D., Le Dorze, S. ,Loiseau. (2011). *Cartes cognitives : une exploitation à base d'échelle, vue et profil. Dans Ali Khenchaf et Pascal Poncelet, éditeurs, EGC, volume RNTI-E-20 de Revue des Nouvelles Technologies del' Information*. Hermann Editions.
- Doan,T., Haddawy,P., Nguyen,T., et Seetharam,D. (1999). A hybrid bayesian network modeling environment. (σ. 34). Bangkok, Thailand: Dans the National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC).
- El abri, M. (2013). Bayesian Network and Cognitive Map for learning and knowledge visualization. *Mémoire de stage Mémoire en vue de l'obtention du Master, spécialité «Informatique»*.
- Giordano, M. (2009). Global groundwater? Issues and solutions. *Annu Rev Environ Resour.*
- Gleick, P. (1996). Water resources In *Encyclopedia of Climate and Weather*. Oxford Univercity Press, 817-823.
- Hasiloglu, S.B., and Cinar, R. (2008). *Evaluating Direct Marketing Practices On the Internet via the Fuzzy Cognitive Mapping Method, International Journal of Business and Management*.
- Kandasamy, W.B.V., and Smarandache, F. (2003). *Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps*. Indian Institute of Technology, Chennai.
- Kjærulff, U., van der Gaag, LC. (2000). *Making sensitivity analysis computationally efficient*. Uncertainty in Artificial Intelligence.
- Kosko, B. (1986). *Fuzzy cognitive maps*.
- Le Dorze, A., Garcia, L., Genest, D., Loiseau, S., Leray P., et Duval. (2013). *Definition of cognitive maps where influences are interpreted as probabilities*. Rapport technique, LERIA, Universite d'Angers LINA, Polytech Nantes.
- Lucas, P. (2005). *Bayesian network modelling through qualitative patterns*. Artif. Intell.
- Nadkarni, S. et Shenoy, P.P. (2001). A bayesian network approach to making inferences in causal maps. (E. J. Research, Επιμ.) σσ. 479–498.

- Renooij, S. ,Parsons, S. et Pardieck, P. (2003). *Using kappas as indicators of strength in qualitative probabilistic networks*. Dans ECSQARU.
- Sedki, K. et Bonneau De Beaufort ,L. (2012). Cognitive Maps and Bayesian Networks for Knowledge Representation and Reasoning. *Dans IEEE 24th ICTAI*, σσ. 1035–1040.
- Todd and Mays. (2005). *Groundwater Hydrology (3rd edition)*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.
- Van Kouwen,F.,Dieperink,C., Schot,P., et Wassen M. (2009). *Computer-supported cognitive mapping for participatory problem structuring*. (E. a. A, Επιμ.)
- Wellman, M. (1990). Fundamental concepts of qualitative probabilistic networks. 257-303.
- Zektser, I.S., Everett, L.G. (2004). Groundwater resources of the world and their use. *IHP-VI, SERIES ON GROUNDWATER*(No 6 UNESCO).
- Αρβανίτης, Μ. Ν. (2015). *Bayesian δίκτυα και εύρεση δομής με ακριβή*. Πτυχιακή Εργασία, Αθήνα.
- Γεωργίου-Γεωργιανάκος, Α. (2017). *Αποτίμηση υπόγειων υδάτων, Διπλωματική εργασία*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Μεταλλευτικής.
- Καλλέργης, Γ. ". (1986). *"Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία"* (Τόμ. Α και Β). Αθήνα: ΤΕΕ.
- Καλλιώρας, Α. (2016). <<Διαχείριση Εμπλουτισμού Υδροφορέων.>>. Αθήνα.
- Μελιγκοτζίδου, Λ. (2008). Bayes notes. Ανάκτηση από <http://eclass.uoa.gr>
- Πλιακάς Φ. , Διαμαντής Ι. (1998). • <<Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων νερών και εφαρμογές του στην Ελλάδα και το διεθνή χώρο.>>.

ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Env%20Geotechnics/Ch-8.pdf>

http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_1.pdf

<http://www.en.wikipedia.org>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας πιθανοτήτων Ρυθμού κατεΐσδυσης - CPT of Infiltration Rate

granulometry	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
porous	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
hydraulics_conductance	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
quality	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>
<i>low</i>	1	0.8	0.9	0.2	0.8
<i>medium</i>	0	0.2	0.1	0.8	0.2
<i>high</i>	0	0	0	0	0

<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>
0	0.9	0.25	0.5	0.25	0.2	0
1	0.1	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8
0	0	0.25	0	0.25	0	0.2

<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>
<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>
<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>
0.8	0	0.5	0	0	0	0.9
0.2	1	0.25	0.6	1	0.3	0.1
0	0	0.25	0.4	0	0.7	0

<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>
0.5	0.5	0	0.6	0.1	0.5	0.25
0.25	0.5	1	0.3	0.6	0.5	0.5
0.25	0	0	0.1	0.3	0	0.25

<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	medium	medium	<i>medium</i>
<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>
<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>
0.2	0	0.25	0	0.2	0.1	0
0.8	0.9	0.5	0.5	0.8	0.6	1
0	0.1	0.25	0.5	0	0.3	0

<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>
0	0	0	0.4	0	0.2	0.1
0.5	1	0.2	0.6	1	0.8	0.6
0.5	0	0.8	0	0	0	0.3

<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>
0	0	0.4	0	0.25	0	0
1	0.3	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7
0	0.7	0	0.4	0.25	0.5	0.3

<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>	<i>standard</i>	<i>high</i>
0	0	0	0	0	0	0
0.2	1	0.2	0.4	0.1	0.2	0
0.8	0	0.8	0.6	0.9	0.8	1

Πίνακας πιθανοτήτων Δυναμικού Απορρύπανσης - CPT of Effective purification

granulometry	low	low	low	low	low
porous	low	low	low	low	low
hydraulics_conductance	low	low	low	medium	medium
geopurification	low	medium	high	low	medium
low	0.05	0	0	0.1	0
medium	0.1	0	0	0.3	0.3
high	0.85	1	1	0.6	0.7

low	low	low	low	low	low	low
low	low	low	low	medium	medium	medium
medium	high	high	high	low	low	low
high	low	medium	high	low	medium	high
0	0.3	0.2	0	0.2	0	0
0.2	0.5	0.5	0.6	0.3	0.4	0.3
0.8	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

low	low	low	low	low	low	low
medium	medium	medium	medium	medium	medium	high
medium	medium	medium	high	high	high	low
low	medium	high	low	medium	high	low
0.3	0	0	0.2	0.1	0.05	0.2
0.5	0.7	0.6	0.8	0.9	0.9	0.4
0.2	0.3	0.4	0	0	0.05	0.4

low	low	low	low	low	low	low
high	high	high	high	high	high	high
low	low	medium	medium	medium	high	high
medium	high	low	medium	high	low	medium
0.1	0	0.1	0.2	0.05	0.8	0.7
0.5	0.6	0.9	0.8	0.9	0.2	0.3
0.4	0.4	0	0	0.05	0	0

<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
0.6	0	0	0	0.15	0	0
0.4	0.5	0.4	0.3	0.8	0.9	0.6
0	0.5	0.6	0.7	0.05	0.1	0.4

<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>
<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>
0.1	0	0.05	0.1	0	0	0.1
0.8	1	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9
0.1	0	0.05	0.1	0.1	0.2	0

<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>
0	0	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
1	0.9	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9
0	0.1	0	0	0.1	0	0

<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
0.05	0.2	0.4	0.3	0.8	0.6	0.6
0.9	0.8	0.6	0.7	0.2	0.4	0.3
0.05	0	0	0	0	0	0.1

<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>
0.1	0	0	0.2	0.15	0.05	0.7
0.2	0.2	0.1	0.8	0.8	0.9	0.3
0.7	0.8	0.9	0	0.05	0.05	0

<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>
<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>
0.8	0.9	0.15	0	0	0.5	0.4
0.2	0.1	0.8	0.95	0.9	0.5	0.6
0	0	0.05	0.05	0.1	0	0

<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>
<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
0.3	0.8	0.6	0.6	0.9	0.8	0.7
0.7	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2
0	0	0	0.1	0	0	0.1

<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
0.9	0.85	0.8	1	0.8	0.85
0.1	0.1	0.2	0	0.2	0.1
0	0.05	0	0	0	0.05

**Πίνακας πιθανοτήτων της επιτυχίας του τεχνητού εμπλουτισμού - CPT of
Success of artificial recharge**

IR	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>high</i>	<i>high</i>
Effective purification	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>	<i>low</i>	<i>medium</i>	<i>high</i>
Value	15	35	65	35	50	75	65	75	100