



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων
Μηχανικών**

**Δ Ι Δ Α Κ Τ Ο Ρ Ι Κ Η
Δ Ι Α Τ Ρ Ι Β Η**

**Πρότυπο Μεθοδολογικό Πλαίσιο Ανάλυσης Συσχετίσεων και
Μοντελοποίησης της Χωροχρονικής Αλληλοεπίδρασης
Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων με χρήση
Μπεϋζιανής Λογικής**

Ιωάννης Ε. Τσιπλακίδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Πρότυπο Μεθοδολογικό Πλαίσιο Ανάλυσης Συσχετίσεων και Μοντελοποίησης της Χωροχρονικής Αλληλοεπίδρασης Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων με χρήση Μπεϋζιανής Λογικής

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Γ. Φώτη, Καθηγητή ΣΑΤΜ ΕΜΠ
Γ. Τσακίρη, Καθηγητή ΣΑΤΜ ΕΜΠ
Ν. Μαμάση, Αν. Καθηγητή ΣΠΜ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Γ. Φώτης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Τσακίρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Μαμάσης
Αν. Καθηγητής
ΕΜΠ

.....
Δ. Αργιαλάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φ. Κυριακίδης
Καθηγητής
University of Cyprus

.....
Π. Πραστάκος
Ερευνητής Α΄
Βαθμίδας, Ινστιτούτο
Υπολογιστικών
Μαθηματικών

.....
Δ. Καβρουδάκης
Επ. Καθηγητής
Πανεπιστήμιο
Αιγαίου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019

Copyright © Ιωάννης Ε. Τσιπλακίδης , 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

«...It ain't what you don't know that gets you into trouble. It's what you know for sure, that just ain't so...»

Mark Twain

Abstract

Natural processes are interacting components of natural systems. Under certain circumstances, they can be transformed into threats for humanity, environment and development. Examples such as the 2006 Pangandaran earthquake - tsunami and the 2011 Tohoku earthquake-tsunami-flood-nuclear catastrophe point out the necessity for an integrated multihazard analysis tool. Natural hazards do not function independently of each other in the same area as they are influenced by one another as being components of a bigger system. This situation, often described as hazard chain, cascade or domino effect.

In order to consider the interactions spatially and temporally among hazards, only a few techniques have been proposed until now and the challenges are great. They mainly are: a) Interaction Matrixes which identify possible relations among two or more hazards, b) The Platform Technique which allows a user to combine more than two related models so as to illustrate the interactions between hazards and c) The family of Probabilistic Graphical Models such as Event Tree or Bayesian Networks.

The main scope of this dissertation is to propose an improved methodology for the Multi Hazard Analysis Process in which natural phenomena such as Earthquakes, Landslides, Wildfires and Rainfalls, are considered in a probabilistic way. In particular, this methodology takes the advantages of Bayesian Networks in conjunction with a novel approach so as to take into consideration the interactions, interrelations and interconnections (3I) among different hazards in the same area. Our study shows that it is possible to consider the “3I concept” among hazards by (a) establishing the proposed matrix approach and (b) demonstrating that the Bayesian Networks and their extensions are the proper tools for multihazard analysis in order to identify more accurately, the mechanisms among hazards in the point of interest.

Nowadays more and more countries are calling for better preparedness and mitigation measures. Thus, an integrated multihazard analysis tool is needed more than ever.

Περίληψη

Τα φυσικά φαινόμενα είναι τμήματα του φυσικού μας περιβάλλοντος. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και καταστάσεις, μπορούν να μετασχηματιστούν σε απειλές για την ανθρωπότητα, το περιβάλλον και την ανάπτυξη. Παραδείγματα όπως οι καταστροφές λόγω σεισμού και τσουνάμι στην Ινδονήσια το 2008 ή το πυρηνικό συμβάν στην Ιαπωνία το 2011 λόγω μία πλημμύρας, που ήταν το αποτέλεσμα ενός τσουνάμι, έχοντας προηγηθεί ένας σεισμός, αναδεικνύουν την ανάγκη για μία μεθοδική και ολοκληρωμένη προσέγγιση στον τομέα της ανάλυση των Επικίνδυνων Φυσικών και Τεχνολογικών Φαινομένων.

Τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα δεν λειτουργούν απομονωμένα, αλλά επηρεάζουν το ένα το άλλο ως στοιχεία ενός ενιαίου συνόλου φαινομένων της ίδιας περιοχής. Όμως η δυνατότητα να ληφθεί υπόψη η αλληλοεπίδραση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων στη διάσταση του χώρου και του χρόνου προϋποθέτει συγκεκριμένο μεθοδολογικό πλαίσιο, που επί του παρόντος είναι περιορισμένο. Εξαιρετικά μικρός αριθμός μεθόδων έχουν προταθεί για την διαχείριση του συγκεκριμένου ζητήματος. Η μέθοδος του πίνακα, η τεχνική της πλατφόρμας και η εφαρμογή των πιθανολογικών δικτύων αποτελούν τις κύριες προσεγγίσεις, στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Ο κύριος σκοπός της συγκεκριμένης διατριβής είναι ο σχεδιασμός και εφαρμογή μίας πρότυπης μεθοδολογίας που θα επιτρέψει την διαχείριση (ανίχνευση και υπολογισμό μεγεθών) των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων με ικανοποιητικό τρόπο. Συγκεκριμένα, η διατριβή αποδεικνύει ότι λαμβάνοντας υπόψη το εννοιολογικό πλαίσιο «3I» (Interaction, Interrelation, Interconnection) μεταξύ διαφορετικών επικίνδυνων φαινομένων, με την αξιοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου και επιλέγοντας τα Μπεύζιανά Δίκτυα ως εργαλείο αποτύπωσης των σχέσεων των φαινομένων μπορούμε να αναγνωρίσουμε και αποτυπώσουμε με καλύτερο τρόπο την παρουσία και αλληλοεπίδραση των επικίνδυνων φαινομένων.

Στις μέρες μας όλο και περισσότερα κράτη αντιλαμβάνονται την αξία της ύπαρξης ενός σχεδίου αντιμετώπισης των επικίνδυνων φαινομένων και των επιπτώσεων τους. Γι' αυτό μία διαδικασία που αφορά την ανάλυση των επικίνδυνων φαινομένων είναι πιο απαραίτητη παρά ποτέ.

Ευχαριστίες

Ευχαριστίες οφείλω σε όλους όσους με βοήθησαν, είτε σε επιστημονικό είτε σε προσωπικό επίπεδο στη διάρκεια της διαδρομής αυτής. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διατριβής μου, Γ. Φώτη, Καθηγητή ΣΑΤΜ ΕΜΠ για τη συνεχή καθοδήγηση, τη στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της έρευνάς μου. Ήταν εκεί όταν έπρεπε να διώχνει τις αμφιβολίες μου.

Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κ. Γ. Τσακίρη, Καθηγητή ΣΑΤΜ ΕΜΠ και κ. Ν. Μαμάση, Αν. Καθηγητή ΣΠΜ ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στις διάφορες φάσεις εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την αμέριστη ηθική και υλική συμπαράσταση αλλά και διαρκή ενθάρρυνση που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Abstract.....	5
Περίληψη.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Περιεχόμενα.....	8
Περιεχόμενα Εικόνων.....	10
Περιεχόμενα Πινάκων.....	12
1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Θέση του προβλήματος.....	13
1.2 Στόχοι της διατριβής.....	14
1.3 Διάρθρωση της διατριβής.....	15
2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Ο ορισμός του εννοιολογικού πλαισίου στην ανάλυση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων και του κινδύνου που προκύπτει από αυτά.....	17
2.3 Η διακινδύνευση ως άθροισμα των επιμέρους Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων σε μία Περιοχή.....	19
2.4 Μέθοδοι και Τεχνικές που λαμβάνουν υπόψη την Αλληλοεπίδραση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων.....	42
2.4.1 Η Μέθοδος του Πίνακα Αλληλοσυσχέτισης (Interaction Matrix Method).....	48
2.4.2 Η Μέθοδος της Αλυσίδας ή Μέθοδος Πλατφόρμας (Chain/ Platform Technique).....	50
2.4.3 Δέντρα Γεγονότων (Event Tree) στην καταγραφή των αλληλοεπιδράσεων των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων.....	53
2.4.4 Κατευθυνόμενα Ακυκλικά Γραφήματα για την αποτύπωση των Αλληλοεπιδράσεων.....	56
3. Καθορισμός Χαρακτηριστικών Μεθόδου για μία Ολοκληρωμένη Ανάλυση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων σε μία Περιοχή.....	64
3.1 Εισαγωγή.....	64
3.2 Απαραίτητα Χαρακτηριστικά Μεθοδολογικού Πλαισίου.....	65
3.3 Από τις Πιθανότητες στα Πιθανολογικά Δίκτυα για την Ανάλυση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων.....	82

4. Ένα Πρότυπο Μεθοδολογικό Πλαίσιο Ανάλυσης των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων	94
4.1 Εισαγωγή	94
4.2 Η τεχνική της Σπείρας στην Σχεδίαση του Μοντέλου	94
4.3 Ορολογία και Άξονες Σχεδιασμού της Μεθοδολογίας	96
4.4 Πρότυπη μέθοδος διαχείρισης αλληλοεπιδράσεων	106
4.4.1 Ο θεσμός του «Μη απομονωμένα στοιχεία».	108
4.4.2 Η αιτιατή σχέση μεταξύ φαινομένων (Cause Effect Connections).....	108
4.4.3 Είδη Αιτιατών Σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών	109
4.4.4 Γραφική απεικόνιση των στοιχείων που συμμετέχουν στην μεθοδολογία.....	111
4.4.5 Η μεθοδολογία «3I» (Interactions-Interrelations- Interconnection).....	112
4.4.6 Η Δημιουργία του Μπεϋζιανού Δικτύου στην Μεθοδολογία «3I»	121
5. Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας.....	124
5.1 Η υλοποίηση ενός Δυναμικού Μπεϋζιανού Δικτύου (DBN)για την μοντελοποίηση της πιθανότητας εκδήλωσης ενός συμβάντος σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης και διαχείρισης Επικίνδυνων υγρών δεδομένου ότι υπάρχει δασική πυρκαγιά, στο Δήμο Περάματος ..	124
5.2 Η δυναμική διάσταση ενός Μπεϋζιανού Δικτύου	131
6. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	145
6.1 Συμπεράσματα	145
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	148
Επίλογος	149
Βιβλιογραφία.....	150

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Υπολογισμός του Overall Risk Index (ORI) (Munich 2005)	23
Εικόνα 2: Υπολογισμός του Total Place Vulnerability Index (TPVI) (Cutter 1996)	24
Εικόνα 3: Εννοιολογικό Διάγραμμα που καθορίζει τα βήματα της μεθοδολογίας στο «SafeLand» Van Westen, Quan Luna et al. (2010)	38
Εικόνα 4: Χάρτες τρωτότητας με διαβαθμίσεις της πιθανότητα υπέρβασης ορισμένου κατωφλίου	40
Εικόνα 5: Interaction matrix για έξι επικίνδυνα φαινόμενα στην περιοχή Campanian της Ιταλίας (De Pippo, Donadio et al. 2009)	49
Εικόνα 6: Η μέθοδος της αλυσίδας για την εφαρμογή MultiRisk Platform [11]	51
Εικόνα 7: Σενάριο διαδοχής των διαφόρων πιθανών καταστάσεων λόγω της έκρηξης του ρηαιστίου για τον δήμο Casalnuovo της Ιταλίας (Marzocchi 2009)	56
Εικόνα 8: Bayesian network (BN) πέντε μεταβλητών που υπολογίζει το μέγεθος της βλάβης του κτιρίου των Nadim F και Liu Z (Nadim and Liu 2013)	58
Εικόνα 9 : Τρόποι σύνδεσης των μεταβλητών σε ένα Bayesian Network	90
Εικόνα 10: Η τεχνική της σπείρα στην ανάπτυξη μια μεθοδολογίας (Boehm 1988)	95
Εικόνα 11: Εννοιολογικό Γράφημα Απεικόνισης των δύο μερών της Μεθόδου	99
Εικόνα 12: Έλεγχος 4S (Σαφήνεια-Συνάφεια-Σενάριο-Συμπαγής Κατασκ.) της ποιότητας του Δικτύου	105
Εικόνα 13: Γραφική απεικόνιση των στοιχείων που συμμετέχουν στην Μεθοδολογία 3I ..	111
Εικόνα 14	116
Εικόνα 15: Στάδια Ανίχνευσης Σχέσεων μεταξύ Μεταβλητών Προτεινόμενης Μεθοδολογίας 3I	116
Εικόνα 16: Διάγραμμα των τριών βημάτων (Ανίχνευση, Υπολογισμού Πιθανοτήτων και Υπολογισμού Διακινδύνευσης μίας ολοκληρωμένης Μεθόδου)	117
Εικόνα 17: Πρώτο στάδιο σχεδιασμού με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου του πίνακα	128
Εικόνα 18: Η εφαρμογή της τεχνικής της σπείρας στην διαμόρφωση του Μπεϋζιανού Δικτύου	129
Εικόνα 19: Προτεινόμενο Μπεϋζιανό δίκτυο για την μοντελοποίηση της πιθανότητας εκδήλωσης ενός αρνητικού συμβάντος στις εγκαταστάσεις έχοντας ως δεδομένο την δασική πυρκαγιά	130

<i>Εικόνα 20: Ένα δυναμικό Μπεϋζιανό Δίκτυο πέντε χρονικών βημάτων. Οι μεταβλητές εξόδου (πράσινες) περνάνε την πληροφορία στις μεταβλητές εισόδου(μπλε) σε κάθε χρονική στιγμή.</i>	<i>132</i>
<i>Εικόνα 21: Αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων για την σχετική υγρασία στην περιοχή ενδιαφέροντος</i>	<i>136</i>
<i>Εικόνα 22: Αποτελέσματα ελέγχου των δεδομένων της θερμοκρασίας στην περιοχή ενδιαφέροντος</i>	<i>137</i>
<i>Εικόνα 23: Αποτελέσματα ελέγχου των δεδομένων της Σχετ. Υγρασίας στην περιοχή ενδιαφέροντος</i>	<i>138</i>

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Διαβάθμιση έντασης φαινομένου / τρωτότητας για τον υπολογισμό του τελικού χάρτη κινδύνου [39].....	26
Πίνακας 2: Κατηγορίες έντασης και αντιστοιχία βλαβών	41
Πίνακας 3: Πίνακας δεικτών απειλής ως αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού των τιμών συχνότητας με την ένταση του φαινομένου[60]	42
Πίνακας 4: Αντιπροσωπευτικά Μοντέλα που βασίζονται σε Μπεϋζιανά Δίκτυα στην διαχείριση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων.....	61
Πίνακας 5: Καταστάσεις των υπό εξέταση μεταβλητών	84
Πίνακας 6: Βασική Ορολογία στην Ανάλυση Φυσικών Φαινομένων σύμφωνα με UNISTR 2009 [132]	97
Πίνακας 7: Πίνακας Ανίχνευσης Αιτιατών Σχέσεων (με ΚΟΚΚΙΝΟ ΒΕΛΟΣ εξετάζεται η σχέση κίτρινο → πράσινο ενώ με ΜΑΥΡΟ ΒΕΛΟΣ η σχέση πράσινο → κίτρινο)	114
Πίνακας 8: Έλεγχος Αιτιατών Σχέσεων με την Μέθοδο του Πίνακα	127
Πίνακας 9: Σύνολο Μεταβλητών του Προτεινόμενου Μπεϋζιανού Δικτύου για την περιοχή μελέτης	133

1. Εισαγωγή

1.1 Θέση του προβλήματος

Τις τελευταίες δεκαετίες ένα μεγάλο κομμάτι του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας ([Aven 2013](#), [Komendantova, Mrzyglocki et al. 2013](#), [Bruneau, Barbato et al. 2017](#)) επικεντρώνεται στην ανεύρεση ενός μεθοδολογικού πλαισίου που θα επιτρέπει την ανίχνευση, ανάλυση και αξιολόγηση του μεγέθους των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων που εκδηλώνονται σε μία περιοχή αλλά και του κινδύνου που απορρέει από αυτά, υπολογίζοντας την πιθανότητα να συμβούν συγκεκριμένα μεγέθη επιπτώσεων με οικονομικά ή κοινωνικά κριτήρια.

Μεγάλες καταστροφές που σημειώθηκαν στο παρελθόν ([Miller and Rowe 2012](#), [Osipov, Larionov et al. 2017](#)), επιβεβαίωσαν δύο πολύ σημαντικά θέματα στο γνωστικό αντικείμενο των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων. Πρώτον, ότι πολλές περιοχές απειλούνται από περισσότερα του ενός επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα και δεύτερον ότι τα μεγέθη των φαινομένων μεταβάλλονται με δυναμικό τρόπο, όταν συνυπάρχουν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μεταβάλουν και το μέγεθος του τελικού κινδύνου που απορρέει από αυτά. Αυτά τα συμπεράσματα, ενίσχυσαν ακόμα περισσότερο την αναγκαιότητα μεταξύ των ερευνητών για την αναζήτηση και σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού μεθοδολογικού πλαισίου, με σκοπό την ανάλυση και ανίχνευση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, κυρίως σε περιοχές με υποδομές υψηλής σπουδαιότητας (εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, φράγματα, ιδιαίτερες κατανομές πληθυσμού) ([Durham 2003](#)).

Όμως οι δυσκολίες για την επίτευξη του ανωτέρου στόχου εξακολουθούν να παραμένουν υψηλές. Τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα είναι δυναμικές διεργασίες με εξαιρετικά πολύπλοκους μηχανισμούς, για μερικούς από τους οποίους ακόμη δεν έχει καταστεί εφικτό να εξηγηθεί ο τρόπος εκδήλωσης αλλά και μία μέθοδο υπολογισμού τους ([Munich 2005](#)). Επιπρόσθετα για τον χαρακτηρισμό και την περιγραφή των φαινομένων χρησιμοποιείται σε ερευνητικό και επιχειρησιακό επίπεδο ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών ορισμών και εννοιών χωρίς να υφίσταται επί του παρόντος κάποιος κοινώς αποδεκτοί ορισμοί από το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας ([Frigerio and](#)

[van Westen 2010](#)). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε διαφορετικές υπολογιστικές διαδικασίες και ερμηνείες αποτελεσμάτων των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και να παρατηρείται το ατυχές γεγονός για την ίδια περιοχή μελέτης να προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα από διαφορετικές μελέτες του ίδιου φαινομένου.

Επίσης αν και η εξέλιξη της τεχνολογίας λειτούργησε θετικά στην μοντελοποίηση των επικίνδυνων φαινομένων με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύς των συστημάτων και την δυνατότητα εκτέλεσης πολύπλοκων υπολογιστικών πράξεων, εντούτοις δεν κατέστη εφικτό αυτή η ικανότητα να μεταφραστεί σε ευκρίνεια και ακρίβεια αποτελεσμάτων, κυρίως λόγω της έλλειψης γνώσης για συγκεκριμένα αντικείμενα, της περιορισμένης ύπαρξης δεδομένων για την εκάστοτε περιοχή μελέτης και της αδυναμίας μας να αναγνωρίσουμε το σύνολο των κινδύνων σε μία περιοχή ([Asimakopoulou and Bessis 2011](#)).

Ιδιαίτερα το κομμάτι των δεδομένων αποτελεί ένα κομβικό κομμάτι στην διαδικασία ανίχνευσης και αξιολόγησης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, καθώς η ύπαρξη χαμηλής ποιότητας δεδομένων δεν επιτρέπει την καθολική εφαρμογή μεθόδων και τεχνικών που να βασίζονται σε καθαρά ποσοτικά χαρακτηριστικά ώστε να επιτευχθεί ένα ελάχιστο επίπεδο ακρίβειας και αποδοχής ([Malet, Glade et al. 2010](#)).

Τέλος, η συνύπαρξή ή όχι, των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων αποτελεί το ουσιαστικότερο κριτήριο στην ανάλυση αυτών. Η αποδοχή του συγκεκριμένου κριτηρίου, απαιτεί να ληφθούν υπόψη οι αλληλοεπιδράσεις των φαινομένων που συνυπάρχουν σε μία περιοχή χωρίς να υφίσταται επί του παρόντος μία κοινώς αποδεκτή μεθοδολογία, γι' αυτό. Αν και έχουν προταθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός λύσεων, οι περισσότερες από αυτές παρουσιάζουν περιορισμούς και η αποτελεσματικότητά τους αναδεικνύεται, μόνο σε ειδικές περιπτώσεις ([Kappes, Gruber et al. 2012](#)).

1.2 Στόχοι της διατριβής

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, κεντρικό άξονα της έρευνας αποτέλεσε η διατύπωση μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την ανάλυση και αποτίμηση του

συνόλου των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων που συνυπάρχουν σε μία περιοχή λαμβάνοντας υπόψη και τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις τους.

Συγκεκριμένα μέσω μιας εκτεταμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης, όπου παρουσιάζονται τα στάδια εξέλιξης των προτεινόμενων μεθοδολογιών, εντοπίστηκαν τα προβληματικά σημεία στις διάφορες μεθοδολογίες που έχουν προταθεί κατά καιρούς και κατόπιν τα ίδια, λειτούργησαν ως σημεία αφετηρίας και αναφοράς για την νέα προτεινόμενη μεθοδολογία.

Κάτω από αυτό το πλαίσιο, με την αξιοποίηση της Μπεϋζιανής Λογικής παρουσιάστηκε μία μεθοδολογία τριών σταδίων που επικεντρώνεται στην αναγνώριση όλων των πιθανών σχέσεων που μπορεί να ενεργοποιηθούν μεταξύ των επικίνδυνων φαινομένων, γεω-χαρακτηριστικών και ανθρώπινων διεργασιών σε μια περιοχή. Σε δεύτερο χρόνο εξετάζονται συγκεκριμένα είδη συνδέσεων (domino effect, Multi triggering, Adding up triggering) που σχετίζονται άμεσα με τον πολλαπλασιασμό των επιπτώσεων ή την ενεργοποίηση πολλαπλών επικίνδυνων φαινομένων στην ίδια περιοχή. Δηλαδή λειτουργούν πάντα πολλαπλασιαστικά υπέρ του τελικού κινδύνου. Ενώ τέλος, προτάθηκε η υιοθέτηση δύο μεταβλητών ως δεσμευμένες πιθανότητες, που αποτυπώνουν την αλλαγή της κάλυψη γης (Land Cover Change) και χρήσης γης (Land Use Change) αντίστοιχα μετά από την εκδήλωση ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου και δύναται να αποκαλύψουν λανθάνουσες συνδέσεις μεταξύ των φαινομένων, διεργασιών και γεω-χαρακτηριστικών.

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Η παρούσα διατριβή αναπτύσσεται σε έξι διακριτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί και την εισαγωγή της διατριβής, τίθενται οι προβληματισμοί που οδήγησαν στη διεξαγωγή της συγκεκριμένης έρευνας. Πέραν του εισαγωγικού κεφαλαίου, ακολουθεί ένα βιβλιογραφικό κεφάλαιό (Κεφάλαιο (2)) όπου παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μεθοδολογίες αλλά και τα στάδια εξέλιξης αυτών. Αναφέρονται οι σύνηθες πρακτικές που υιοθετήθηκαν ώστε να ξεπεραστούν προβλήματα όπως η απουσία κοινών ορισμών και διαφορετικών μονάδων μέτρησης για την ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών και τεχνολογικών φαινομένων.

Στο Κεφάλαιο (3) παρουσιάζονται οι ελάχιστες προϋποθέσεις και χαρακτηριστικά που πρέπει να διατηρεί μία μεθοδολογία ώστε να χαρακτηριστεί ως αποδεκτή μέσα σε ένα σύγχρονο επιχειρησιακό πλαίσιο. Τα χαρακτηριστικά όπως ορίζονται στο τρίτο κεφάλαιο θα αποτελέσουν τα κριτήρια σχεδιασμού της μεθοδολογίας στο επόμενο κεφάλαιο. Στο Κεφάλαιο (4) παραθέτονται οι προκλήσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίστηκαν κατά τον σχεδιασμό της μεθοδολογίας. Καταλήγοντας σε μία ολοκληρωμένη πρόταση ανάλυσης και ανίχνευσης επικίνδυνων φαινομένων. Στο Κεφάλαιο (5) γίνεται εφαρμογή της μεθόδου σε μία ρεαλιστική κατάσταση και αξιολογείται η απόδοση αυτής σε μία περιοχή όπου συνυπάρχουν δύο επικίνδυνα φαινόμενα. Τέλος, στο Κεφάλαιο (6) ανακεφαλαιώνονται τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας ενώ αναδεικνύονται και ζητήματα που μπορούν να αποτελέσουν πεδίο μελλοντικής έρευνας.

2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο είναι αποτέλεσμα μιας βιβλιογραφικής έρευνας που σκοπό είχε να καταγράψει την εξέλιξη των μεθοδολογικών προσεγγίσεων στην ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και να αναδείξει τα σημεία εκείνα που μπορεί να αποτελέσουν τις βάσεις για την ανάπτυξη μιας πρωτότυπης μεθοδολογίας, αποδίδοντας όσο καλύτερα γίνεται την συνέργεια των φαινομένων σε μια περιοχή ([Tsiplakidis and Photis 2019](#)). Πραγματοποιείται μια εκτενέστερη αναφορά μεθόδων και τεχνικών, πάνω στο τρόπο ανάλυσης και αξιολόγησης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, αλλά και του κινδύνου που απορρέει από την παρουσία αυτών σε μία περιοχή μελέτης. Ιδιαίτερη σημασία και ενδιαφέρον παρουσιάζει καταρχάς η επιλογή του υπολογιστικού υπόβαθρου των μοντέλων, που υιοθετήθηκαν για να επιτευχθεί κάθε φορά ο αντικειμενικός στόχος της μελέτης και κατά δεύτερον αλλά το ίδιο σημαντικό η ικανότητα τους να λαμβάνουν υπόψη την συνύπαρξη των φαινομένων σε μία περιοχή με την απόδοση της συνέργειας και της αλληλοεπίδρασης τους. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται για την ανάλυση των φυσικών φαινομένων αλλά και για την απόδοση της αλληλοεπίδρασης τους μέσα από συγκεκριμένες βιβλιογραφικές αναφορές καλύπτουν όλο το εύρος των πρακτικών που έχουν εφαρμοστεί και εξεταστεί μέχρι σήμερα. Από ποιοτικά μοντέλα διαχείρισης του κινδύνου μέχρι αυστηρά ποσοτικές εφαρμογές που βασίζονται στην θεωρία των πιθανοτήτων, της στατιστικής αλλά και των γραφημάτων.

2.2 Ο ορισμός του εννοιολογικού πλαισίου στην ανάλυση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων και του κινδύνου που προκύπτει από αυτά

Αποτελεί εξαιρετική πρόκληση η ενασχόληση με ένα θέμα, όπως η ανάλυση και αξιολόγηση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, καθότι σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα ζωής και ασφάλειας της ανθρώπινης κοινωνίας και κατ' επέκταση της ίδιας της ύπαρξής μας. Η ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων προέκυψε από την ανάγκη αξιολόγησης του κινδύνου που απορρέει από αυτά, απέναντι σε πληθυσμούς και υποδομές και συγκεκριμένα τον υπολογισμό των

πιθανών απωλειών των «υπό εξέταση» ή «απειλούμενων» στοιχείων σε μία περιοχή. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο εκτιμάται ότι δεν πρέπει να διαχωριστούν οι δύο έννοιες αλλά να εξεταστούν και ερευνηθούν συνολικά μέσα σε ένα κοινό πλαίσιο, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο χαρακτηρισμός, ανίχνευση και καταγραφή των μεγεθών των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε συνδυασμό με τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις τους σε μία περιοχή, είναι οι μεταβλητές που θα καθορίσουν τον τελικό κίνδυνο απέναντι σε συγκεκριμένο υπό εξέταση απειλούμενο στοιχείο. Όσο καλύτερη είναι η καταγραφή φαινομένων σε μία περιοχή τόσο πιο αξιόπιστη θα είναι η εκτίμηση του μεγέθους του κινδύνου.

Η πρόκληση έγκειται στο γεγονός ότι οι ερευνητές ([Cees J. van Westen](#)) προσπαθούν να ποσοτικοποιήσουν ή τουλάχιστον να κατηγοριοποιήσουν τον κίνδυνο ως μεταβλητή που συνδέεται ή συσχετίζεται με επιμέρους γεγονότα όπως την συχνότητα εμφάνισης φαινομένων, την ένταση αυτών των φαινομένων, την πιθανότητα εμφάνισης συγκεκριμένου μεγέθους φαινομένου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το μέγεθος των επιπτώσεων επί των εκτεθειμένων στοιχείων αλλά και τις ιδιαίτερες ιδιότητες και χαρακτηριστικά αυτών που καθορίζουν την τρωτότητά τους, απέναντι σε ένα συγκεκριμένο επικίνδυνο φαινόμενο. Από το σύνολο των προαναφερόμενων ενδεικτικών μεταβλητών που εδόθησαν σαν παράδειγμα, πολύ εύκολα δύναται να συμπεράνουμε ότι στο πεδίο της ανάλυσης των φυσικών φαινομένων και της διαχείρισης και αξιολόγησης του κινδύνου που απορρέει από αυτά, υφίστανται ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών καθώς εμπλέκονται με τον ένα ή τον άλλο τρόπο διαφορετικά γνωστικά πεδία, που διαφέρουν ως προς την διαθεσιμότητα των δεδομένων και τον τρόπο του υπολογισμού τους και απαιτούν ερευνητές που πρέπει να αντιλαμβάνονται διαφορετικά γνωστικά αντικείμενα μέσα σε ένα κοινό πλαίσιο γνωστικών αντικειμένων αλλά και υπολογιστικών μεθόδων.

Η πιο διαδεδομένη ερμηνεία που συνδέει με ικανοποιητικό τρόπο τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα με τις πιθανές επιπτώσεις τους, επί του εξεταζόμενου κάθε φορά πληθυσμού σε μία συγκεκριμένη περιοχή, είναι ο ορισμός του «υπολογίσιμου κινδύνου» όπου αναφέρεται ως ένα εν δυνάμει ζημιογόνο «γεγονός» που αναμένεται να προκαλέσει απώλειες με οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς όρους σε μία περιοχή ενδιαφέροντος ([1992](#)), [2009](#)), [2011](#)).

Λαμβανομένου υπόψη τα ανωτέρω μία πρώτη προσέγγιση, υπό μορφή ενός μαθηματικού τύπου αποτέλεσε η παρακάτω εξίσωση:

$$\mathcal{R} = \mathcal{H} \times V \times \mathcal{E} \quad (2.1)$$

όπου το μέγεθος και η εφικτότητα του «υπολογίσιμου κινδύνου» αποδίδεται ως συνάρτηση γινομένου τριών διαφορετικών μεγεθών, αυτό του ενδεχόμενου εκδήλωσης ενός επικίνδυνου φαινομένου σε συγκεκριμένο χρονικό και χωρικό διάστημα (\mathcal{H}), της τρωτότητας των υπό εξέταση εκτεθειμένων στον κίνδυνο στοιχείων (V) και του μεγέθους ή πλήθους των εκτεθειμένων στοιχείων (\mathcal{E}), εισάγοντας με αυτό τον τρόπο το μέγεθος της διακινδύνευσης (\mathcal{R}). Αυτή η εννοιολογική εξίσωση απεικονίζει την διακινδύνευση ως ένα μετρήσιμο μέγεθος, δύο διαφορετικών μηχανισμών καταγραφής, της εκδήλωσης ενός επικίνδυνου φαινομένου με τεχνολογικά ή φυσικά χαρακτηριστικά και της τρωτότητας, του υπό εξέταση στοιχείου, που εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μεταβλητής που αντιπροσωπεύει κάθε φορά. Τέλος, το μέγεθος του «υπό απειλή πληθυσμού» λειτουργεί ως πολλαπλασιαστής ισχύος για το τελικό αποτέλεσμα.

Αν και ο ορισμός της διακινδύνευσης σύμφωνα με την εξίσωση (2.1), θα μπορούσε να δώσει την εντύπωση μιας ποσοτικής και αντικειμενικής προσέγγισης, είναι καλύτερο να μην θεωρηθεί με αυτόν τον τρόπο, σε αυτή την στιγμή της ανάλυσης, αφενός γιατί πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την τρωτότητα καθορίζονται μέσω συνολικών κοινωνικών αποφάσεων (όπως το πώς και πού θα κατασκευαστεί μια κοινότητα και τα συστήματα που θα την υποστηρίζουν), αφετέρου γιατί ο κίνδυνος αξιολογείται, εν μέρει, με βάση τις αξίες και τις υποκειμενικές εκτιμήσεις, των ανθρώπων και την εκάστοτε παιδεία που διαθέτουν οι κοινωνίες με βάση την κουλτούρα που έχει αναπτυχθεί απέναντι στα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα, της υπό εξέταση περιοχής.

2.3 Η διακινδύνευση ως άθροισμα των επιμέρους Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων σε μία Περιοχή

Τον πρώτο καιρό της ανάπτυξης τεχνικών και μεθόδων για την ανάλυση και αναγνώριση των επικίνδυνων φαινομένων και του κινδύνου, που απορρέει από αυτά, τα μοντέλα απαιτούσαν σε μεγάλο βαθμό τις υποκειμενικές κρίσεις και

πεποιθήσεις του ερευνητή. Η απουσία δομημένων διαδικασιών αναπόφευκτα οδηγούσε σε υποκειμενικές αποφάσεις σχετικά με το τι πρέπει να συμπεριληφθεί, και πως διαφορετικοί παράγοντες και μεταβλητές θα πρέπει να μετρηθούν και να σταθμίσουν στην διαδικασία της προτεραιοποίησης αλλά και τον καθορισμό των μεγεθών.

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί το μοντέλο PAR (Pressure and Release) ([Wisner, Blaikie et al. 2004](#)). Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει την τρωτότητα ως μια δυναμική και σύνθετη διαδικασία, η οποία δημιουργεί συνεχείς μεταβολές και πιέσεις στην ισχύουσα πραγματικότητα, που τελικά οδηγούν σε μη ασφαλείς συνθήκες των υπό εξέταση εκτιθέμενων στοιχείων (Ε). Αντιθέτως η ενδεχόμενη εκδήλωση ενός επικίνδυνου φυσικού ή τεχνολογικού φαινομένου, απεικονίζεται με ένα απλοϊκό τρόπο χωρίς ανάλυση και αντιμετωπίζεται μόνο ως το (αίτιο) έναυσμα που θα αποκαλύψει το μέγεθος της τρωτότητας μιας κοινωνίας και θα οδηγήσει σε απώλειες, φθορά ή και καταστροφή των υπό εξέταση στοιχείων, συναρτήσει πάντα των αδυναμιών του. Η βαρύτητα της ανάλυσης αποδίδεται στην τρωτότητα των εκτιθέμενων στοιχείων, στον κίνδυνο και στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών που την αποτελούν και όχι στην ανάλυση του επικίνδυνου φυσικού φαινομένου μέσω των διαθέσιμων δεδομένων. Αυτό αποτελεί μία εξαιρετικά εσφαλμένη προσέγγιση καθότι η τρωτότητα δεν καθορίζεται μόνο από την ταυτότητα του επικίνδυνου φαινομένου και τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού απέναντι σε αυτό, αλλά κυρίως από το μέγεθος και την συχνότητα εκδήλωσης του φαινομένου. Στοιχεία που δύναται να καθοριστούν μετά την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων για το επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο που λαμβάνεται υπόψη στην περιοχή.

Πολύ σύντομα, αρκετοί ερευνητές συνειδητοποίησαν ([Cees J. van Westen](#) , [Granger, Jones et al. 1999](#), [Westen, Montoya et al. 2002](#), [Durham 2003](#), [Bell and Glade 2004](#), [Arnold, Dilley et al. 2005](#), [Delmonaco, Margottini et al. 2006](#), [Greiving, Fleischhauer et al. 2006](#), [Heinl, Neuenschwander et al. 2006](#), [Schmidt-Thomé, Kallio et al. 2006](#), [Tarvainen, Jarva et al. 2006](#), [2007](#), [Bartel and Muller 2007](#), [Thierry, Stieltjes et al. 2007](#), [Tate, Cutter et al. 2010](#), [MATRIX 2010-13](#), [Asimakopoulou and Bessis 2011](#), [Dragicevic, Filipovic et al. 2011](#), [Schmidt, Matcham et al. 2011](#), [Glade 2012](#), [Greiving and Fleischhauer 2012](#),

[Kappes, Gruber et al. 2012](#), [Kappes, Keiler et al. 2012](#), [Marzocchi, Garcia-Aristizabal et al. 2012](#), [Lung, Lavalle et al. 2013](#), [Nadim and Liu 2013](#), [Ronchetti, Corsini et al. 2013](#), [Van Westen 2013](#), [Ciscar, Feyen et al. 2014](#), [Sandri, Thouret et al. 2014](#)) ότι η προσέγγιση της εξίσωσης (2.1) δεν μπορούσε να καλύψει τις απαιτήσεις και τα συμπεράσματα που προκύπταν από την ανάλυση διαφόρων περιπτώσιολογικών μελετών που αφορούσαν φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές σε ολόκληρο τον κόσμο. Κύριο συμπέρασμα αυτών των αναλύσεων αποτέλεσε, η διαπίστωση ότι πολλές περιοχές απειλούνταν από την παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου και για να ληφθεί υπόψη το σύνολο αυτών, απαιτούνταν μια διαφορετική προσέγγιση από αυτήν της εξίσωσης (1). Η μεθόδευση που προτάθηκε και υιοθετήθηκε από αρκετούς ερευνητές ([Kappes, Keiler et al. 2012](#), [Obrová and Smolíková 2013](#), [van Westen, Kappes et al. 2014](#)) αφορούσε την εφαρμογή μίας κοινής κλίμακας μέτρησης της έντασης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων αλλά και της τρωτότητας που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από αυτά. Η διακινδύνευση, προκύπτει ως αποτέλεσμα μίας συνάρτησης της επιμέρους άθροισης των φαινομένων σε μία περιοχή σε συνδυασμό με το αντίστοιχο άθροισμα της τρωτότητας, για κάθε φαινόμενο που εξετάζεται στον απειλούμενο πληθυσμό.

$$\mathcal{R} = \mathcal{F} \left(\sum_{j=1}^n \mathcal{H}_j +/ * \sum_{j=1}^n V(E)_j \right) \quad (2.2)$$

Η εξίσωση (2.2) αποτελεί μία αναγκαία εξέλιξη της εξίσωσης (2.1) στην προσπάθεια των ερευνητών να αναλύσουν με πιο ρεαλιστικό τρόπο τα φυσικά φαινόμενα. Κάτω από αυτό το πλαίσιο γίνονται μελέτες και εμφανίζονται μέθοδοι που προσπαθούν να αναλύσουν τα φαινόμενα αλλά και τον κίνδυνο από την παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φαινομένου σε μία περιοχή. Η πρόκληση που υπάρχει πλέον είναι το πώς θα καταστεί εφικτή η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών επικίνδυνων φυσικών φαινομένων που υπάρχουν στην ίδια περιοχή.

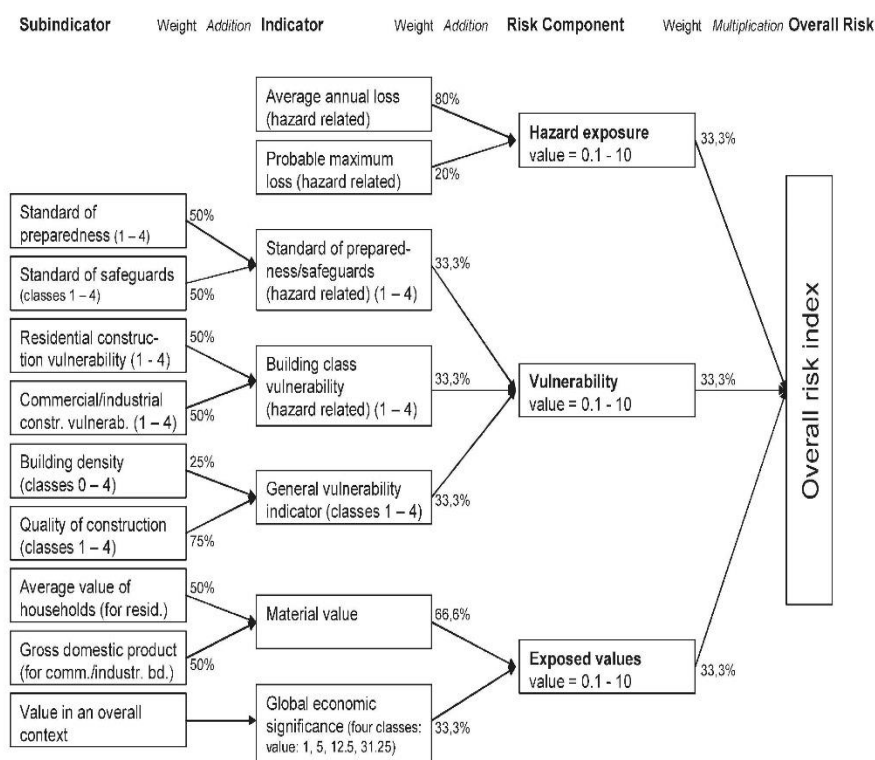
Η τυποποίηση μέσω της ταξινόμησης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των διαφορετικών φαινομένων και να μπορούν να αξιοποιηθούν οι εξισώσεις (2.2), (2.3) και (2.4) (αναφέρονται στη σελ.29). Το κάθε φαινόμενο με βάση τη ένταση και την συχνότητα

εμφάνισης του, ταξινομείται σε κάποια κατηγορία ενός κοινού συνόλου κατηγοριών ή αριθμού διαβαθμίσεων (με βάση συγκεκριμένα κριτήρια και ορισμού μιας τιμής κατωφλίου) ώστε να εξασφαλίζεται η ισοδυναμία και μία σχετική συγκρισιμότητα μεταξύ των φαινομένων που εξετάζονται. Για παράδειγμα ένας ισχυρός σεισμός και μία μεγάλη πλημμύρα μπορεί να ανήκουν στην ίδια κατηγορία έντασης φαινομένου, αν θεωρηθεί ότι είναι ισοδύναμα σε μέγεθος ή μπορεί να προκαλέσουν το ίδιο μέγεθος επιπτώσεων. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να κάνουμε πράξεις μεταξύ των φαινομένων αφού έχουν αντιστοιχηθεί σε μια κοινή τιμή έντασης ή ανήκουν στην ίδια κατηγορία που αφορά συγκεκριμένο μέγεθος επιπτώσεων.

Οι δείκτες Overall Risk Index (ORI) ([Munich 2005](#)), Total Place Vulnerability Index (TPVI) ([Cutter 1996](#)) και Integrated Risk Index (IRI) ([Greiving, Fleischhauer et al. 2006](#)) αποτελούν αντιπροσωπευτικά παραδείγματα της μοντελοποίησης που αντιπροσωπεύει η εξίσωση (2.2). Συγκεκριμένα ο δείκτης ORI αναπτύχθηκε για να μετρά το ρίσκο με οικονομικούς όρους στις 50 μεγαλύτερες πόλεις του κόσμου από επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα. Λαμβάνει υπόψη τρεις μεταβλητές α) την έκθεση σε ένα συγκεκριμένο αριθμό επικίνδυνων φυσικών φαινομένων (σεισμοί, ηφαίστεια, πλημμύρες, δασικές πυρκαγιές) β) την τρωτότητα (των υπό εξέταση στοιχείων) που αντιστοιχεί στο φαινόμενο που εξετάζεται κάθε φορά και γ) τις απειλούμενες οικονομικές αξίες (μέγεθος ζημιών) από τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα. Η έκθεση στο φυσικό φαινόμενο (hazard exposure) υπολογίζεται ορίζοντας δυο επιμέρους οικονομικούς δείκτες, τους AAL (Average Annual Loss) και PML (Probable Maximum Loss).

Ο τελικός υπολογισμός επιτυγχάνεται σε τρία βήματα. Πρώτον, προσθέτοντας τις τιμές του δείκτη AAL (τιμές για τα επιμέρους φαινόμενα) και επιλέγοντας την υψηλότερη τιμή PML από όλους τους κινδύνους. Κατόπιν, υπολογίζοντας το άθροισμα $Total_{AAL+PML}$ με την χρήση συντελεστών βαρύτητας 80% και 20% αντίστοιχα. Παρόμοια, η μεταβλητή της τρωτότητας υπολογίζεται ως άθροισμα τριών επιμέρους δεικτών ίδιας βαρύτητας, που ο καθένας προκύπτει από δύο υπο-δείκτες που έχουν τέσσερις διαβαθμίσεις (1-4) πλην της πυκνότητας κτιρίων που έχει ελαφρώς διαφορετική (0 έως 4). Η τελική τιμή προκύπτει προσθέτοντας το σύνολο των τιμών των δεικτών λαμβάνοντας υπόψη

συγκεκριμένους συντελεστές βαρύτητας. Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η μεταβλητή που αναφέρεται στις απώλειες των οικονομικών μεγεθών. Στόχος αποτελεί ο προσδιορισμός της «συνολικής» αξίας της περιοχής και ο καθορισμός της οικονομικής «σπουδαιότητας» της, σε παγκόσμια κλίμακα. Η τελική τιμή του δείκτη ORI (Overall Risk Index) εκφράζεται ως γινόμενο των τριών τιμών των δεικτών που αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές «έκθεση στο επικίνδυνο φαινόμενο», «τρωτότητα» και «απειλούμενες οικονομικές αξίες».

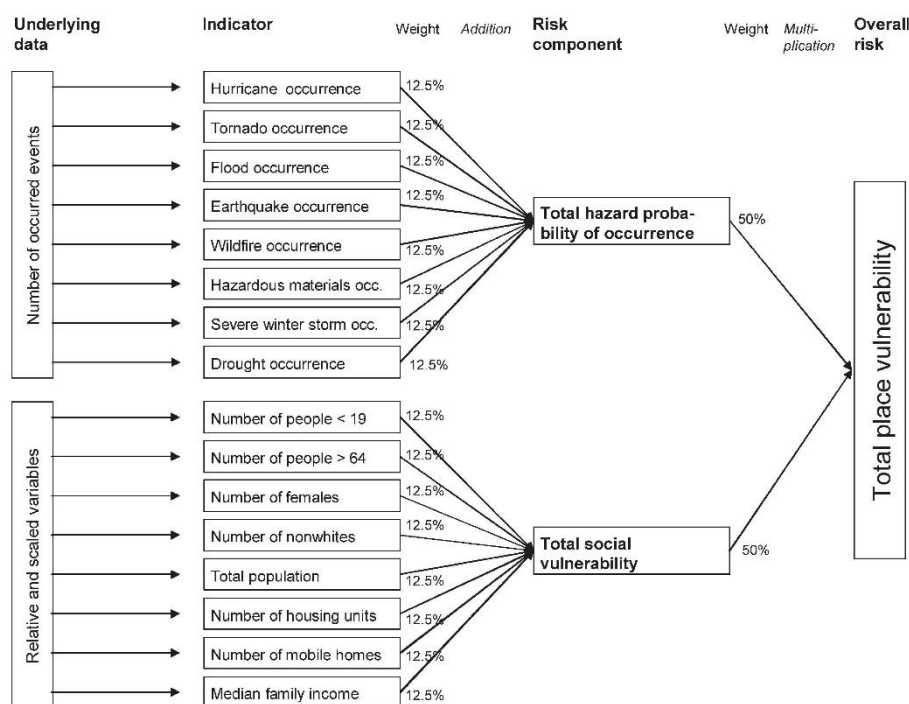


Εικόνα 1: Υπολογισμός του Overall Risk Index (ORI) (Munich 2005)

Παρόμοια ο δείκτης TPVI (Cutter 1996) αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνας για να χρησιμοποιηθεί αρχικά σε επίπεδο περιφέρειας πολιτείας αλλά έχει εφαρμοστεί και σε άλλες περιοχές. Σκοπός της μεθόδου αποτελεί ο υπολογισμός του πιθανού κινδύνου που παράγεται από επικίνδυνα φαινόμενα για τους ανθρώπους και τα αγαθά τους. Σύμφωνα με την μεθοδολογία της εφαρμογής, μετά την αναγνώριση των επικίνδυνων φαινομένων που δύναται να απειλήσουν την περιοχή ενδιαφέροντος, διαιρείται ο αριθμός των συμβάντων του εκάστοτε φαινομένου προς τον αριθμό των ετών που αποτελεί τη συνολική χρονική περίοδο μελέτης (υπολογισμός συχνότητας

εμφάνισης). Οι τιμές που προκύπτουν για κάθε επικίνδυνο φαινόμενο προστίθενται με όμοιο συντελεστή βαρύτητας για να υπολογιστεί μια συνολική τιμή που αντιπροσωπεύει τον κίνδυνο από την ύπαρξη των υπό εξέταση επικίνδυνων φυσικών και τεχνολογικών φαινομένων.

Για τον υπολογισμό της τρωτότητας λαμβάνονται υπόψη οκτώ μεταβλητές (βλέπε εικόνα 2) όπου η τιμή της κάθε μίας, προκύπτει διαιρώντας την τιμή της κάθε μεταβλητής σε επίπεδο περιφέρειας με την αντίστοιχη τιμή σε επίπεδο πολιτείας και η τιμή που προκύπτει κάθε φορά, διαιρείται με την μέγιστη τιμή για την ίδια μεταβλητή για το σύνολο των περιφερειών της πολιτείας, αυτή η κανονικοποίηση των τιμών οδηγεί σε μία κοινή κλίμακα μέτρησης με εύρος από το μηδέν έως και την μονάδα.



Εικόνα 2: Υπολογισμός του Total Place Vulnerability Index (TPVI) (Cutter 1996)

Η συνολική τρωτότητα προκύπτει ως το άθροισμα των τιμών της κάθε μεταβλητής λαμβανομένου υπόψη τους εκάστοτε συντελεστές βαρύτητας που στην συγκεκριμένη περίπτωση παραμένουν ίδιοι. Η τελική τιμή του δείκτη προκύπτει με πολλαπλασιασμό των δυο κύριων δεικτών, που κατέχουν τον ίδιο βαθμό σπουδαιότητας, του δείκτη THP (Total Hazard Probability) και του δείκτη TSV (Total Social Vulnerability). Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι δεν λαμβάνει υπόψη το μέγεθος και την ένταση των φαινομένων,

προσέγγιση που δύναται να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση ή υποβάθμιση του κινδύνου που απορρέει από τα εξεταζόμενα φαινόμενα και κατ' επέκταση σε εσφαλμένες τιμές του τελικού δείκτη.

Η μεθοδολογία του δείκτη IRI ([Greiving, Fleischhauer et al. 2006](#)) εφαρμόστηκε στο σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο του προγράμματος ESPON (European Spatial Planning Observation Network). Η μέθοδος παρουσιάζει την χρήσιμη ιδιότητα να είναι ανεξάρτητη των δεδομένων και των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν στο στάδιο των υπολογισμών, δηλαδή δύναται να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε γεωγραφική κλίμακα και ανεξαρτήτως των φαινομένων που θα επιλέγουν για αξιολόγηση. Για κάθε φαινόμενο που εξετάζεται παράγεται ένας χάρτης κινδύνου όπου αποτυπώνεται χωρικά το που εκδηλώνεται το συγκεκριμένο επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο αλλά και με ποια ένταση, συμβαίνει αυτό. Κατόπιν το σύνολο των χαρτών για το σύνολο των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων που εξετάζονται αθροίζονται για να παραχθεί ο τελικός χάρτης επικινδυνότητας από την παρουσία των φαινομένων.

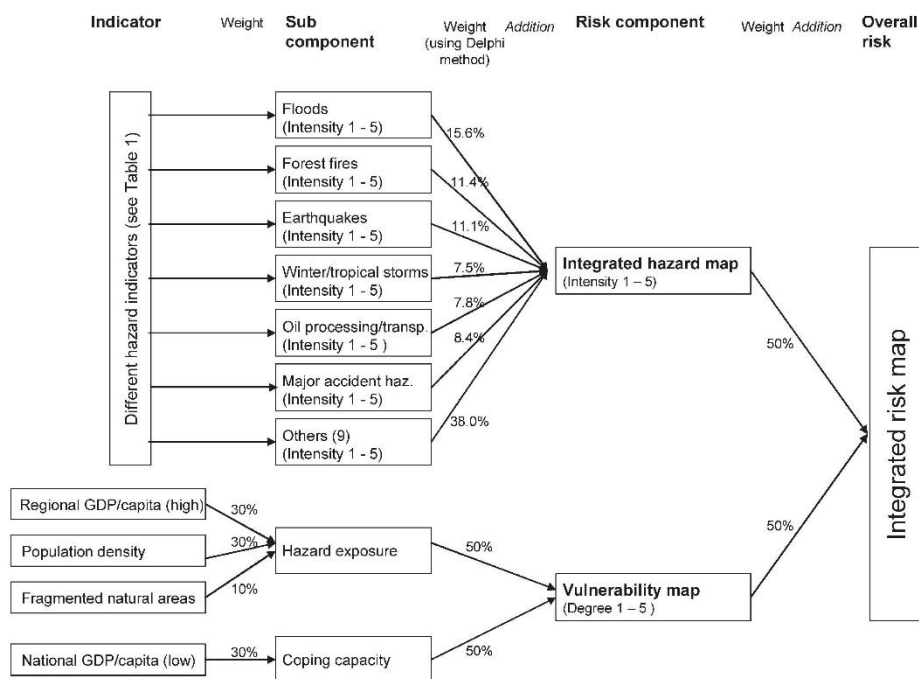
Λαμβανομένου υπόψη ότι το κάθε φυσικό ή τεχνολογικό φαινόμενο εμφανίζει διαφορετικό μηχανισμό εκδήλωσης, διαφορετική χρονική περίοδο μελέτης, διαφορετική χρονική περίοδο εκδήλωσης, διαφοροποιούμενη κλίμακα μέτρησης και διαφορετικές μονάδες μέτρησης και έντασης είναι πρακτικά αδύνατη η αποτύπωση του συνόλου των φαινομένων σε έναν κοινό χάρτη. Αυτό το υπολογιστικό ζήτημα ξεπεράστηκε με την υιοθέτηση μιας ποιοτικής τεχνικής όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, αυτή της μεθόδου της ταξινόμησης. Σε αυτή την μελέτη ορίστηκε μια κοινή κλίμακα πέντε διαβαθμίσεων έντασης (κατηγορίες) για το σύνολο των φαινομένων που εξετάζεται και τα φαινόμενα ταξινομούνται σύμφωνα με την αντίληψη του ερευνητή και τα όρια (κατώφλι) που έχουν θεσπιστεί ανά κατηγορία. Το μεγάλο πλεονέκτημα της ανωτέρω προσέγγισης είναι ότι επιτρέπει την χρήση διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων και δεικτών για κάθε φαινόμενο διότι οι τελικές τιμές για κάθε φαινόμενο, με την αξιοποίηση της ταξινόμησης θα κατηγοριοποιηθούν και αντιστοιχηθούν (με ποιοτικά κριτήρια), σε κοινές τιμές μιας διαβαθμισμένης κλίμακας έντασης.

Πίνακας 1: Διαβάθμιση έντασης φαινομένου / τρωτότητας για τον υπολογισμό του τελικού χάρτη κινδύνου (Greiving, Fleischhauer et al. 2006)

Degree of Vulnerability Overall Hazard Intensity					
1	2	3	4	5	6
2	3	4	5	6	7
3	4	5	6	7	8
4	5	6	7	8	9
5	6	7	8	9	10

Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός χάρτης για το σύνολο των επικίνδυνων φαινομένων ως άθροισμα των τιμών της έντασης που αντιστοιχεί για κάθε φαινόμενο σύμφωνα με την κοινή κλίμακα αναφοράς. Έχοντας σαν μοναδικό ερώτημα για τον μελετητή, τον υπολογισμό του συντελεστή βαρύτητας, που αντανακλά την σπουδαιότητα του εκάστοτε φαινομένου στην περιοχή μελέτης. Στην συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει επιλεχτεί η μέθοδος Delphi για την οριοθέτηση αυτών των συντελεστών βαρύτητας.

Με την ίδια μεθοδολογική προσέγγιση υπολογίζεται η τρωτότητα, ως άλλο ένα ενδιάμεσο βήμα, ώστε να παραχθεί ο τελικός χάρτης εκδήλωσης κινδύνου. Η τρωτότητα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία που εκτίθενται στον κίνδυνο (κατοικίες, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δημόσια κτίρια κοινής ωφέλειας), την πληθυσμιακή κατανομή, την παραγωγική δυναμική της περιοχής ενδιαφέροντος, τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον και την ικανότητα της ανθρώπινης κοινωνίας να αντιδράσει και να επανέλθει από την φυσική/ τεχνολογική καταστροφή. Στη μελέτη λαμβάνονται υπόψη μόνο οικονομικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης και όχι ποιοτικά στοιχεία, όπως θα μπορούσε να ήταν η συνοχή μιας κοινωνίας, ή η ύπαρξη αλληλοβοήθειας μεταξύ διαφορετικών κοινωνικών ομάδων. Για κάθε μεταβλητή, εφαρμόζεται και εδώ μία κοινή κλίμακα αναφοράς πέντε διαβαθμίσεων (1-5), που το άθροισμα τους παράγει την τελική συνολική τιμή της τρωτότητας για την περιοχή ενδιαφέροντος.



Εικόνα 3: Υπολογισμός του Integrated Risk Index (IRI) (Greiving, Fleischhauer et al. 2006)

Ο τελικός χάρτης κινδύνου προκύπτει από την «πρόσθεση» των τιμών της συνολικής έντασης για το σύνολο των επικίνδυνων φαινομένων και της τρωτότητας στην αντίστοιχη περιοχή, δημιουργώντας εννέα διαβαθμίσεις επικινδυνότητας για την εξεταζόμενη περιοχή. Πρέπει να τονιστεί ότι το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την συνέργεια των φαινομένων (combined effect) στη περιοχή μελέτης ενώ οι συντελεστές βαρύτητας και η κατηγοριοποίηση της έντασης και της τρωτότητας προκύπτουν με υποκειμενικές διαδικασίες και εκφράζουν τις πεποιθήσεις του ερευνητή.

Με όμοιο τρόπο το πρόγραμμα ARMONIA (Delmonaco, Margottini et al. 2006) ως συνέχεια των ευρωπαϊκών προγραμμάτων TIGRA (European Commission DG XII, Environment and Climate Program, 1997) και TEMRAP (The European Multi-Hazard Risk Assessment Project), στη λογική της εξίσωσης (2.1) και χρησιμοποιώντας μία κοινή κλίμακα έντασης για την σύγκριση και την άθροιση των επικίνδυνων φαινομένων και την εφαρμογή καμπυλών τρωτότητας για τον υπολογισμό της τρωτότητας για κάθε επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο, μελέτησε συγκεκριμένα σενάρια ανάλυσης των φυσικών φαινομένων και υπολογισμού της διακινδύνευσης αυτών, υπολογίζοντας αθροιστικά τις επιπτώσεις από κάθε φυσικό φαινόμενο για το ίδιο εκτεθειμένο στοιχείο (π.χ. οικονομικές απώλειες, θύματα).

Η εξίσωση (2.1) βρίσκει εφαρμογή και στην μελέτη με τίτλο «Atlas of Disaster Risk» [\[2007\]](#) που αφορά την ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου (συνολικά 21 χώρες) και αξιολογεί τον κίνδυνο για πέντε επικίνδυνα φαινόμενα (πλημμύρα, σεισμό, θερμοκρασιακή καταπόνηση, άνεμο και κατολισθήσεις) προκειμένου να εντοπιστούν πιθανά σημεία όπου ο πληθυσμός μπορεί να εκτεθεί σε διαφόρους κινδύνους ταυτόχρονα. Με βασικό μεθοδολογικό πλαίσιο την εξίσωση (2.1) και την αξιοποίηση των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (ΓΠΣ), παρήχθησαν χάρτες για κάθε επικίνδυνο φαινόμενο ξεχωριστά (με την χρήση κάθε φορά του καταλληλότερου μοντέλου για το εκάστοτε φαινόμενο) και διαβαθμίστηκαν σε πέντε κοινές κατηγορίες έντασης (Very low, Low, Medium, High, Very high) ώστε να υπάρχει κοινή διαβάθμιση για κάθε επικίνδυνο φαινόμενο. Για την δημιουργία του χάρτη του σεισμού χρησιμοποιήθηκε ο παράγοντας PGA (Peak Ground Acceleration) για περίοδο επαναφοράς 475 έτη, ενώ οι χάρτες θερμότητας και ανέμου δημιουργήθηκαν με την χρήση δεδομένων από 453 μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής μελέτης. Τέλος, ο χάρτης για τις πλημμύρες βασίστηκε σε μια στατιστική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων. Για την παραγωγή του τελικού χάρτη λήφθηκε υπόψη ένας συντελεστής βαρύτητας για κάθε φαινόμενο σύμφωνα με τις απώλειες σε ανθρώπινο και οικονομικό δυναμικό που αντιστοιχούν σε κάθε φαινόμενο για την περιοχή μελέτης. Με την αξιοποίηση των συντελεστών βαρύτητας και τους πέντε παραγόμενους χάρτες, προκύπτει ο τελικός χάρτης πέντε διαβαθμίσεων (MultiHazard Index Distribution Map) ως άθροισμα της κοινής έντασης του κάθε φαινομένου επί του συντελεστή βαρύτητας που αντιστοιχεί σε κάθε φαινόμενο κάθε φορά.

Multihazard index	Intensity level
1 – 1.5	Very low
1.5 – 2.5	Low
2.5 – 3.5	Medium
3.5 – 4.5	High
4.5 – 5	Very high

Εικόνα 4: Σχέση τιμών – κατηγοριών μεταξύ δείκτη και επίπεδο έντασης [\[2007\]](#)

Αρκετοί ερευνητές προτείνουν μια ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση των εξισώσεων (2.1) και (2.2) στον υπολογισμό της διακινδύνευσης των

εκτεθειμένων στοιχείων σε μία συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Η διακινδύνευση υπολογίζεται ως γινόμενο ή άθροισμα των επιμέρους διακινδυνεύσεων που αντιστοιχούν στα υπό εξέταση επικίνδυνα φαινόμενα στη περιοχή μελέτης. Οι επιμέρους διακινδυνεύσεις είναι συναρτήσεις, της επικινδυνότητας του εκάστοτε φυσικού φαινομένου που αναλύεται και της αντίστοιχης τρωτότητας του υπό εξέταση εκτεθειμένου στοιχείου που αντιστοιχεί στο εκάστοτε φαινόμενο. Πρακτικά, αυτή η τεχνική διευκολύνει και απλοποιεί την διαδικασία για την παραγωγή του τελικού αποτελέσματος διότι έχοντας υπολογίσει μεμονωμένα την διακινδύνευση για κάθε επικίνδυνο φυσικό ή τεχνολογικό φαινόμενο στην περιοχή μελέτης, μπορούμε να παράγουμε την τελική διακινδύνευση ως άθροισμα ή γινόμενο των μεμονωμένων μεγεθών έχοντας αξιοποιήσει και εδώ την τεχνική της ταξινόμησης, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Σε κάθε περίπτωση και αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση που αντιστοιχεί στις εξισώσεις (2.3) και (2.4), αν και λαμβάνει υπόψη την παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φαινομένου σε μία περιοχή (Combined Effect) δεν αξιολογεί τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις που μπορεί να αναπτυχθούν μεταξύ των φαινομένων.

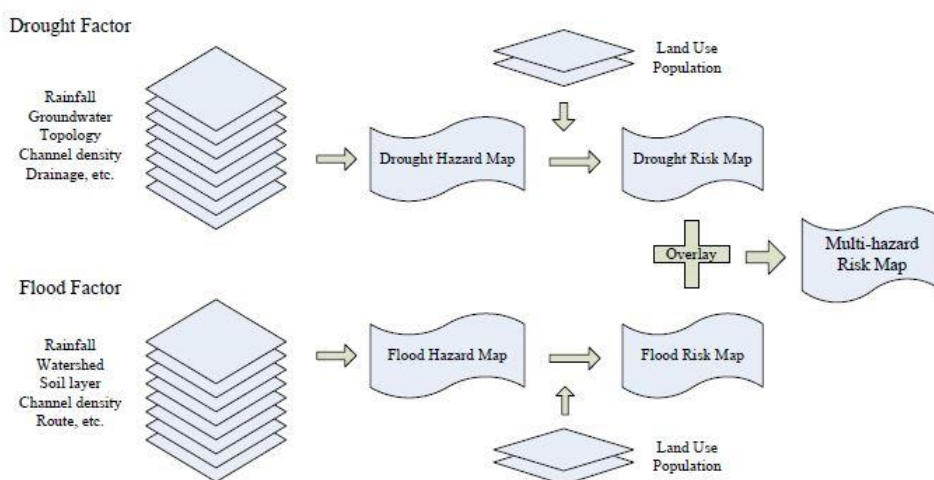
$$\mathcal{R} = \sum_{i=1}^n R(\mathcal{H}_i, V(\mathcal{E})_i) \quad (2.3)$$

$$\mathcal{R} = \prod_{i=1}^n R(\mathcal{H}_i, V(\mathcal{E})_i) \quad (2.4)$$

Οι Bartel P. και Muller ([Bartel and Muller 2007](#)) στην μελέτη τους για τον υπολογισμό της διακινδύνευσης του πληθυσμού από την έκθεσή του σε τέσσερα επικίνδυνα φαινόμενα (ξηρασία, πλημμύρα, σεισμό και σμήνη ακριδών) στο Κέρας της Αφρικής υιοθέτησαν την εξίσωση (2.4) για τον υπολογισμό της τελικής διακινδύνευσης χωρίς την δημιουργία κάποιου δείκτη που θα ακολουθεί κάποιο εύρος τιμών βασιζόμενοι σε επιμέρους δείκτες και μεταβλητές. Στην περίπτωση τους, η διακινδύνευση είναι υπολογισμένη λαμβάνοντας την ετήσια πιθανότητα εμφάνισης μιας φυσικής καταστροφής σε μια συγκεκριμένη περιοχή και δευτερευόντως στην πιθανότητα εμφάνισης ενός συνδυασμού από τα τρία υπό-εξέταση φαινόμενα (ξηρασία, πλημμύρα και

σμήνη ακριδών) μέσα σε ένα έτος. Επί της ουσίας μετρήθηκε η συχνότητα εμφάνισης του κάθε φαινομένου σε ένα έτος και υπολογίστηκε η σχετική συχνότητα για κάθε φαινόμενο σε ένα έτος. Ο σεισμός εξαιρέθηκε από τον υπολογισμό της ετήσιας πιθανότητας εμφάνισης καθώς παρουσιάζει εξαιρετικά διαφορετική συχνότητα επανάληψης για την περίοδο μελέτης σε σχέση με τα υπόλοιπα φαινόμενα. Η τελική διακινδύνευση για την περιοχή μελέτης υπολογίζεται με την από κοινού συνάρτηση πιθανότητας για το σύνολο των υπό μελέτη επικίνδυνων φαινομένων (εξαιρουμένου του σεισμού για τους λόγους που αναφέρθηκαν) και εμφανίζεται σε χάρτη ως πιθανότητα ετήσια εκδήλωσης αυτών.

Παρόμοια ο Wipulanusat ([Wipulanusat, Nakrod et al. 2011](#)) χρησιμοποίησε την εξίσωση (2.3) στη μελέτη του, για τη λεκάνη Pak Phanang στην Ταϊλάνδη. Σε αυτή την μελέτη εξετάζονται δύο επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα, η ξηρασία και οι πλημμύρες. Για κάθε ένα από αυτά και με την χρήση των ΓΠΣ παράχθηκε ένας χάρτης επικινδυνότητας που λαμβάνει υπόψη την ένταση του φαινομένου και την κατανομή του πληθυσμού βασιζόμενος σε δεδομένα παλαιότερων συμβάντων πλημμύρας και ξηρασίας. Ο τελικός χάρτης που αντιπροσωπεύει τον κίνδυνο από τα δύο επικίνδυνα φαινόμενα στον πληθυσμό προκύπτει από την επικάλυψη (άθροισμα των τιμών) των δύο χαρτών. Η μέθοδος της ταξινόμησης επιλέχθηκε για την κατηγοριοποίηση του τελικού χάρτη σε τρία επίπεδα έντασης.



Εικόνα 5: Εννοιολογικό διάγραμμα υπολογισμού της διακινδύνευσης στη λεκάνη Pak Phanang στην Ταϊλάνδη ([Wipulanusat, Nakrod et al. 2011](#))

Από την μέχρι τώρα επισκόπηση των διαφόρων μεθόδων και τεχνικών εύκολα διαπιστώνεται ότι οι μέθοδοι και τεχνικές που παρουσιάστηκαν αλλά και τα αποτελέσματά τους, έχουν ποιοτικά χαρακτηριστικά καθότι η κατηγοριοποίηση του κάθε φαινομένου σε διάφορες διαβαθμίσεις εμπεριέχει την υποκειμενική γνώση και αντίληψη του ερευνητή. Πράγματι τόσο η διακινδύνευση όσο και η ένταση του φαινομένου, βαθμονομούνται και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις προσδοκίες και το πόσο καλά γνωρίζει ο ερευνητής την περιοχή μελέτης αλλά και τους μηχανισμούς εκδήλωσης των επικίνδυνων φυσικών και τεχνολογικών φαινομένων.

Κάτω από αυτό το πλαίσιο, είναι εξαιρετικά πιθανό, διαφορετικοί ερευνητές χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση για την ίδια περιοχή μελέτης να παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα, αναδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο, την βαρύτητα της απουσίας αντικειμενικότητας κατά τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων και την ύπαρξη αβεβαιότητας στην μέθοδο εφαρμογής. Επιπρόσθετα ένα άλλο σημείο που απαιτεί περαιτέρω ανάλυση, είναι ο τρόπος αξιολόγησης του συνολικού κινδύνου που απορρέει από την παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φαινομένου στην ίδια περιοχή. Μέχρι τώρα οι ερευνητές απομονώνουν το κάθε φαινόμενο από τα υπόλοιπα που συνυπάρχουν στην περιοχή μελέτης και εφαρμόζουν μία ανεξάρτητη διαδικασία υπολογισμού της διακινδύνευσης για το κάθε ένα ξεχωριστά, Τέλος, αν και λαμβάνεται υπόψη η συνύπαρξη των φαινομένων, υπολογίζοντας αθροιστικά την διακινδύνευση ή το μέγεθος των επιπτώσεων για τα υπό εξέταση στοιχεία δεν λαμβάνονται υπόψη οι πιθανές αλληλοεπιδράσεις και αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ αυτών, άρα και η πιθανότητα τα τελικά μεγέθη να διαφοροποιηθούν λόγω αυτών των συσχετίσεων.

Πράγματι οι ερευνητές ξεκίνησαν να αποδίδουν περισσότερα ποσοτικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες στις μεθόδους και τεχνικές που εφαρμόζαν, για να ξεπεράσουν το ζήτημα της υποκειμενικότητας στα αποτελέσματα των πράξεων τους αλλά και να λάβουν υπόψη τις πιθανές συνδέσεις μεταξύ των φαινομένων. Εφάρμοσαν καθαρά υπολογιστικές μεθόδους που είχαν σαν αποτέλεσμα να περιορίσουν τη συμμετοχή του ερευνητή στην διαδικασία παραγωγής του τελικού αποτελέσματος, αξιοποιώντας μόνο τα διαθέσιμα στοιχεία από την παρατήρηση και την καταγραφή των αντίστοιχων διεργασιών των φαινομένων.

Τα διαθέσιμα στοιχεία αφορούν κυρίως την καταγραφή της συχνότητας εμφάνισης του υπό εξέταση φαινομένου εντός ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος σε συνδυασμό με την έντασή, που εκδηλώθηκε σε κάθε εμφάνισή του. Αυτές οι καταγραφές αναφέρονται σαν μεγέθη σχετικής συχνότητας και όπως αναλύεται στο κεφάλαιο (3) επιτρέπουν τον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου εντός ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος, συνήθως αναφέρεται σε διάστημα ενός έτους, αλλά και την πιθανότητα εμφάνισης συγκεκριμένης τιμής ή μεγέθους του φαινομένου σε σχέση με το σύνολο των τιμών που έχουν καταγραφεί για το συγκεκριμένο φαινόμενο στην περιοχή μελέτης.

Η εφαρμογή υπολογιστικών μεθόδων στα μοντέλα εκτίμησης κινδύνου επέτρεψε την καλύτερη κατανόηση των διαβαθμίσεων της επικινδυνότητας, της διακινδύνευσης αλλά και συγκεκριμένων μεγεθών των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων καθότι αυτά προβάλλονται και υπολογίζονται μόνο με τη χρήση των διαθέσιμων δεδομένων, αποφεύγοντας ποιοτικές περιγραφές που ο καθένας δύναται να ερμηνεύει διαφορετικά αναλόγως των εμπειριών και της γνώσης που διαθέτει. Επιπρόσθετα, με την εφαρμογή των υπολογιστικών μεθόδων είναι εφικτή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με την περαιτέρω εφαρμογή μαθηματικής ανάλυσης καθότι μπορούμε να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα των εφαρμοσμένων τεχνικών για να παραχθούν επιπλέον συμπεράσματα που σχετίζονται με την ακρίβεια των υπολογισμών και των χαρακτηριστικών των αρχικών υπολογισμών. Παράλληλα η εξάλειψη της συμμετοχής του ερευνητή τόσο στην εφαρμοσμένη μεθοδολογία όσο και στην διαδικασία των υπολογισμών ενός μοντέλου, επιτρέπει την εφαρμογή του μοντέλου να είναι ανεξάρτητη του ερευνητή αλλά και της περιοχής μελέτης παρέχοντας με αυτό τον τρόπο πιο αντικειμενικά αποτελέσματα.

Η επεξεργασία δεδομένων που αφορούσαν την συχνότητα επανάληψης του υπό-εξέταση φαινομένου ως εργαλείο ανάδειξης αποτελεσμάτων, βελτίωσε την ποιότητα και ευκρίνεια των μοντέλων αλλά ανέδειξε ένα εξαιρετικά μεγάλο ζήτημα στο πεδίο της διαχείρισης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, αυτό της διαθεσιμότητας και ποιότητας των προς επεξεργασία στοιχείων. Συχνά η μελέτη συγκεκριμένων φυσικών κινδύνων σε μία περιοχή δεν προϋποθέτει ότι υπήρχε η ίδια αντίληψη και στο παρελθόν για τους ίδιους κινδύνους, κι αυτό

έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει καταγραφή των φαινομένων υπό την μορφή της παρατήρησης και της ύπαρξης δεδομένων. Επιπρόσθετα, η χωρική και χρονική εξέλιξη του φαινομένου δεν επέτρεπε πάντα τη συνολική παρατήρηση και καταγραφή του, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία που να καταγράφουν την συμπεριφορά και το μέγεθός του για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα ή στο σύνολο του χώρου που εκδηλώνεται. Επίσης είναι εξαιρετικά πιθανό η καταγραφή των στοιχείων να υφίσταται σε χρόνο και ποσότητα που αξιολογούνται ικανοποιητικά για την επεξεργασία τους, αλλά ο τρόπος που έχει υλοποιηθεί δια μέσου των χρόνων η όλη διαδικασία και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των μετρήσεων να έχουν παράγει χαμηλής ποιότητας και αξιοπιστίας δεδομένα.

Παρόλες τις αντικειμενικές δυσκολίες που προκύπτουν από κακής ποιότητας δεδομένα ή απουσία δεδομένων, η αναγκαιότητα για την δημιουργία μοντέλων που αξιολογούν τον κίνδυνο και μπορούν να παράγουν ποσοτικά αποτελέσματα, βασισμένα στην στατιστική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων δεν ατόνησε αλλά οδήγησε στην εξέλιξη των μεθόδων και τεχνικών ώστε να μην απαιτούν υπερβολικά μεγάλο αριθμό δεδομένων, τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Έτσι οι ερευνητές υιοθέτησαν την εφαρμογή των παραμετρικών και μη παραμετρικών στατιστικών μεθόδων (parametric and non-parametric methods) ([Livingstone and Salt 2005](#)).

Η επιλογή ποιας μεθόδου θα υιοθετηθεί, καθορίζεται από τα διαθέσιμα δεδομένα και την δυνατότητα επεξεργασία αυτών. Όταν τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα και ο αριθμός τους δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων από την επεξεργασία τους ή όταν διαφαίνεται ότι τα δεδομένα δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή και ο ερευνητής αντιλαμβάνεται ότι ακόμη και με την χρήση του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος δεν μπορεί να υιοθετηθεί η κανονικότητα των τιμών, τότε εφαρμόζονται οι μη παραμετρικές μέθοδοι. Είναι μέθοδοι που είναι ιδιαίτερα ευέλικτες καθότι δεν απαιτούν εκ των προτέρων να γνωρίζουμε ιδιότητες των δεδομένων αλλά αξιοποιώντας κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία (kernel density estimators) εξάγουμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το υπό εξέταση επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο από τα διαθέσιμα στοιχεία.

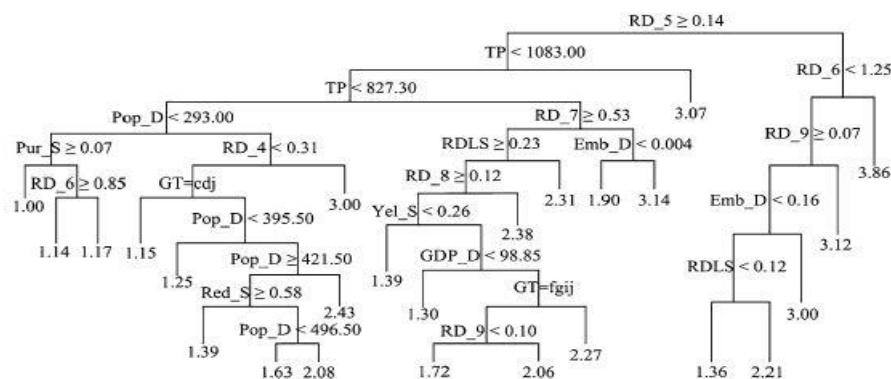
Ωστόσο, παρά την ευελιξία που παρέχουν οι μη παραμετρικές τεχνικές, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μελέτης όπου τα δεδομένα δεν βοηθούν, πολλοί συγγραφείς υποστηρίζουν ότι τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολο να ερμηνευθούν σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση που αφορά την εφαρμογή των παραμετρικών τεχνικών, ενώ παράλληλα υποστηρίζεται ότι υπάρχει υψηλός κίνδυνος τα αποτελέσματα να μην παρουσιάζουν ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα και ως εκ τούτου, να μην μπορεί να εφαρμοστούν στην ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων ([Chongfu 1996](#), [Huang and Ruan 2008](#), [Liu, Siu et al. 2013](#)). Για την εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ότι η κατανομή των δεδομένων περιγράφεται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή ή τουλάχιστον ότι τα δεδομένα ακολουθούν ικανοποιητικά μίας συγκεκριμένης μορφή κατανομή. Το σφάλμα στους υπολογισμούς των συγκεκριμένων μεθόδων σχετίζεται άμεσα με το πόσο ισχυρή είναι η παραδοχή της κανονικότητας για τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται κάτι που σε πολλές περιπτώσεις, αποτελεί ανασταλτικός παράγοντας για την εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων στο πεδίο της ανάλυσης και αξιολόγησης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, ενώ και τα μοντέλα εφαρμογής τους, μπορεί να είναι πολύπλοκα και με μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

Η μέθοδος της ταξινόμησης και παλινδρόμησης δέντρου CART (Classification and Regression Tree) είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μη παραμετρικές τεχνικές, λόγω του γεγονότος ότι δεν απαιτεί τα δεδομένα να ακολουθούν μία γνωστή κατανομή με αποτέλεσμα να μην απαιτούνται και έλεγχοι καλής προσαρμογής αυτών (Goodness of fit tests). Η τεχνική βασίζεται στη χρήση ενός αλγόριθμου που στοχεύει στην πρόβλεψη μίας ποσοτικής εξαρτημένης μεταβλητής (παλινδρόμηση) αλλά και κατηγορικής (ταξινόμηση), από ένα πλήθος ανεξάρτητων μεταβλητών με τη μορφή δενδρικής ιεραρχίας.

$$Q(s|t) = 2 \left(\text{Left} \right) \left(\text{Right} \right) \sum_i |P(C_i|t_{\text{Left}}) - P(C_i|t_{\text{Right}})| \quad (2.5)$$

Πιο συγκεκριμένα, οι όροι (Left) και (Right), ([Fenton, Littlewood et al.](#)) εκφράζουν την πιθανότητα της τυχαίας τιμής από μία βάση δεδομένων, να βρεθεί αντιστοίχως στο αριστερό ή στο δεξί μονοπάτι του υπό εξέταση δέντρου, που ξεκινά από τον τυχαίο κόμβο k. Κατά ανάλογο τρόπο, οι πιθανότητες

$P(C_i|tLeft)$ και $P(C_i|tRight)$ εκφράζουν τη δεσμευμένη πιθανότητα, τυχούσα εγγραφής της βάσης δεδομένων, να ανήκει στη κατηγορία C_i (όπου $i=1, \dots, m$), δεδομένου του γεγονότος πως η εν λόγω εγγραφή, βρίσκεται είτε στο αριστερό, είτε στο δεξί μονοπάτι αντιστοίχως, που ξεκινά από το κόμβο k .



Εικόνα: Η μέθοδο ταξινόμησης και παλινδρόμησης δέντρου για την περιφέρεια Hunan στην Κίνα (Ji, Li et al. 2013)

Οι Zhonghui Ji, Ning Li (Ji, Li et al. 2013) εφάρμοσαν την τεχνική CART στον υπολογισμό της διακινδύνευσης για την εκδήλωση πλημμύρας στην περιφέρεια Hunan στην Κίνα και του υπολογισμού των απωλειών με οικονομικούς όρους στην περιοχή μελέτης (million yuan/km²). Συνολικά δέκα οκτώ μεταβλητές (χαρακτηριστικά τρωτότητας πληθυσμού, μετεωρολογικών δεδομένων και χωρικών χαρακτηριστικών της περιοχής) αξιοποιήθηκαν από τους ερευνητές, για να μετρηθεί η επίδρασή τους στη εκδήλωση μιας πλημμύρας. Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου έγινε με γνώμονα την έλλειψη δυνατότητας, μετά από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων, να εδραιωθεί μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών της περιοχής μελέτης. Από την ανάλυση καταγράφεται ότι οι καιρικές συνθήκες φαίνεται να έχουν τον σημαντικότερο αντίκτυπο στην εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας για την περιοχή μελέτης.

Παρόμοια, η μελέτη της συσχέτισης του μοτίβου της χωρικής κατανομής των κατοικιών σε σχέση με την διακινδύνευση τους, από τις δασικές πυρκαγιές για δύο περιοχές στη νότια Καλιφόρνια Syphard, Keeley et al. (2012) έχει υλοποιηθεί με την αξιοποίηση μη παραμετρικών τεχνικών, καθότι είχε

αποδειχθεί από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων ότι το ιστορικό πυρκαγιών που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη δεν είχε γραμμική συσχέτιση με τις υπόλοιπες μεταβλητές (χωρική κατανομή κατοικιών, μορφή συστάδας κατοικιών, απόσταση κατοικιών από βλάστηση). Αξιοσημείωτο είναι το αποτέλεσμα της μελέτης που αναδεικνύει ότι υψηλή επικινδυνότητα για δημιουργία ζημιών στις κατοικίες υπολογίζεται κυρίως σε τμήματα της περιοχής μελέτης όπου ο κίνδυνος για εκδήλωση πυρκαγιάς δεν είναι ο ψηλότερος για το σύνολο της περιοχής.

Η είσοδος των υπολογιστικών μεθόδων στην εκτίμηση της διακινδύνευσης επί του απειλούμενου πληθυσμού από συγκεκριμένο επικίνδυνο φυσικό ή τεχνολογικό κίνδυνο επιβεβαίωσε την αξία της μοντελοποίησης του κινδύνου που απορρέει από φαινόμενα και διαδικασίες που μπορούν να προκαλέσουν ζημιές ή απώλειες με οικονομικούς ή κοινωνικούς όρους. Πράγματι ο υπολογισμός της διακινδύνευσης ή της πιθανότητας εκδήλωσης ενός επικίνδυνου φαινομένου μπορεί να παρέχει την απαραίτητη πληροφόρηση στο προσωπικό που είναι υπεύθυνο για την διαχείριση μιας φυσικής ή τεχνολογικής καταστροφής, ώστε να ληφθούν οι απαραίτητες ενέργειες που θα περιορίσουν το μέγεθος των επιπτώσεων στον υπό εξέταση πληθυσμό ή θα προσαρμόσουν τα χαρακτηριστικά του απειλούμενου πληθυσμού στις απαιτήσεις που απορρέουν από την ενδεχόμενη εκδήλωση ενός ανεπιθύμητου γεγονότος. Σε κάθε περίπτωση, η μοντελοποίηση του κινδύνου που οδηγεί μέσω των συμπερασμάτων της, στην προσαρμογή του υπό εξέταση πληθυσμού στον υπαρκτό κίνδυνο μέσω κατάλληλων δράσεων ή τον μετριασμό των πιθανών αρνητικών επιπτώσεων επί του πληθυσμού από την εκδήλωση των φαινομένων είναι πιο ευδιάκριτη τόσο στους τελικούς χρήστες των μοντέλων όσο και στον πληθυσμό που πρέπει να ενημερωθεί για τον πιθανό κίνδυνο.

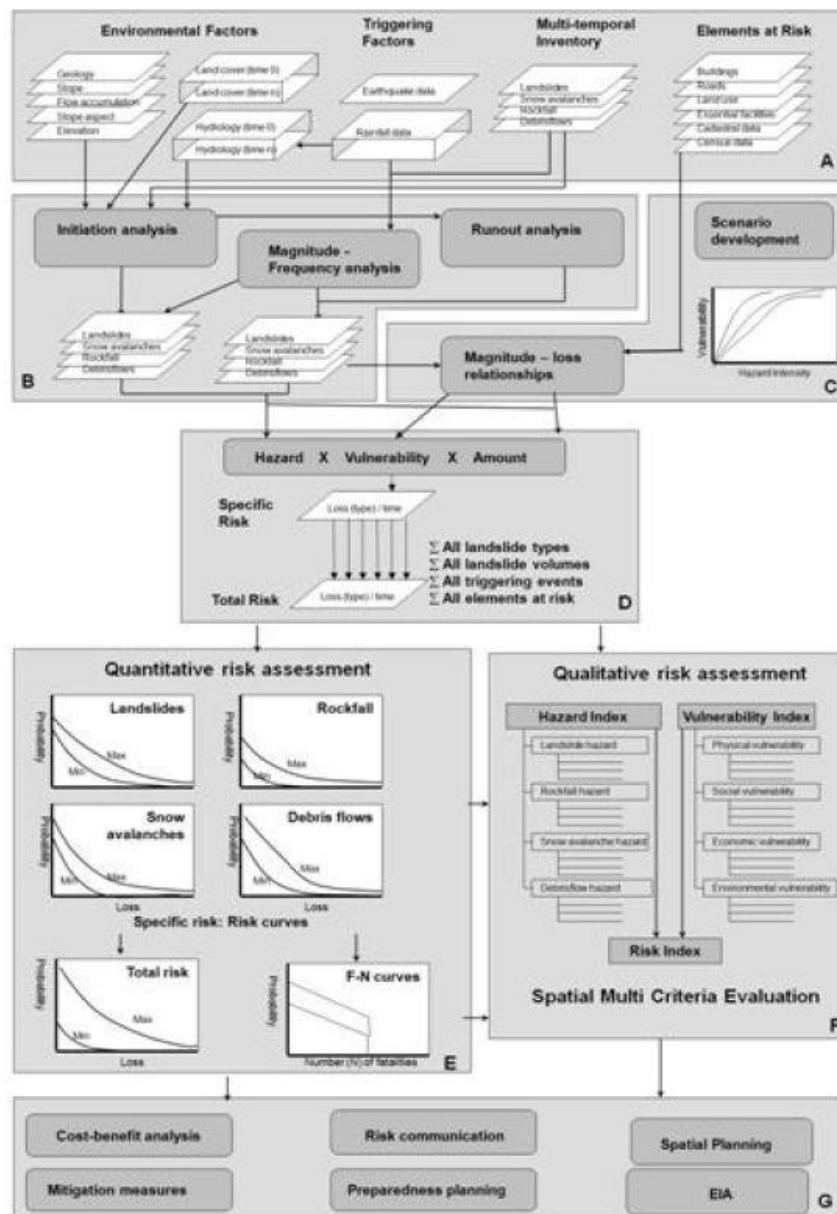
Η εξέλιξη των τεχνικών και μεθόδων σε συνδυασμό με την αποδοχή από την κοινωνία της σπουδαιότητας που μπορεί να έχει η μοντελοποίηση της διακινδύνευσης για την θωράκισή της από τα επικίνδυνα φυσικά και τεχνολογικά φαινόμενα οδήγησε στην ανάπτυξη εφαρμογών από κρατικούς και ανεξάρτητους οργανισμούς ξεπερνώντας την μέχρι τότε κατάσταση όπου μία εφαρμογή ή μεθοδολογία ήταν αποτέλεσμα κάποιου ερευνητικού προγράμματος ή μεμονωμένων ερευνητικών προσπαθειών ενός ακαδημαϊκού

ιδρύματος. Προγράμματα και εφαρμογές όπως τα: Hazus ([FEMA, 2011](#)), RiskScape ([Frigerio and van Westen 2010](#), [Schmidt, Matcham et al. 2011](#)), Capra ([CAPRA 2008-2012](#)) και RiskCity ([Westen et al., 2002](#)) αναπτύχθηκαν και υιοθετήθηκαν από κρατικούς και ανεξάρτητους οργανισμούς σε καθαρά επιχειρησιακό επίπεδο για τον υπολογισμό της διακινδύνευσης του πληθυσμού αλλά και των υποδομών από έναν διευρυμένο αριθμό επικίνδυνων φυσικών φαινομένων με υπολογιστικά κριτήρια, αξιοποιώντας κυρίως δεσμευμένες πιθανότητες και ΓΣΠ για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

Κάτω από αυτό το πλαίσιο έχουν κυριαρχήσει τα ποσοτικά μοντέλα υπολογισμού της διακινδύνευσης, καθότι μέσω της αξιοποίησης της θεωρίας των πιθανοτήτων και της στατιστικής επεξεργασίας των διαθέσιμων δεδομένων μπορούν να παράγουν ποσοτικά αποτελέσματα που αφορούν μεγέθη όπως τις οικονομικές απώλειες σαν ποσοστό του ΑΕΠ, της παραγωγικής διαδικασίας ως εξαγωγές, του πλούτου μιας περιοχής ως αμοιβές ή την πιθανότητα εμφάνισης συγκεκριμένου μεγέθους/κατάστασης ενός επικίνδυνου φαινομένου ως ποσοστό επί του συνόλου των πιθανών καταστάσεων που μπορεί να εμφανίσει το συγκεκριμένο φαινόμενο στην περιοχή ([Fragiadakis and Christodoulou 2014](#)). Αυτή η εξέλιξη ανεξαρτητοποιεί την μεθοδολογία από τα χαρακτηριστικά περιγραφής του φαινομένου, της περιοχής μελέτης αλλά και των πεποιθήσεων των ερευνητών ([Corominas, van Westen et al. 2013](#)). Οι υπολογιστικές μέθοδοι που βασίζονται στις πιθανότητες παρουσιάζουν και ένα ακόμη πλεονέκτημα, οι πιθανότητες είναι καθαροί αριθμοί οπότε ο υπολογισμός όλων των μεταβλητών με πιθανότητες επιτρέπει την σύγκριση διαφορετικών φαινομένων και μηχανισμών, χαρακτηριστικών που ανήκουν σε διαφορετικά μη συγκρίσιμα πεδία κάτω από ένα κοινό σύστημα αναφοράς και βαθμονόμησης που είναι αντιληπτό και αποδεκτό με τον ίδιο τρόπο από όλους.

Ένα (ανοιχτού κώδικα) λογισμικό που έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από πολλούς ερευνητές είναι το ILWIS (Integrated Land and Water Information System) που αξιοποιεί αρχεία ΓΣΠ σε συνδυασμό με δορυφορικές απεικονίσεις της περιοχής μελέτης για την εξαγωγή χαρτών σύμφωνα με την εκάστοτε μεθοδολογία που εφαρμόζεται από τους ερευνητές. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα «SafeLand» [Van Westen, Quan Luna et al. \(2010\)](#) για την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που με ποσοτικά ή ποιοτικά

κριτήρια μπορεί να εκτελέσει μια σειρά υπολογισμών για την εκτίμηση της διακινδύνευσης της απώλειας ανθρώπων αλλά και περιουσιών από πλημμύρες, κατολισθήσεις, πτώση βράχων και χιονοστιβάδες στις γαλλικές Άλπεις. Οι ποιοτικοί υπολογισμοί της μεθοδολογίας αφορούν την δημιουργία δύο δεικτών που λαμβάνουν υπόψη ένα διευρυμένο πακέτο κριτηρίων οικονομικού και κοινωνικού χαρακτήρα για τον δείκτη τρωτότητας ενώ για τον δείκτη των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων βαθμονομούνται τα φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη.



Εικόνα 3: Εννοιολογικό Διάγραμμα που καθορίζει τα βήματα της μεθοδολογίας στο «SafeLand» [Van Westen, Quan Luna et al. \(2010\)](#)

Οι ποσοτικοί υπολογισμοί της διακινδύνευσης μπορούν να γίνουν με την αξιοποίηση καμπυλών τρωτότητας στη βάση της εξίσωσης (2.6) που βασίζεται στην εξίσωση (2.1) :

$$\mathcal{R} = P_t * P_s * v * \varepsilon \quad (2.6)$$

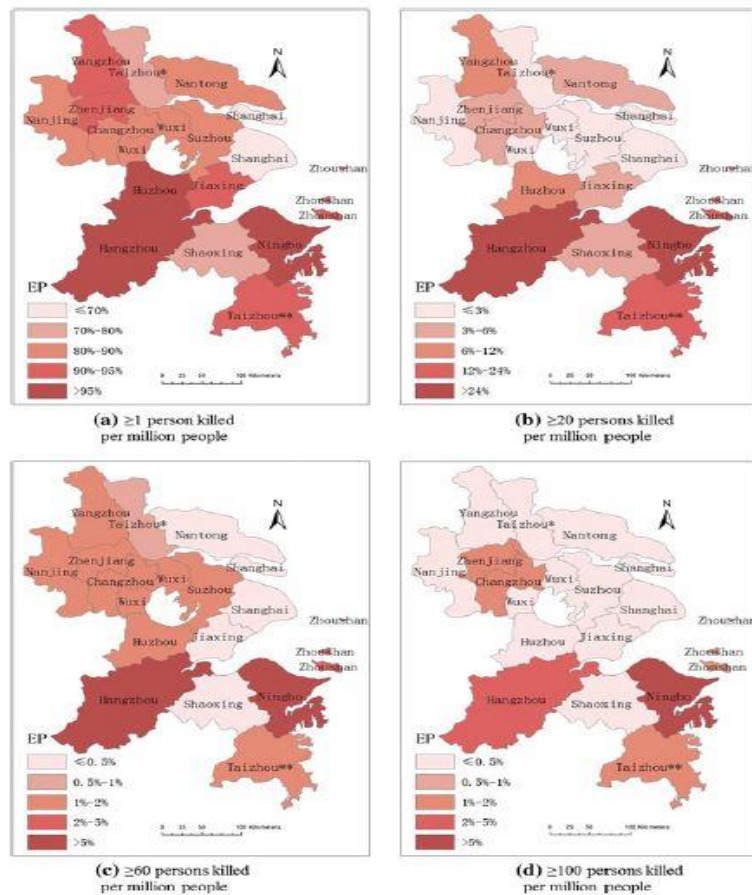
(\mathcal{R} είναι η διακινδύνευση, ε είναι ο αριθμός των στοιχείων σε κίνδυνο (άνθρωποι ή υποδομές), v είναι η τρωτότητα για τον κάθε φορά εξεταζόμενο επικίνδυνο φαινόμενο, P_t είναι η χρονική πιθανότητα να διεγερθεί (triggering effect) ένα δεύτερο φαινόμενο από τρία επίπεδα έντασης του πρώτου φαινομένου και P_s εκφράζει την χωρική πιθανότητα εξάπλωσης του φαινομένου. Τα προϊόντα της μεθοδολογίας εξάγονται με την μορφή χαρτών για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Ενώ αποτελεί μία από τις πρώτες προσπάθειες αποτύπωσης της αλληλοεπίδρασης των φαινομένων σε μία περιοχή με την χρήση της πιθανότητας P_t .

Οι Liu, Siu ([Liu, Siu et al. 2013](#)) στην μελέτη τους για το δέλτα του ποταμού Yangtze στην Κίνα παρουσίασαν μία εναλλακτική προσέγγιση βασισμένη στην «Diffusion Theory» για να ξεπεράσουν τις δυσκολίες που παρουσιάζουν οι παραμετρικές και μη παραμετρικές τεχνικές στον υπολογισμό της διακινδύνευσης του τοπικού πληθυσμού από την παρουσία πέντε επικίνδυνων φυσικών φαινομένων (σεισμός, ξηρασία, πλημμύρες, τυφώνες και κατολισθήσεις). Η μεθοδολογία που εφάρμοσαν δεν ακολουθεί τις εξισώσεις (2.1), (2.2), (2.3) και (2.4) αλλά υπολογίστηκε η διακινδύνευση σαν πιθανότητα υπέρβασης του αριθμού θανάτων του πληθυσμού σε κάθε φαινόμενο από ένα κατώφλι, το οποίο υπολογίστηκε χωρίς τις παραδοχές ότι τα δεδομένα ακολουθούν γνωστές κατανομές ή την ύπαρξη γραμμικότητας μεταξύ των τιμών των μεταβλητών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ενώ η μεθοδολογία είναι απλή, παραγωγική και άμεσα εφαρμόσιμη και ο υπολογισμός της διακινδύνευσης για κάθε φαινόμενο υλοποιήθηκε με γρήγορο τρόπο, εντούτοις δεν κατέστη εφικτό να υπολογιστεί συνολικά η διακινδύνευση, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το σύνολο των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων στην ίδια περιοχή αλλά και τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις τους. Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε αντιμετώπισε μεμονωμένα το κάθε επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο με τον υπολογισμό του συνολικού κινδύνου για τον πληθυσμό να προκύπτει με

την άθροιση των θανάτων που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα σύμφωνα με την εξίσωση (2.7):

$$P(\text{Human Loss}) = \sum_{k=0}^{ujm} P(u_{jm}) \quad (2.7)$$

Με αυτόν τον τρόπο αγνοήθηκε η οποιαδήποτε αλληλοεπίδραση και αλληλοσυσχέτιση που δύναται να αναπτυχθεί μεταξύ των φαινομένων στην ίδια περιοχή. Εκτίμηση αποτελεί το γεγονός, ότι η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, λειτουργεί περιοριστικά σε σχέση με την δυνατότητα των ερευνητών να μπορούν να εφαρμόσουν σχέσεις μεταξύ των φαινομένων που θα αποτυπώνονται υπολογιστικά στο τελικό αποτέλεσμα. Η χρησιμότητα της μεθόδου περιορίζεται στο να αποδώσει μία σχετική εικόνα του κινδύνου για τον πληθυσμό.



Εικόνα 4: Χάρτες τρωτότητας με διαβαθμίσεις της πιθανότητα υπέρβασης ορισμένου κατωφλίου

Ένα άλλο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μιας ποιοτικής προσέγγισης που χρησιμοποιεί πιθανότητες στον υπολογισμό της διακινδύνευσης του

πληθυσμού από την παρουσία πολλαπλών επικίνδυνων φαινομένων σε μία περιοχή αφορά το πρόγραμμα GRINP, στο Καμερούν ([Thierry, Stieltjes et al. 2008](#)). Σκοπός του προγράμματος αποτέλεσε η προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί ο κίνδυνος για τον άνθρωπο και τις ανθρωπογενείς διεργασίες από την ύπαρξη ενός ενεργού ηφαιστείου. Η υπόθεση εργασίας αφορά την ανάλυση και αποτύπωση συνολικά εννέα επικινδύνων φαινομένων (έξι από αυτά, αφορούν τις εκρήξεις ηφαιστείου: (δημιουργία ροής λάβας, τοξικά αέρια, μικροσωματίδια) δύο, αφορούν φαινόμενα κατολισθήσεων και ένα αφορά το φαινόμενο του σεισμού. Για τον ορισμό του κάθε επικίνδυνου φυσικού φαινομένου λαμβάνεται υπόψη μόνο η ένταση και η συχνότητα εμφάνισής του στην περιοχή μελέτης. Παρουσιάζει ενδιαφέρον ο τρόπος που οριοθετείται η ένταση, καθώς αναφέρεται ως μέγεθος που περιγράφει τις επιπτώσεις στα εκτεθειμένα στοιχεία του περιβάλλοντος από τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα και όχι το μέγεθος αυτών. Επιπρόσθετα εκφράζεται σε μια κλίμακα που είναι σταθερή και κοινή για το σύνολο των υπό εξέταση φαινομένων. Πρακτικά η ένταση των φαινομένων αντανακλά το μέγεθος των ζημιών στο δομημένο περιβάλλον και όχι την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την εκδήλωση του επικίνδυνου φαινομένου και επί της ουσίας αντικαθιστά την τρωτότητα στην εξίσωση (2.1), ενώ ορίζει πέντε διαβαθμίσεις κοινές για το σύνολο των φαινομένων καθότι έχει υιοθετηθεί η μέθοδος της ταξινόμησης.

Πίνακας 2: Κατηγορίες έντασης και αντιστοιχία βλαβών

Intensity class	Qualification of the hazard intensity	Degree of damage (reference: global settlement)	Numerical equivalent (E_i)
I_0	Very low to negligible	<5% damage	5
I_1	Low	5–10% damage	10
I_2	Moderate	10–50% damage	50
I_3	High	50–80% damage	80
I_4	Very high	≥80% damage	100

Για τον υπολογισμό της συχνότητας των φαινομένων, ορίστηκε ένας δείκτης συχνότητας (QF), λαμβάνοντας υπόψη το αντίστροφο της μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς για κάθε κατηγορία συχνότητας, ενώ η χωρική ιδιότητα των επικίνδυνων φαινομένων καταγράφηκε στο μοντέλο με την εφαρμογή ενός συντελεστή δυαδικού χαρακτήρα που αντανακλά την εξάπλωση ή όχι του φαινομένου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η επικινδυνότητα για κάθε φαινόμενο

που εξετάζεται μεμονωμένα λαμβάνεται ως γινόμενο με την μορφή πίνακα σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση :

$$I = i_{ext} * Q_F * E_t \quad (2.8)$$

Τα στοιχεία του τελικού πίνακα που προκύπτουν ονομάζονται δείκτες απειλής και ορίζουν το εύρος τιμών της επικινδυνότητας για κάθε φαινόμενο της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3: Πίνακας δεικτών απειλής ως αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού των τιμών συχνότητας με την ένταση του φαινομένου (Thierry, Stieltjes et al. 2008)

$$I_m = i_{ext} \cdot Q_F \times {}^t E_t = i_{ext} \cdot \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = i_{ext} \cdot \begin{bmatrix} 0.01 & 0.05 & 0.1 & 0.5 & 0.8 & 1 \\ 0.02 & 0.1 & 0.2 & 1 & 1.6 & 2 \\ 0.1 & 0.5 & 1 & 5 & 8 & 10 \\ 0.2 & 1 & 2 & 10 & 16 & 20 \\ 1 & 5 & 10 & 50 & 80 & 100 \\ 2 & 10 & 20 & 100 & 160 & 200 \\ 10 & 50 & 100 & 500 & 800 & 1000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 10 & 50 & 80 & 100 \end{bmatrix}$$

Η τελική διαβάθμιση του υπολογισμένου κινδύνου προκύπτει από την διαβάθμιση των τιμών σε πέντε κύριες κατηγορίες με παράλληλη ύπαρξη οδηγιών προς τον πληθυσμό ανά κατηγορία.

2.4 Μέθοδοι και Τεχνικές που λαμβάνουν υπόψη την Αλληλοεπίδραση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων

Από την μέχρι τώρα παρουσίαση των μοντέλων που καταγράφονται στην παρούσα διατριβή εύκολα διαπιστώνουμε ότι η τεχνολογία λειτουργεί υπέρ της μοντελοποίησης της διακινδύνευσης, ως αποτέλεσμα της βελτίωσης της αναγνώρισης των επικίνδυνων φαινομένων και υπολογισμού της συχνότητας εμφάνισης αλλά και του μεγέθους τους. Πράγματι η εξέλιξη των αισθητήρων καταγραφής αύξησε την διαθεσιμότητα των δεδομένων παρατήρησης, βελτιώνοντας παράλληλα την ποιότητα των στοιχείων που αποτελεί και το μεγάλο ζητούμενο. Αυτή η νέα πραγματικότητα στην καταγραφή των παρατηρήσεων των φυσικών φαινομένων σε συνδυασμό με την επικαιροποίηση και ταξινόμηση των ήδη καταγεγραμμένων παρατηρήσεων σε βιβλιοθήκες πρόσβασης, επέτρεψε την βελτίωση της μεθοδολογίας και

υπολογιστικής διαδικασίας στα προτεινόμενα μοντέλα και μεθόδους των ερευνητών.

Ένα άλλος λόγος που επικράτησαν τα υπολογιστικά μοντέλα σε σχέση με τα ποιοτικά αποτέλεσε το γεγονός ότι τόσο οι χειριστές των μοντέλων που λαμβάνουν το αποτέλεσμα ως πληροφορία, όσο και ο υπόλοιπος μη εξειδικευμένος κόσμος αντιλαμβάνονται καλύτερα τον κίνδυνο όταν τους αποδίδεται η πληροφορία με αριθμούς. Επί παραδείγματι το ποσοστό 60% γίνεται αντιληπτό το ίδιο από όλους σε σχέση με μία διαβάθμιση κινδύνου ως «Μέτρια» που μπορεί να ανησυχήσει ένα μέρος του πληθυσμού ενώ ένα άλλο να αδιαφορήσει επιδεικτικά. Αυτό έχει να κάνει κυρίως με την κουλτούρα του πληθυσμού απέναντι στον κίνδυνο αλλά και άλλες κοινωνικές μεταβλητές (εκπαίδευση, κοινωνική θέση, εργασία) που έχουν καθαρά ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Η χρήση των υπολογιστικών μοντέλων ανεξαρτήτως των λόγων που οδήγησαν στην επικράτηση τους, βασίζεται κυρίως στην ανάλυση των δεδομένων και την κοινοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω των πιθανοτήτων. Βέβαια ή όλη διαδικασία δεν αποτέλεσε μια εύκολη διαδρομή. Τα δεδομένα στο πεδίο της ανάλυσης και αξιολόγησης των φυσικών φαινομένων, προέρχονται κυρίως από την παρατήρηση και αποτελούν χαμηλής ποιότητας δεδομένα που δεν έχουν καταγραφεί και ταξινομηθεί με τον ίδιο τρόπο, με τα ίδια όργανα αλλά και από τους ίδιους ερευνητές. Όσο πιο παλιά τα δεδομένα, τόσο χαμηλότερης ποιότητας και λιγότερο αξιοποιήσιμα είναι από σύγχρονες εφαρμογές, καθώς ενσωματώνουν υψηλά επίπεδα αβεβαιότητας στις τιμές τους. Αυτή η πραγματικότητα οδήγησε τους ερευνητές να αναζητήσουν αλλά και να εφαρμόσουν μεθόδους πέραν της κλασσικής θεωρίας των πιθανοτήτων και της στατιστικής ανάλυσης όπου απαιτούν εξαιρετικά μεγάλο όγκο δεδομένων και συγκεκριμένες προϋποθέσεις (γραμμικότητας, συσχέτισης, κανονικότητας) για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων ([Delmonaco, Margottini et al. 2006](#)).

Οι νέες μέθοδοι, στο πεδίο ανάλυσης των φυσικών φαινομένων, ανεξαρτήτως των υπολογιστικών τεχνικών που εφάρμοσαν (παραμετρικές, μη παραμετρικές κτλ), της ποιότητας και διαθεσιμότητας των απαιτούμενων δεδομένων, και των πεποιθήσεων και αντιλήψεων των ερευνητών σχετικά με τα υπό εξέταση επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα παρουσιάζουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Το

σύνολο των μοντέλων αντιλαμβάνεται τα δεδομένα για κάθε φαινόμενο ως συχνότητα επανάληψης αυτού και σε δεύτερο χρόνο ως συχνότητα επανάληψης ανά μέγεθος, επί του συνόλου των τιμών που υπάρχουν. Αυτή η αντιμετώπιση, επέτρεψε το πέρασμα από την συχνότητα εμφάνισης ενός φαινομένου, στην καταγραφή της πιθανότητας εκδήλωσης αυτού, καθώς η πιθανότητα ως έννοια μπορεί να οριστεί ως το πηλίκο του αριθμού εμφάνισης ενός φαινομένου προς το σύνολο εμφάνισης όλων των φαινομένων στην περιοχή μελέτης, κάτι που αποκαλούμε σχετική συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου.

Παράλληλα ένα άλλο πλεονέκτημα της υιοθέτησης των πιθανοτήτων αναφέρεται στο γεγονός ότι μπορεί να εκφράσουν την πεποίθηση ή την εμπιστοσύνη του ερευνητή ή μιας ομάδας μελέτης για κάποια τιμή ή κατάσταση του υπό εξέταση φαινομένου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Τότε αναφερόμαστε σε πιθανότητες που βασίζονται στην πεποίθηση του ερευνητή ή ομάδας ερευνητών και οι οποίες έχουν ποιοτικά χαρακτηριστικά καθώς εμπεριέχουν την υποκειμενικότητα της γνώμης αυτών. Βέβαια, στο πεδίο των φυσικών φαινομένων, οι πιθανότητες που βασίζονται στην πεποίθηση των ερευνητών διατηρούν την σημασία τους, διότι είναι εξαιρετικά σύνηθες να υπάρχει απουσία δεδομένων για κάποιο φαινόμενο σε μία περιοχή και οι πεποιθήσεις του ερευνητή να καλύπτουν αυτό το κενό ([Neapolitan 2004](#)).

Επιπρόσθετα η διαχείριση και αξιολόγηση πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου σε μία περιοχή απαιτεί σε πρώτο επίπεδο την γνώση και αντίληψη για το πώς λειτουργεί το κάθε φαινόμενο μεμονωμένα και δευτερευόντως την αντίληψη να οριστούν οι μεταξύ τους σχέσεις και αλληλοεπιδράσεις. Όμως υπάρχουν εξαιρετικές διαφορές (στον τρόπο εκδήλωσης, ρυθμό επανάληψης, μεγέθους επιπτώσεων, χωρικής εξάπλωσης, μονάδων μετρήσεως, τρόπους καταγραφής) μεταξύ των φαινομένων. Επί παραδείγματι, ένας σεισμός έχει τυπική διάρκεια κάποιων δευτερολέπτων ενώ μία δασική πυρκαγιά μέχρι να κατασβηστεί από την πυροσβεστική υπηρεσία, μπορεί να «καίει» για μέρες. Σε αντίθεση με αυτό, οι επιπτώσεις ενός σεισμού μπορεί να εμφανίζονται άμεσα σε αρκετή απόσταση από το επίκεντρο του, ενώ μία πυρκαγιά έχει τοπικά χαρακτηριστικά και εξαπλώνεται σχετικά αργά. Αυτή η διαφορετικότητα των φαινομένων σε συνδυασμό με την ύπαρξη εξειδικευμένων υπολογιστικών

μοντέλων για αυτά τα φαινόμενα, έχει σαν αποτέλεσμα να παράγονται συμπεράσματα με διαφορετικές μονάδες μέτρησης αλλά και διαφορετική κλίμακα μεγέθους σε αριθμούς, δυσχεραίνοντας με αυτό τον τρόπο την απόδοση και υπολογισμό της κοινής διακινδύνευσης αλλά και των μεγεθών των επιπτώσεων συνολικά επί των εκτεθειμένων στοιχείων (πληθυσμός, ακίνητα) στους υπό εξέταση κινδύνους.

Αυτό το πρόβλημα, στο παρελθόν αντιμετωπίστηκε με την εφαρμογή της μεθόδου της ταξινόμησης, η οποία λόγω της ευκολίας της, εφαρμόστηκε σε ένα μεγάλο αριθμό μελετών και ερευνών. Αργότερα με την χρήση των πιθανοτήτων για τους λόγους που προαναφέραμε, επιτεύχθηκε με ποσοτικά κριτήρια η κοινή αξιολόγηση των φαινομένων καθώς οι υπολογισμοί έχουν μεταφερθεί στο πεδίο της στατιστικής και πιθανοτήτων αποδίδοντας για όλα τα φαινόμενα που παρατηρούνται σε μία περιοχή μελέτης μία τιμή πιθανότητας που συνήθως αναφέρεται στην εκδήλωση, ξεπερνώντας προβλήματα διαφορετικών μονάδων, κλίμακας και συχνότητας εμφάνισης.

Ακόμα και σε αυτό το σημείο εξέλιξης των εφαρμογών της ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και διαχείρισης του κινδύνου που προκύπτει από την παρουσία πέραν του ενός φαινομένου σε μία περιοχή, συγκεκριμένες παραδοχές που υιοθετούνται από τους ερευνητές περιορίζουν την πραγματική αποτύπωση των φαινομένων και αξιολογώντας αυτά, χωρίς τον απαιτούμενο ρεαλισμό. Οι περισσότερες μεθοδολογίες βασίζονται στην παραδοχή ότι τα φυσικά φαινόμενα εκδηλώνονται μεμονωμένα σε μία περιοχή και οι διεργασίες και μηχανισμοί που τα αποτελούν δεν επηρεάζουν ούτε επηρεάζονται από άλλα φαινόμενα που συνυπάρχουν στην ίδια περιοχή. Συνήθως τα μεγέθη των φαινομένων που υπολογίζονται λαμβάνουν ως δεδομένο ότι το κάθε φαινόμενο είναι ξεχωριστό και απομονωμένο από τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα την απουσία οποιασδήποτε αλληλοεπίδρασης, αλληλοσυσχέτισης και αλληλοσύνδεσης μεταξύ τους.

Αρκετοί ερευνητές ([Delmonaco, Margottini et al. 2006](#), [Kappes, Gruber et al. 2012](#), [Kappes, Papathoma-Köhle et al. 2012](#)) άρχισαν να εξετάζουν πιο ολοκληρωμένα το ζήτημα και να αντιλαμβάνονται ότι τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα δεν λειτουργούν μεμονωμένα ούτε μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα φαινόμενα στην ίδια περιοχή, καθότι αποτελούν

όλα μαζί στοιχεία ενός μεγαλύτερου συστήματος. Αυτή η νέα προσέγγιση εισήγαγε την έννοια της συνύπαρξης των φαινομένων, που με την σειρά της δημιουργεί την ανάγκη να λαμβάνονται υπόψη οι πιθανές αλληλοεπιδράσεις και αλληλοσυσχετίσεις, μεταξύ των φαινομένων που εμφανίζονται στην ίδια περιοχή. Αυτή η νέα μεθόδευση επιτρέπει πλέον στους ερευνητές να εξηγήσουν σύνθετες περιπτώσεις μεταξύ των φαινομένων όπως όταν το ένα επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο διαδέχεται το άλλο ως αποτέλεσμα της αλληλοεπίδρασης που αναπτύσσεται μεταξύ τους, γνωστό ως «domino effect» ([Tarvainen, Jarva et al. 2006](#), [Marzocchi, Garcia-Aristizabal et al. 2012](#), [van Westen, Kappes et al. 2014](#)).

Η μελέτη του πυρηνικού ατυχήματος, γνωστού ως «Fukushima disaster» που έλαβε χώρα στις 11 Μαρτίου 2011, στη βορειανατολική Ιαπωνία, όταν σημειώθηκε σεισμός μεγέθους 9,0 - 9,1 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ, με επίκεντρο του σεισμού το Νησί Χονσού της Ιαπωνίας, αποτελεί εξαιρετικό παράδειγμα αλληλοεπίδρασης επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, όπου ο τελικός κίνδυνος είναι πολλαπλάσιος του αντίστοιχου κινδύνου εάν εξετάζαμε μεμονωμένα τα φαινόμενα και αθροίζαμε τα αποτελέσματα της κάθε ξεχωριστής ανάλυσης για το κάθε φαινόμενο. Παρότι ο σεισμός που εκδηλώθηκε ήταν εξαιρετικά ισχυρός, οι εγκαταστάσεις του πυρηνικού εργοστασίου δεν παρουσίασαν ιδιαίτερα προβλήματα, ούτε ανέστειλαν καταστροφικά τις λειτουργίες τους, αποδεικνύοντας ότι οι εκτιμήσεις και η προετοιμασία για έναν ενδεχόμενο σεισμό του μεγέθους που «χτύπησε» τις εγκαταστάσεις είχε ληφθεί υπόψη κατά το στάδιο του σχεδιασμού. Επιπρόσθετα οι ίδιες εγκαταστάσεις παρουσιάστηκαν ανθεκτικές και στο τσουνάμι που ακολούθησε αργότερα και ήταν προϊόν του ισχυρού σεισμού που μόλις είχε εκδηλωθεί αποδεικνύοντας ότι τα φυσικά φαινόμενα δεν πρέπει να εξετάζονται μεμονωμένα αλλά σαν διεργασίες που συνεχώς αλληλοεπιδρούν μέσα στο ίδιο περιβάλλον. Αυτό που δεν αντιμετωπίστηκε επιτυχώς ήταν το φαινόμενο της πλημμύρας που εμφανίστηκε στην περιοχή ως αποτέλεσμα του τσουνάμι.

Ο σχεδιασμός των εγκαταστάσεων είχε τοποθετήσει τις γεννήτριες ανάγκης παραγωγής ρεύματος στα υπόγεια των εγκαταστάσεων, καθότι είχε εκτιμηθεί ότι το ενδεχόμενο ύπαρξης πλημμύρας, μεγέθους ανάλογου του ιστορικού

συμβάντων δεν θα επηρέαζε την εύρυθμη λειτουργία αυτών. Όμως η εκδήλωση του τσουνάμι που ήταν το αποτέλεσμα ενός σεισμού (domino effect) δημιούργησε τις προϋποθέσεις για μία πλημμύρα πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από ότι είχε προβλεφθεί από τους ερευνητές. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις καταστροφές των περιφερειακών συστημάτων που είχαν συμβεί αθροιστικά από τα πρώτα δυο φαινόμενα, οδήγησαν στο να βυθιστούν στο θαλασσινό νερό τόσο οι γεννήτριες ανάγκης όσο και συστήματα διανομής ρεύματος σε αυτές, με αποτέλεσμα όταν απαιτήθηκε η λειτουργία τους για την τροφοδότησή του εναλλακτικού συστήματος ψύξης των πυρηνικών αντιδραστήρων, αυτό δεν κατέσται εφικτό με αποτέλεσμα την αδυναμία ψύξης και την ύπαρξη έκρηξης, λόγω υψηλών θερμοκρασιών στις εγκαταστάσεις με παράλληλη διαφυγή ραδιενέργειας στον αέρα και την θάλασσα.

Το συγκεκριμένο περιστατικό ξεκαθάρισε στην αντίληψη των ερευνητών την αναγκαία απαίτηση να λαμβάνεται πάντα υπόψη η αλληλοεπίδραση των φαινομένων σε μία περιοχή, διότι η συνύπαρξη επικίνδυνων φαινομένων συνήθως ενισχύει τον τελικό κίνδυνο και αυξάνει με πολλαπλασιαστικό τρόπο τα μεγέθη των επιπτώσεων στα εκτεθειμένα στοιχεία.

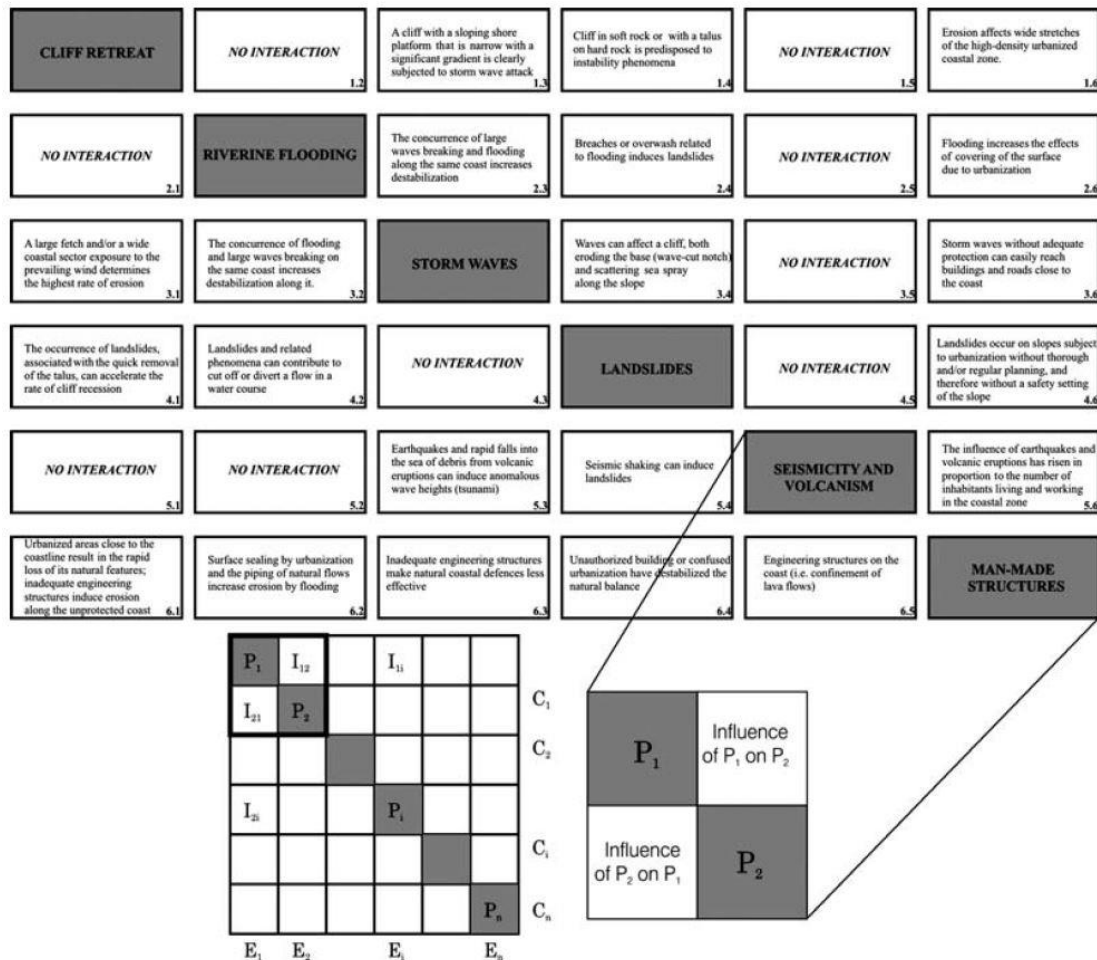
Με αντίστοιχο τρόπο, η αλληλοεπίδραση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων στην ίδια περιοχή μπορεί να παράγει και διαφορετικό αποτέλεσμα. Δηλαδή να δημιουργήσει τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την εκδήλωση ενός άλλου ανεξάρτητου φαινομένου που μέχρι τώρα δεν ήταν πιθανό να γίνει ή να αυξήσει το μέγεθος και την ένταση των φαινομένων σε μία αλληλουχία φαινομένων όπου το ένα εκδηλώνεται σαν αποτέλεσμα του άλλου. Κρίνεται πλέον απαραίτητο όχι μόνο η ορθή διαδικασία αναγνώρισης των επικίνδυνων φαινομένων σε μια περιοχή αλλά και η εξέταση της αλληλοεπίδρασης των φαινομένων που συνυπάρχουν σε μία περιοχή. Κάτω από αυτό το πλαίσιο θα πρέπει να διερευνάται αν προκύπτουν αλλαγές από αυτή την συνύπαρξη και αν αυτές οι αλλαγές μπορεί να οδηγήσουν στην εκδήλωση άλλων φαινομένων ή μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά των όσο ήδη έχουν εντοπιστεί. Αυτή η διαδικασία είναι εξαιρετικά δύσκολη και μόνο ένας μικρός αριθμός μεθόδων και τεχνικών έχουν προταθεί από τους ερευνητές.

2.4.1 Η Μέθοδος του Πίνακα Αλληλοσυσχέτισης (Interaction Matrix Method)

Ένα εξαιρετικό πρώτο βήμα στην προσπάθεια να αποτυπωθούν οι αλληλοεπιδράσεις των φαινομένων από την συνύπαρξη περισσότερων του ενός επικίνδυνων φαινομένων σε μία περιοχή αποτελεί η εφαρμογή της μεθόδου του πίνακα (Interaction Matrix Method). Σε αυτή την μέθοδο κατασκευάζουμε έναν πίνακα όπου τα επικίνδυνα φαινόμενα αποτελούν τον διαγώνιο του, με αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός τους να καθορίζει και τις διαστάσεις του (πχ 3 επικίνδυνα φαινόμενα \approx πίνακας 3×3 , κοκ). Στο δεξιό κελί που ακολουθεί το κελί ενός επικίνδυνου φαινομένου (A) γράφεται η επίδραση που έχει το συγκεκριμένο φαινόμενο στο αμέσως επόμενο επικίνδυνο φαινόμενο (B) της διαγωνίου, στο κελί που ακολουθεί του πρώτου δεξιού κελιού από το επικίνδυνο φαινόμενο (A) καταγράφεται η επίδραση του, στο μεθεπόμενο επικίνδυνο φαινόμενο, κοκ. Η διαδικασία επαναλαμβάνετε για το σύνολο των στοιχείων της διαγωνίου ώστε να συμπληρωθούν όλα τα κελιά του πίνακα που είναι δεξιά και πάνω από την διαγώνιο. Κατόπιν η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το σύνολο των στοιχείων που ευρίσκονται αριστερά και κάτω της διαγωνίου με όμοιο τρόπο. Γι' αυτό και στο δεύτερο μισό της διαδικασίας κινούμαστε αντίθετα από πριν, ώστε να εξετάσουμε τις αντίστροφες σχέσεις που καταγράφηκαν κατά την προηγούμενη διαδικασία.

Η πρώτη εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αφορούσε τον υπολογισμό της διακινδύνευσης των μηχανικών έργων από την πτώση βράχων στην περιοχή των εργασιών ([Jiao and Hudson 1995](#)). Ακολούθησαν αρκετές τροποποιήσεις της συγκεκριμένης μεθόδου ([Carpignano, Golia et al. 2009](#), [Kappes, Gruber et al. 2012](#)) με την κεντρική μεθοδολογία να αποτελεί την κατασκευή ενός εμπειρικού πίνακα όπου στα κελιά του καταγράφονται όλες οι πιθανές σχέσεις μεταξύ των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων κινδύνων για την περιοχή μελέτης. Ο τελικός κίνδυνος μπορεί να εκτιμηθεί με την επικάλυψη όλων των χωρικών πληροφοριών διαδοχικά ή με την άθροιση όλων των επιμέρους επιπτώσεων που απορρέουν από τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα στο πεδίο των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων αποτέλεσε η μελέτη υπολογισμού του κινδύνου στην περιοχή Campanian της Ιταλίας από έξι επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα ([De Pippo,](#)

[Donadio et al. 2009](#)). Ένας πίνακας 6x6 κατασκευάστηκε με τους έξι κινδύνους να είναι τα έξι διαγώνια στοιχεία αντίστοιχα, ενώ τα υπόλοιπα 30 στοιχεία καθορίζουν το είδος και το μέγεθος των αλληλεπιδράσεων.



Εικόνα 5: Interaction matrix για έξι επικίνδυνα φαινόμενα στην περιοχή Campania της Ιταλίας([De Pippo, Donadio et al. 2009](#))

Στην παρούσα μελέτη έχει υιοθετηθεί από τους συγγραφείς ένας δείκτης κινδύνου (I_{ij}) που αποτυπώνει το αποτέλεσμα της αλληλοεπίδρασης μεταξύ δύο φυσικών φαινομένων και ένας συντελεστής βαρύτητας που προσμετρά την σημασία κάθε δείκτη (I_{ij}) στο τελικό αποτέλεσμα. Υπολογιστικά σημαίνει ότι απεικονίζει την σπουδαιότητα κάθε αλληλεπίδρασης και σταθμίζει την επίδραση κάθε δείκτη στο μοντέλο συνολικά. Τέλος, ο συνολικός κίνδυνος εκτιμάται με την πρόσθεση των τιμών των επιμέρους δεικτών πολλαπλασιασμένους με τον συντελεστή βαρύτητας, ώστε οι τιμές τους να αντανακλούν στις πραγματικές ανάγκες και κινδύνους της περιοχής μελέτης σύμφωνα με τους ερευνητές.

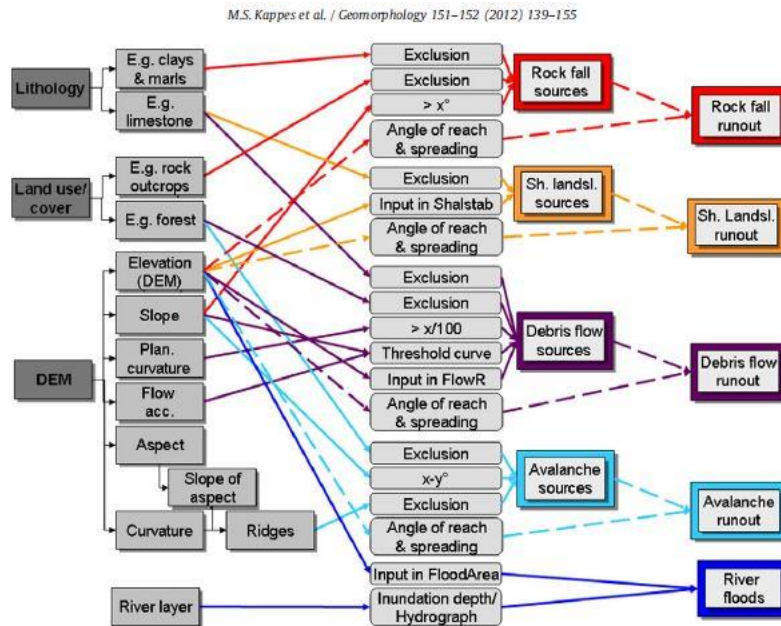
2.4.2 Η Μέθοδος της Αλυσίδας ή Μέθοδος Πλατφόρμας (Chain/Platform Technique)

Η μέθοδος της αλυσίδας αποτελεί μια μεθοδολογική προσέγγιση που σκοπό έχει να αποδώσει με έναν καλύτερο τρόπο την συνέργεια των φαινομένων σε μία περιοχή. Σε αυτή την μέθοδο, η αλληλοεπίδραση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων λαμβάνεται υπόψη μέσω της συνεργασίας αυτόνομων μοντέλων που αναφέρονται σε έναν μεμονωμένο φυσικό φαινόμενο κάθε φορά και συνδέονται το ένα με το άλλο με την μορφή ακολουθίας, Δηλαδή το ένα ακολουθεί το άλλο, ώστε τα αποτελέσματα του ενός μοντέλου να αποτελούν τα δεδομένα εισαγωγής για το επόμενο κοκ. Επί της ουσίας δημιουργείται ένα περιβάλλον εργασίας (μια πλατφόρμα λογισμικών) που τρέχουν περισσότερες από μία εφαρμογές με κάποια προκαθορισμένη σειρά ώστε να επιτυγχάνεται η μετάδοση της πληροφορίας από το ένα μοντέλο στο άλλο.

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα MEDIGRID ([Bovolo, Abele et al. 2009](#)) που αποτελεί μια πλατφόρμα συνεργασίας διαφορετικών λογισμικών που αναφέρονται σε ξεχωριστά φυσικά φαινόμενα. Ο χρήστης δύναται να τρέξει το κάθε μοντέλο αυτόνομα και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να αποτελέσουν τα στοιχεία εισαγωγής για το επόμενο μοντέλο, που αναφέρεται σε διαφορετικό φυσικό κίνδυνο, ο υπολογισμός των καμένων εκτάσεων μιας περιοχής, αποτελούν τα δεδομένα που εισάγονται σε ένα άλλο λογισμικό (SHETRAN Hydrology, Soil Erosion and Landslide Model) που με την σειρά του θα παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες σε ένα άλλο λογισμικό που ανιχνεύει της εκτάσεις όπου η βλάστηση μπορεί να αναγεννηθεί. Ομοίως η εφαρμογή BAER ([De Graff, Cannon et al. 2007](#)) εφαρμόζει την μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης και υπολογίζει την πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων μετά το τέλος της θερινής περιόδου λαμβάνοντας υπόψη τις καμένες εκτάσεις που προέκυψαν από την εκδήλωση των πυρκαγιών και ένα πλήθος παραγόντων όπως την κλίση για την περιοχή μελέτης, το ποσοστό αργίλου στο έδαφος, το ιστορικό βροχοπτώσεων και καταιγίδων της περιοχής.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεθοδολογική προσέγγιση μίας εφαρμογής ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και των αλληλοεπιδράσεων τους, που εμφανίζονται σε μία περιοχή και ονομάστηκε: «MultiRISK platform»

(Kappes, Gruber et al. 2012). Έχει υιοθετηθεί από τους δημιουργούς του, μία διαδικασία δύο σταδίων για να ληφθούν υπόψη το σύνολο των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή μαζί με τις αλληλοεπιδράσεις αυτών. Αρχικά αξιοποιείται η μέθοδος του πίνακα για την αναγνώριση των αλληλοεπιδράσεων μεταξύ των πέντε επικίνδυνων φυσικών φαινομένων (τρία είδη κατολισθήσεων, πλημμύρες, χιονοστιβάδες) που εξετάζονται για την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 6: Η μέθοδος της αλυσίδας για την εφαρμογή MultiRisk Platform [11]

Κατόπιν επιλέγονται πέντε ανεξάρτητα μοντέλα υπολογισμού του κινδύνου για το κάθε ένα επικίνδυνο φαινόμενο που εξετάζεται στην περιοχή και εφαρμόζεται η μέθοδος της αλυσίδας για τη σύνδεση των ανεξάρτητων μοντέλων, που το καθένα αναλύει ένα υπό εξέταση επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο της περιοχής. Επί της ουσίας αναφερόμαστε σε μία υβριδική προσέγγιση που προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τα δυνατά σημεία της κάθε μεθοδολογίας. Η εφαρμογή αποτέλεσε ένα εργαλείο ανάλυσης των κινδύνων για μία ορεινή περιοχή των Άλπεων, με απώτερο στόχο να λειτουργήσει σαν ένα ολοκληρωμένο εργαλείο υπολογισμού της συνολικής διακινδύνευσης για τα πέντε επικίνδυνα φαινόμενα. Τελικά αν και προσπάθησε να λάβει υπόψη της αλληλοεπιδράσεις των πέντε φαινομένων δε κατέστη δυνατόν αυτές να αποτυπωθούν πλήρως λόγω αδυναμίας εντοπισμού κατάλληλων υπομοντέλων που θα μπορούσαν να συνεργαστούν με ικανοποιητικό τρόπο.

Παρότι η μέθοδος της αλυσίδας αποτελεί μια αξιολογη προσπάθεια να αποδοθεί η συνέργεια των φαινομένων, η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα που λειτουργεί ανασταλτικά για την αποδοχή της. Η χρήση ανεξάρτητων εφαρμογών για την ανάλυση του κάθε επικίνδυνου φαινομένου μεμονωμένα, δημιουργεί δυσκολίες στην απαίτηση της συνεργασίας αυτών των εφαρμογών, που τα αποτελέσματα του ενός, αποτελούν τις πληροφορίες εισόδου για το άλλο.

Γεγονός αποτελεί ότι οι εφαρμογές ανάλυσης και αξιολόγησης για το κάθε φυσικό φαινόμενο συνήθως διαφέρουν, καθώς αναπτύσσονται ανεξάρτητα και από διαφορετικούς ερευνητές, εξυπηρετώντας διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υφίστανται θέματα ασυμβατότητας μεταξύ τους, που επικεντρώνονται κυρίως σε διαφορετική χωρική και χρονική κλίμακα μελέτης για το κάθε μοντέλο, άλλη αρχιτεκτονική λογισμικού, διαφορετική απαίτηση μορφής δεδομένων για κάθε εφαρμογή, διαφορετικές μονάδες μετρήσεως. Παράδειγμα όπου καταγράφηκαν οι ανωτέρω δυσκολίες αποτελεί η εφαρμογή «MultiRISK» που ενώ στον αρχικό σχεδιασμό υπήρχε και ο σεισμός ως φαινόμενο που ήθελαν να εξεταστεί, δεν κατέστη τελικά εφικτό να βρεθεί εφαρμογή για τον σεισμό που θα συνεργαζόταν με τις υπόλοιπες εφαρμογές της πλατφόρμας με ικανοποιητικό τρόπο ([Malet, Glade et al. 2010](#)).

Οι μέθοδοι της αλυσίδας και του πίνακα επέτρεψαν στους ερευνητές να λάβουν υπόψη την αλληλοεπίδραση των φαινομένων στην περιοχή μελέτης, επιτρέποντας με μερικούς περιορισμούς τον υπολογισμό του συνολικού κινδύνου ή της διακινδύνευσης που απορρέει από την παρουσία πέραν του ενός φαινομένου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτό επιτυγχάνεται με την καταγραφή της πληροφορίας που παράγεται από την αλληλοεπίδραση δύο φαινομένων σε μία περιοχή και την αξιοποίηση αυτών των καινούργιων δεδομένων για τον υπολογισμό των νέων μεγεθών των φυσικών φαινομένων που επικρατούν στην περιοχή. Βέβαια η δυσκολία ανίχνευσης και εντοπισμού εφαρμογών που θα συνεργάζονται αρμονικά σε μία υπολογιστική διαδοχή όπου τα προϊόντα της μίας εφαρμογής θα αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στην επόμενη, σε συνδυασμό με τον ποιοτικό χαρακτήρα ανάλυσης των συσχετίσεων που παράγεται από την μέθοδο του πίνακα, (καθότι αναφέρεται σε «αιτιακές» σχέσεις μεταξύ των επικίνδυνων φαινομένων που δεν

μεταφράζεται σε υπολογισμούς, αλλά σε ποιοτική άθροιση κάποιου δείκτη έντασης ή σπουδαιότητας του κάθε φαινομένου) οδήγησαν τους ερευνητές να συνεχίσουν την προσπάθεια για την ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών που θα αποτυπώνουν με καλύτερο τρόπο την παρουσία και την συνέργεια περισσοτέρων του ενός επικίνδυνου φαινομένου σε μία περιοχή, ξεπερνώντας τις δυσκολίες του παρελθόντος.

2.4.3 Δέντρα Γεγονότων (Event Tree) στην καταγραφή των αλληλοεπιδράσεων των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων.

Η προσπάθεια να ξεπεραστούν τα ζητήματα ασυμβατότητας μεταξύ των μοντέλων, κάτω από μια κοινή λειτουργία όπου το σύνολο των φαινομένων θα αξιολογείται με ένα κοινό σύστημα αναφοράς, αλλά και ο περιορισμός της υποκειμενικότητας στις εκτιμήσεις των μεγεθών σε όλα τα στάδια των υπολογισμών του προτεινόμενου μοντέλου, οδήγησε στην εφαρμογή καθαρά ποσοτικών μεθόδων που αξιοποιούν την θεωρία των πιθανοτήτων, της στατιστικής αλλά και της θεωρίας γραφημάτων, όπως τα Δέντρα Γεγονότων (Event Tree) και τα Πιθανολογικά Δίκτυα (Bayesian Networks).

Τα Δέντρα Γεγονότων χρησιμοποιούνται ευρέως στο γνωστικό πεδίο της διαχείρισης κίνδυνου. Πρόσφατα χρησιμοποιήθηκαν και στο πεδίο της ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων αλλά και της εκτίμησης του κινδύνου από την εκδήλωσή τους σε μία περιοχή. Τα Δέντρα Γεγονότων παρουσιάζουν υψηλή προσαρμοστικότητα στο υπολογιστικό σκέλος τους, καθώς δύναται να αποτελέσουν μία αυστηρά ποσοτική μέθοδο εάν χρησιμοποιηθούν μετρήσιμα στοιχεία (ιστορικά στοιχεία, δεδομένα μετρήσεων,) σε όλα τα στάδια των υπολογισμών, ενώ αν αξιοποιηθούν πεπεισμένες εμπειρογνώμων και ειδικών σε κάποιο στάδιο των υπολογισμών λόγω έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων ή χαμηλής ποιότητας δεδομένων τότε χαρακτηρίζονται ως ημι-ποσοτική μέθοδο. Οι υπολογισμοί σε ένα δέντρο γεγονότων βασίζονται στην θεωρία των πιθανοτήτων και η αξιοποίησή τους ορίζεται από το γεγονός ότι επιτρέπουν την ανάλυση και εξέλιξη υπό μορφή γεγονότων ενός σεναρίου που καθορίζεται αποκλειστικά από μία λογική εξέλιξη του κύριου συμβάντος σε επιμέρους γεγονότα, με την παράλληλη γραφική απεικόνισή του. Το κάθε διακριτό γεγονός στην ροή του σεναρίου αντιστοιχεί σε ένα κλαδί με όλες τις πιθανές καταστάσεις που δύναται να βρεθεί και

αποτελεί ένα λογικό βήμα εξέλιξης του κύριου συμβάντος ([Newhall and Hoblitt 2002](#)). Εάν οριστούν πιθανότητες σε κάθε «κλαδί» του δέντρου τότε οι πιθανότητες κατά μήκος των κλαδιών πολλαπλασιάζονται με το μέγεθος των επιπτώσεων που αντιστοιχούν σε κάθε πιθανό ενδεχόμενο και αποδίδουν την διακινδύνευση για το κύριο συμβάν σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις που δύναται να εξελιχθεί. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας απαιτείται να επιλεγεί με σωστό τρόπο το κύριο συμβάν και να επιλέγουν με τέτοιο τρόπο τα ενδιάμεσα βήματα εξέλιξης του σεναρίου ώστε να καλύπτονται όλες οι πιθανές περιπτώσεις που μπορούν να συμβούν, λαμβανομένου υπόψη ότι η άσκοπη προσθήκη «κλαδιών» δύναται να επηρεάσει τις τελικές τιμές των αποτελεσμάτων ([Newhall and Hoblitt 2002](#)).

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάζει εξαιρετική αποδοχή και εφαρμογή στην ανάλυση των φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή μελέτης, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Συγκεκριμένα αν συνυπάρχουν φαινόμενα στη περιοχή μελέτης, τότε ένα από αυτά θα πρέπει να παρουσιάζει κυριαρχικά χαρακτηριστικά απέναντι στα άλλα, δηλαδή να παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλη πιθανότητα να συμβεί σε σχέση με τα υπόλοιπα στον ίδιο χώρο, ώστε να μπορούν να αγνοηθούν τα υπόλοιπα στο στάδιο της μελέτης ή το μέγεθος των επιπτώσεων που εκτιμάται από ένα φαινόμενο είναι εξαιρετικά δυσανάλογο σε σχέση με τα μεγέθη των επιπτώσεων από τα υπόλοιπα φαινόμενα στον ίδιο χώρο. Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί, σαν δεύτερο στάδιο μιας διαδικασίας αξιολόγησης του κινδύνου, αφού πρώτα θα έχει αξιολογηθεί η ισχύουσα πραγματικότητα και θα έχει καθοριστεί το πιο πιθανό ή το πιο επικίνδυνο φαινόμενο ώστε να κατηγοριοποιηθεί ως κύριο συμβάν. Επιπρόσθετα ο χαρακτήρας της μεθόδου, δεν επιτρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταυτόχρονη εκδήλωση πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου σε μία περιοχή με την ανάλυση του σεναρίου να βασίζεται σε πιθανά ενδεχόμενα που σχετίζονται μόνο με το κύριο γεγονός. Για τους ανωτέρω λόγους, η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε σενάρια που αξιολογούν τον κίνδυνο που απορρέει για τον πληθυσμό ή τις υποδομές από την εκδήλωση ηφαιστειακής δραστηριότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η έκρηξη ενός ηφαιστείου δημιουργεί έναν ικανό αριθμό επικίνδυνων φαινομένων που πριν

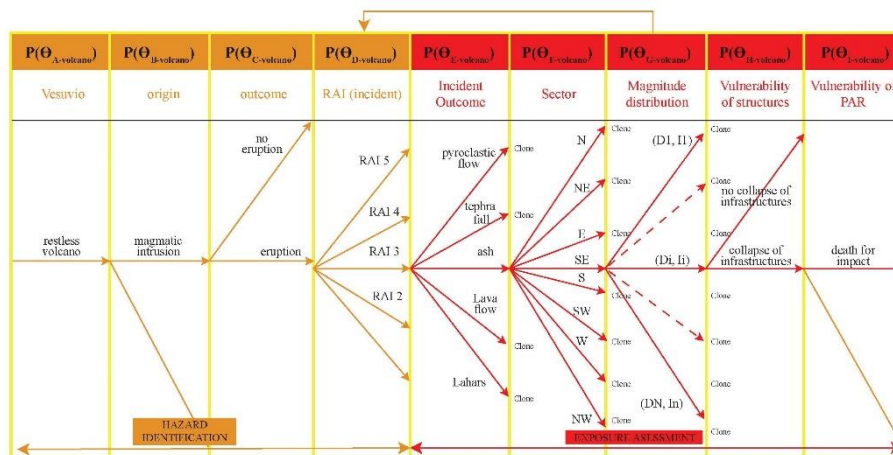
δεν υπήρχαν, ενώ η ένταση και το μέγεθος τους σχετίζεται άμεσα με την δραστηριότητα του ηφαιστείου, που μπορεί να οδηγήσει σε τεράστιες καταστροφές μετρούμενες με οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια.

Παράδειγμα αποτελεί η εργασία των Newhall και Hoblitt ([Newhall and Hoblitt 2002](#)) που αναφέρεται στην υλοποίηση μίας μεθοδολογίας που βασίζεται στην δημιουργία ενός δέντρου γεγονότων (Event Tree) για την εκτίμηση του κινδύνου και τις τυχόν απώλειες στο πληθυσμό από την έκρηξη ενός ηφαιστείου που αποτελεί και το κύριο επικίνδυνο φαινόμενο σε μία υποθετική περιοχή ενδιαφέροντος. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται βασίζεται στις δεσμευμένες πιθανότητες και στον νόμο του Bayes, δηλαδή υπολογίζεται η πιθανότητα $P(a_t|a_{t-1})$, με δεδομένο ότι το γεγονός (a_{t-1}) έχει ήδη συμβεί, σύμφωνα με τον νόμο του Bayes είναι: $P(a_t|a_{t-1}) = \{P(a_{t-1}|a) * P(a)\} / P(a_{t-1})$. Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει εννέα (9) στάδια εξέλιξης ενός υποθετικού σεναρίου και χαρακτηρίζεται γενικά εφαρμόσιμη σε οποιοδήποτε ηφαίστειο ανά την υφήλιο με την προσθήκη ή αφαίρεση κάποιου κλαδιού του δικτύου, ώστε να προσομοιάζει καλύτερα το υπό εξέταση ηφαίστειο. Το αποτέλεσμα του δέντρου υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P(n) = P(1) \times P(2|1) \times P(3|2) \times \dots \times P(n|n-1) \quad (2.8)$$

Παρόμοια, στην ανάλυση πέντε επικίνδυνων φυσικών φαινομένων (σεισμός, ηφαίστειο, κατολίσθηση, πλημμύρα, βροχόπτωση) για τον δήμο Casalnuovo της Ιταλίας ([Marzocchi 2009](#)) υπολογίστηκε η διακινδύνευση του πληθυσμού για την παρουσία του κάθε φαινομένου μεμονωμένα. Εντοπίστηκε ότι ο κίνδυνος από την παρουσία του ηφαιστείου είναι ο υψηλότερος για τον πληθυσμό της περιοχής σε σχέση με τα υπόλοιπα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα. Με το ηφαίστειο να αποτελεί το κύριο συμβάν, και ένα υποθετικό σενάριο έκρηξης αυτού, προτάθηκε ένα δέντρο γεγονότων που αξιοποιούσε τις δεσμευμένες πιθανότητες και τον νόμο του Bayes για να καταλήξει σε ποσοτικά συμπεράσματα, εκτελώντας έναν διαφορετικό σενάριο κάθε φορά σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία για τις καταστάσεις των μεταβλητών του δέντρου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του συνόλου των σεναρίων που εξετάστηκαν από τους ερευνητές (πιθανότερο σενάριο, βέλτιστο σενάριο, χειρότερο σενάριο σε σχέση με κάθε μεταβλητή), υπολογίστηκε η συνάρτηση

πυκνότητας πιθανότητας της απώλειας του πληθυσμού λόγω της έκρηξης του ηφαιστείου, σε σχέση με την απόσταση αυτού από το ηφαίστειο.



Εικόνα 7: Σενάριο διαδοχής των διαφόρων πιθανών καταστάσεων λόγω της έκρηξης του ηφαιστείου για τον δήμο Casalnuovo της Ιταλίας (Marzocchi 2009)

2.4.4 Κατευθυνόμενα Ακυκλικά Γραφήματα για την αποτύπωση των Αλληλοεπιδράσεων

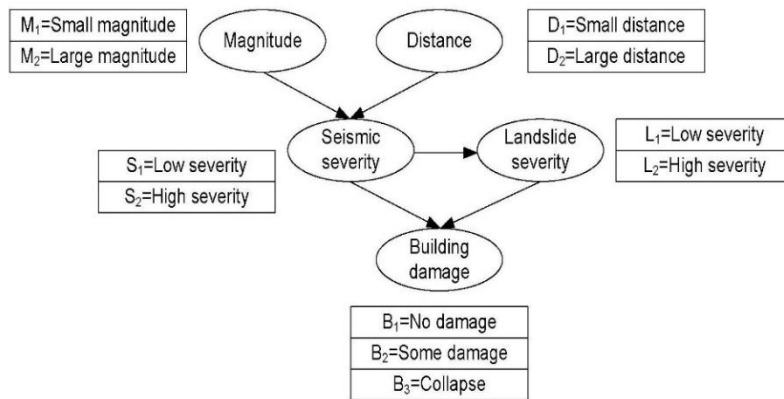
Η μεθοδολογία των Δέντρων Γεγονότων παρουσιάζει ποσοτικά χαρακτηριστικά στους υπολογισμούς της, χωρίς να υφίσταται η απαίτηση για μεγάλο όγκο δεδομένων και ανάγκη για υψηλό υπολογιστικό φορτίο. Κάτω από αυτό το πλαίσιο, είναι μία τεχνική που συνεισφέρει στην εξέλιξη των μοντέλων εκτίμησης κινδύνου καθώς αποδίδει με ικανοποιητικό τρόπο αντικειμενικά αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη την συνέργεια των φαινομένων στην εξέλιξη ενός συγκεκριμένου σεναρίου. Ωστόσο, υπάρχει ένας κρίσιμος περιορισμός στην εφαρμογή της μεθόδου που σχετίζεται με την γραφική απεικόνιση της. Μπορεί να ληφθεί υπόψη μόνο ένα κύριο αρχικό συμβάν ως σημείο αφετηρίας ενός σεναρίου εκδήλωσης επικινδύνων φαινομένων, ενώ τα διαδοχικά φαινόμενα που δύναται να εκδηλωθούν, δηλαδή να πάρουν μέρος στο σενάριο, σχετίζονται αποκλειστικά από το κύριο συμβάν.

Παράλληλα η απαίτηση αξιοποίησης δεδομένων χαμηλής ποιότητας και διαφορετικού υπόβαθρου προέλευσης, η παραγωγή γρήγορου και άμεσου αποτελέσματος που θα δύναται να διαχειρίζεται ταυτόχρονα περισσότερα του ενός κύρια συμβάντα σε μία περιοχή ενδιαφέροντος αλλά και η απεικόνιση της συλλογιστικής του μοντέλου, οδήγησε στην υιοθέτηση πιο ευέλικτων γραφημάτων σε σχέση με τα παραδοσιακά δέντρα γεγονότων. Μία επιλογή που

ικανοποιούσε σε μεγάλο βαθμό τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά αποτέλεσαν τα Κατευθυνόμενα Ακυκλικά Γραφήματα ή Μπεϋζιανά Δίκτυα (Bayesian Networks-BNs).

Τα Μπεϋζιανά Δίκτυα αποτελούν μια πρόσφατη δημοφιλή μέθοδο για την μοντελοποίηση της αβεβαιότητας και σύνθετων καταστάσεων στο τομέα του περιβάλλοντος. Τα γραφήματα παρουσιάζουν τις άμεσες σχέσεις – επιδράσεις των φαινομένων που ορίζονται μέσα από τις μεταβλητές και αναπαριστούν την πραγματική σχέση αιτίας – αποτελέσματος και όχι κάτι συλλογιστικό ([Pearl 1982](#)) ενώ το υπολογιστικό κομμάτι αφορά την εφαρμογή του νόμου του Bayes και των δεσμευμένων πιθανοτήτων.

Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής των Μπεϋζιανών Δικτύων στην διαχείριση κινδύνου από την εκδήλωση και την αλληλοεπίδραση των φυσικών φαινομένων αποτελεί η εφαρμογή των Nadim F και Liu Z ([Nadim and Liu 2013](#)). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή λαμβάνεται υπόψη η συνέργεια και η αλληλοεπίδραση των φαινομένων του σεισμού και των κατολισθήσεων στις ζημιές που μπορεί να παρουσιάσει ένα κτίριο. Το γράφημα του μοντέλου, αποτελείται συνολικά από πέντε μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές έννοιες, ενώ για λόγους απλοποίησης των απαιτούμενων πράξεων, όλες οι μεταβλητές περιγράφονται από δυο αμοιβαίως αποκλειόμενες καταστάσεις, πλην της μεταβλητής που περιγράφει τις ζημιές του κτιρίου και παρουσιάζεται με τρεις αμοιβαίως αποκλειόμενες πιθανές καταστάσεις.



Εικόνα 8: Bayesian network (BN) πέντε μεταβλητών που υπολογίζει το μέγεθος της βλάβης του κτιρίου των Nadim F και Liu Z (Nadim and Liu 2013)

Σύμφωνα με τον νόμο του Bayes και των δεσμευμένων πιθανοτήτων η πιθανότητα της μεταβλητής building damage να είναι B₁ θα ορίζεται ως:

$$P(\text{build damage} = B_1) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^2 P\{B = B_1, M = M_i, D = D_j, S = S_k, L = L_m\} \quad (2.16)$$

Αντίστοιχα η από κοινού κατανομή πιθανότητας λαμβανομένου υπόψη το γράφημα και τις εξαρτήσεις που ορίζονται από τις σχέσεις γονέα-παιδιού θα είναι:

$$P(B = B_1, M = M_i, D = D_j, S = S_k, L = L_m) = P(M = M_i) \times P(D = D_j) \times P(S = S_k | M = M_i, D = D_j) \times P(L = L_m | S = S_k) \times P(B = B_1 | S = S_k, L = L_m) \quad (2.17)$$

Από την συγκεκριμένη εφαρμογή μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι δυνατότητες των Μπεϋζιανών Δικτύων ικανοποιούν σε μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις της ανάλυσης των φυσικών φαινομένων και των αλληλοεπιδράσεων τους σε μία περιοχή. Ένα Δίκτυο μπορεί να αποτυπώσει την συνέργεια δύο ή περισσότερων επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή με κατανοητό τρόπο μέσω του γραφήματος αλλά και υπολογιστικά με την χρήση των πιθανοτήτων. Τόσο η δυνατότητα της καταγραφής της μεταβολής των επιπτώσεων λόγω της ύπαρξης πέραν του ενός φαινομένου που επιδρούν αρνητικά στο υπό εξέταση στοιχείο, όσο και η αποτύπωση της αλληλοεπίδρασης των φαινομένων μέσω αιτιατών σχέσεων αποτελούν κρίσιμα σημεία στην ανάλυση των καταστάσεων και σχέσεων των επικίνδυνων

φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή. Η δυνατότητα των Μπεϋζιανών Δικτύων να παρέχουν όλη αυτή την υπολογιστική ευελιξία, τα καθιστά εξαιρετικό εργαλείο στην ανάλυση και αξιολόγηση των φυσικών κινδύνων.

Κάτω από αυτό το πλαίσιο, έλαβε χώρα μια εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση μοντέλων (βλέπε πίνακα (4) που αφορά αντιπροσωπευτικά μοντέλα του συνόλου των εφαρμογών) που βασίζονται σε Μπεϋζιανά Δίκτυα, για την ανάλυση και αξιολόγηση επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τον αριθμό των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές, την πολυπλοκότητα και το είδος του γραφήματος, το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση των πινάκων των δεσμευμένων πιθανοτήτων σε κάθε μεταβλητή, το είδος του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε και αν λήφθηκε υπόψη η παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου σε μία περιοχή.

Κυριότερα συμπεράσματα της ανωτέρω βιβλιογραφικής έρευνας αποτέλεσαν τα εξής:

- α) ο μεγαλύτερος αριθμός μοντέλων χρησιμοποιεί γραφήματα με όχι εκτεταμένα μεγέθη. Το εύρος στον αριθμό των μεταβλητών που εμπεριέχονται στα γραφήματα κυμαίνεται από 8 έως και 40 μεταβλητές. Βεβαία υπάρχουν και δίκτυα που έχουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό αλλά αποτελούν περιορισμένες εφαρμογές. Το είδος των μεταβλητών ποικίλει αναλόγως του χαρακτήρα του μοντέλου. Η ανάλυση των φαινομένων αφορά την συμμετοχή μεταβλητών που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά και τις διεργασίες τους, ενώ η ανάλυση της διακινδύνευσης αφορά και μεταβλητές που περιγράφουν το μέγεθος, την χωρική κατανομή και τις χρησιμοποιούμενες μονάδες του υπό εξέταση απειλούμενου στοιχείου (πληθυσμός, υποδομές ή περιβαλλοντικές διεργασίες).
- β) Η μελέτη και αξιολόγηση των επικίνδυνων φυσικών και τεχνολογικών κινδύνων σε μία περιοχή με τη χρήση των Μπεϋζιανών Δικτύων υλοποιείται με αρκετούς τρόπους. Κυρίαρχη προσέγγιση αποτελεί η υιοθέτηση εμπειρικών τύπων για το κάθε εξεταζόμενο φαινόμενο και η κατασκευή ενός δικτύου με το πλήθος των μεταβλητών που εμπεριέχονται στους τύπους που περιγράφουν τα φαινόμενα. Παρότι τα Δίκτυα επιτρέπουν την μοντελοποίηση και καταγραφή πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου, σε ένα κοινό γράφημα

ανάλυσης και αξιολόγησης αυτών και των αλληλοεπιδράσεων τους. Εντούτοις, στην βιβλιογραφία είναι εξαιρετικά περιορισμένος ο αριθμός των εργασιών που αφορούν την ανάλυση και αποτύπωση πολλών φαινομένων μαζί.

γ) Το μεγαλύτερο μέρος των γραφημάτων των μελετών, αποτελεί δημιουργία των ερευνητών, με βάση τις αντιλήψεις και πεποιθήσεις αυτών για το πώς εκδηλώνονται τα φυσικά φαινόμενα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ένας πολύ μικρός αριθμός εργασιών αξιοποίησε κατάλληλους αλγόριθμους για την εξαγωγή των εξαρτήσεων μεταξύ των μεταβλητών με σκοπό την δημιουργία των γραφημάτων. Η μεθόδευση της εκμάθησης του γραφήματος από τα δεδομένα προϋποθέτει την ύπαρξη ικανοποιητικού αριθμού δεδομένων υψηλής ποιότητας ώστε οι εξαρτήσεις που θα προκύψουν να μην είναι εσφαλμένες. Κατάσταση που δεν είναι συνηθισμένη στο πεδίο της ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων.

δ) Το μεγαλύτερο μέρος των μοντέλων εμπεριέχει μεταβλητές που οι καταστάσεις τους είναι αμοιβαίες και αποκλειόμενες διακριτές τιμές. Υπάρχει ένας μικρός αριθμός δικτύων που εμπεριέχει μεταβλητές με συνεχείς τιμές αλλά και δίκτυα όπου συνυπάρχουν συνεχείς και διακριτές τιμές μαζί. Η συγκεκριμένη κατάσταση προσομοιάζει με πιο ικανοποιητικό τρόπο την πραγματικότητα καθώς η ύπαρξη συνεχών τιμών σε κάποια φαινόμενα (βροχόπτωση, θερμοκρασία) είναι απαραίτητη, χωρίς να είναι κανόνας για όλα τα φυσικά φαινόμενα. Αυτή η συνύπαρξη διακριτών και συνεχών τιμών μπορεί να ικανοποιηθεί με την εφαρμογή διαφορετικών μαθηματικών προσεγγίσεων χωρίς επί του παρόντος την καθολική αποδοχή κάποιας μεθόδου από την ερευνητική κοινότητα ([Friedman and Goldszmidt 1996](#), [Aguilera, Fernández et al. 2011](#)). Τα δίκτυα που περιέχουν μεταβλητές με συνεχείς και διακριτές τιμές ονομάζονται Υβριδικά Μπεϋζιανά Δίκτυα (Hybrid Bayesian Networks) και κάνουν χρήση των μεθόδων της διακριτοποίησης, της μεθόδου MTE (Mixtures of Truncated Exponentials) ([Moral, Rumi et al. 2001](#), [Cobb, Rumi et al. 2007](#), [Nielsen and Jensen 2009](#)), της μεθόδου CGM (Conditional Gaussian Model) ([Castillo, Gutiérrez et al. 1998](#)) και της μεθόδου MCMC (Markov chain Monte Carlo) ([Bennett, Racine-Poon et al. 1996](#), [Chib 2001](#)). Το κοινό στοιχείο είναι, ότι η κάθε μία από τις μεθόδους μπορεί να μετασχηματίσει τις συνεχείς τιμές χωρίς να χαθεί σημαντικό ποσοστό της πληροφορίας.

ε) Το σύνολο των γραφημάτων έχουν υλοποιηθεί σε περιβάλλον εργασίας συγκεκριμένων λογισμικών (Netica, Hugin, Bayes for Matlab) και ο τρόπος ανάλυσης και υπολογισμού των τιμών των μεταβλητών (discrete values or not) έχει άμεση σχέση με τους περιορισμούς των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται σε αυτά.

ζ) Ο μεγαλύτερος αριθμός των γραφημάτων της βιβλιογραφίας που εξετάστηκε αφορά στατικά γραφήματα που δεν λαμβάνουν υπόψη τον χρόνο ως μεταβλητή. Όμως τα φυσικά φαινόμενα είναι δυναμικά με κύριο χαρακτηριστικό την μεταβολή των μεγεθών τους, στο πέρασμα του χρόνου. Κάτω από αυτό το πλαίσιο έχουν γίνει προσπάθειες ([Murphy and Weiss 2001](#), [Rowe and Lester 2010](#)) να λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος στα γραφήματα με διάφορες μεθόδους. Η ενσωμάτωση του χρόνου στα γραφήματα οδήγησε στην δημιουργία των Δυναμικών Μπεϋζιανών Δικτύων (Dynamic Bayesian Networks) ([Fenton and Neil 2007](#), [Molina, Pulido-Velázquez et al. 2013](#), [Wang, Gu et al. 2013](#)). Η προσθήκη μιας μεταβλητής-κόμβου που θα αναφέρεται σε τιμές του παρελθόντος ενός φαινομένου ή η επιλογή συγκεκριμένων γραφημάτων που αντιπροσωπεύουν μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή στην εξέλιξη ενός φαινομένου ή η πραγματοποίηση δομικών αλλαγών (μετασχηματισμούς) στην μορφή ενός γραφήματος όταν κάποιες μεταβλητές αυτού ξεπεράσουν μια συγκεκριμένη τιμή (κατώφλι) αποτελούν κάποιες προτάσεις για την υιοθέτηση του χρόνου στα Δίκτυα. Ωστόσο, οι δομικοί μετασχηματισμοί των δικτύων, οι στιγμιαίες απεικονίσεις τιμών των μεταβλητών και η προσθήκη κόμβων σε ένα γράφημα για να ληφθεί υπόψη ο χρόνος στις διεργασίες των φαινομένων μπορούν να οδηγήσουν σε σύνθετους υπολογισμούς και πολύπλοκα γραφήματα και γι' αυτό τον λόγο ακριβώς, η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη σε απλοϊκά γραφήματα με διακριτές τιμές ([Cox Jr 2013](#)).

Πίνακας 4: Αντιπροσωπευτικά Μοντέλα που βασίζονται σε Μπεϋζιανά Δίκτυα στην διαχείριση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων

Author	Natural/ technological hazard	State of nodes	Software	Validation
(GIS, Grêt-Regamey et al. 2006)	Avalanche	Discrete	Hugin	Sensitivity analysis
(Liang, Zhuang et al. 2012)	Debris flow	Discrete	Bayes Net Toolbox for MATLAB	Comparative analysis
(Song, Gong et al. 2012)	earthquake landslides	Discrete	Bayes Net Toolbox for MATLAB	Sensitivity analysis

(Nadim and Liu 2013)	earthquake- landslides	Discrete	Bayes Net Toolbox for MATLAB	Sensitivity analysis
(Bayraktarli, Ulfkjaer et al. 2005)	Earthquake	Discrete	Bayes Net Toolbox for MATLAB	Sensitivity analysis
(Gutierrez, Plant et al. 2011)	Coastal erosion	Discrete	Netica	Sensitivity analysis
(Money, Reckhow et al. 2012)	Nanoparticle	Discrete	Netica	Authors discussion
(Yates and Cozannet 2012)	Coastal erosion	Discrete	Netica	Sensitivity analysis
(García-Herrero, Mariscal et al. 2013)	Nuclear hazard	Discrete	Hugin	Sensitivity analysis
(Hapke and Plant 2010)	Coastal cliff erosion	Discrete	Netica	Sensitivity analysis
(Blaser, Ohrmberger et al. 2011)	Earthquake tsunami	Discrete	BN learning	Authors discussion
(Straub and Grêt-Regamey 2006)	avalanche	Discrete	Not mention	No Sensitivity analysis
(Peng and Zhang 2012)	dam-break floods	Discrete	Hugin	Sensitivity analysis
(Dlamini 2011)	Fire	Discrete	Netica	Sensitivity analysis
(Wang, Gu et al. 2013)	Earthquakes, landslides, barrier lakes floods	Discrete	Not mention	No Sensitivity analysis
(Fenton, Littlewood et al. 1997)	Nuclear	Discrete	Hugin	Sensitivity analysis
(Einstein, Sousa et al. 2010)	Rock Instability	Discrete	Not mention	Sensitivity analysis
(Aspinall and Woo 2014)	Volcano hazard	Discrete	Netica	
(Khakzad, Khan et al. 2014)	Chemicals	Discrete Dynamic BN	Hugin	Sensitivity analysis
(Matellini, Wall et al. 2013)	fire	Discrete	Hugin	Sensitivity analysis
(Papakosta and Straub 2013)	wildfire	Discrete	Hugin	No Sensitivity analysis
(Pagano, Giordano et al. 2014)	Water impacts	Discrete	Netica	Sensitivity analysis
(Cai, Liu et al. 2013)	offshore oil explosion	Discrete	Netica	Sensitivity analysis
(Mediero, Garrote et al. 2007)	Flood	Discrete Dynamic structure	BN learning	validated by simulating operation
Quantitative Multi-risk Modelling and Management Using Bayesian Networks(Liu, Nadim et al. 2014)	Earthquake tsunami, rockslide	Discrete	Hugin	validated by an event tree model.
(Bayraktarli 2006)	Earthquakes,soil liquefaction	Discrete	Hugin	No Sensitivity analysis
(Špačková and Straub 2011)	Geotechnical conditions	Discrete Dynamic BN	Not mention	Sensitivity analysis
(Wu, Liu et al. 2015)	Road damage	Discrete Dynamic BN	Not mention	Sensitivity analysis
(Molina, Pulido-Velázquez et al. 2013)	Climate change impacts	Discrete Dynamic BN	Hugin	Sensitivity analysis
(Khakzad 2015)	Heat radiation,explosion	Discrete Dynamic BN	Hugin	Authors discussion
(Venkatesan, Thangavelu et al. 2013)	landslide	Discrete	Not mention	Authors discussion
(Lee and Lee 2006)	Nuclear waste disposal	Discrete s	Not mention	PRA technique

Η αξιολόγηση και ανάλυση των φυσικών και τεχνολογικών κινδύνων που συνυπάρχουν σε μία περιοχή, αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο στην διαδικασία λήψης απόφασης από κρατικούς ή ανεξάρτητους φορείς που έχουν

επιφορτιστεί με την ευθύνη της διαχείρισης ή πρόληψης μιας φυσικής ή τεχνολογικής καταστροφής. Η ανάλυση των κινδύνων ως εργαλείο μπορεί να παρέχει κρίσιμες πληροφορίες με την μορφή εκτιμήσεων στους υπευθύνους με αποτέλεσμα την λήψη αποφάσεων που θα μετριάσουν τις επιπτώσεις στον πληθυσμό και τις υποδομές από τον εν δυνάμει κίνδυνο που απορρέει από τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα και τεχνολογικές διεργασίες. Κάτω από αυτό το πλαίσιο η αξία όλων των εφαρμογών της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι αδιαμφισβήτητη. Ιδιαίτερα αν προσεγγίσουμε την βιβλιογραφία ως μία διαδικασία εξέλιξης των μοντέλων που κάθε φορά η πραγματικότητα των φυσικών φαινομένων αποτυπώνεται πιο αξιόπιστα και ρεαλιστικά από την προηγούμενη φορά. Από τα πρώτα ποιοτικά μοντέλα που αναφέρονταν αποκλειστικά στην πεποίθηση του ερευνητή μέχρι τις πρόσφατες εφαρμογές που βασίζονται σε καθαρά υπολογιστικά μοντέλα πολλά πράγματα έχουν επιτευχθεί. Η επικράτηση των ποσοτικών μεθόδων σε συνδυασμό με την εξέλιξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων των συστημάτων έχουν επιτρέψει τους ερευνητές να προσπαθήσουν να ποσοτικοποιήσουν σύνθετες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε μία περιοχή από την παρουσία πέραν του ενός φαινομένου. Σε αυτό ακριβώς το σημείο επικεντρώνεται το επόμενο κεφάλαιο που λαμβάνει υπόψη τα όσα καταγράφηκαν στο παρόν και με κριτική σκέψη τοποθετηθεί τις προϋποθέσεις μέσα σε ένα πλαίσιο, στο οποίο πρέπει να οριοθετηθεί μια μεθοδολογία που θα ανταποκρίνεται με πρωτότυπο τρόπο απέναντι στις δύσκολες προκλήσεις της εποχής μας.

3. Καθορισμός Χαρακτηριστικών Μεθόδου για μία Ολοκληρωμένη Ανάλυση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων σε μία Περιοχή

3.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας αποτελεί πραγματικό γεγονός ότι ο αριθμός των καταστροφών εξαιτίας επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και τεχνολογικών συμβάντων συνεχώς αυξάνει με ανυπολόγιστες επιπτώσεις κάθε φορά για την ανθρωπότητα. Την ίδια στιγμή, η αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο, η κλιματική αλλαγή και η συνεχόμενη πίεση που ασκεί ο άνθρωπος στο περιβάλλον για κατοίκηση και εκμετάλλευση των φυσικών πόρων ασκούν μία αυξανόμενη πίεση στα τελευταία ανέγγιχτα μέρη της γης μεταβάλλοντας τα μεγέθη των φυσικών διεργασιών, και εκθέτοντας με αυτό τον τρόπο, τον άνθρωπο απέναντι σχεδόν σε όλα τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα. Αποτέλεσμα όλων αυτών, είναι η αυξανόμενη απαίτηση από την ανθρώπινη κοινωνία για καθιέρωση μεθόδων και πρακτικών που θα καταγράφουν τα υφιστάμενα επικίνδυνα φαινόμενα σε μία περιοχή και θα ανιχνεύουν τα νέα, που δύναται να διεγερθούν από τα υφιστάμενα φαινόμενα αλλά και τις δράσεις του ανθρώπου στο περιβάλλον.

Κάτω από αυτό το πλαίσιο, πολλοί ερευνητές ανταποκρίθηκαν στην πρόκληση και προσέγγισαν με διάφορες τεχνικές το ζήτημα της ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων. Κυριότερα συμπεράσματα αυτών των προσπαθειών είναι τα εξής: α) πολλές περιοχές ανά την υφήλιο δεν απειλούνται μόνο από ένα επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο, β) τα επικίνδυνα φαινόμενα δεν συνυπάρχουν μεμονωμένα αλλά αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, γ) υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών της περιοχής και το είδος των επικίνδυνων φαινομένων. Οι ορεινές περιοχές συνήθως απειλούνται από κατολισθήσεις, χιονοστιβάδες, πυρκαγιές και σεισμούς ενώ οι παραθαλάσσιες περιοχές είναι εκτεθειμένες σε πλημμύρες, τυφώνες, ανεμοστρόβιλους και τσουνάμι. Οι ενδιάμεσες καταστάσεις απειλούνται από ένα συνδυασμό αυτών.

Αυτή η συνεχώς αυξανόμενη γνώση στο πεδίο των φυσικών φαινομένων δεν έχει καταφέρει να αποτρέψει τις φυσικές καταστροφές και να ανακόψει τις

αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη κοινωνία και στο περιβάλλον. Καταστροφές όπως το 2004 στην Σουμάτρα, το 2006 στην Ιάβα της Ινδονησίας, το 2011 στο Σίκκιμ της Ινδίας και το 2011 στο Τόχοκου της Ιαπωνίας αναδεικνύουν την ανάγκη για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στο πεδίο της ανίχνευσης, ανάλυσης και καταγραφής των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή, δημιουργώντας παράλληλα ανασφάλεια στους κρατικούς οργανισμούς που είναι υπεύθυνοι για την διαχείριση των καταστροφών. Τελικά αν δεν μπορούμε να αποτρέψουμε τις φυσικές καταστροφές, τι μπορεί να θεωρηθεί επιτυχία στο συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο;

Η διαχείριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων με σκοπό να περιορίσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον, εφαρμόζοντας καινοτόμες πρακτικές ώστε να αυξήσουμε την ετοιμότητα αντίδρασης και αντοχή μας απέναντι στα φυσικά φαινόμενα και βασιζόμενοι σε στρατηγικές μετριασμού, να περιορίσουμε τον κίνδυνο που απορρέει από αυτά.

Αυτό, μπορεί να θεωρηθεί επιτυχία για την ανθρώπινη κοινωνία και ένα βήμα μακρύτερα από τις φυσικές καταστροφές. Ειδικότερα η ανάλυση των φυσικών φαινομένων μέσα από ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που έχει λάβει υπόψη όλους εκείνους του παράγοντες που μπορεί να βοηθήσουν τους υπεύθυνους:

α) να αποκτήσουν την αντίληψη και γνώση, όλων των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων που μπορούν να εκδηλωθούν στην περιοχή ευθύνης τους.

β) να ενημερωθούν με ποσοτικά κριτήρια για τα μεγέθη των φαινομένων και των πιθανών επιπτώσεων που μπορεί να προκύψουν από αυτά,

θα επιτρέψει τον σχεδιασμό μιας υγιής ανάπτυξης και τον καθορισμό μίας πιο ασφαλούς χρήσης γης για τον άνθρωπο.

3.2 Απαραίτητα Χαρακτηριστικά Μεθοδολογικού Πλαισίου

Τα φυσικά φαινόμενα είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και για τα περισσότερα από αυτά, ακόμα και τώρα, υπάρχει μία αδυναμία κατανόησης των μηχανισμών εκδήλωσης και εσωτερικών δυναμικών διεργασιών τους. Πολλοί ερευνητές ([Mannan 2004](#), [Tate, Cutter et al. 2010](#), [van Westen, Kappes et al. 2014](#)) για να ξεπεράσουν το πρόβλημα της έλλειψης γνώσης για μηχανισμούς και

ιδιότητες των φαινομένων οδηγήθηκαν σε ένα μεγάλο αριθμό παραδοχών στις μελέτες τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των φαινομένων αφαιρέθηκε ο δυναμικός τους χαρακτήρας που σχετίζεται κυρίως με την χωρική και χρονική εξέλιξη τους στο περιβάλλον, υιοθετήθηκε μία γραμμική συμπεριφορά που δεν περιλαμβάνει απότομες μεταβολές και έντονες διαφοροποιήσεις, επικράτησαν διακριτές τιμές για την περιγραφή του φαινομένου και όχι συνεχείς τιμές ενώ πολλές φορές η κατάσταση που αποδίδονταν στο υπό εξέταση φαινόμενο αποτελούσε προσωπική πεποίθηση του ερευνητή. Επιπρόσθετα στα ποιοτικά μοντέλα για λόγους απλοποίησης των πράξεων η εξέταση των φαινομένων γινόταν υπό την παραδοχή ότι δεν υφίσταται άλλο φαινόμενο στην ίδια περιοχή εκτός από αυτό που μελετάται εκείνη τη στιγμή. Βέβαια αυτός είναι και ο κύριος λόγος που στην περίοδο των ποιοτικών μοντέλων ελάχιστα είχαν γίνει για την μετάβαση από την μεμονωμένη ανάλυση ενός φαινομένου σε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που θα λαμβάνει την συνέργεια και την αλληλοεπίδραση αυτών.

Όλες αυτές οι παραδοχές στην μεθοδολογία των μοντέλων, είχαν σαν αποτέλεσμα οι συγκεκριμένες μέθοδοι να αποδίδουν μια σχετική αντίληψη των κινδύνων και των μεγεθών των επικίνδυνων φαινομένων που συνυπήρχαν σε μία περιοχή ενδιαφέροντος. Παράλληλα στα αποτελέσματα των υπολογισμών και εκτιμήσεων κυριαρχούσαν η υποκειμενικότητα και οι πεποιθήσεις του ερευνητή, για τα φαινόμενα που εξετάζονταν και δυστυχώς αυτή η πραγματικότητα πολλές φορές οδηγούσε στην υπερεκτίμηση ή στην υποβάθμιση των πραγματικών μεγεθών των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων. Πραγματικότητα που και στις δύο περιπτώσεις είναι επικίνδυνη για τον πληθυσμό ή τις υποδομές της περιοχής μελέτης. Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα ποιοτικά μοντέλα εκφράζουν κυρίως τον τρόπο που οι ερευνητές αντιλαμβάνονται κάθε φορά τη σπουδαιότητα του κάθε ένα από τα υπό εξέταση φαινόμενα.

Αντιθέτως, ένα μοντέλο που βασίζεται σε υπολογιστικές μεθόδους είναι ανεξάρτητο του ερευνητή και των πεποιθήσεών του, δύναται να εφαρμοστεί θεωρητικά και σε άλλες περιοχές με μόνο περιορισμό την ύπαρξη δεδομένων για τις μεταβλητές που το αποτελούν. Επιπρόσθετα εάν η ποιότητα των δεδομένων είναι ικανοποιητική τότε το μοντέλο με επιτυχία μπορεί να αποδώσει

μια ρεαλιστική εκτίμηση για τα εν δυνάμει μεγέθη του υπό εξέταση φαινομένου, αποτυπώνοντας τον πραγματικό κίνδυνο που απορρέει από αυτά. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ένα σύγχρονο μεθοδολογικό πλαίσιο πρέπει να βασίζεται σε αυστηρά υπολογιστές μεθόδους ενώ η συμμετοχή του ερευνητή στο στάδιο των υπολογισμών πρέπει να γίνεται αποδεκτή μόνο εάν η γνώση του, έρχεται να καλύψει την απουσία των δεδομένων.

Ένας μεγάλος αριθμός, επικίνδυνων φυσικών φαινομένων (πυρκαγιές σεισμοί, πλημμύρες, καταιγίδες, εκρήξεις ηφαιστείων, τσουνάμι, κατολισθήσεις) απειλούν την ανθρώπινη κοινότητα σε διάφορα σημεία του πλανήτη. Η αντίληψη και κατανόηση του γεγονότος ότι πολλά από αυτά τα φαινόμενα απειλούν ταυτόχρονα την ίδια περιοχή οδήγησε στην απαίτηση δημιουργίας μεθόδων και τεχνικών που θα λαμβάνουν υπόψη την ταυτόχρονη παρουσία των φαινομένων σε μια περιοχή. Η κύρια δυσκολία αυτής της προσέγγισης, επικεντρώνεται κυρίως στην συγκρισιμότητα των επικίνδυνων φαινομένων μεταξύ τους. Τα διάφορα επικίνδυνα φαινόμενα διαφέρουν στη φύση τους, στην ένταση τους, στις μονάδες που χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση τους, στις περιόδους αναφοράς τους, στις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των φαινομένων και στον τρόπο που εκδηλώνονται και εξελίσσονται σαν φαινόμενα σε σχέση πάντα με τον χώρο και τον χρόνο. Για να ξεπεραστούν τα ζητήματα της συγκρισιμότητας και να μπορεί να ποσοτικοποιηθούν τα μεγέθη των φαινομένων ταυτόχρονα, υιοθετήθηκαν μία σειρά από διαφορετικές μέθοδοι που λάμβαναν υπόψη την ταυτόχρονη παρουσία των φαινομένων σε μία περιοχή. Τέτοιες μέθοδοι είναι η μέθοδος της ταξινόμησης, η μέθοδος των δεικτών, η μέθοδος της αλυσίδας αλλά και αυστηρά υπολογιστικές μέθοδοι που αξιοποιούν την στατιστική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων ώστε να ξεπεραστούν θέματα ασυμβατότητας και προβληματικών συγκρίσεων μεταξύ των μεταβλητών.

Η μέθοδος της ταξινόμησης βασίζεται στην λογική της αντιστοίχισης διαφορετικών φαινομένων σε ένα κοινό εύρος αναφοράς τιμών που αντιπροσωπεύει κάθε φορά κάποιο συγκεκριμένο μέγεθος όπως η ένταση των φαινομένων ή το μέγεθος των επιπτώσεων (πχ ένταση βροχόπτωσης και μέγεθος σεισμού σε κοινή κλίμακα έντασης). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου ο ερευνητής προβαίνει στην ταξινόμηση και αντιστοίχιση των τιμών των

φαινομένων σε έναν αριθμό κατηγοριών του κοινού μεγέθους αναφοράς που έχει ορίσει ο ίδιος. Με αποτέλεσμα η υποκειμενικότητα του ερευνητή να καθορίζει δύο σημεία εφαρμογής της μεθόδου (αυτό της ταξινόμησης των τιμών των μεγεθών των φαινομένων και αυτό της κατηγοριοποίησης του κοινού μεγέθους αναφοράς) αποδίδοντας με αυτό τον τρόπο ποιοτικά χαρακτηριστικά στην ανάλυση της συνύπαρξης των φαινομένων. Ως επακόλουθο αυτής της προσέγγισης προκύπτουν και εδώ τα ζητήματα αξιοπιστίας στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, που αντιστοιχούν σε μία ποιοτική προσέγγιση του θέματος.

Κατά αντιστοιχία, η μέθοδος του δείκτη βασίζεται στην ίδια λογική, την δυνατότητα να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς η παρουσία πέραν του ενός φαινομένου σε μία περιοχή. Σε αυτή την μέθοδο για κάθε φαινόμενο ή μεγέθους φαινομένου ορίζεται ένας δείκτης ως αποτέλεσμα γινομένου ή αθροίσματος επιμέρους κριτηρίων που περιγράφουν το φαινόμενο ή το μέγεθος του φαινομένου με οικονομικά ή κοινωνικά κριτήρια. Ο δείκτης λαμβάνει ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών όπως και τα κριτήρια αξιολόγησης και ο ερευνητής αντιστοιχίζει την τιμή του μεγέθους ενός φαινομένου για το υπό εξέταση κριτήριο σε μία τιμή ενός προκαθορισμένου εύρους του κριτηρίου. Στο τέλος οι τιμές των κριτηρίων προστίθεται ή πολλαπλασιάζονται για τον υπολογισμό των δεικτών. Η σύγκριση ή η συνέργεια μεταξύ των φαινομένων λαμβάνεται υπόψη συγκρίνοντας ή προσθέτοντας τους αντίστοιχους δείκτες για κάθε φαινόμενο. Η συμμετοχή του ερευνητή στην διαδικασία αντιστοίχισης και μετασχηματισμού των τιμών μεταξύ δείκτη και μεγεθών του φαινομένου αποδίδει ποιοτικά χαρακτηριστικά στην μέθοδο αφού η τελική τιμή των δεικτών θα εξαρτάται αποκλειστικά από την βαθμολόγηση του.

Επιπρόσθετα και οι δύο αναλυθέντες μέθοδοι παρότι λαμβάνουν υπόψη την ταυτόχρονη παρουσία των φαινομένων δεν μπορούν να αποδώσουν την συνέργεια των φαινομένων και την πιθανή αλληλοεπίδραση τους στην ίδια περιοχή. Η πρόσθεση ή η σύγκριση κοινών τιμών αναφοράς περιορίζεται μόνο στον υπολογισμό των πιθανών επιπτώσεων ως άθροισμα των επιμέρους φαινομένων ενώ δεν εξετάζεται εάν η αλληλοεπίδραση των φαινομένων δύναται να μεταβάλει τα ήδη υπολογισμένα χαρακτηριστικά.

Η αποδοχή μεθόδων βασισμένων στην θεωρία της στατιστικής και των πιθανοτήτων μπορεί να ξεπεράσει τα προαναφερθέντα προβλήματα, χωρίς να θυσιάσει την αντικειμενικότητα της προσέγγισης. Για να οριστεί βέβαια η πιθανότητα εκδήλωσης ενός συμβάντος ή γεγονότος είναι απαραίτητο να οριστεί πρώτα το σύνολο των πιθανών αποτελεσμάτων, του υπό εξέταση συμβάντος που θα διερευνηθεί. Όσο καλύτερα και πληρέστερα καθοριστεί αυτός ο χώρος, τόσο αξιόπιστα και ρεαλιστικά θα είναι τα αποτελέσματα. Στην παρούσα διατριβή, αναφερόμαστε σε δειγματικούς χώρους με περιορισμένο αριθμό στοιχείων και διακριτά χαρακτηριστικά των πιθανών καταστάσεων τους, καθότι ο αριθμός των φυσικών/τεχνολογικών επικίνδυνων φαινομένων που δύναται να εμφανιστεί σε μία περιοχή μελέτης δεν είναι άπειρος και βέβαια τα φαινόμενα είναι διακριτά. Συνεπώς εάν θεωρήσουμε ότι \mathcal{H} είναι ένα σύνολο που περιέχει n διακριτά στοιχεία και συμβολίζουμε:

$$\mathcal{H} = \{H_1, H_2, H_3 \dots \dots H_n\} \quad \mu\epsilon \quad n = 1, 2, \dots, j \dots n \in \mathbb{N} \quad (3.1)$$

τότε θα ονομάζουμε ένα τέτοιο σύνολο, «δειγματικό χώρο» όταν κάθε στοιχείο H_i αντιστοιχεί σε ένα συμβάν, γεγονός, διαδικασία ή φαινόμενο που εκδηλώνεται στην περιοχή ευθύνης που αναφέρεται ο δειγματικός χώρος και εμφανίζει συγκεκριμένα και διακριτά όρια (αρχή και τέλος φαινομένου).

Σαν ορισμός πιθανότητας δεν αποδίδεται η κλασική προσέγγιση του *Laplace* διότι προϋποθέτει την ύπαρξη περιορισμού δειγματικού χώρου, κάτι που δεν είναι πρόβλημα στο συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο. Όμως η απαίτηση ως προϋπόθεση για τα στοιχεία του δειγματικού χώρου να παρουσιάζουν την ίδια πιθανότητα να συμβούν είναι κάτι που δεν μπορεί να διασφαλιστεί στην μελέτη των επικίνδυνων φαινομένων. Αντί του ορισμού της κλασικής πιθανότητας, υιοθετείται λοιπόν ο στατιστικός ορισμός της, που ικανοποιεί περισσότερο την αντίληψη που έχουμε οι περισσότεροι για την έννοια της πιθανότητας. Συγκεκριμένα για κάθε τιμή ενός μεγέθους που περιγράφει ένα φαινόμενο ή για κάθε εμφάνιση του φαινομένου σε μία περιοχή που συνυπάρχουν και άλλα φαινόμενα, κατασκευάζεται ένας πίνακας συχνοτήτων και υπολογίζεται μέσω αυτού, η σχετική συχνότητα εμφάνισης (*relative frequency*) (που ονομάζεται και ποσοστό), ως πηλίκο της συχνότητας εμφάνισης μιας κατάστασης ή τιμής ενός μεγέθους που αντιστοιχεί σε ένα φαινόμενο ή της εμφάνισης ενός φαινομένου προς το σύνολο των παρατηρήσεων του αντίστοιχου δειγματικού χώρου

(καταστάσεων των μεγεθών ή φαινόμενα). Εάν ο αριθμός των παρατηρήσεων τείνει στο άπειρο, τότε το όριο του ποσοστού για ένα συγκεκριμένο στοιχείο H_1 , θα καλείται πιθανότητα του H_1 , και θα συμβολίζεται $P(H_i)$ ως εξίσωση (3.2) με τις ιδιότητες της (3.3). Εάν θεωρήσουμε ότι \mathcal{H} είναι ένα σύνολο, δηλαδή ένας δειγματικός χώρος που περιέχει n διακριτά στοιχεία που, αντιστοιχούν σε φαινόμενα που συνυπάρχουν σε μία περιοχή, τότε μπορούμε συμβολίζουμε τον χώρο \mathcal{H} :

$$\mathcal{H} = \{H_1, H_2, H_3 \dots \dots H_n\} \quad \mu \epsilon \quad n = 1, 2, \dots, j \dots \dots n \in N$$

Και $f_1, f_2, f_3, \dots \dots f_n$ είναι συχνότητες εμφάνισης: $\forall H_n \Rightarrow f_n, n = 1, 2, \dots, j \dots \dots n \in N$ τότε ως ποσοστό ή σχετική συχνότητα του H_i , ορίζουμε:

$$p_i = \frac{f_i}{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n} \quad (3.2)$$

$$\text{Εάν } (f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n) \rightarrow \infty \wedge \exists \lim_{(f_1+f_2+f_3+\dots+f_n) \rightarrow \infty} (p_i) \approx P(H_i) \quad (3.3)$$

$$P(\mathcal{H}) = 1 \wedge P(H_i) \geq 0$$

Έχοντας υιοθετήσει τον στατιστικό ορισμό για την πιθανότητα μπορούμε να περάσουμε από την συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου στην πιθανότητα εμφάνισης, δηλαδή από τις σχετικές συχνότητες στις πιθανότητες και να αξιοποιήσουμε τις ιδιότητες τους, που απορρέουν από την θεωρία των πιθανοτήτων. Με αυτό τον τρόπο έχουμε επιτύχει να λαμβάνεται υπόψη η συνολική παρουσία των επικίνδυνων φαινομένων χωρίς όμως το στοιχείο της υποκειμενικότητας του ερευνητή, καθότι τα αποτελέσματα είναι αποκλειστικά συνδεδεμένα με τα κάθε φορά υφιστάμενα δεδομένα και υπολογισμούς.

Ακόμα όμως και με την αξιοποίηση των πιθανοτήτων, δεν έχουμε καταφέρει να αποδώσουμε με ρεαλιστικό τρόπο την παρουσία πέραν του ενός επικίνδунου φυσικού φαινομένου καθώς εξακολουθούμε να μην λαμβάνονται υπόψη οι πιθανές αλληλοεπιδράσεις και αλληλοσυσχετίσεις των φαινομένων σε μια περιοχή. Η μέχρι τώρα προσέγγιση θεωρεί τα γεγονότα (φαινόμενα) ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, δηλαδή αν και συνυπάρχουν σε μία περιοχή θεωρείται ότι δεν επηρεάζει το ένα το άλλο. Με αυτό τον τρόπο οι ερευνητές αποδίδουν την ολική πιθανότητα να συμβούν όλα τα φαινόμενα ως:

$$P(H_1 \cap H_2 \cap H_3 \dots \dots \cap H_n) = P(H_1) \times P(H_2) \times \dots \times P(H_n) \quad (3.4)$$

Κατάσταση που δεν ικανοποιητική, διότι ο τελικός κίνδυνος ή μέγεθος των επιπτώσεων μπορεί να διαφέρει αρκετά από πού υπολογίζεται ως γινόμενο ανεξάρτητων γεγονότων.

Η είσοδος των δεσμευμένων πιθανοτήτων στο γνωστικό πεδίο της διαχείρισης των επικίνδυνων φαινομένων θα αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζονται τα φαινόμενα και θα αυξήσει τις δυνατότητες των ερευνητών για μία πιο ρεαλιστική αποτύπωση των κινδύνων. Σύμφωνα με τον ορισμό, ως δεσμευμένη πιθανότητα του H_1 με δεδομένο το H_2 και έχοντας $P(H_2) > 0$ θα καλείται το πηλίκο $P(H_1 \cap H_2)$ προς το $P(H_2)$ και θα γράφεται:

$$P(H_1|H_2) = \frac{P(H_1 \cap H_2)}{P(H_2)} \quad (3.5)$$

Η αλλαγή που φέρνει ο ορισμός της δεσμευμένης πιθανότητας στον τρόπο ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων καταγράφεται ευκρινώς στον υπολογισμό της από κοινού πιθανότητας, όταν αποσύρουμε την παραδοχή της ανεξαρτησίας των φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή και κάνουμε χρήση της δεσμευμένης πιθανότητας, ερμηνεύοντας ότι το ένα φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της εκδήλωσης του προηγούμενου φαινομένου στην ίδια περιοχή. Η εξίσωση (3.6) αποδίδει την από κοινού πιθανότητα και διαφέρει αρκετά σε σχέση με την εξίσωση (3.4) που λειτουργεί στην βάση της παραδοχής ότι τα φαινόμενα είναι ανεξάρτητα.

$$P(H_1 \cap H_2 \cap H_3 \dots \dots \cap H_v) = P(H_1) \times P(H_2|H_1) \times P(H_3|H_2 \cap H_1) \times \dots \times P(H_v|H_1 \cap H_2 \cap \dots \cap H_{v-1}) \quad (3.6)$$

Επιπρόσθετα οι δεσμευμένες πιθανότητες θα επιτρέψουν να λαμβάνεται υπόψη με ποσοτικά κριτήρια όχι μόνο η παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου σε μία περιοχή αλλά και η αλληλοεπίδραση μεταξύ των φαινομένων, καθώς από τον ορισμό της, προκύπτει ότι για να υπολογιστεί η πιθανότητα εμφάνισης του H_1 θεωρείται ότι συνέβη το H_2 ή πρόκειται να συμβεί σύντομα. Πρακτικά μέσω της δεσμευμένης πιθανότητας αξιολογείται η δυναμική μιας σχέσης που υφίσταται μεταξύ δύο φαινομένων, στην οποία το H_2 που έχει συμβεί ή έχει εκδηλωθεί, είναι η αιτία για να συμβεί και το H_1 , το οποίο με την σειρά του, είναι το αποτέλεσμα αυτής της αλληλοεπίδρασης. Αυτή η σχέση μεταξύ αιτίου και αποτελέσματος που βασίζεται στην αρχή της αιτιότητας κυριαρχεί στο πεδίο των φυσικών φαινομένων και των κινδύνων που

απορρέει από αυτά ([Beck 1992](#), [Reason 2016](#)) καθότι παρέχει το εννοιολογικό πλαίσιο για να ερμηνευτεί με ικανοποιητικό τρόπο πως ένα φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει ή να μεταβάλλει την εκδήλωση ενός άλλου.

Ωστόσο αν και οι δεσμευμένες πιθανότητες αποδίδουν την σχέση «αίτιο – αποτέλεσμα» δεν μπορούν να ερμηνεύσουν πιο πολύπλοκες αλληλοεπιδράσεις που μπορεί να αναπτυχθούν μεταξύ φαινομένων σε μία περιοχή ενδιαφέροντος, ούτε παρέχουν ένα πλήρες μεθοδολογικό πλαίσιο για την μαθηματική ερμηνεία αυτών. Παραταύτα, δεν πρέπει να αγνοούμε ότι η βελτίωση των υπολογιστικών ικανοτήτων των μοντέλων ευθύνεται αποκλειστικά στην υιοθέτηση των δεσμευμένων πιθανοτήτων στους υπολογισμούς τους.

Η διαχείριση και ανάλυση των φαινομένων και κινδύνων που απορρέουν από την παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου σε μία περιοχή λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις και αλληλοσυσχετίσεις αυτών αποτελεί ένα σύνθετο ζήτημα, όπου ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων όπως ο αριθμός και ο χαρακτήρας των φαινομένων, τα χαρακτηριστικά της περιοχής, η χωρική και χρονική κλίμακα παρατήρησης και η μέθοδος αποτύπωσης των αλληλοεπιδράσεων, επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Η δυσκολία του εγχειρήματος αποτυπώνεται και βιβλιογραφικά καθώς είναι εξαιρετικά μικρός ο αριθμός των μελετών που αναφέρεται στο θέμα, ενώ οι αναλύσεις των συσχετίσεων περιορίζονται στην εξέταση μέχρι 2-3 φαινομένων στην ίδια περιοχή. Κοινό συμπέρασμα ([MATRIX 2010-13](#), [Asimakopoulou and Bessis 2011](#), [Khakzad and Reniers 2015](#)) αποτελεί, ότι ο τελικός κίνδυνος που δύναται να προκύψει από την συνέργεια των φαινομένων, δύναται να διαφέρει από το απλό άθροισμα όλων των επιμέρους κινδύνων, διαδικασία που δυστυχώς είναι αρκετά διαδεδομένη στις βιβλιογραφία. Καταλήγοντας με αυτό τον τρόπο, σε μη ορθή αξιολόγηση του πραγματικού επιπέδου του κινδύνου και αμφισβητώντας την ορθότητα των σχεδίων διαχείρισης που βασίζονται στα συμπεράσματα τέτοιων προσεγγίσεων.

Κάτω από αυτό το πλαίσιο, αποτελεί εξαιρετική πρόκληση, η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου που θα ανταποκρίνεται στις πρόσφατες απαιτήσεις και θα αποτυπώνει ρεαλιστικά τις όποιες σχέσεις φαινομένων αναπτύσσονται μεταξύ τους.

Οι μέθοδοι της αλυσίδας και του πίνακα, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο (2), προσπάθησαν να δώσουν λύση στο τρόπο της αποτύπωσης της αλληλοεπίδρασης μεταξύ των φαινομένων, που συνυπάρχουν σε μία περιοχή, χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία. Προτού όμως αναλυθούν οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την μη ικανοποιητική πρακτική, θα γίνει ο πρώτος διαχωρισμός στην ερμηνεία της αλληλοεπίδρασης που μπορεί να εμφανιστεί μεταξύ φαινομένων στην ίδια περιοχή. Η πρώτη ερμηνεία αναφέρεται στην διέγερση ενός φαινομένου από ένα άλλο, το οποίο με την σειρά του θα προκαλέσει την ενεργοποίηση ενός τρίτου κοκ. Αυτή η κατάσταση περιγράφεται ως «domino effect» ([Thierry, Stieltjes et al. 2008](#), [Van Westen, Quan Luna et al. 2010](#), [van Westen, Kappes et al. 2014](#)) και μπορεί να εξηγήσει σε ικανοποιητικό βαθμό την εξέλιξη ενός σεναρίου όπου συνυπάρχουν πέραν του ενός επικίνδυνου φαινομένου και καταλήγει σε μία φυσική ή τεχνολογική καταστροφή. Η δεύτερη ερμηνεία διαφέρει από την πρώτη καθώς δεν εξετάζει τα φαινόμενα αλλά επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά των επιπτώσεων των φαινομένων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται πως οι επιπτώσεις σε μία περιοχή, από την εκδήλωση ενός φαινομένου, επηρεάζουν την εκδήλωση ενός άλλου φαινομένου. Δηλαδή κατά πόσο η ενεργοποίηση ενός επικίνδυνου φαινομένου δημιουργεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την αποτροπή ή ενεργοποίηση και εξέλιξη ενός άλλου επικίνδυνου φαινομένου. Το δεύτερο επικίνδυνο φαινόμενο μπορεί να εκδηλωθεί σε χρόνο και χώρο που διαφέρει από το πρώτο γεγονός και εφόσον το επιτρέπουν οι τρέχουσες διαμορφωθέντες συνθήκες. Τυπικό παράδειγμα αυτής της ερμηνείας, αποτελεί η καταστροφή των δέντρων σε μία πλαγιά από δασική πυρκαγιά το καλοκαίρι, με αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης και έντασης των κατολισθήσεων την εποχή των βροχών.

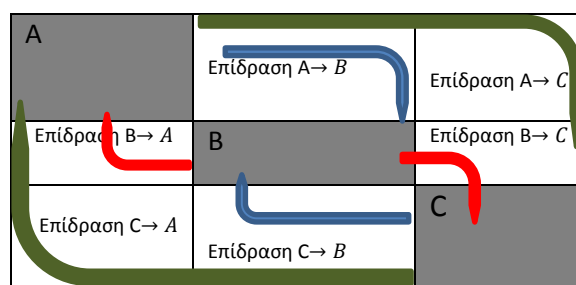
Η μέθοδος της αλυσίδας (Chain Method) αξιοποιείται και από τις δύο προαναφερθείσες ερμηνείες της αλληλοσυσχέτισης και για την υλοποίηση της, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να έχουν εντοπιστεί εφαρμογές (μία ανά επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο) που μπορούν να συνεργαστούν μεταξύ τους. Γι' αυτό το λόγο, αν και εξετάζονται φαινόμενα που έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης, διαφορετική κλίμακα στην συχνότητα εμφάνισης και διαφορετικούς μηχανισμούς αποτύπωσης, θα πρέπει να βρεθούν κοινά παράθυρα χρόνου, χώρου και μονάδων ώστε να επιτευχθεί η συνέχεια της ανάλυσης των

δεδομένων. Προϋπόθεση, που είναι εξαιρετικά δύσκολη να επιτευχθεί, όπως έχει δείξει και η πράξη ([Malet, Glade et al. 2010](#)). Πρακτικά τα εξαγόμενα αποτελέσματα μίας εφαρμογής που εμπεριέχεται στο ευρύτερο μοντέλο, αποτελούν τα δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή που ακολουθεί, διαδικασία που αναπαράγεται τόσες φορές, όσες και ο αριθμός των μεμονωμένων εφαρμογών, με την προϋπόθεση ότι έχει επιτευχθεί κατάλληλη επιλογή μοντέλων που είναι συμβατά μεταξύ τους.

Επιπρόσθετα η συγκεκριμένη μέθοδος μεταφέρει την πληροφορία μόνο προς μία κατεύθυνση, όπως αυτή ορίζεται, από την ιεράρχηση των επιμέρους εφαρμογών. Αυτό σημαίνει ότι εξετάζεται συγκεκριμένη σειρά εκδήλωσης φαινομένων άρα συγκεκριμένο σενάριο. Συνεπώς αν στην περιοχή ενδιαφέροντος η «ενεργοποίηση» αφορά το πρώτο επικίνδυνο φαινόμενο, η μέθοδος θα αποδώσει τις πιθανές συσχετίσεις και αλληλοεπιδράσεις των φαινομένων μεταξύ τους, καθώς θα περνάει η πληροφορία από την μία εφαρμογή στην άλλη. Αντιθέτως αν η «ενεργοποίηση» αφορά το φαινόμενο που έχει τοποθετηθεί τελευταίο ή στην μέση της σειράς, στην αλυσίδα των εφαρμογών τότε η πληροφορία θα περάσει μόνο στα φαινόμενα που ακολουθούν στην προκαθορισμένη σειρά της μεθόδου. Σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση των συσχετίσεων θα εξαιρέσει τα φαινόμενα που προηγούνται του σημείου που εισήλθε η πληροφορία με αποτέλεσμα να μην ληφθούν υπόψη στην ανάλυση του συνολικού κινδύνου στη περιοχή ενδιαφέροντος, αφού δεν θα λάβουν μέρος στους υπολογισμούς. Προσέγγιση που είναι εξαιρετικά εσφαλμένη.

Επιπρόσθετα στην συγκεκριμένη μέθοδο, αν απαιτηθεί η επικαιροποίηση του τελικού αποτελέσματος λόγω ύπαρξης νέων δεδομένων ως ενδείξεις στην περιοχή ενδιαφέροντος, ο ερευνητής θα πρέπει να ενεργοποιήσει από την αρχή της αλυσίδας την διαδικασία των υπολογισμών, δηλαδή να επαναλάβει το σύνολο των απαιτούμενων πράξεων σε κάθε επιμέρους εφαρμογή και να ακολουθήσει την σειρά της διαδοχής της πληροφορίας με το χαρακτήρα του αποτελέσματος ή των δεδομένων εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι ο απαιτούμενος χρόνος υλοποίησης θα είναι το άθροισμα των επιμέρους χρόνων υπολογισμού της κάθε εφαρμογής που μπορεί να ποικίλει σε διάρκεια, καθιστώντας προβληματική, την κάθε διαδικασία επικαιροποίηση σε πραγματικό χρόνο.

Παρόμοια, η μέθοδος του πίνακα (Interaction matrix method) αποτέλεσε μία εναλλακτική προσέγγιση για να αποδοθούν οι αλληλοεπιδράσεις των φαινομένων σε μία περιοχή με την μορφή των επιπτώσεων. Η διαμόρφωση του πίνακα με την τοποθέτηση κατά μήκος της διαγωνίου, των υπό εξέταση επικίνδυνων φαινομένων, περιορίζει το είδος των αλληλοσυσχετίσεων και αλληλοεπιδράσεων που μπορούν να εξεταστούν με την συγκεκριμένη μέθοδο. Αν και είναι εφικτό σε αυτή την μεθοδολογία, η εξέταση όλων των φαινομένων μεταξύ τους, αυτό μπορεί να γίνει μόνο κατά ζεύγη (σε ένα προς ένα αντιστοιχία) αγνοώντας τα επιμέρους φαινόμενα κάθε φορά που μπορεί να συνυπάρχουν στην περιοχή ενδιαφέροντος. Με αυτό τον τρόπο οι επιπτώσεις λόγω αλληλοεπιδράσεων που λαμβάνονται υπόψη, αφορούν αποκλειστικά μόνο δυο φαινόμενα κάθε φορά, αγνοώντας με αυτό τον τρόπο τις τυχόν επιδράσεις που μπορεί να έχουν τα υπόλοιπα φαινόμενα του πίνακα στο υπό εξέταση ζευγάρι. Στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη αθροιστικά το σύνολο των επιμέρους επιπτώσεων όπως αυτό ορίστηκε ανά ζεύγος φαινομένων. Το αθροιστικό αποτέλεσμα προκύπτει συνήθως μετά την εφαρμογή μιας κοινής κλίμακας έντασης επιπτώσεων στην οποία ανάγονται (όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο (2) οι επιπτώσεις από κάθε ζευγάρι φαινομένων. Πρόκειται λοιπόν για μία ποιοτική προσέγγιση που εξετάζει την αλληλοεπίδραση σε μεμονωμένα ζεύγη φαινομένων.



Πίνακας 3.1 Γραφική Απεικόνιση Αλληλοεπιδράσεων σε πίνακα 3x3

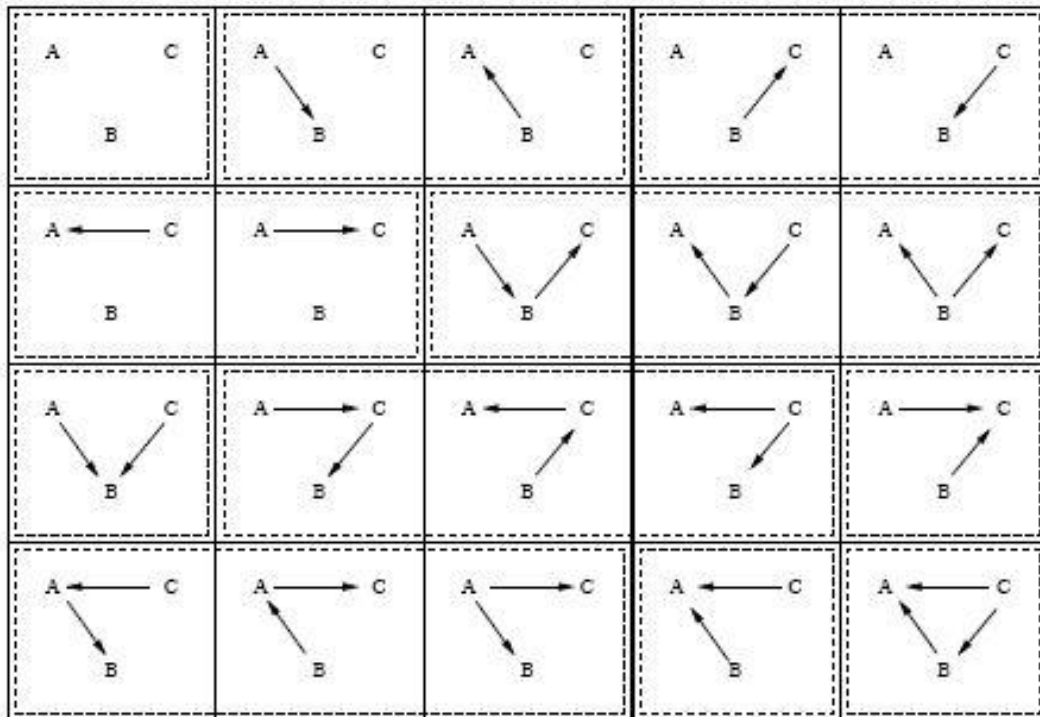
Ένα άλλο χαρακτηριστικό που επηρεάζει την διατύπωση μίας μεθοδολογίας που λαμβάνει υπόψη τις αλληλοεπιδράσεις των φαινομένων είναι ο τύπος και ο αριθμός των φαινομένων που υπάρχουν σε μία περιοχή. Ο τύπος των φαινομένων σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της σχέσης που θα αναπτυχθεί μεταξύ τους και θα επηρεάσει τον τρόπο της αλληλοεπίδρασης. Μία δυναμική

σχέση που μπορεί να αναπτύσσεται μεταξύ έντονης βροχόπτωσης αρκετών ημερών και του φαινομένου των κατολισθήσεων στην ίδια περιοχή περιγράφει, ακριβώς αυτό, δηλαδή την συνεχή-μεταβολή του μεγέθους της βροχόπτωσης επί της αυξανόμενης πιθανότητας εκδήλωσης μιας κατολίσθησης. Επιπρόσθετα μία αλληλοεπίδραση μεταξύ διαφορετικών τύπων φαινομένων μπορεί να ενισχύει την εκδήλωση ενός εκ των δύο φαινομένων ή να την αποτρέπει, ακυρώνοντας τις προϋποθέσεις εκδήλωσης του.

Παράγοντες όπως ο χρόνος και ο χώρος κάτω από τους οποίους διαφορετικά φυσικά φαινόμενα εκδηλώνονται και εξελίσσονται με διαφορετικούς τρόπους παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στην αλληλοεπίδραση των φαινομένων. Ο χώρος ως μεταβλητή μπορεί να είναι αποτρεπτικό χαρακτηριστικό για την εκδήλωση ενός φαινομένου, και να λειτουργεί πολλαπλασιαστικά για ένα άλλο. Επίσης κάποια επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα έχουν σημειακό χαρακτήρα και δεν εξελίσσονται στο χώρο, ενώ αλλά καταλαμβάνουν μεγάλες επιφάνειες από την αρχή της εκδήλωσης τους. Σε όλες αυτές της περιπτώσεις η μεταβολή της χωρικής πληροφορίας θα μεταβάλει και την μεταξύ τους εξάρτηση, διεγείροντας ή αποτρέποντας την εκδήλωση του ενός ανάλογα με την χωρική πληροφορία.

Παράλληλα τα φυσικά φαινόμενα είναι ιδιαίτερα δυναμικές διεργασίες που σχετίζονται άμεσα με τον χρόνο. Είναι λογικό και οι εξαρτήσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους να εμφανίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά και να επηρεάζονται από αυτόν. Διαφορετικά φαινόμενα, αναφέρονται συνήθως σε διαφορετική χρονική κλίμακα εκδήλωσης αλλά και συχνότητα εμφάνισής (πχ μία κατολίσθηση διαρκεί πολύ περισσότερο σαν φαινόμενο από ένα σεισμό ή μία καταστροφή φράγματος, ενώ η συχνότητα εμφάνισης πλημμυρών είναι υψηλότερη από ένα τσουνάμι). Ο χρόνος συνήθως επηρεάζει τον υπολογισμό των μεγεθών ενός φαινομένου, που με την σειρά τους καθορίζουν το μέγεθος των επιπτώσεων. Η ύπαρξη διαφορετικής χρονικής κλίμακας εμφάνισης, αποτύπωσης και εξέλιξης μεταξύ φαινομένων, ίσως δεν επιτρέπει τον υπολογισμό κοινών σημείων αναφοράς με σκοπό την συσχέτιση αυτών. Στην πράξη αποδεικνύεται ότι για να οριστεί μία σχέση μεταξύ φαινομένων, που να λαμβάνει υπόψη και τον χρόνο αποτελεί μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία αφού προϋποθέτει τον καθορισμό ενός κοινού παραθύρου αναφοράς για τα

υπό εξέταση φαινόμενα, κάτι που δυστυχώς δεν είναι πάντα εφικτό ([Kappes, Keiler et al. 2012](#)).



Εικόνα 3.1 Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί συσχέτισης μεταξύ τριών μεταβλητών ([Korb and Nicholson 2010](#))

Ο αριθμός των φαινομένων που εξετάζεται κάθε φορά σε μία περιοχή ενδιαφέροντος αποτελεί άλλον έναν παράγοντα που επηρεάζει την μελέτη και ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων αλλά και των πιθανών τρόπων αλληλοεπιδράσεων αυτών. Αυτό γίνεται πολύ εύκολα αντιληπτό καθότι όσο αυξάνει ο αριθμός των επικίνδυνων φαινομένων που συνυπάρχουν, τόσο αυξάνει και ο συνδυασμός των πιθανών σχέσεων αλληλοεπίδρασης που μπορεί να αναπτυχθούν μεταξύ τους. Για να τονιστεί το πρόβλημα των συνδυασμών στην εικόνα (3.1) καταγράφονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί που μπορεί να προκύψουν από την παρουσία τριών φαινομένων στην ίδια περιοχή. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο οι σχέσεις μπορεί να είναι τεσσάρων ειδών. Μπορεί να έχουν γραμμικό χαρακτήρα, δηλαδή η μία σχέση να προκύπτει ως αποτέλεσμα της προηγούμενης, διαδικασία που θα επαναλαμβάνεται πέραν της μίας φορές. Αυτή η επιλογή μπορεί να εξηγήσει σενάρια τύπου «domino/cascade effect» μεταξύ των φαινομένων, όπου έχουμε διαδοχικά γεγονότα, το ένα πίσω από το άλλο. Άλλη επιλογή σύνδεσης μπορεί να αποτελέσει η πολλαπλή διέγερση ενός φαινομένου, σε μία περιοχή που συνυπάρχουν πέραν

του ενός φαινομένου, το οποίο σημαίνει ότι οι αιτίες για την εκδήλωση του είναι περισσότερες της μίας ενώ το αποτέλεσμα είναι μόνο ένα. Τρίτη πιθανή περίπτωση είναι η αντίθετη διαδικασία ,δηλαδή η αιτία της διέγερσης είναι μία αλλά τα αποτελέσματα είναι πολλά και διαφορετικά μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι ένα επικίνδυνο φαινόμενο θα διεγείρει περισσότερα του ενός(ένας σεισμός μπορεί να διεγείρει ταυτόχρονα τσουνάμι και κατολισθήσεις), με επιπτώσεις διαφορετικού μεγέθους για το καθένα. Και τέλος, η περίπτωση να προκύψει ένας συνδυασμός των ανωτέρω με επαναληπτικότητα και μεγάλο αριθμό μεταβλητών, που αποτελεί και την πιο δύσκολη περίπτωση.

Ο υπολογιστικός φόρτος που συνεπάγεται, η ύπαρξη των συνδυασμών ,είναι και ο κύριος λόγος που τα περισσότερα μοντέλα στο πεδίο της ανάλυσης των επικινδύνων φαινομένων περιορίζονται στην μελέτη μικρού αριθμού φαινομένων που συνυπάρχουν σε μία περιοχή ή επιλέγουν να αναλύσουν μέρος του συνολικού αριθμού των φαινομένων, τα οποία έχουν αξιολογηθεί ως πιο επικίνδυνα λόγω του μεγέθους των πιθανών επιπτώσεων τους σε σχέση με τα υπόλοιπα, στην ίδια περιοχή μελέτης ή εξαιτίας της υψηλής πιθανότητας που έχουν να εκδηλωθούν με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Ένας μεγάλος αριθμός υπό εξέταση φαινομένων, εκτός ότι παράγει ένα μεγάλο αριθμό πιθανών αλληλοεπιδράσεων, αυξάνει και τις υπολογιστικές απαιτήσεις λόγω των μεγάλου αριθμού σχέσεων που πρέπει να εξεταστούν, σε συνδυασμό με τον αριθμό των σεναρίων που πηγάζουν από αυτές. Συμπερασματικά υφίσταται η απαίτηση για ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που θα μπορεί να λαμβάνει υπόψη το σύνολο των πιθανών περιπτώσεων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο χωρίς περιορισμό για τον αριθμό των σχέσεων της αλληλοεπίδρασης μεταξύ των φαινομένων αλλά και για τον ίδιο τον αριθμό των φαινομένων που εξετάζονται από το μοντέλο.

Επιπρόσθετα η ανάλυση και εξέταση των επικινδύνων φυσικών φαινομένων αλλά και των αλληλοεπιδράσεων τους σε μία περιοχή, αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία που πρέπει να συνδυάσει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών διεργασιών που συμβαίνουν στη φύση απαιτώντας ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων και πληροφοριών. Ένα κοινό συμπέρασμα που προκύπτει εξετάζοντας τους διάφορους μηχανισμούς που ενεργοποιούνται κατά την

εκδήλωση ενός επικίνδυνου φαινομένου είναι το γεγονός ότι τα περισσότερα στοιχεία που απαιτούνται για την ανάλυση και περιγραφή του διατηρούν μια χωρική ιδιότητα και σχετίζονται άμεσα με τη χρονική «περίοδο» μελέτης ([Coppock 1995](#)). Κάτω από αυτό το πλαίσιο, αναπόφευκτα προκύπτει η ανάγκη για την αποτύπωση των φαινομένων σε χάρτη και τα ΓΣΠ (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών) δύναται να καλύψουν αυτή την απαίτηση, αλλά και να αποτελέσουν ένα επιπλέον εργαλείο για την ολοκληρωμένη προσέγγιση και ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων. Το κύριο πλεονέκτημα των ΓΣΠ επικεντρώνεται όχι μόνο στην οπτικοποίηση του αποτελέσματος της ανάλυσης των φαινομένων, αλλά και στο γεγονός ότι παρέχουν την δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία/ανάλυση της παραχθείσας απεικόνισης ώστε να εξεταστούν και περαιτέρω ερωτήματα που σχετίζονται με την παρουσία των επικίνδυνων φαινομένων όπως το μέγεθος των πιθανών επιπτώσεων που απορρέει από αυτά αλλά και την χωρική αποτύπωση τους.

Επιπρόσθετα τα ΓΣΠ λόγω των παραγόμενων προϊόντων τους, που είναι κυρίως χάρτες παρέχουν μια πιο κατανοητή και συνολική εικόνα των μεγεθών των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων βοηθώντας με αυτό τον τρόπο τους τελικούς χρήστες αλλά και αυτούς που λαμβάνουν αποφάσεις να κατανοήσουν την δυναμική των φαινομένων αλλά και τους πραγματικούς κινδύνους που απορρέουν από αυτά. Γι' αυτό τον λόγο κυρίως, αποτελούν τα μόνα παραγωγικά εργαλεία στον σχεδιασμό και την υλοποίηση των σχεδίων έκτακτης ανάγκης στην διαχείριση φυσικών καταστροφών. Απαιτείται λοιπόν τα όποια αποτελέσματα (σε μονάδες και είδος) που θα προκύπτουν από την μεθοδολογική προσέγγιση που θα επιλεγεί, να είναι τέτοια ώστε να είναι εφικτή η οπτικοποίηση αυτών και η περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον ΓΣΠ.

Επίσης η συνεχής εξέλιξη των μοντέλων στο πεδίο της διαχείρισης των φυσικών φαινομένων επέτρεψαν τον διαχωρισμό αυτών σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά την ανάλυση και αξιολόγηση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή ενώ η δεύτερη αφορά την αξιολόγηση του κινδύνου που απορρέει από την παρουσία των επικίνδυνων φαινομένων. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η πρώτη αποτελεί υποκατηγορία της δεύτερης καθότι αποτελεί προϋπόθεση για την υλοποίηση της. Πράγματι η μετάβαση από την

αξιολόγηση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή στην αξιολόγηση του κινδύνου που απορρέει από αυτά, προϋποθέτει αφενός ότι έχουν καταγραφεί το σύνολο των φαινομένων, αφετέρου ότι έχει ληφθεί υπόψη η τρωτότητα των εκτεθειμένων υπό εξέταση στοιχείων συνήθως σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.1). (2.2) (2.3) και (2.4) που παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφαλαίο. Εκτιμάται ότι οποιαδήποτε μεθοδολογία στην ανάλυση και αξιολόγησή των επικίνδυνων φαινομένων, για την αποδοχή της θα πρέπει να εμπεριέχει την δυνατότητα μετάβασης της, από την διαχείριση των φαινομένων στην διαχείριση του κινδύνου, ορίζοντας πρώτα όμως, την τρωτότητα και το μέγεθος του εξεταζόμενου πληθυσμού.

Όταν αναφερόμαστε στην διαχείριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων το μέγεθος της αβεβαιότητας που κυριαρχεί σε όλα τα στάδια μίας μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Η αβεβαιότητα μπορεί να εμπεριέχεται α) στις μετρήσεις από την παρατήρηση των φαινομένων, β) στις μαθηματικές εξισώσεις που θα προκύψουν από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων, γ) στα υπο-μοντέλα (sub-models) που θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση των φαινομένων, δ) στις σχέσεις που θα δομηθούν μεταξύ των φαινομένων και θα βασίζονται στην αλληλοεπίδραση τους. Όλες αυτές οι μορφές της αβεβαιότητας μπορεί να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) στην τυχαματική ή εγγενή (aleatory) και β) στην επιστημική (epistemic) αβεβαιότητα. Ειδικότερα, οι εγγενείς αβεβαιότητες αναφέρονται στην τυχαματικότητα (randomness) η οποία οφείλεται στην εγγενή μεταβλητότητα του συστήματος ενώ οι επιστημικές, ή αλλιώς αβεβαιότητες βασισμένες στη γνώση, αναφέρονται στην αδυναμία ερμηνείας λόγω της έλλειψης γνώσεων για το υπό εξέταση φαινόμενο ([Der Kiureghian and Ditlevsen 2009](#)).

Πρακτικά, η εγγενής αβεβαιότητα σχετίζεται με τη μεταβλητότητα του φαινομένου δηλαδή το εύρος των δυνατών αποτελεσμάτων του υπό μελέτη φαινομένου ή φαινομένων, ενώ η επιστημική αβεβαιότητα σχετίζεται με το επίπεδο της γνώσης του ερευνητή πάνω στο υπό-εξέταση φαινόμενο. Αυτός ο διαχωρισμός οδηγεί και στο συμπέρασμα ότι η επιστημική αβεβαιότητα μπορεί να περιοριστεί όσο αποκτάται γνώση για το φαινόμενο, αντιθέτως η εγγενής αβεβαιότητα δεν επηρεάζεται από τις γνώσεις του ερευνητή. Βέβαια στο πεδίο

των φυσικών φαινομένων, η έλλειψη κοινής αποδοχής ορισμών για τα φαινόμενα που εξετάζονται από την επιστημονική κοινότητα, η απουσία κοινών βάσεων δεδομένων και η έλλειψη γνώσης για την ερμηνεία αρκετών φαινομένων έχει οδηγήσει στην επικράτηση της εγγενούς αβεβαιότητας. Εκτιμάται ότι μία μεθοδολογία που θα περιορίζει την εγγενή αβεβαιότητα και θα επιτρέπει με άμεσους ή έμμεσους τρόπους την μέτρηση της επιστημικής αβεβαιότητας θα συνεισφέρει στην δημιουργία πιο ασφαλών προβλέψεων, αναφορικά με τα μεγέθη των φαινομένων.

Κλείνοντας θα μπορούσε να ειπωθεί ότι αν ληφθούν υπόψη το σύνολο των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών, ως απαραίτητες προϋποθέσεις για τον σχεδιασμό και αποδοχή μιας σύγχρονης μεθοδολογίας (που θα αξιολογεί και θα αναλύει τα φυσικά φαινόμενα και τις αλληλοεπιδράσεις τους με ποσοτικές μεθόδους ενώ τα παραγόμενα αποτελέσματα της μεθόδου θα έχουν τέτοια χαρακτηριστικά που θα μπορούν να οπτικοποιηθούν με την χρήση των ΓΣΠ τότε τα Μπεϋζιανά Δίκτυα (Bayesian Networks-BNs) είναι μία από τις ελάχιστες επιλογές των ερευνητών στο πεδίο ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων που μπορούν να υιοθετηθούν μεμονωμένα ή ως μέρος σε ένα ευρύτερο περιβάλλον εργασίας για την μοντελοποίηση αυτών.

3.3 Από τις Πιθανότητες στα Πιθανολογικά Δίκτυα για την Ανάλυση των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων

Έχοντας επιλέξει τα Μπεύζιανά Δίκτυα ως το υπολογιστικό εργαλείο μιας πρότυπης μεθοδολογίας που θα αποδίδει με διαυγές τρόπο τα μεγέθη των υπό εξέταση φαινομένων σε μία περιοχή, θα γίνει προσπάθεια να αποδοθεί με μαθηματικό τρόπο η στενή σχέση των Δικτύων με ορισμούς και ιδιότητες της θεωρίας των πιθανοτήτων. Σκοπός αποτελεί να αναδειχθεί πως τα Δίκτυα αξιοποιούν την δεσμευμένη πιθανότητα και τον νόμο του Bayes για να διαδώσουν σε όλες τις μεταβλητές του γραφήματος την πληροφορία που λαμβάνουν σαν ένδειξη σε μία από αυτές με ταχύτητα και περιορισμό αριθμό υπολογισμών.

Από τις εξισώσεις (3.1) και (3.5) που ορίζεται η πιθανότητα και η δεσμευμένη πιθανότητα μπορεί να οριστεί η «συνάρτηση πιθανότητας» ως μία συνάρτηση, η οποία αποδίδει έναν πραγματικό αριθμό $P(H_j)$ σε κάθε στοιχείο του δειγματικού χώρου \mathcal{H} και ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες:

$$0 \leq P(H_j) \leq 1 \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, v \in N \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^v P(H_j) = P(H_1) + P(H_2) + P(H_3) + \dots + P(H_v) = 1 \quad (3.8)$$

Το ζευγάρι που ορίζεται από την συνάρτηση πιθανότητας $P(H_j)$ και τον χώρο \mathcal{H} το ονομάζουμε «Χώρος Πιθανοτήτων» και συμβολίζεται (\mathcal{H}, P) .

$\forall (\mathcal{H}, P)$ με $H_j, H_i \in \mathcal{H}$, όπου $j, i \in N$ με $i \neq j$, ισχύουν τα ακόλουθα :

$$0 \leq P(H_i) \leq 1$$

$$0 \leq P(H_j) \leq 1$$

$$H_j \neq H_i \in \mathcal{H} \Rightarrow H_i \cap H_j = \emptyset \Rightarrow$$

$$P(H_i \cup H_j) = P(H_i) + P(H_j) - P(H_i \cap H_j) \quad (3.9)$$

Έστω δύο γεγονότα H_j, H_i που ανήκουν στο χώρο \mathcal{H} και να ισχύει ότι $P(H_i) \neq 0 \wedge P(H_j) \neq 0$ τότε η πιθανότητα να συμβεί το γεγονός H_i λαμβάνοντας υπόψη

ότι έχει συμβεί το γεγονός H_j ονομάζεται δεσμευμένη πιθανότητα και συμβολίζεται $P(H_i / H_j)$. Ισχύει ότι:

$$P(H_i / H_j) = \frac{P(H_i \cap H_j)}{P(H_j)} \quad (3.10)$$

Αντίθετα, δύο γεγονότα $H_j, H_i \in \mathcal{H}$, όπου $j, i \in N$ με $i \neq j$ θα ονομάζονται ανεξάρτητα όταν ισχύει: $P(H_i / H_j) = P(H_i)$ (3.11) για τα ίδια γεγονότα:

$$P(H_i \cap H_j) = P(H_i) * P(H_j) \quad (3.12)$$

Έστω $\mathcal{H} = \{H_1, H_2, H_3 \dots \dots H_n\}$ με $n = 1, 2, j \dots n \in N$ και $H_i \cap H_j \neq \emptyset \wedge P(H_j) > 0$

με $i \neq j$, ενώ $H_1 \cup H_2 \cup H_3 \cup H_4 \cup \dots \dots \cup H_n = \mathcal{H}$, τότε η πιθανότητα ενός άλλου γεγονότος B όπου $B \in \mathcal{H}$, θα ισούται:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B \cap H_i) \stackrel{(7)}{\Rightarrow} \sum_{i=1}^n P(B / H_i) * P(H_i) \quad (3.13) \text{(Θεώρημα ολικής Πιθανότητας)}$$

Σε αυτό το στάδιο μπορούμε να καταγράψουμε το «θεώρημα του Bayes». Έστω δύο γεγονότα H_1, H_2 που ανήκουν στο χώρο \mathcal{H} και ισχύει ότι $P(H_1) \neq 0 \wedge P(H_2) \neq 0$ τότε θα ισχύει η ακόλουθη ισότητα:

$$P(H_1 / H_2) = \frac{P(H_2 / H_1) * P(H_1)}{P(H_2)} \quad (3.14)$$

Γενικότερα, εάν $\mathcal{H} = \{H_1, H_2, H_3 \dots B \dots H_n\}$ με $n = 1, 2, \dots j \dots n \in N$ και B ένα άλλο γεγονός, τότε θα ισχύει:

$$P(H_i / B) = \frac{P(B / H_i) * P(H_i)}{P(B)} = \frac{P(B / H_i) * P(H_i)}{\sum_{i=1}^n P(B / H_i) * P(H_i)} \quad (3.15)$$

Η εξίσωση (3.12) ορίζει ότι η δεσμευμένη πιθανότητα $P(H_i / B)$ για να υπολογιστεί, προϋποθέτει τον υπολογισμό του αθροίσματος $\sum_{i=1}^n P(B / H_i) * P(H_i)$ το οποίο, είναι άμεσα εξαρτώμενο από το μέγεθος του χώρου \mathcal{H} . Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του \mathcal{H} , τόσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος των πράξεων για τον υπολογισμό του παρονομαστή. Η ανωτέρω διαπίστωση αποτελεί ίσως την μεγαλύτερη δυσκολία στην αξιοποίηση των πιθανοτήτων για την ανάλυση των φαινομένων και την εκτίμηση κινδύνου που απορρέει από αυτά με υπολογιστικούς μεθόδους.

Τα ανωτέρω, αποδεικνύονται εύκολα με το ακόλουθο παράδειγμα. Έστω ότι θέλω να υπολογίσω την πιθανότητα εκδήλωσης κατολίσθησης σε μία περιοχή έχοντας ως μεταβλητές-επηρεασμού τον σεισμό και την βροχόπτωση σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5: Καταστάσεις των υπό εξέταση μεταβλητών

α/α	Μεταβλητή	Κατάσταση	Ερμηνεία Κατάστασης
1	Κατολίσθηση	K_1 / K_2	Ναι / Όχι
2	Σεισμός	Σ_1 / Σ_2	Ναι / Όχι
3	Βροχόπτωση	B_1 / B_2	Ναι / Όχι

Συνεπώς αν θέλουμε να υπολογίσουμε την δεσμευμένη πιθανότητά $P(K_1 / \Sigma_1 B_2)$ θα ισχύει :

$$P(K_1 / \Sigma_1 B_2) = \frac{P(K_1 \Sigma_1 B_2)}{P(\Sigma_1 B_2)} = \frac{\sum P(K_i \Sigma_1 B_2)}{\sum_{i=1}^2 P(K_i \Sigma_1 B_2)} \quad (3.16)$$

Η εξίσωση (3.16) αναδεικνύει ότι ο αριθμός των όρων στα αθροίσματα είναι άμεσα εξαρτώμενος από τον αριθμό των μεταβλητών που λαμβάνουν μέρος στους υπολογισμούς αλλά και τον αριθμό των καταστάσεων που αντιστοιχεί σε κάθε μεταβλητή καθότι εισέρχονται σαν περίπτωση στο συνολικό άθροισμα. Αποδεικνύεται ότι ο αριθμός των συνδυασμών που αθροίζονται για δυαδικές μεταβλητές, υπολογίζεται από την σχέση 2^{v-k} όπου ν: ο αριθμός των μεταβλητών που μετέχουν στους υπολογισμούς και κ: ο αριθμός των μεταβλητών που είναι δεσμευμένοι σε μία κατάσταση (εξαιρουμένη της υπό εξέταση μεταβλητής).

Η ανωτέρω υπολογιστική διαδικασία μπορεί να μετατραπεί σε ένα δύσκολο πρόβλημα όταν ο αριθμός των μεταβλητών είναι μεγάλος με αρκετές καταστάσεις (states) σε κάθε μεταβλητή. Ιδιαίτερα, μέθοδοι αναλύσεων που βασίζονται πάνω στην θεωρία των πιθανοτήτων έρχονται αντιμέτωποι με πράξεις μεγάλου υπολογιστικού όγκου όπου απαιτούν πόρους και χρόνο για να επιλυθούν. Η κύρια αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έχει να κάνει με τον περιορισμό των καταστάσεων ανά μεταβλητή και τελικώς την επικράτηση δυαδικών μεταβλητών που λύνει μεν το πρόβλημα του όγκου των πράξεων αλλά δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα με ικανοποιητικό τρόπο. Αυτή την προβληματική υπολογιστική διαδικασία τα Μπεύζιανά μπορούν να την διαχειριστούν με έναν ικανοποιητικό τρόπο, θέτοντας σε εφαρμογή την συνθήκη «Markov» ([Neapolitan 2004](#)). Αλλά πριν φτάσουμε εκεί θα δώσουμε

έναν μαθηματικό ορισμό και μία γενικότερη περιγραφή των Μπεϋζιανών Δικτύων.

Έστω \mathcal{H} , ένα μη κενό σύνολο με περιορισμένο αριθμό στοιχείων για το οποίο ισχύει ότι $\mathcal{H} = \{H_1, H_2, H_3 \dots \dots H_V\}$ όπου $v = 1, 2, \dots j \dots n \in \mathbb{N}$ και ορίζουμε E το σύνολο που περιέχει τα στοιχεία $[(H_1, H_2), (H_3, H_4) \dots (H_{V-1}, H_V)]$, τότε ονομάζουμε Κατευθυνόμενο Γράφημα (Directed Graph) το (\mathcal{H}, E) στο οποίο τα στοιχεία του \mathcal{H} είναι οι μεταβλητές που απαρτίζουν το γράφημα ενώ τα στοιχεία του E αντιστοιχούν στα βέλη που καθορίζουν τον τρόπο σύνδεσης των μεταβλητών μεταξύ τους.

$\forall \mathcal{H} = \{H_1, H_2, H_3 \dots \dots H_V\} \wedge E = [(H_1, H_2), (H_3, H_4) \dots (H_{V-1}, H_V)]$ όπου $v = 1, 2, \dots j \dots n \in \mathbb{N}$. Θα υφίσταται μία διαδοχική σειρά σύνδεσης των στοιχείων του \mathcal{H} . Οποιαδήποτε επιμέρους τμήμα της ανωτέρω διαδοχής ονομάζεται υποσύνολο του E , ενώ εάν η διαδοχή των στοιχείων αρχίζει και τελειώνει στο ίδιο στοιχείο, τότε έχω ορίσει μια κυκλική διαδοχή στοιχείων. Αντιθέτως, εάν $X_{\text{τέλους}} \neq X_{\text{αρχής}}$, τότε έχω ορίσει ένα «ακυκλικό» γράφημα διατεταγμένων στοιχείων που καλείται DAG (Directed Acyclic Graph) και συμβολίζεται $\text{DAG}=(\mathcal{H}, E)$.

Τα Μπεϋζιανά Δίκτυα (BNs) ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των «Probabilistic Graph Models» (PGMs) και ονομάζονται «Directed Acyclic Graph» DAG. Σε αυτά τα γραφήματα, κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει μία μεταβλητή ενώ τα βέλη μεταξύ των μεταβλητών αντιπροσωπεύουν την πιθανολογική εξάρτηση μεταξύ των μεταβλητών που συνδέει το κάθε βέλος. Οι δεσμευόμενες πιθανότητες που ορίζονται από το γράφημα μεταξύ των μεταβλητών δύναται να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω δύναται να ειπωθεί ότι τα BNs συνδυάζουν την θεωρία πιθανοτήτων με την θεωρία γραφημάτων και την πληροφορική.

Το γράφημα αποτελείται από ένα σύνολο μεταβλητών και κατευθυνόμενων συνδέσεων μεταξύ των μεταβλητών αντίστοιχα, ενώ όταν αναφερόμαστε στις συνδέσεις μεταξύ των μεταβλητών τότε αναφερόμαστε σε σχέσεις, χρησιμοποιώντας την ορολογία των σχέσεων μιας οικογένειας. Δηλαδή εάν υπάρχει μια σύνδεση από το A στο B λέμε ότι το B είναι παιδί του A και ότι το A είναι γονιός του B ([Jensen 2001](#)). Αναλυτικότερα δύναται να ειπωθεί το βέλος

από τον κόμβο A στον κόμβο B αντιπροσωπεύει την εξάρτηση της μεταβλητής του κόμβου B από τον κόμβο A, δηλαδή η τιμή που λαμβάνει η μεταβλητή B (επηρεάζεται) εξαρτάται από την τιμή ή την κατάσταση της μεταβλητής A ([Goodchild, Jessup et al.](#)). Τα βέλη δεν αποτελούν την ένδειξη της ροής της πληροφορίας μεταξύ των κόμβων, αλλά σχέσεις που βασίζονται στην αρχή της αιτιότητας μεταξύ των μεταβλητών και επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων ως πρόβλεψη (prediction), ως απαγωγή (abduction) και ως ύπαρξη ενός ισχυρού αίτιου που μειώνει την απαίτηση αναζήτησης άλλων πιθανών αιτιών (explaining way). Παράλληλα οι μεταβλητές του δικτύου μπορεί να ερμηνεύσουν ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων, καθώς δύναται να αντιπροσωπεύουν γεγονότα, επικίνδυνα φαινόμενα, τον απειλούμενο πληθυσμό ή κρίσιμες υποδομές, τις επιπτώσεις με οικονομικούς και κοινωνικούς όρους, ή την τρωτότητα των υπό αξιολόγηση στοιχείων.

Το ποσοτικό μέρος του μοντέλου, αφορά τον καθορισμό των δεσμευμένων πιθανοτήτων σύμφωνα με τις σχέσεις που ορίζουν τα βέλη μεταξύ των μεταβλητών στο γράφημα. Ο αριθμός των καταστάσεων των μεταβλητών σε συνδυασμό με τις σχέσεις εξάρτησης που αναπτύσσονται μεταξύ των μεταβλητών θα καθορίσει το μέγεθος των πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων (Cond. Probability Table) που αντιστοιχεί σε κάθε μεταβλητή. Τα κελιά του κάθε πίνακα μπορεί να συμπληρωθούν από την στατιστική ανάλυση των υφιστάμενων δεδομένων ή εάν δεν υφίσταται επαρκή δεδομένα σύμφωνα με την γνώμη και τις πεποιθήσεις ειδικών επί των φαινομένων που εξετάζονται στη περιοχή ενδιαφέροντος.

Επιπρόσθετα υπάρχουν δύο μεθοδεύσεις όσον αφορά την αξιοποίηση των Μπεϋζιανών Δικτύων σε διάφορα γνωστικά αντικείμενα. Η πρώτη αφορά την δημιουργία του γραφήματος με την αξιοποίηση της υποκειμενικής γνώσης του ερευνητή σύμφωνα με τα γενικά στοιχεία που εξετάζονται και την χρήση των δεδομένων για να ορισθούν οι πίνακες των δεσμευμένων πιθανοτήτων μεταξύ των μεταβλητών, ενώ η δεύτερη αφορά την αξιοποίηση των υφιστάμενων δεδομένων με την χρήση κατάλληλου αλγορίθμου ώστε από την ανάλυση των δεδομένων να προκύψουν οι εξαρτήσεις μεταξύ των μεταβλητών και άρα οι συνδέσεις στο γράφημα. Η δεύτερη επιλογή παρότι είναι μία αποδεκτή μεθοδολογική προσέγγιση παρουσιάζει περιορισμένη εφαρμογή, στο πεδίο

των περιβαλλοντικών θεμάτων καθώς έχει αποδειχθεί ότι η δημιουργία των Μπεϋζιανών Δικτύων από την αξιοποίηση υφιστάμενης γνώσης και εμπειρίας (εμπειρικοί κανόνες, διδάγματα καταστροφών, συμπεράσματα από την παρατήρηση των φαινομένων) αποδίδουν ρεαλιστικότερα την πραγματικότητα από τις σχέσεις εξάρτησης που θα οριστούν από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων ([Uusitalo 2007](#)) ([Nyberg, Marcot et al. 2006](#)). Παράλληλα η εμπειρία έχει δείξει ότι η πρώτη προσέγγιση οδηγεί σε πιο ευκολονόητα γραφήματα σε σχέση με την δεύτερη περίπτωση όπου ο αλγόριθμος μπορεί να εντοπίσει την συσχέτιση στις τιμές μεταξύ δυο φαινομένων αλλά δεν είναι απαραίτητο ότι θα ερμηνεύσει και την συμπεριφορά των φαινομένων με ορθό τρόπο.

Ο πυρήνας των Μπεϋζιανών Δικτύων βασίζεται στον ορισμό της δεσμευμένης πιθανότητας. Δηλαδή στην πιθανότητα του X δοθέντος του Y.

$$P(x / y) = \frac{P(x,y)}{P(y)} \Rightarrow P(x, y) = P(x / y) \times P(y)$$

Και του θεωρήματος του bayes (Thomas Bayes 1702-1762)

$$P(x / y) = \frac{P(y/x) \times P(x)}{P(y)}$$

Το μεγάλο πλεονέκτημα του θεωρήματος που εφαρμόζεται πλήρως στα Μπεϋζιανά Δίκτυα έγκειται στο γεγονός ότι έχοντας την δεσμευόμενη πιθανότητα $P(x / y)$ μπορώ να υπολογίσω την $P(y / x)$ και αντίστροφα, λαμβανομένου υπόψη τι είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί αρχικά βάσης τις πληροφορίες που διαθέτουμε. Μια άλλη μορφή της εξίσωσης (2.10) αποτελεί η εξίσωση (2.11), μέσω της οποίας εκφράζετε η αρχή της Αιτιότητας, που είναι κυρίαρχη στη λογική δόμησης των Μπεϋζιανών Δικτύων.

$$P(effect / cause) = \frac{P(cause/effect) \times P(effect)}{P(cause)} \quad (3.17)$$

Το θεώρημα του Bayes, όπως εκφράζεται από την (3.14), αφορά ένα αποτέλεσμα (effect) και ένα αίτιο (cause). Η γενίκευση του τύπου, επιτυγχάνεται

πολύ εύκολα για ν στον αριθμό αποτελέσματα ($effect_1, effect_2, effect_3 \dots \dots effect_v$) (αμοιβαία και αποκλειόμενα), για ν στον αριθμό αιτίες ($cause_1, cause_2, \dots \dots cause_v$)(αφορμές) σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.12) και (2.13) αντίστοιχα.

$$P(effect_m / cause) = \frac{P(cause / effect_m) \times P(effect_m)}{\sum_{m=1}^v (P(cause|effect_m) \times P(effect_m))} \quad (3.18)$$

$$P(effect_m / cause_1, cause_2, \dots \dots cause_v) =$$

$$= \frac{P(cause_1, \dots, cause_v / effect_m) \times P(effect_m)}{\sum_{m=1}^v (P(cause_1, \dots, cause_v | effect_m) \times P(effect_m))} \quad (3.19)$$

Εάν P είναι η από κοινού συνάρτηση πιθανότητας (joint Probability Distribution P) των στοιχείων του συνόλου \mathcal{H} και (\mathcal{H}, E) είναι ένα ακυκλικό γράφημα διατεταγμένων στοιχείων DAG= (\mathcal{H}, E) τότε θα ισχύει ότι $\forall H_i \in \mathcal{H}$ με $i = 1, 2, \dots j \dots n \in \mathbb{N} \Rightarrow$ το $\{(\mathcal{H}, E), P\}$ ικανοποιεί την συνθήκη «Markov». Δηλαδή $\forall H \in \mathcal{H}$, αυτό θα είναι ανεξάρτητο οποιαδήποτε άλλου στοιχείου που ανήκει στο \mathcal{H} , που δεν είναι απόγονος του, λαμβανομένου υπόψη τους γονείς του.

$$\forall H_i \text{ με } i = 1, 2, \dots j \dots n \in \mathbb{N} \xrightarrow{\wedge} H_i, H_y \in \mathcal{H} \wedge H_y \not\equiv \text{descendent of } H_i \Rightarrow$$

$$P(H_i / pa_{H_i} \wedge H_y) = P(H_i / pa_{H_i}) \quad (3.20)$$

Συνέχεια των ανωτέρω αποτελούν οι δύο ερμηνείες της συνθήκης «Markov» για ένα ακυκλικό γράφημα διατεταγμένων στοιχείων DAG= (\mathcal{H}, E) ως ακολούθως:

- Η από κοινού πιθανότητα P του γραφήματος θα ισούται με το συνολικό γινόμενο των δεσμευμένων πιθανοτήτων όλων των μεταβλητών του γραφήματος (\mathcal{H}, E) .

$$\forall \{(\mathcal{H}, E), P\} \text{ όπου } \mathcal{H} = \{H_1, H_2, H_3 \dots \dots H_v\} \text{ με } v = 1, 2, \dots j \dots n \in \mathbb{N} \text{ και } pa_i \text{ με } i = 1, 2, \dots j \dots n \in \mathbb{N} \wedge P(pa_i) \neq 0 \Rightarrow$$

$$P(H_1, H_2 \dots H_{v-1}, H_v) = P(H_v / pa_{H_v}) * P(H_{v-1} / pa_{H_{v-1}}) * \dots * P(H_1 / pa_{H_1}) \quad (3.21)$$

$$P(x_1, x_2 \dots x_{v-1}, x_v) = \prod_{i=1}^v P(H_i / pa_{H_i}) \quad (3.22) \text{ η αλλιώς}$$

$$P(z_1, z_2, z_3 \dots z_n) = \prod_{i=1}^{n-1} P(z_i | z_{i+1} \dots z_n) * P(z_n)$$

$$= \prod_{i=1}^{n-1} P(z_i | \text{parents}(z_i)) * P(z_n) \quad (3.23)$$

- Το κριτήριο d-separate θα ισχύει για τα στοιχεία του \mathcal{H} :

$$\forall H_i \text{ με } i = 1, 2, \dots, j \dots n \in \mathbb{N} \rightarrow H_i, H_j \in \mathcal{H} \wedge S \subset \mathcal{H} \setminus \{H_i\} \Rightarrow$$

$$P(H_i, H_j / S) = P(H_i / S) * P(H_j / S) \quad (3.24)$$

Όταν μεταξύ δυο στοιχείων του \mathcal{H} δεν υπάρχει «ανοιχτό» μονοπάτι που να ενώνει αυτά τα στοιχεία μεταξύ τους (μη ανοιχτό μονοπάτι $\equiv z \rightarrow x \leftarrow d$). Επιπρόσθετα όταν στο μονοπάτι μεταξύ δύο στοιχείων υπάρχουν άλλα στοιχεία σε «κλειδωμένες» καταστάσεις και επίσης το μονοπάτι είναι ανοιχτό, (αλλιώς είναι η προηγούμενη κατάσταση). Αντιθέτως δύο στοιχεία ενώνονται όταν στο μονοπάτι μεταξύ τους, το στοιχείο που έχει «κλειδωμένη» κατάσταση είναι το x ($z \rightarrow x \leftarrow d$) ή απόγονος αυτού ([Pearl 2009](#)).

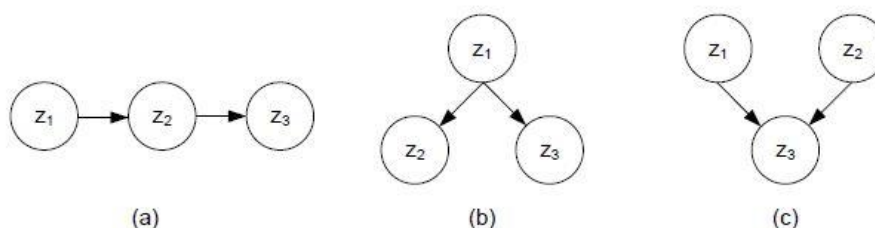
Πλέον μπορούμε να ορίσουμε ένα Bayesian Network ([Wipulanusat, Nakrod et al.](#)) ως ένα σύνολο BN: (G, P) , όπου $G = (\mathcal{H}, E)$ αντιστοιχεί σε ένα ακυκλικό δομημένο γράφημα που ικανοποιεί την συνθήκη «Markov». Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα η συνολική πιθανότητα του γραφήματος να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις δεσμευμένες πιθανότητες μεταξύ των μεταβλητών του και της ανεξαρτησίας που προκύπτουν από τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών στο γράφημα. Είναι ξεκάθαρο ότι ο τελικός σκοπός της εφαρμογής ενός BN είναι ο υπολογισμός των τελικών πιθανοτήτων της μεταβλητής ζητούμενο του γραφήματος αφού ληφθεί υπόψη οποιαδήποτε διαθέσιμη πληροφορία (αποδείξεις) υπάρχει για τις διάφορες μεταβλητές του δικτύου.

Ενώ αν η μεταβλητή z_1 έχει $(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n)$ καταστάσεις και η z_2 έχει $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ με την z_n να έχει (v_1, v_2, \dots, v_n) καταστάσεις τότε η πιθανότητα για οποιαδήποτε μεταβλητή p_x z_1 μπορεί να υπολογιστεί δεσμεύοντάς την, πάνω σε ένα οποιοδήποτε σύνολο αμοιβαίως αποκλειόμενων ενδεχομένων σ_i με $i = 1, 2, \dots, v$ των οποίων η ένωση ισούται με το δειγματικό χώρο (διαμέριση του $P(z_1 = \zeta_1)$ και ορίζεται ως ακολούθως:

$$P(z_1 = \zeta_1) \sum_{i=1}^v P(z_1 | \sigma_i) \times P(\sigma_i) \quad (3.25)$$

Διαδικασία που καλείται marginalization και είναι γνωστή ως Θεώρημα Ολικής Πιθανότητας.

Αναφορικά με το γράφημα υπάρχουν τρία πιθανά είδη σύνδεσης μεταξύ τριών τυχαίων μεταβλητών z_1, z_2, z_3 που «εκμεταλλεύονται» την συνθήκη Markov σε ένα BN ([Charniak 1991](#), [Nielsen and Jensen 2007](#)).



Εικόνα 9 :Τρόποι σύνδεσης των μεταβλητών σε ένα Bayesian Network

Η σειριακή σύνδεση (περίπτωση α) όπου το z_1 έχει μία επίδραση στο z_2 το οποίο με την σειρά του επηρεάζει το z_3 . Όμως αν η κατάσταση του z_2 είναι γνωστή τότε η διαδρομή $z_1 - z_2 - z_3$ είναι μπλοκαρισμένη καθώς η κατάσταση του z_1 δεν επηρεάζει το z_3 . Αυτή η συνθήκη αναφέρεται ως, z_1, z_3 είναι ανεξάρτητα δεδομένου του z_2 τότε αναφέρουμε ότι τα z_1, z_3 είναι d-διαχωρισμένα (d-separated). Τότε η κατανομή πιθανότητας τομής (joint distribution) ορίζεται:

$$\begin{aligned}
 (5) \quad P(z_1, z_2, z_3) &= P(z_3 / z_2, z_1) \times P(z_2, z_1) \\
 &= P(z_3 / z_2, z_1) \times P(z_2 / z_1) \times P(z_1) \\
 &= P(z_3 / z_2) \times P(z_2 / z_1) \times P(z_1)
 \end{aligned}$$

Στην αποκλίνουσα σύνδεση (περίπτωση β) η μεταβλητή z_1 επηρεάζει τις z_2, z_3 όπου η z_1 αποτελεί τον γονέα τους. Εάν η z_1 είναι γνωστή τότε τα z_2, z_3 θεωρούνται ανεξάρτητα d-διαχωρισμένα δοθέντος της z_1 και η κατανομή πιθανότητας τομής (joint distribution) ορίζεται:

$$\begin{aligned}
 (6) \quad P(z_1, z_2, z_3) &= P(z_3 / z_2, z_1) \times P(z_2, z_1) \\
 &= P(z_3 / z_1) \times P(z_2 / z_1) \times P(z_1)
 \end{aligned}$$

Στην συγκλίνουσα σύνδεση (περίπτωση γ), οι γονείς μεταβλητές z_1, z_2 είναι ανεξάρτητες εάν δεν υφίστανται στοιχεία για την μεταβλητή z_3 . Εάν όμως

υπάρχουν στοιχεία που επηρεάζουν την βεβαιότητα του z_3 τότε οι γονείς γίνονται εξαρτώμενοι.

Με βάση τα ανωτέρω σε ένα Μπεϋζιανό Δίκτυο υπάρχει η ευελιξία της εισαγωγής δεδομένων με την μορφή της επικαιροποιημένης πληροφορίας ή «στοιχείου» σε οποιαδήποτε μεταβλητή του δικτύου με ταυτόχρονη επικαιροποίηση των πιθανοτήτων των υπολοίπων μεταβλητών του γραφήματος. Αυτή η δυνατότητα μεταφοράς της πληροφορίας από την μεταβλητή εισόδου προς τις γειτνιάζουσες μεταβλητές και από εκεί σε όλο το γράφημα είναι υπεύθυνη για την ευελιξία των BNs. Αυτό αποτυπώνεται και στο ακόλουθο παράδειγμα όπου τέσσερις μεταβλητές (δυναμικού χαρακτήρα) συνδέονται σε σειρά.

$$\mathbb{H}_1 \rightarrow \mathbb{H}_2 \rightarrow \mathbb{H}_3 \rightarrow \mathbb{H}_4$$

Για το γράφημα, έχω τις δυαδικές μεταβλητές H_1, H_2, H_3, H_4 με $P(H_{11})=0.4, P(H_{21} / H_{11})=0.9, P(H_{21} / H_{12})=0.8, P(H_{31} / H_{21})=0.7$

$P(H_{31} / H_{22})=0.4, P(H_{41} / H_{31})=0.5, P(H_{41} / H_{32})=0.6.$

Υπάρχει πληροφορία ότι η μεταβλητή H_1 έχει πιθανότητα να βρεθεί στην κατάσταση H_{11} ως $P(H_{11})= 0.4 \xrightarrow{1} P(H_{12})= 0.6 \xrightarrow{2}$ Αυτή η πληροφορία θα περάσει στις γειτονικές μεταβλητές που με τη σειρά τους θα την περάσουν ως επικαιροποιημένη πληροφορία σε όλες τις μεταβλητές του δικτύου και θα αλλάξει τις πεποιθήσεις σε αυτές, σε όλο το γράφημα.

Μετάδοση της πληροφορίας από πάνω προς τα κάτω

$$P(H_{21}) = P(H_{21}/H_{11}) * P(H_{11}) + P(H_{21}/H_{12}) * P(H_{12}) = 0.9 * 0.4 + 0.8 * 0.6 = 0.84$$

$$P(H_{31}) = P(H_{31}/H_{21}) * P(H_{21}) + P(H_{31}/H_{22}) * P(H_{22}) = 0.7 * 0.84 + 0.4 * 0.16 = 0.65$$

$$P(H_{41}) = P(H_{41}/H_{31}) * P(H_{31}) + P(H_{41}/H_{32}) * P(H_{32}) = 0.9 * 0.4 + 0.8 * 0.6 = 0.53$$

Εκμεταλλεούμενοι την συνθήκη «Markov» θα επικαιροποιήσουμε τις δεσμευμένες πιθανότητες του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μεταβλητές του δικτύου είναι ανεξάρτητες της μεταβλητής X και των καταστάσεων που μπορεί να περιέλθει, λαμβανομένου υπόψη των γονέων τους.

$$P(H_{21}/H_{11}) = 0.9$$

$$P(H_{31}/H_{11}) = P(H_{31}/H_{21}, H_{11}) * P(H_{21}/H_{11}) + P(H_{31}/H_{22}, H_{11}) * P(H_{22}/H_{11}) \Rightarrow$$

$$P(H_{31}/H_{11}) = P(H_{31}/H_{21}) * P(H_{21}/H_{11}) + P(H_{31}/H_{22}) * P(H_{22}/H_{11}) \Rightarrow$$

$$P(H_{31}/H_{11}) = 0.7 * 0.9 + 0.4 * 0.1 = 0.67. \text{ Ομοίως για τις υπόλοιπες μεταβλητές:}$$

$$P(H_{41}/H_{11}) = P(H_{41}/H_{31}, H_{11}) * P(H_{31}/H_{11}) + P(H_{41}/H_{32}, H_{11}) * P(H_{32}/H_{11}) \Rightarrow$$

$$P(H_{41}/H_{11}) = P(H_{41}/H_{31}) * P(H_{31}/H_{11}) + P(H_{41}/H_{32}) * P(H_{32}/H_{11}) \Rightarrow$$

$$P(H_{41}/H_{11}) = 0.5 * 0.67 + 0.6 * 0.33 = 0.533$$

Έστω τώρα, ότι υπάρχουν πληροφορίες για $P(H_{41}) = 0.53$. Και σε αυτή την περίπτωση η πληροφορία θα περάσει στην γειτνιάζουσα μεταβλητή και θα επεκταθεί στο υπόλοιπο δίκτυο από κάτω προς τα πάνω. Σε αυτή την προσέγγιση χρησιμοποιείται επαναλαμβανόμενα το θεώρημα του Bayes σε συνδυασμό με την ολική πιθανότητα.

$$P(H_{41}) = 0.53$$

Μετάδοση της πληροφορίας από κάτω προς τα πάνω

$$P(H_{31}/H_{41}) = \frac{P(H_{41}/H_{31}) * P(H_{31})}{P(H_{41})} = \frac{0.5 * 0.65}{0.53} = 0.61$$

$$P(H_{21}/H_{41}) = \frac{P(H_{41}/H_{21}) * P(H_{21})}{P(H_{41})} = \frac{P(H_{41}/H_{21}) * 0.84}{0.53}$$

$$P(H_{41}/H_{21}) = P(H_{41}/H_{31}) * P(H_{31}/H_{21}) + P(H_{41}/H_{32}) * P(H_{32}/H_{21}) \Rightarrow$$

$$P(H_{41}/H_{21}) = 0.5 * 0.7 + 0.67 * 0.3 = 0.55$$

$$P(H_{21}/H_{41}) = 0.87$$

$$P(H_{11}/H_{41}) = \frac{P(H_{41}/H_{11}) * P(H_{11})}{P(H_{41})} =$$

$$P(H_{41}/H_{11}) = P(H_{41}/H_{21}) * P(H_{21}/H_{11}) + P(H_{41}/H_{22}) * P(H_{22}/H_{11}) \Rightarrow$$

$$P(H_{41}/H_{11}) = 0.55 * 0.9 + P(H_{41}/H_{22}) * 0.1$$

$$P(H_{41}/H_{22}) = P(H_{41}/H_{31}) * P(H_{31}/H_{22}) + P(H_{41}/H_{32}) * P(H_{32}/H_{22}) \Rightarrow$$

$$P(H_{41}/H_{22}) = 0.5 * 0.6 + 0.6 * 0.6 = 0.66$$

$$P(H_{41}/H_{11}) = 0.55 * 0.9 + 0.66 * 0.1 = 0.56$$

$$P(H_{11}/H_{41}) = \frac{0.56 * 0.4}{0.53} = 0.42$$

Ξεκάθαρα μέσα από αυτό το απλοϊκό παράδειγμα των τεσσάρων μεταβλητών διαφαίνεται η ευελιξία των Μπεϋζιανών Δικτύων στην ενσωμάτωση της νέας πληροφορίας σε οποιοδήποτε σημείο του γραφήματος χωρίς περιορισμούς αναφορικά με την θέση της μεταβλητής που γίνεται δέκτης των νέων δεδομένων. Επιπρόσθετα σχεδόν αμέσως τα νέα δεδομένα θα επικαιροποιήσουν τις πιθανότητες (πλην αυτών που δεν έχουν γονείς στο δίκτυο) όλων των μεταβλητών του δικτύου. Αυτή η ευελιξία οφείλεται σε

κατάλληλους αλγόριθμους που εκμεταλλεύονται το θεώρημα του Bayes και τις ανεξαρτησίες μεταξύ των μεταβλητών του γραφήματος. Βιβλιογραφικά, τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων που αξιοποιεί και βελτιώνει την υπολογιστική δύναμη των Μπεϋζιανών Δικτύων, ενδεικτικά αναφέρονται οι «forward-backwards algorithm» ([Murphy and Weiss 2001](#)), «polytree algorithm» ([Pearl 1986](#)), «junction tree algorithm» ([Nielsen and Jensen 2007](#)), «bucket tree elimination» ([Russell and Norvig 2010](#)) που στο σύνολο τους δουλεύουν σχεδόν με τον ίδιο τρόπο. Τον μετασχηματισμό του γραφήματος για να φτάσει η πληροφορία σε όλες τις μεταβλητές ή την μετάδοση της πληροφορίας μέσω εξισώσεων για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα. Στο κεφάλαιο αυτό έγινε προσπάθεια να αποδοθούν οι λόγοι, γιατί μία μεθοδολογία ανάλυσης και αξιολόγησης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων πρέπει να βασίζεται πάνω στα Μπεϋζιανά Δίκτυα. Η διαύγεια της συλλογιστικής των δικτύων σε συνδυασμό με την περιορισμένη απαίτηση για δεδομένα και όγκου υπολογισμών είναι πλεονεκτήματα που δεν εντοπίζονται εύκολα σε άλλες υπολογιστικές προσεγγίσεις. Κάτω από αυτό το πλαίσιο στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μια πρότυπη μεθοδολογία για την αξιολόγηση και ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή όπου το υπολογιστικό υπόβαθρο της θα κάνει χρήση της Μπεϋζιανής Λογικής.

4. Ένα Πρότυπο Μεθοδολογικό Πλαίσιο Ανάλυσης των Επικίνδυνων Φυσικών Φαινομένων

4.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη μίας πρότυπης μεθοδολογίας στην ανάλυση και διαχείριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, αποτελεί μια εξαιρετική πρόκληση καθότι πρέπει να διαχειριστεί με επιτυχία έναν μεγάλο αριθμό ζητημάτων, που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά και την πολυπλοκότητα των φυσικών φαινομένων. Κάτω από αυτό το πλαίσιο, ο στόχος μίας τέτοιας μεθοδολογίας είναι ο καθορισμός συγκεκριμένων βημάτων και διαδικασιών, ώστε να είναι εφικτή η ανάλυση και αξιολόγηση όλων των φυσικών κινδύνων σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο. Αυτή η πρώτη απαίτηση ως χαρακτηριστικό της μεθόδου, θα επιτρέψει στους χρήστες της να αποκτήσουν την συνολική εικόνα της διαμορφωμένης κατάστασης στην περιοχή μελέτης, αναλύοντας το σύνολο των φυσικών φαινομένων που συνυπάρχουν σε μία περιοχή. Αυτή η συνύπαρξη οδηγεί σε μία δεύτερη απαίτηση ως χαρακτηριστικό της μεθόδου που είναι η δυνατότητα εξέτασης των πιθανών αλληλοεπιδράσεων των φαινομένων που θα προκύψουν από την συνύπαρξη τους. Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν προτείνεται μία πρωτότυπη μεθοδολογία που θα ανιχνεύει και θα καταγράφει αφενός το σύνολο των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή αφετέρου όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των αλληλοεπιδράσεων τους, χωρίς να υφίσταται περιορισμός ως προς τα εξέταση φαινόμενα.

4.2 Η τεχνική της Σπείρας στην Σχεδίαση του Μοντέλου

Για τον καθορισμό λοιπόν της βέλτιστης προσέγγισης στο σχεδιασμό της μεθοδολογίας, ακολουθήθηκε η τεχνική της σπείρας ([Boehm 1988](#)) όπου η διαδικασία σχεδιασμού κατηγοριοποιείται σε τέσσερα διαδοχικά βήματα στη βάση της λογικής του ΑΣΕΑ (Αναγκαιότητα – Σχεδίαση – Εφαρμογή – Αξιολόγηση) και μπορεί να επαναλαμβάνεται συνεχώς από την γέννηση της μεθοδολογίας μέχρι την ωρίμανση της και την επιχειρησιακή αξιοποίηση της. Το πλεονέκτημα που παρέχει αυτή η προσέγγιση, έγκειται στο γεγονός ότι παράγει σε κάθε κύκλο σχεδίασης, ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο. Η διαφορά επικεντρώνεται στην σύνθεση και πολυπλοκότητα του πλαισίου που παράγεται σε κάθε κύκλο εξέλιξης σε σχέση με τον προηγούμενο.



Εικόνα 10: Η τεχνική της σπείρα στην ανάπτυξη μια μεθοδολογίας(Boehm 1988)

Τα αρχικά προϊόντα σχεδιασμού της συγκεκριμένης τεχνικής, αναφέρονται σε απλοϊκές μεθοδολογίες που περιγράφουν με γενικό τρόπο το ζήτημα που αντιμετωπίζουν ή μέρος του ζητήματος αυτού. Με αυτό τον τρόπο, παρέχεται χρόνος στην κατανόηση του ζητήματος, καθώς οι απλοϊκές προσεγγίσεις αντιστοιχούν σε μικρό βαθμό πολυπλοκότητας. Κάθε σπείρα οδηγεί και σε μία διαφορετική εκδοχή της μεθόδου (πιο σύνθετη) καθώς εμπεριέχει τα συμπεράσματα από την αξιολόγηση της προηγούμενης μεθόδου ως διορθωτικές ενέργειες που καλύπτουν τυχόν ατέλειες ή κενά στην μεθοδολογία. Αυτό είναι εφικτό μέσα από το στάδιο της αξιολόγησης, όπου ερευνητές ή χρήστες της μεθόδου, αξιολογούν την πρώιμη έκδοση της, αναφορικά με την εφικτότητα, λειτουργικότητα, αξιοπιστία της, ώστε οι προτάσεις τους να αποτελέσουν τις απαραίτητες διορθώσεις για την εξέλιξη του μοντέλου, ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια της μελέτης του σχεδιασμού. Αυτή η επιχειρησιακή αξιολόγηση της μεθοδολογίας, ακόμη και από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού της, θα περιορίσει τον κίνδυνο να παραμείνει ένα θεωρητικό πλαίσιο χωρίς δυνατότητα εφαρμογής της και θα επιτρέψει την γρήγορη ωρίμανσή της.

Τα τελικά στάδια της εξέλιξης της μεθοδολογίας, αναφέρονται σε ένα θεωρητικό πλαίσιο πλήρως εφαρμόσιμο, που έχει εξαλείψει το σύνολο των ατελειών που παρουσιάστηκαν στα αρχικά στάδια εξέλιξης, συνδυάζοντας τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη με την υπολογιστική δυνατότητα της μεθόδου κάτω από το εννοιολογικό πλαίσιο των γνωστικών πεδίων που αναφέρεται η μεθοδολογία. Είναι λογικό και αναμενόμενο το τελικό στάδιο της μεθοδολογίας να παρουσιάζει πολυπλοκότητα, όμως η εξέλιξη του, έχει γίνει σε στάδια και

κύκλους εξέλιξης, ώστε αυτή η βελτίωση να προκύπτει ως αναγκαιότητα και να είναι αποδεκτή και κατανοητή από το σύνολο των ατόμων που μετέχουν στην διαδικασία εξέλιξής της.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση υπερτερεί απέναντι σε άλλες πρακτικές σχεδιασμού, στο πεδίο των φυσικών φαινομένων, καθώς είναι μία επαναληπτική διαδικασία που διορθώνει συνεχώς το τελικό αποτέλεσμα, βασισμένη στα συμπεράσματα της προηγούμενης κατάστασης. Με βάση την λογική της ικανοποίησης του κεντρικού στόχου, που στην περίπτωσή μας, αποτελεί το γεγονός να λαμβάνονται υπόψη το σύνολο των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και οι αλληλεπιδράσεις τους στην ίδια περιοχή, παράγεται σε κάθε κύκλο μία εκδοχή της μεθόδου που εμπεριέχει στοιχεία, συμπεράσματα, μηχανισμούς αποτυπώσεις, μαθηματικά μοντέλα διαφορετικά από την προηγούμενη εκδοχή εάν ικανοποιείται καλύτερα ο στόχος της μεθόδου. Διαδικασία που ταιριάζει με τον χαρακτήρα των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και αξιολόγηση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων.

4.3 Ορολογία και Άξονες Σχεδιασμού της Μεθοδολογίας

Στην παρούσα διατριβή έγινε προσπάθεια να αποδοθεί μία πρότυπη μεθοδολογική προσπάθεια, που να αναλύει τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, βασιζόμενη στην υπολογιστική ισχύ των Μπεϋζιανών Δικτύων. Κάτω από αυτό το πλαίσιο, έπρεπε να συνδυαστούν ορολογίες και γνωστικά αντικείμενα διαφορετικών επιστημονικών πεδίων με την θεωρία των πιθανοτήτων αλλά και των γραφημάτων. Μέσα από την μελέτη, έγινε αντιληπτό ότι διαφορετικά γνωστικά πεδία διατηρούν διαφορετικούς ορισμούς για το ίδιο φαινόμενο ή διεργασία, δυσχεραίνοντας την κατανόηση βασικών εννοιών και αποδίδοντας διαφορετικά συμπεράσματα. Λόγω της απουσίας κοινών αποδεκτών ορισμών από το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας ([Kappes, Keiler et al. 2012](#)), για το σύνολο των φαινομένων και διεργασιών που συμμετέχουν στην ανάλυση και αξιολόγηση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων στη παρούσα διατριβή, παρατίθενται οι ορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς για οποιαδήποτε μελλοντική εξέλιξη της μεθόδου αλλά και για να γνωστοποιηθεί ο τρόπος που προσεγγίστηκαν

διάφορα ζητήματα του σχεδιασμού. Παράλληλα στον ίδιο πίνακα έχουν προστεθεί βασικές έννοιες που σχετίζονται με την Μπεϋζιανή Λογική.

Πίνακας 6: Βασική Ορολογία στην Ανάλυση Φυσικών Φαινομένων σύμφωνα με UNISTR 2009 ([Burton, Kates et al. 2015](#))

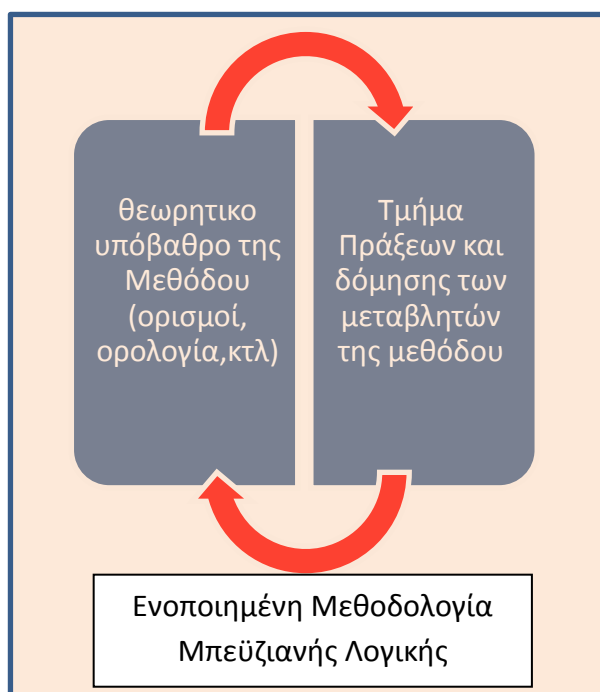
	<u>Στοιχείο</u>	<u>Ορισμός</u>	<u>Στάδιο Εφαρμογής</u>
1	Στοιχεία σε κίνδυνο	Ο πληθυσμός, οι υπηρεσίες και οι υποδομές κλπ. που εκτίθενται σε επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα.	Ανάλυση Κινδύνου
2	Έκτακτο Συμβάν	Ένα ξαφνικό και συνήθως απρόβλεπτο γεγονός που απαιτεί τη λήψη άμεσων μέτρων για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών συνέπειων του.	Ανάλυση Φαινομένων/ Ανάλυση Κινδύνου
3	Εκτίμηση	Δήλωση ή στατιστική εκτίμηση της εμφάνισης μελλοντικού συμβάντος. Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται και ως «πρόβλεψη».	Ανάλυση Φαινομένων/ Ανάλυση Κινδύνου
4	Επικίνδυνο Φυσικό Φαινόμενο	Ένα απειλητικό συμβάν ή η πιθανότητα εμφάνισης ενός ενδεχομένως καταστρεπτικού φαινομένου εντός συγκεκριμένης χρονικής περιόδου και περιοχής	Ανάλυση Φαινομένων
5	Ένταση	Ένας αριθμός με τον οποίο βαθμονομούνται οι επιπτώσεις με οικονομικούς και κοινωνικούς, που προκαλεί ένα επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο σε μία συγκεκριμένη περιοχή.	Ανάλυση Φαινομένων
6	Δευτερογενείς κίνδυνοι	Οι κίνδυνοι που προκύπτουν ως αποτέλεσμα άλλου κινδύνου ή μίας καταστροφής	Ανάλυση Φαινομένων/ Ανάλυση Κινδύνου
7	Συμβάν N-έτους	Η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μέσα σε N έτη τιμή που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς T=N	Ανάλυση Κινδύνου
8	Φυσικοί κίνδυνοι	Φυσικές διεργασίες ή φαινόμενα που συμβαίνουν στη βιόσφαιρα και αποτελούν γεγονότα που μπορεί να προκαλέσουν απώλειες	Ανάλυση Φαινομένων
9	Διακινδύνευση (Αξιολόγηση Κινδύνου)	Μέγεθος που αποδίδει την σοβαρότητα και το μέγεθος των επιπτώσεων συνάρτηση της πιθανότητας εμφάνισης ενός μελλοντικού συμβάντος και των συνεπειών του.	Ανάλυση Κινδύνου
10	Τεχνολογικός κίνδυνος	Κίνδυνος που προέρχεται από τεχνολογικά ή βιομηχανικά ατυχήματά σε υποδομές και δραστηριότητες που μπορούν να προκαλέσουν απώλεια ζωής ή τραυματισμό, υλικές ζημιές, κοινωνική και οικονομική αναστάτωση/ περιβαλλοντική υποβάθμιση.	Ανάλυση Κινδύνου

11	Τρωτότητα	Οι συνθήκες που καθορίζονται από τις φυσικές, κοινωνικές, οικονομικές διαδικασίες και αυξάνουν την ευαισθησία μιας κοινότητας σε συγκεκριμένα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα.	Ανάλυση Κινδύνου
12	Αλληλουχία Γεγονότων (Domino Effect)	Είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα που παράγεται όταν ένα συμβάν διεγείρει μια σειρά από παρόμοια συμβάντα.	Ανάλυση Φαινομένων
13	Αλληλεπίδραση (Interactions, Interrelations, Interconnections)	Δύο μεταβλητές αλληλοεπιδρούν εάν η επίδραση της μιας στην άλλη μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή που διατηρεί η ίδια. Διαδικασία που μπορεί να έχει και αμφίδρομα χαρακτηριστικά.	Ανάλυση Φαινομένων
14	Εξαγωγή Συμπεράσματος (Inference)	Η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος ακολουθώντας τις εξαρτήσεις μεταξύ των μεταβλητών στο γράφημα ενός BN.	
15	Ανάλυση Ευαισθησίας	Μία μέθοδος που αξιολογεί την επίδραση των μεταβλητών εισόδου στην μεταβλητή ερώτημα.	
16	Μεταβλητή τύπου Boolean(Δυαδική)	Μια μεταβλητή τύπου Boolean μπορεί να θεωρηθεί σαν αριθμητική μεταβλητή με δύο μόνο τιμές	

Η προσέγγιση της ανάλυσης πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου σε μία περιοχή, διαφέρει αρκετά από την αντίστοιχη ανάλυση ενός μεμονωμένου φαινομένου. Τα φυσικά φαινόμενα διαφέρουν μεταξύ τους, ως προς τον τρόπο εκδήλωσης τους, την συχνότητα εμφάνισης τους, τις μονάδες μετρήσεως τους και τον τρόπο εξάπλωσης τους στο χώρο. Γι' αυτό συγκεκριμένες επιλογές πέραν των προϋποθέσεων που αναφέρονται στο κεφάλαιο (3) πρέπει να γίνουν στο στάδιο του σχεδιασμού ώστε να καταστεί εφικτό ο σχεδιασμός μίας αξιόπιστης μεθόδου. Η επιλογή του κατάλληλου μαθηματικού υπόβαθρου για να περιοριστούν οι παραδοχές στην ανάλυση των φαινομένων, η δυνατότητα αξιολόγησης των παραγόμενων αποτελεσμάτων αλλά και ο καθορισμός της κλίμακας μελέτης αποτελούν ακρογωνιαίους λίθους για έναν πετυχημένο σχεδιασμό.

Η υιοθέτηση ενός μαθηματικού υπόβαθρου που θα επιτρέψει την αξιολόγηση όχι μόνο όλων των υπό εξέταση επικίνδυνων φαινομένων αλλά και τις αλληλεπιδράσεις αυτών αποτελεί κύρια επιλογή στον σχεδιασμό. Πολλές μεθοδολογίες στο συγκεκριμένο τομέα βασίζονται μόνο σε θεωρητικές προσεγγίσεις χωρίς την δυνατότητα να υποστηρίξουν την εφαρμογή τους, λόγω

απουσίας κατάλληλου μαθηματικού εργαλείου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η εκάστοτε εφαρμογή της προτεινόμενης θεωρίας να μετατρέπεται σε πράξη μέσω απλοϊκών προσεγγίσεων και παραδοχών για τα φυσικά φαινόμενα. Είναι απαραίτητο λοιπόν το θεωρητικό υπόβαθρο και οι υπολογισμοί που ορίζονται μέσα από αυτό, να υποστηρίζονται με αμοιβαίο τρόπο, ώστε να επιτρέψει το πέρασμα από την θεωρία στην πράξη με τις ιδιαιτερότητες που ισχύουν στο συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο. Διαφορετικά μοντέλα που αναφέρονται στην ανάλυση μεμονωμένων επικίνδυνων φαινομένων σε συνδυασμό με διαφορετικές θεωρητικές ερμηνείες αυτών σε επίπεδο μεγεθών, χρόνου και επιπτώσεων θα πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά στο ίδιο υπολογιστικό πλαίσιο.



Εικόνα 11: Ενωσιολογικό Γράφημα Απεικόνισης των δύο μερών της Μεθόδου

Επιπρόσθετα, η ικανότητα να μπορεί το υπολογιστικό κομμάτι της μεθόδου, να συμπεριλάβει στους υπολογισμούς του και διαφορετικές έννοιες που σχετίζονται με την ανάλυση κινδύνου είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο καθορισμός της ταυτότητας των στοιχείων σε κίνδυνο και της τρωτότητας αυτών απέναντι σε συγκεκριμένα επικίνδυνα φαινόμενα, επιτρέπει το πέρασμα από την ανάλυση των φαινομένων στην εκτίμηση της διακινδύνευσης για τα απειλούμενα στοιχεία. Αποτελεί προτέρημα η ευελιξία της μεθοδολογίας να μπορεί να εκτελέσει και τους δύο τύπους ανάλυσης. Τονίζοντας για άλλη μία

φορά ότι αν και μία ολοκληρωμένη διαχείριση αναφέρεται πάντα στον απολογισμό των επιπτώσεων και απωλειών από την παρουσία των επικίνδυνων φαινομένων, εντούτοις η ανίχνευση και ο καθορισμός των επικίνδυνων φαινομένων και των αλληλεπιδράσεών τους, θα καθορίσει το πραγματικό μέγεθος των απωλειών.

Ο καθορισμός εκ των προτέρων της κλίμακας περιοχής που θα αναφέρεται η μεθοδολογία αποτελεί δεσμευτικό παράγοντα για τον σχεδιασμό, καθώς το συγκεκριμένο κριτήριο σχετίζεται με το επίπεδο της επιθυμητής λεπτομέρειας που θέλουμε να ληφθεί υπόψη, αλλά και με τα διαθέσιμα στοιχεία κάθε φορά. Βιβλιογραφικά υφίστανται τρία επίπεδα μελέτης αναφορικά με τον χώρο: α) το τοπικό που αναφέρεται σε επίπεδο Δήμων ή Περιφέρειας, β) το εθνικό που αναφέρεται σε επίπεδο κρατών και το γ) το διακρατικό επίπεδο που αναφέρεται μεταξύ κρατών. Όσο μεγαλύτερη η κλίμακα εξέτασης τόσο περιορίζεται και η δυνατότητα να εξετάζουμε λεπτομέρειες. Συγκεκριμένα σε μια μεγάλη κλίμακα παρατήρησης, η μεθόδευση που επιλέγεται είναι να εντοπιστούν οι περιοχές με την μεγαλύτερη παρουσία και πιθανότητα εκδήλωσης επικίνδυνων φυσικών φαινομένων ώστε να εξεταστεί εκεί ο κίνδυνος που προκύπτει από αυτά. Συνεπώς η κλίμακα μελέτης επηρεάζει την επιλογή ανάλυσης κάθε φαινομένου και μπορεί να αποτελέσει και αποτρεπτικό παράγοντα (εάν επιλεγεί εσφαλμένα) για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η δυνατότητα της διαχείρισης της αβεβαιότητας εντός της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτελεί άλλο ένα κριτήριο επιλογής. Το θέμα της αβεβαιότητας αν και αναφέρθηκε στο κεφάλαιο (3) ως κριτήριο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό μιας μεθοδολογίας, κρίθηκε απαραίτητο να επαναδιατυπωθεί, καθώς αποτελεί ένα από τα κύρια ζητήματα στην μοντελοποίηση των φυσικών φαινομένων. Είναι γεγονός ότι αν και έχουν γίνει προσπάθειες για να οριστεί ένα πλαίσιο καταγραφής της αβεβαιότητας στα προτεινόμενα μοντέλα, αυτό μένει σε θεωρητικό επίπεδο και δεν μεταφράζεται σε νούμερα στα αποτελέσματα των υπολογισμών. Δεν πρέπει να αγνοούμε ότι στο πεδίο της ανάλυσης των φυσικών φαινομένων η αβεβαιότητα εμπεριέχεται σχεδόν σε όλα τα στάδια της μοντελοποίησης, δυσκολεύοντας με αυτό τον τρόπο τον ερευνητή να καθορίσει την ταυτότητά της αλλά και την αλλοίωση των αποτελεσμάτων. Κάτω από αυτό το πλαίσιο κρίνεται απαραίτητο το υπολογιστικό υπόβαθρο που

θα επιλεγεί να παρέχει την δυνατότητα εφαρμογής συγκεκριμένων τεχνικών (αναλύσεων ευαισθησίας ή αβεβαιότητας) χωρίς την απαίτηση μεγάλου όγκου δεδομένων ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί σε κάποιο βαθμό το αποτέλεσμα που θα προσφέρει στον τελικό χρήστη.

Η τεχνική της σπείρας δεν χρησιμοποιήθηκε μόνο στην ανάπτυξη του θεωρητικού πλαισίου της μεθοδολογίας που αποτελεί το μισό κομμάτι της αλλά και στο άλλο μισό που είναι το υπολογιστικό μέρος της μεθοδολογίας. Κατά την δημιουργία ενός Μπεύζιανού Δικτύου, οι βασικές ερωτήσεις σχεδιασμού επικεντρώνονται στα χαρακτηριστικά και είδη των μεταβλητών που συμμετέχουν στο γράφημα. Στις καταστάσεις και τιμές που αυτές οι μεταβλητές θα υιοθετούν στο γράφημα αλλά και οι αλληλοεπιδράσεις και εξαρτήσεις που θα λαμβάνονται υπόψη σε συνδυασμό με το είδος και το μέγεθος του γραφήματος αλλά και η ποιότητα των δεδομένων που θα καλύψουν τα κελιά των πινάκων των δεσμευμένων πιθανοτήτων.

Βασική απαίτηση είναι να αφομοιωθούν στο σύνολό τους όλες οι ορολογίες ώστε να μπορούν να αποδοθούν ως μεταβλητές εισόδου ή συνδυασμό μεταβλητών στο γράφημα με τον πληρέστερο τρόπο. Όσο καλύτερα γνωρίζουμε τις ορολογίες και τους ορισμούς που χρησιμοποιούνται στην μεθοδολογία τόσο πιο απλοϊκά θα τις μεταφέρουμε στο γράφημα. Αυτό σημαίνει μικρότερος αριθμός μεταβλητών στο γράφημα άρα και ευκολότερη διαδικασία υπολογισμού των πιθανοτήτων στις μεταβλητές ενδιαφέροντος. Στοιχείο που έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς στο πεδίο των φυσικών φαινομένων η προσπάθεια να αποδοθούν τα φαινόμενα με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια, καταλήγει σε γραφήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών και αρκετές καταστάσεις σε αυτές. Όλα αυτά θα επιτρέψουν την καλύτερη δυνατή συνεργασία μεταξύ θεωρίας και υπολογιστικού τμήματος, χωρίς να υπάρχουν υπερκαλύψεις ορισμών ή κενά στην ερμηνεία και τις καταστάσεις των μεταβλητών του γραφήματος.

Η Κατανόηση του πυρήνα του προβλήματος θα καθορίσει την πληροφορία που θέλουμε να υπολογίσουμε και τον τρόπο αποτύπωσής της στο γράφημα. Δηλαδή ποιες μεταβλητές, θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε, έχοντας πληροφορίες για αυτές ή ποιες μας είναι άγνωστες. Η καταγραφή των μεταβλητών πριν τοποθετηθούν στο γράφημα έχει δύο λόγους, πρώτον να

περιορίσουμε το φαινόμενο να οδηγηθούμε αμέσως σε ένα εκτενές γράφημα και δεύτερον να υπάρχει (εάν είναι δυνατόν) μία ισορροπία μεταξύ γνωστών – αγνώστων μεταβλητών στο δίκτυο με την εφαρμογή μίας προτεραιοποίησης σπουδαιότητας. Ιδιαίτερα η γνώση μίας μεταβλητής συνήθως μας οδηγεί ενστικτωδώς να την τοποθετήσουμε στο δίκτυο. Προσθέτοντας με αυτό τον τρόπο όγκο στο δίκτυο, χωρίς να προσθέτουμε υπολογιστική αξία.

Τα χαρακτηριστικά των μεταβλητών στο γράφημα σχετίζονται άμεσα με τις μεταβλητές των οποίων τις τιμές ή καταστάσεις, ο χρήστης θέλει να μάθει και με τις μεταβλητές των οποίων ο χρήστης γνωρίζει ήδη, τις τιμές. Ιδιαίτερα για τις άγνωστες μεταβλητές θα πρέπει να καθοριστεί εκ των προτέρων, ο αριθμός των καταστάσεων που μπορεί να βρεθούν ή οι τιμές που μπορεί να αποκτήσουν. Γι αυτό η επιλογή μεταβλητών με δυαδικά χαρακτηριστικά ή συνεχείς τιμές έχει σχέση με τα διαθέσιμα στοιχεία, τον αλγόριθμο που υποστηρίζει το γράφημα και την υπολογιστική ισχύ των συστημάτων. Ιδιαίτερη προσοχή στις μεταβλητές με διακριτές τιμές θα πρέπει να αποδοθεί διότι οι καταστάσεις που μπορεί να βρεθούν, άρα και να εξεταστούν, θα πρέπει να είναι αμοιβαίως αποκλειόμενες και εξαντλητικές. Επιπρόσθετα πρέπει να μη χρησιμοποιούμε διαφορετικές μεταβλητές για να αποδώσουμε διαφορετικές καταστάσεις της ίδιας μεταβλητής, γιατί καταλήγουμε να αυξάνουμε το μέγεθος του δικτύου χωρίς παραγωγική αξία. Το τελευταίο πρόβλημα προκύπτει συνήθως όταν δεν έχουμε κατανοήσει επαρκώς την ορολογία και τους ορισμούς της μεθοδολογίας.

Η διαδικασία της σχεδίασης του γραφήματος αποτελεί την πιο καθοριστική στιγμή, στην υλοποίηση ενός Μπεϋζιανού Δίκτυου. Το κλειδί για την δημιουργία ενός λειτουργικού και αξιόπιστου γραφήματος είναι η αποτύπωση όλων των εξαρτήσεων που ορίζονται από τα βέλη, με την αρχή της αιτιότητας. Για να διασφαλιστεί το επιθυμητό αποτέλεσμα ένας εμπειρικός κανόνας είναι να εντοπιστούν οι μεταβλητές που προκαλούν μεταβολή σε κάποιες άλλες του δικτύου ή άλλες μεταβλητές που αποτρέπουν αυτή την μεταβολή. Δηλαδή όταν ένα φαινόμενο ή στοιχείο ως αποτέλεσμα θα συμβεί εκτός και αν μια πράξη αποτροπής συμβεί προηγουμένως (εκδήλωση μίας έκτακτης βροχόπτωσης κατά την διάρκεια του καλοκαιριού με υψηλές θερμοκρασίες περιορίζει προσωρινά την εκδήλωση πυρκαγιάς). Όταν ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία

της αναγνώρισης, βέλη ενώνουν τις μεταβλητές για να σημανθεί η εξάρτηση και να ικανοποιηθεί ο χαρακτήρας των συνδέσεων του γραφήματος.

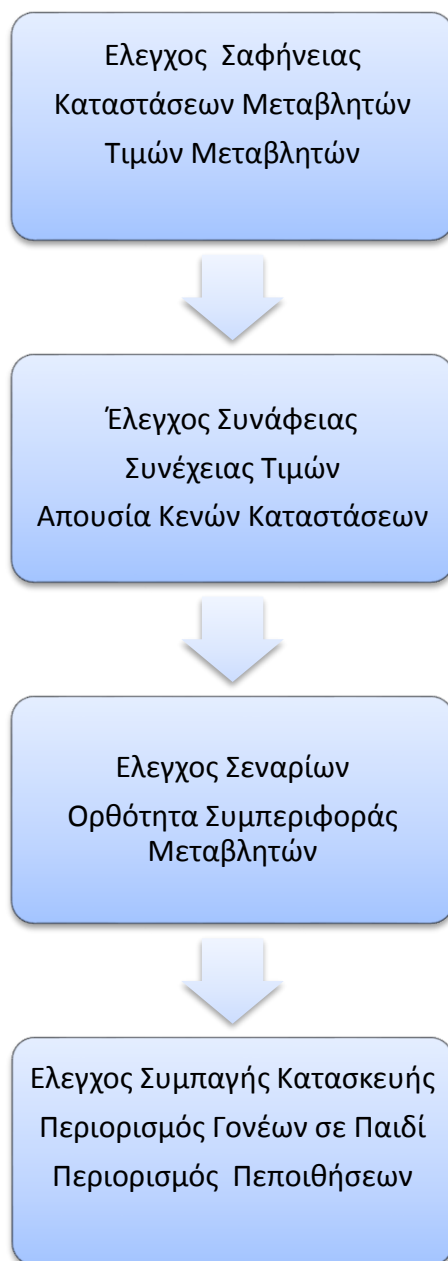
Ο καθορισμός του βαθμού εξάρτησης ή ανεξαρτησίας μεταξύ των μεταβλητών αποτελεί ένα κύριο σημείο ανάλυσης που επηρεάζει τις υπολογιστικές απαιτήσεις ενός δικτύου. Αν εντοπιστούν δύο μεταβλητές στο δίκτυο όπου η μεταβολή της μίας, ξεκάθαρα επηρεάζει την τιμή της άλλης, τότε αυτές οι δύο μεταβλητές είναι εξαρτημένες, η μία από την άλλη. Αν αυτές οι μεταβλητές είναι εξαρτημένες ανεξάρτητα των τιμών που παίρνουν οι άλλες μεταβλητές στο δίκτυο τότε ορίζονται ως ευθέως εξαρτημένες και μπορούν να συνδεθούν με βέλος, αν όχι τότε είναι εξαρτημένες μέσω άλλων μεταβλητών και η εφαρμογή του κριτηρίου «d-separate» πρέπει να εξεταστεί από τον ερευνητή ([Pearl 1982](#)) ([Nielsen and Jensen 2009](#)).

Ο χρόνος στο πεδίο ανάλυσης των φυσικών φαινομένων αποτελεί μέρος των διεργασιών τους, ως εξαιρετικά δυναμικά συστήματα. Η απόδοσή του χρόνου, ως μεταβλητή στο γράφημα και η ενσωμάτωση του, στη ροή του γραφήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς τρόπους. Η εύκολη προσέγγιση είναι να αποδοθεί μία χρονική σειρά εμφάνισης στις μεταβλητές στο γράφημα. Αυτό πρέπει να γίνεται βέβαια με ιδιαίτερη προσοχή και προτεραιοποίηση, καθότι θα περιορίσει τις σχέσεις που θα βασίζονται στο «αίτιο – αποτέλεσμα» ([Korb and Nicholson 2010](#)). Άλλη μία έμμεση εισαγωγή του χρόνου είναι μέσω των μεταβλητών ($t-1$) που ορίζουν με τις καταστάσεις τους παρελθοντικές τιμές μιας μεταβλητής που βρίσκεται στο παρόν (t) ή σχεδιάζοντας ένα γράφημα για την χρονική στιγμή (t) το οποίο θα μεταβάλλεται ή θα αναπαράγεται όλο ή τμήμα του γραφήματος για την χρονική στιγμή ($t+1$).

Περιορισμός του αριθμού των βελών σε ένα γράφημα δεν είναι απαίτηση για την δημιουργία απλών γραφημάτων αλλά συνεκτικών δικτύων. Ο αριθμός των βελών καθορίζει τις εξαρτήσεις και άρα το μέγεθος των πινάκων των δεσμευμένων πιθανοτήτων κάθε μεταβλητής του γραφήματος. Πρέπει να περιορίζονται οι πολλοί γονείς σε μία μεταβλητή γιατί αυξάνονται το μέγεθος του πίνακα και οι απαιτούμενοι υπολογισμοί. Εμπειρικά ισχύει ο κανόνας της μη υιοθέτησης πάνω από τέσσερις γονείς σε ένα κόμβο – παιδί. Εάν κάτι τέτοιο δεν μπορεί να επιτευχθεί τότε η μεταβολή της μορφής του γραφήματος με την

προσθήκη μίας μεταβλητής σε αυτό, ώστε να απορροφήσει μέρος των γονέων, είναι η ενδεδειγμένη λύση (divorced method).

Επαναξιολόγηση του γραφήματος πριν την είσοδο των τιμών των δεσμευμένων πιθανοτήτων. Αρχικά, α) επανέλεγχος σαφήνειας ως προς τις μεταβλητές που έχουν χρησιμοποιηθεί ώστε να μην υπάρχουν αλληλοκαλύψεις των μεταβλητών που έχουν υιοθετηθεί από τον ερευνητή, β) επανέλεγχος συνάφειας ως προς των καταστάσεων που αντιπροσωπεύουν οι μεταβλητές. Πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ίδιες καταστάσεις όταν αναφέρονται στην ίδια περιγραφή μεταξύ διαφορετικών μεταβλητών γ) επανέλεγχος σεναρίων ως προς την ορθότητα των καταστάσεων των μεταβλητών. Το γράφημα θα πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει στην εξέταση συγκεκριμένων σεναρίων που θα μπορεί να αντιπροσωπεύουν το πιο δυσμενές ή το πιο πιθανό γεγονός που μπορεί να συμβεί ή πρέπει να επαληθεύει την ικανότητά του να υπολογίζει την πληροφορία για το ζήτημα που κατασκευάστηκε. Πρακτικά θα πρέπει να ελεγχθεί ότι ικανοποιεί την ανάγκη για την οποία προέκυψε η απαίτηση να υλοποιηθεί. Αυτό μπορεί να γίνει πολύ εύκολα, επιλέγοντας ένα σενάριο (case study) που είναι γνωστά τα αποτελέσματα του.



Εικόνα 12: Έλεγχος 4S (Σαφήνεια-Συνάφεια-Σενάριο-Συμπαγής Κατασκ.) της ποιότητας του Δικτύου

Η εφαρμογή των πεποιθήσεων του ερευνητή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο όταν απουσιάζουν τα δεδομένα, γιατί η πεποίθηση του συνήθως πάσχει από υπερβολική αυτοπεποίθηση για την επιλογή μίας τιμής ή κατάσταση μίας μεταβλητής του γραφήματος λόγω της γνώσης που μπορεί να διαθέτει ο ίδιος για το συγκεκριμένο θέμα ή διότι η συγκεκριμένη κατάσταση, του είναι πιο γνώριμη από το παρελθόν. Και στις δυο όμως περιπτώσεις, η πληροφορία που εισέρχεται στο γράφημα αλλά και τους υπολογισμούς μέσω των πινάκων δεν είναι αντικειμενική και οδηγεί σε εσφαλμένες εκτιμήσεις και αποτελέσματα. Μία

αποδεκτή λύση είναι η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για το υπό εξέταση ζήτημα, όταν τα δεδομένα απουσιάζουν ή δεν είναι διαθέσιμα.

Η αξιολόγηση ενός γραφήματος αφορά την επιβεβαίωση σε τι βαθμό το γράφημα μας, αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο το πρόβλημα που εξετάζει. Μία απλή προσέγγιση στο κομμάτι της αξιολόγησης είναι ο έλεγχος των αποτελεσμάτων με κάποιον ειδικό στο θέμα που εξετάζει την συμπεριφορά των μεταβλητών του γραφήματος με γνωστές αντιδράσεις που είναι αποδεκτές βιβλιογραφικά. Άλλοι τρόποι αφορούν την αξιοποίηση στατιστικών μεθόδων ([Nielsen and Jensen 2007](#), [Korb and Nicholson 2010](#)), αξιολογώντας τα αποτελέσματα μέσω της επιβεβαίωσης αυτών σε σχέση με γνωστά αποτελέσματα διαφόρων περιπτώσιολογικών μελετών. Επίσης είναι εφικτό να εφαρμόσουμε μία ανάλυση ευαισθησίας ώστε να εντοπιστούν οι μεταβλητές που διαχειρίζονται δεδομένα εισόδου και ασκούν την μεγαλύτερη επίδραση στην μεταβλητή που απαντά στο ερώτημα ή εντοπίζοντας στις μεταβλητές εισόδου τις τιμές πέραν των οποίων δεν μεταβάλλονται οι μεταβλητές του γραφήματος.

4.4 Πρότυπη μέθοδος διαχείρισης αλληλοεπιδράσεων

Μέχρι τώρα, οι μέθοδοι και τεχνικές που εφαρμόζονται στο συγκεκριμένο πεδίο καλύπτουν ένα εύρος επιλογών, που συνήθως αναφέρονται από την ανίχνευση και ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων μέχρι και την αξιολόγηση του συνολικού κινδύνου, που απορρέει από αυτά με πολλές φορές την ύπαρξη ασαφών ορίων μεταξύ τους. Αν και ο αριθμός όλων αυτών των προσπαθειών, σε ερευνητικό και βιβλιογραφικό επίπεδο, συνεχώς αυξάνει δεν έχουν καταφέρει να περιορίσουν τον αριθμό των φυσικών καταστροφών. Πράγματι, διάφορα προτεινόμενα μοντέλα που ενσωματώνουν δύσκολες υπολογιστικές τεχνικές (fuzzy Logic, Neural Networks, Parametric/ non Parametric techniques, Bayesian Networks) ([Chongfu 1996](#), [Chongfu 1997](#), [Chib 2001](#)) δεν κατάφεραν να περιορίσουν το μέγεθος των απωλειών σε οικονομικούς και κοινωνικούς όρους, όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Αυτή η ασυμφωνία μεταξύ της εξέλιξης των μοντέλων στην ανάλυση και διαχείριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και της χαμηλής απόδοσής τους, στην προσπάθεια να προστατέψουν τον άνθρωπο και την κοινωνία, οδήγησε αρκετούς τελικούς

χρήστες αυτών, να αμφισβητήσουν την αξία τους απέναντι στην αξιολόγηση και διαχείριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων.

Η διαχείριση (περιορισμός ή αποτροπή) των επιπτώσεων από την εκδήλωση των επικίνδυνων φαινομένων προϋποθέτει τον υπολογισμό της διακινδύνευσης του στοιχείου που απειλείται κάτω από συγκεκριμένο φαινόμενο. Συνεπώς οι εσφαλμένες εκτιμήσεις των μοντέλων, οφείλονται σε εσφαλμένα μεγέθη της διακινδύνευσης, όπου δύο λόγοι είναι υπεύθυνοι γι' αυτό. Αυτός των εσφαλμένων μεγεθών και ανίχνευσης των επικίνδυνων φαινομένων σε μία περιοχή και εκείνος του υπολογισμού της τρωτότητας για τα απειλούμενα στοιχεία. Η τρωτότητα έμμεσα σχετίζεται με το είδος και το μέγεθος των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, αφού υπολογίζεται για το απειλούμενο στοιχείο (πληθυσμός, υποδομές, οικονομικοί όροι, διεργασίες περιβάλλοντος) πάντα εξεταζόμενη υπό κάποιο συγκεκριμένο επικίνδυνο φαινόμενο. Άρα κύριο σημείο στην διαδικασία υπολογισμών ενός μοντέλου αποτελεί η σωστή ανίχνευση των επικίνδυνων φαινομένων στην περιοχή μελέτης.

Συνεπώς, η αδυναμία να ανιχνεύσουμε και να καταγράψουμε την δυναμική ενός φαινομένου σε μία περιοχή ενδιαφέροντος λόγω έλλειψης δεδομένων ή λόγω εσφαλμένων δεδομένων σε συνδυασμό με την πρακτική να μην λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις των φαινομένων σε μία περιοχή, αποτελούν τους σημαντικότερους λόγους για τους οποίους οδηγούμαστε σε μη ικανοποιητική αποτύπωση και αναγνώριση των επικίνδυνων φαινομένων σε μία περιοχή. Όμως η προαναφερθείσα διαδικασία, ως πρώτο βήμα ανάλυσης αποτελεί το κύριο μέρος της διαδικασίας υπολογισμού της διακινδύνευσης για τα απειλούμενα στοιχεία. Εάν αποτύχουμε να αναγνωρίσουμε τον σωστό αριθμό φαινομένων σε μία περιοχή αγνοώντας τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις, αλληλοσυσχετίσεις και αλληλοσυνδέσεις μεταξύ αυτών, είναι βέβαιο ότι θα αποτύχουμε και να αποδώσουμε τον πραγματικό κίνδυνο που προκύπτει από την παρουσία των φαινομένων σε μία περιοχή.

Γι' αυτό τον λόγο η διαδικασία αναγνώρισης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων (Multi Hazard Identification Process) MHIP πρέπει να είναι το κυριότερο και σημαντικότερο στάδιο ανάλυσης στην αξιολόγηση του κινδύνου που απορρέει από τα επικίνδυνα φαινόμενα (Multi Hazard Risk Assessment) MHRAP. Αυτό θα οδηγήσει όχι μόνο σε ορθότερες εκτιμήσεις για τα μεγέθη των

επιπτώσεων σε σχέση με πριν, αλλά θα βελτιώσει και το επίπεδο της ετοιμότητας και επίγνωσης του πληθυσμού στην περιοχή μελέτης. Η έλλειψη της πραγματικής συναίσθησης του κινδύνου τόσο σε είδος όσο και σε μέγεθος, έχει οδηγήσει στο παρελθόν σε μεγάλες καταστροφές όπου το περιβάλλον και ο άνθρωπος κατέγραψαν μεγάλες απώλειες. Για να αντιμετωπίσουμε τις μέχρι τώρα προαναφερθέντες δυσκολίες και προκλήσεις, μία πρότυπη μεθοδολογική διαδικασία που αφορά την αναγνώριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, σχεδιάστηκε ως μέρος μίας διαδικασίας αναγνώρισης κινδύνου για τα απειλούμενα στοιχεία με σκοπό να παρέχει μία συνολική εικόνα των επικίνδυνων φαινομένων σε αριθμό και μέγεθος.

4.4.1 Ο θεσμός του «Μη απομονωμένα στοιχεία».

Κύριο ρόλο στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας παίζει ο χαρακτηρισμός του «μη απομονωμένου» φαινομένου στην περιοχή μελέτης. Δηλαδή τα επικίνδυνα φαινόμενα δεν αντιμετωπίζονται ως μοναδικά και ανεξάρτητα γεγονότα, όπως στις περισσότερες αναλύσεις ([Van Westen, Montoya et al. 2002](#), [Durham 2003](#), [Arnold, Dilley et al. 2005](#), [Cozzani, Gubinelli et al. 2005](#)). Αυτή η προσέγγιση έχει σαν αποτέλεσμα να αναγνωριστούν τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα σε μία περιοχή ως διεργασίες που δεν είναι απομονωμένες, αλλά αλληλοεπιδρούν με άλλα φαινόμενα ή διεργασίες και χαρακτηριστικά, όπως οι ανθρώπινες διεργασίες ή τα χωρικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ως διαφορετικοί μηχανισμοί και διεργασίες στο ίδιο περιβάλλον.

Αυτή η ερμηνεία της αλληλοεπίδρασης, επιτρέπει να εδραιωθούν συνδέσεις μεταξύ των φαινομένων, διεργασιών και χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος, που να δηλώνουν την συσχέτιση μεταξύ τους και δευτερευόντως, αλλά όχι εξαντλητικά, οι σχέσεις αυτές να μπορεί να ερμηνευτούν με την αρχή της αιτιότητας. Κάτω από αυτό το πλαίσιο, όλοι οι παράγοντες που βρίσκονται σε μία περιοχή, μπορεί να αναλυθούν και εξεταστεί η δημιουργία σχέσεων μεταξύ τους, που θα βασίζονται στα διαθέσιμα δεδομένα αλλά και στην λογική της ερμηνείας των σχέσεων «Αιτίου-Αποτελέσματος».

4.4.2 Η αιτιατή σχέση μεταξύ φαινομένων (Cause Effect Connections)

Στην παρούσα διατριβή η αιτιατή σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών ορίζεται ως: Η εκδήλωση ενός φαινομένου ή η μεταβολή των χαρακτηριστικών του, από μία

αρχική ισορροπημένη κατάσταση, λόγω μίας διέγερσης ή δημιουργία προϋπόθεσης από ένα άλλο φαινόμενο, διεργασία ή χαρακτηριστικό (μεταβλητών, σε γενικότερο πλαίσιο), κατηγοριοποιεί το πρώτο ως «αίτιο», που προκάλεσε την αλλαγή ή την δημιουργία του δεύτερου φαινομένου, το οποίο κατηγοριοποιείται ως «αποτέλεσμα» και εκφράζει το μεταβαλλόμενο ή το εκδηλωμένο στοιχείο.

Αυτός ο γενικός ορισμός δεν περιορίζεται σε δύο στοιχεία αλλά είναι πιθανό μία μεταβλητή να έχει διπλή ιδιότητα. Δηλαδή η ίδια μεταβλητή να είναι το αίτιο και το αποτέλεσμα ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικές συνδέσεις. Η κατάσταση αυτή παράγει μία αλληλουχία αιτιατών σχέσεων που αντιστοιχούν σε αλληλουχία συμβάντων. Κατάσταση που είναι εξαιρετικά σύνηθες στην μελέτη και παρατήρησή των φυσικών φαινομένων.

Στην παρούσα Διατριβή, η σχέση «Αιτίου – Αποτελέσματος», πέραν του προαναφερθέντος ορισμού της, στηρίζεται πάνω σε δύο παραδοχές: α) Η σχέση αξιολογείται ως γραμμική, και γι' αυτό συμβολίζεται με ένα ευθύ βέλος, όπου η κατεύθυνση είναι από το A στο B ($A \rightarrow B$), δηλαδή το A είναι το αίτιο και το B, το αποτέλεσμα. β) Το βέλος που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο μεταβλητών των σχέσεων πρέπει να έχει ένα ελάχιστο μήκος, δηλαδή εννοιολογικά δεν μπορεί να αναφέρεται σε σημείο, που πρακτικά σημαίνει ότι το αίτιο και το αποτέλεσμα θα μπορούσαν να συμβαίνουν ταυτόχρονα, στην ίδια σύνδεση μεταξύ δύο στοιχείων ([Sterian 2013](#), [Toma 2013](#)).

4.4.3 Είδη Αιτιατών Σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών

Αρχικά πρέπει να ειπωθεί ότι οι σχέσεις «Αιτίου – Αποτελέσματος» μπορεί να αναπτυχθούν μεταξύ των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων. Παραδείγματα τέτοιων σχέσεων είναι «Σεισμός – Κατολίσθηση» όπου ο σεισμός είναι η αιτία για την εκδήλωση κατολισθήσεων σε ικανοποιητική απόσταση από το επίκεντρό εκδήλωσης του. Επίσης η σχέση «Σεισμός – Τσουνάμι – Πλημμύρα» αποδεικνύει ότι μία πλημμύρα μπορεί να είναι το αποτέλεσμα ενός σεισμού ως διαδοχή διαφορετικών συμβάντων καθώς σε αυτή την περίπτωση το Τσουνάμι διατηρεί διπλή ιδιότητα, αυτή του αποτελέσματος του σεισμού και της αιτίας για την εμφάνιση της Πλημμύρας. Το τελευταίο παράδειγμα αναδεικνύει την ικανότητα των σχέσεων «Αιτίου – Αποτελέσματος» να αποτυπώνουν σχέσεις

μεταξύ επικίνδυνων φαινομένων, όπου με κατάλληλο συνδυασμό αυτών, να προκύπτουν πιο σύνθετες συνθήκες μεταξύ επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, πέραν της απλής σχέσεως, μεταξύ δύο μεταβλητών.

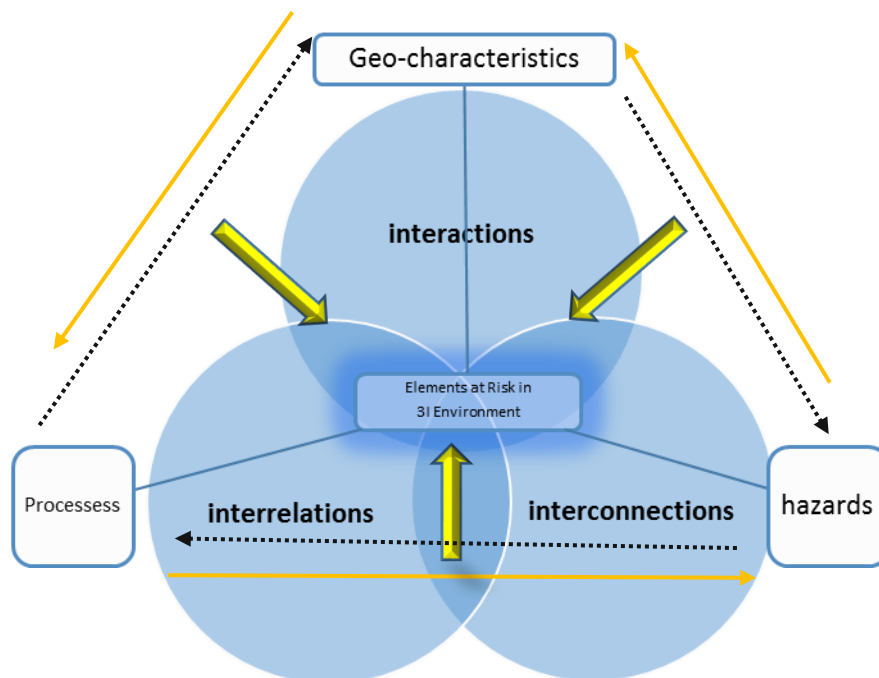
Επιπρόσθετα οι σχέσεις «Αιτίου – Αποτελέσματος» μπορεί να αναπτυχθούν μεταξύ επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και των φυσικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Σε αυτή την περίπτωση τα χαρακτηριστικά της περιοχής συνήθως αποτελούν το αίτιο στην σχέση, χωρίς όμως να είναι απόλυτο. Πράγματι ένας σεισμός μπορεί να αλλάξει τα χαρακτηριστικά μίας περιοχής ενώ και τα ίδια χαρακτηριστικά μπορεί να προκαλέσουν μόνα τους ή σε συνδυασμό με άλλα γεγονότα την εκδήλωση ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου. Επί παραδείγματι, σε περιοχή με έντονη κλίση μπορεί να προκληθούν εκτεταμένες κατολισθήσεις εάν έχει βρέξει για αρκετές μέρες ή ποτάμια λάσπης μπορεί να είναι αποτέλεσμα έντονων βροχοπτώσεων σε περιοχή χωρίς δέντρα αλλά με ικανοποιητική κλίση.

Τέλος, οι σχέσεις «Αιτίου – Αποτελέσματος» μπορεί αναπτυχθούν μεταξύ των ανθρωπίνων διεργασιών και επικίνδυνων φυσικών φαινομένων ή των χαρακτηριστικών μίας περιοχής. Στην πρώτη περίπτωση ένας ισχυρός σεισμός μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή ενός φράγματος με ανυπολόγιστες επιπτώσεις για την ευρύτερη περιοχή ενώ και ένα ατύχημα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις μίας χώρας μπορεί να μεταβάλει δραστικά την τοπική περιοχή με τις επιπτώσεις του ατυχήματος να παρουσιάζονται εκτός εθνικών συνόρων.

Τα παραπάνω παραδείγματα με εύκολο τρόπο υποδηλώνουν ότι συνδέσεις μεταξύ επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, χαρακτηριστικών περιοχής και ανθρωπίνων διεργασιών μπορεί να εδραιωθούν με ποικίλους τρόπους. Γι' αυτό κρίνεται αναγκαίο πέραν, της ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων που αποτελούν την βάση για τον καθορισμό των υπό εξέταση φαινομένων η διαδικασία ανίχνευσης να επεκτείνεται μεταξύ όλων των διαθέσιμων μεταβλητών και να ερευνώνται όλες οι πιθανές σχέσεις με βάση την αρχή της αιτιότητας στην περιοχή μελέτης.

4.4.4 Γραφική απεικόνιση των στοιχείων που συμμετέχουν στην μεθοδολογία

Στην εικόνα (13) αποτυπώνεται γραφικά η έννοια του ενιαίου χώρου συνύπαρξης των τριών διαφορετικών ειδών σχέσεων που συνυπάρχουν και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους ως αποτέλεσμα διαφορετικών συνθηκών. Στο κέντρο του τριγώνου βρίσκονται τα απειλούμενα στοιχεία (πληθυσμός, υποδομές, ανθρώπινες διεργασίες, περιβάλλον, κοκ) ως κεντρικό στοιχείο στην διαδικασία της ανίχνευσης καθώς τα απειλούμενα στοιχεία, που εξετάζονται κάθε φορά, είναι αυτά που θα καθορίσουν το είδος των επιπτώσεων που ερευνάται στο στάδιο του υπολογισμού της διακινδύνευσης.



Εικόνα 13: Γραφική απεικόνιση των στοιχείων που συμμετέχουν στην Μεθοδολογία 3I

Στις κορυφές του τριγώνου είναι οι τρεις διαφορετικές μεταβλητές (επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα, χαρακτηριστικά περιοχής, ανθρώπινες διεργασίες) ενώ οι πλευρές του τριγώνου, αντιπροσωπεύουν τις ευκρινείς σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Αυτό το οποίο αγνοείται από τους ερευνητές και είναι εξαιρετικά εσφαλμένο, αλλά και επικίνδυνο για τα απειλούμενα στοιχεία είναι ο χώρος μεταξύ των κορυφών του τριγώνου και του κέντρου που ευρίσκονται τα στοιχεία. Αυτή η διαθέσιμη «περιοχή» που ευρίσκεται μεταξύ των επικίνδυνων φαινομένων και των απειλούμενων στοιχείων, αντιπροσωπεύει τις κατάλληλες συνθήκες σε χρόνο και χώρο ώστε τα

επικίνδυνα φαινόμενα, χαρακτηριστικά περιοχής και διεργασίες να αλληλοεπιδράσουν (interact, interconnect, interrelate) μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο τελικός κίνδυνος που προκύπτει από αυτά. Αν και κάποιες συνδέσεις (κάτι που αντιπροσωπεύουν τα βέλη μεταξύ των κορυφών) είναι εύκολο να προκύψουν από τα διαθέσιμα δεδομένα και το ιστορικό των συμβάντων στην περιοχή μελέτης, είναι εξαιρετικά επικίνδυνο να αγνοούνται οι πιθανές συνδέσεις που βασίζονται στις αλληλοεπιδράσεις των φαινομένων, καθώς μεταβάλουν τον τελικό κίνδυνο.

4.4.5 Η μεθοδολογία «3I» (Interactions-Interrelations-Interconnection)

Η μεθοδολογία χαρακτηρίζεται ως μία πολύ-επίπεδη διεργασία στην οποία κάθε επίπεδο ανάλυσης για να ολοκληρωθεί, πρέπει να εκτελεστεί ένας συγκεκριμένος αριθμός ενεργειών. Στόχος αποτελεί η ανίχνευση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, διεργασιών και χαρακτηριστικών της περιοχής, που μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο και να ερευνηθούν αιτιατές σχέσεις και αλληλοεπιδράσεις μεταξύ τους.

Το πρώτο επίπεδο απαιτεί την συμμετοχή του ερευνητή στη διαδικασία, καθώς θα πρέπει να επιλέξει τα φυσικά φαινόμενα, γεωφυσικά χαρακτηριστικά και ανθρώπινες διεργασίες που θα περιγράψουν την πραγματικότητα και ιδιαιτερότητες της περιοχής ενδιαφέροντος. Η επιλογή των ανωτέρω μεταβλητών πρέπει να γίνει με κριτήρια: το ζήτημα που εξετάζεται, την συχνότητα εμφάνισης των διαφόρων φαινομένων, το μέγεθος των επιπτώσεων που θα επιφέρουν και τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις μεταξύ μεταβλητών, που εύκολα προκύπτουν από την εξέταση σε πρώτο βαθμό των διαθέσιμων δεδομένων. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της συλλογής των στοιχείων για την κάθε κατηγορία (φυσικά φαινόμενα, χαρακτηριστικά της περιοχής, ανθρώπινες διεργασίες), τότε το σύνολο των στοιχείων που έχουν επιλεγεί από τον ερευνητή ή ομάδα ερευνητών αφού επανελεγχθούν για την ορθότητα τους και την αποφυγή να υπάρχουν διαφορετικές μεταβλητές που θα περιγράψουν το ίδιο φαινόμενο, ενοποιοούνται και τοποθετούνται σε πίνακα διαστάσεων όσο και το άθροισμά τους, όπου οι μεταβλητές τοποθετούνται στην πρώτη οριζόντια και κατακόρυφη σειρά και στήλη αντίστοιχα ενώ η διαγώνιος αποτελείται από κλειδωμένα μαύρα κελιά σύμφωνα με τον πίνακα (5). Σε αυτό το πρώτο στάδιο

θα διερευνηθούν το σύνολο των στοιχείων για την δυνατότητα ύπαρξης σχέσης «Αιτίου – Αποτελέσματος» μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι η κάθε μεταβλητή εξετάζεται με όλες τις υπόλοιπες στην λογική της μίας προς μίας αντιστοιχίας με την διαδικασία να επαναλαμβάνεται δύο φορές, (την πρώτη φορά η κάθετη στήλη είναι το «αίτιο» και η οριζόντια το «αποτέλεσμα», ενώ την δεύτερη φορά θα ισχύει το ανάποδο).

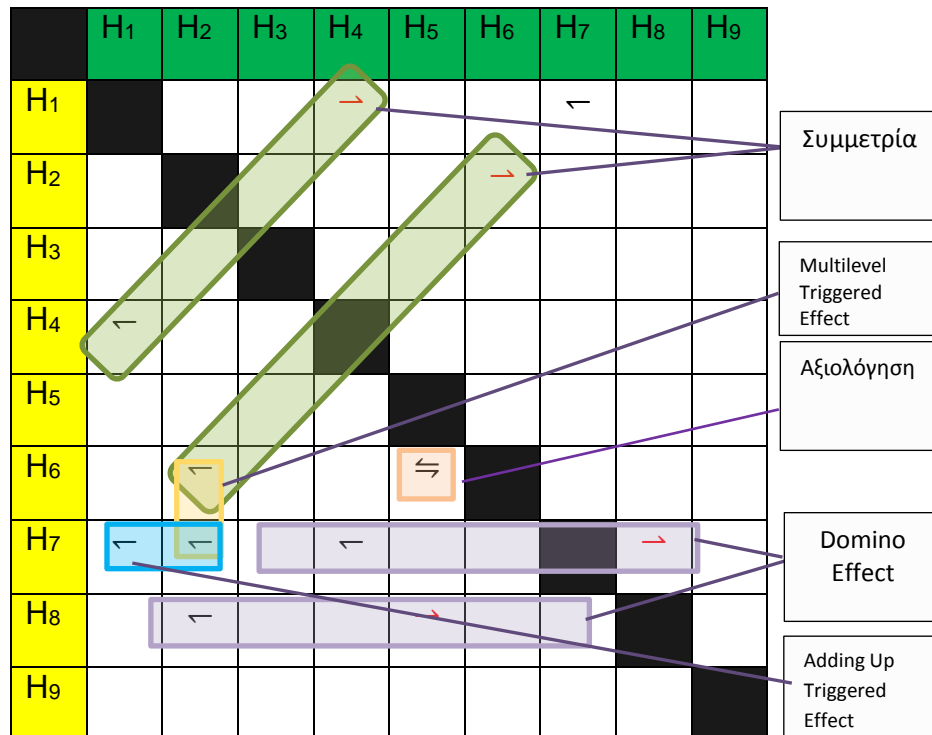
Στο κενό κελί ($K_{m \times l}$) του πίνακα που αντιστοιχεί στη m σειρά και στη l στήλη όπου $m, l \in \{1, 2, 3 \dots n\}$ όπου $n = (\text{Διάσταση του πίνακα})$, τοποθετείται ένα βέλος με την κατεύθυνση που εξετάζεται κάθε φορά η σχέση «Αιτίου – Αποτελέσματος», όταν μπορεί να οριστεί μία πιθανή σύνδεση. Αν αυτό δεν είναι δυνατό, τότε το κελί παραμένει κενό. Υφίστανται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- Αν η αιτιατή σχέση μπορεί να οριστεί μόνο κατά την μία κατεύθυνση, τότε τα βέλη εμφανίζονται συμμετρικά της διαγωνίου του πίνακα.
- Αν η αιτιατή σχέση μπορεί να δικαιολογηθεί και στις δύο κατευθύνσεις, τότε θα εμφανιστούν δύο βέλη αντίθετης κατεύθυνσης στο ίδιο κελί και θα πρέπει ο ερευνητής να αξιολογήσει τα διαθέσιμα δεδομένα (συχνότητα εμφάνισης, συμβάντα, διαδοχή γεγονότων) και να κρατήσει την μία από τις δύο κατευθύνσεις για το γράφημα.
- Αν μία μεταβλητή εμφανίσει δύο διαφορετικές αιτιατές σχέσεις στην στήλη ή γραμμή της με την ίδια μεταβλητή και δεν είναι στο ίδιο κελί τα βέλη, τότε έχει γίνει λάθος στην αξιολόγηση τους και απαιτείται επανέλεγχος.
- Αν μία μεταβλητή παρουσιάζει σε μία στήλη ή σειρά, περισσότερα του ενός βέλη τα οποία βρίσκονται ΑΡ και ΔΕ της διαγωνίου του πίνακα, τότε η συγκεκριμένη μεταβλητή συμμετέχει σε ένα «domino effect» και πρέπει να εξεταστεί λεπτομερώς το συγκεκριμένο φαινόμενο μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία του πίνακα διότι τα συγκεκριμένα φαινόμενα έχουν την ιδιότητα να πολλαπλασιάζουν τα μεγέθη των επιπτώσεων στο απειλούμενο στοιχείο.

Μόλις εξεταστούν όλες οι πιθανές σχέσεις και συμπληρωθούν τα απαιτούμενα κελιά του πίνακα, καταγράφεται το σύνολο των αιτιατών σχέσεων που επιλέχθηκαν μέσω του πίνακα και εξετάζονται ως προς την

διαθεσιμότητα των υφιστάμενων δεδομένων. Οι τελικές μεταβλητές που επιλέχθηκαν μέσω των αιτιατών σχέσεων διαχωρίζονται σε δύο σύνολα (G, E), το ένα αφορά τις μεταβλητές που έχουν χαρακτηριστεί σαν «αιτίες» και το άλλο τις μεταβλητές που χαρακτηρίστηκαν «αποτελέσματα» και εδώ τελειώνει το πρώτο στάδιο της ανάλυσης.

Πίνακας 7: Πίνακας Ανίχνευσης Αιτιατών Σχέσεων (με ΚΟΚΚΙΝΟ ΒΕΛΟΣ εξετάζεται η σχέση κίτρινο → πράσινο ενώ με ΜΑΥΡΟ ΒΕΛΟΣ η σχέση πράσινο → κίτρινο)



Στο δεύτερο στάδιο της μεθοδολογίας, οι αιτιατές σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση του πρώτου σταδίου, εξετάζονται για την ύπαρξη συγκεκριμένων τύπων συνδέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Επί τους ουσίας εξετάζονται τα χαρακτηριστικά όλων των συνδέσεων καθώς διαφορετικοί τύποι συνδέσεων, μπορούν να παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα και να οδηγήσουν σε σύνθετα φαινόμενα. Σκοπός αποτελεί ο έλεγχος και τυχόν αναγνώριση τριών συγκεκριμένων σύνθετων συνδέσεων (DOMINO EFFECT, AUTE, MULTE) που η παρουσία τους, στο στάδιο της ανάλυσης των φαινομένων σημαίνει πολλαπλασιασμό των επιπτώσεων στο στάδιο της ανάλυσης του κινδύνου και της διακινδύνευσης ή διέγερση πολλαπλών φαινομένων ταυτόχρονα ή διαδοχικά.

Αρχικά, τα δύο σύνολα των στοιχείων, G και E εξετάζονται ως προς την τομή τους. Αν η τομή των δύο συνόλων είναι μηδενική τότε δεν εμφανίζονται φαινόμενα τύπου «domino effect» στην περιοχή.

$C \cap E =$

$$= \begin{cases} \emptyset, & \text{domino effect, cascade phenomena are not possible among elements of } A \\ \neq \emptyset, & \text{domino effect, cascade phenomena are possible among elements of } A \end{cases}$$

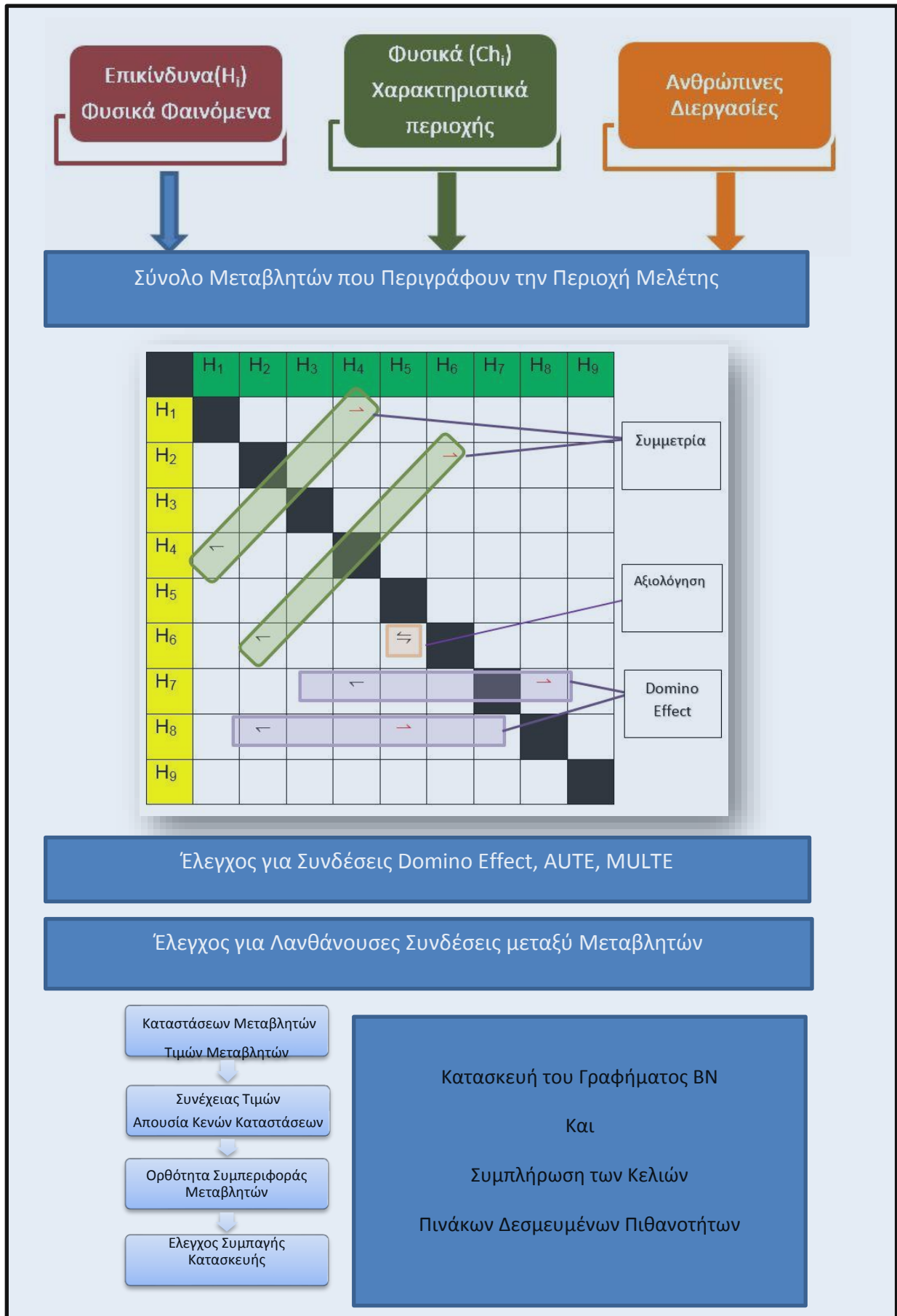
Αν η τομή των δύο συνόλων δεν είναι το κενό σύνολο, τότε καταγράφονται τα κοινά στοιχεία και εντοπίζονται οι σχέσεις που μπορεί να αποτελέσουν μία αλληλουχία γεγονότων(σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του πίνακα).

Παράλληλα εξετάζονται άλλα δύο φαινόμενα, αυτό του φαινομένου της Αθροιστικής Διέγερσης (Adding Up Triggerring Effect) AUTE που προκύπτει όταν ο αριθμός των αιτιών είναι μεγαλύτερος του αριθμού του αποτελέσματος με αριθμό σχέσεων ίσο με τον αριθμό των αιτίων. Πρακτικά σημαίνει ότι κάποια «αίτια» έχουν κοινό αποτέλεσμα, το οποίο λειτουργεί πολλαπλασιαστικά και οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους του φυσικού φαινομένου που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα.

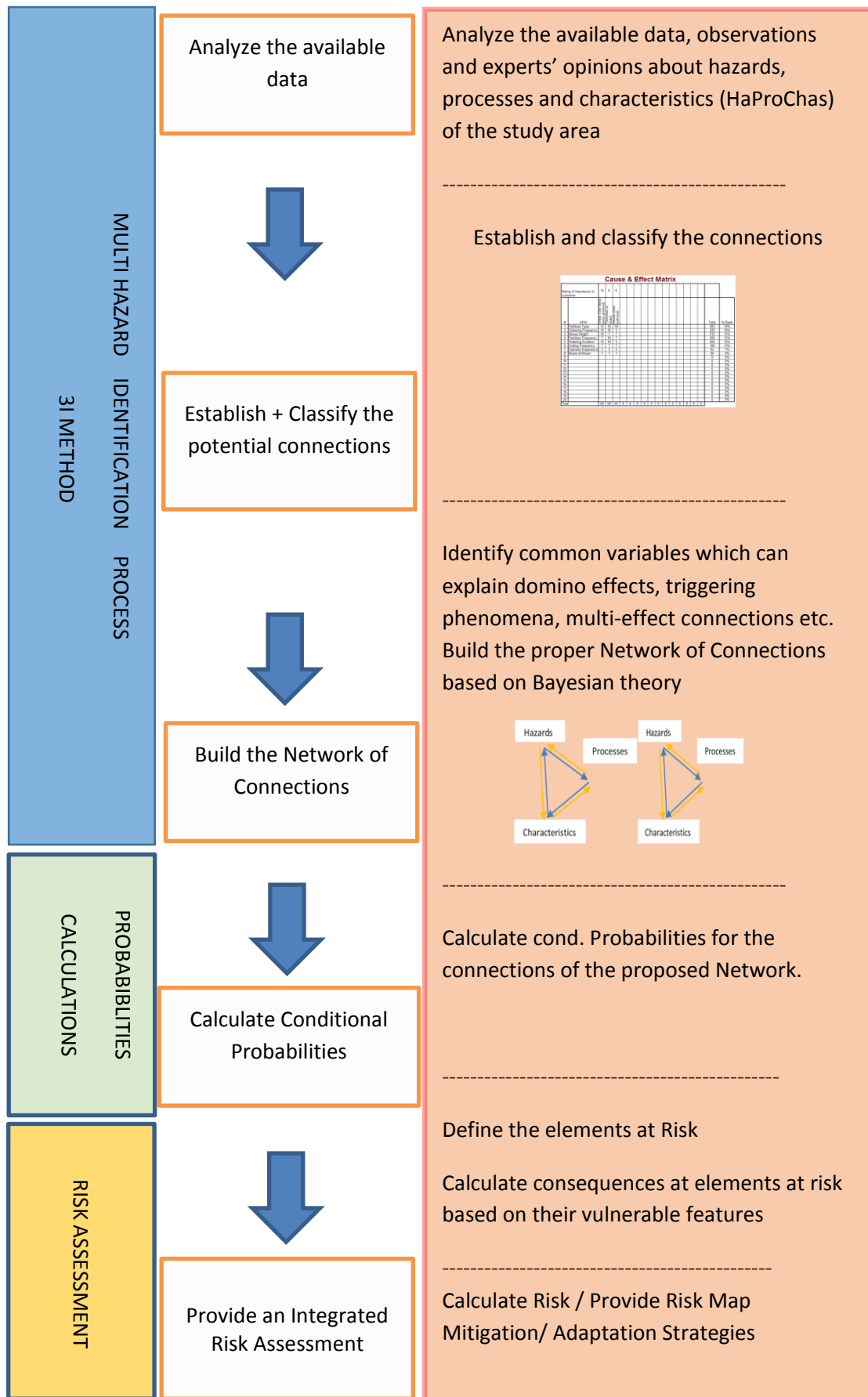
If Number of cause $\geq 2 \wedge$ Number of Effect = 1 for a number of connection $\geq 2 \wedge$ then this situation describes the Adding Up Triggerring Effect (AUTE -see table 1-)

Αντιθέτως το φαινόμενο της Πολυεπίπεδης Διέγερσης (Multi Level Triggerring Effect) MULTE απαιτεί τον συνδυασμό πέραν της μίας σύνδεσης και προκύπτει όταν ο αριθμός των μεταβλητών που έχουν χαρακτηριστεί ως αιτίες είναι μονάδα ενώ ο αριθμός μεταβλητών που έχουν χαρακτηριστεί ως αποτελέσματα είναι ίσος με τον αριθμό των συνδέσεων. Πρακτικά σημαίνει ότι ένα κοινό «αίτιο» έχει πολλά αποτελέσματα, το οποίο οδηγεί συνήθως σε κατακόρυφη αύξηση των αριθμών των φαινομένων που μπορεί να εκδηλωθούν ταυτόχρονα ή διαδοχικά στην ίδια περιοχή μελέτης και οι επιπτώσεις να απευθύνονται σε παραπάνω από ένα απειλούμενο στοιχείο.

If Number of cause = 1 \wedge Number of Effect ≥ 2 for a number of connection ≥ 2 then this situation describes the Multi-Level Triggerring Effect(MULTE-see table 1-)



Εικόνα 15: Στάδια Ανίχνευσης Σχέσεων μεταξύ Μεταβλητών Προτεινόμενης Μεθοδολογίας 3I



Εικόνα 16: Διάγραμμα των τριών βημάτων (Ανίχνευση, Υπολογισμού Πιθανοτήτων και Υπολογισμού Διακινδύνευσης μίας ολοκληρωμένης Μεθόδου)

Σε αυτό το βήμα καθορίζεται επίσης και ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων ή των τιμών των μεγεθών που δύναται να βρεθούν οι μεταβλητές που επιλέχθησαν από τον ερευνητή μας. Ο αριθμός των καταστάσεων ή των τιμών θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της Μπεϋζιανής Λογικής γιατί αυτές οι επιλογές θα αποτελέσουν την περιγραφή του φαινομένου στο γράφημα του μοντέλου μας. Γι αυτό, πρέπει να ικανοποιούνται όλες τις πιθανές συνθήκες που μπορεί να βρεθεί η μεταβλητή και στο σύνολό τους, όλες οι καταστάσεις ή τιμές να είναι αμοιβαία αποκλειόμενα ή ασυμβίβαστα γεγονότα. Επιπρόσθετα αν και δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των καταστάσεων που δύναται να αντιπροσωπεύουν μια μεταβλητή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όσο μεγαλύτερος αυτός ο αριθμός, τόσο πολυπλοκότερες και μεγαλύτερες σε όγκο γίνονται οι εκτελούμενες υπολογιστικές πράξεις στο γράφημα. Συνήθης προσέγγιση για λόγους απλότητας αλλά και οικονομίας πράξεων είναι η υιοθέτηση ενός «δυναμικού χαρακτήρα» στις μεταβλητές. Δηλαδή οι πιθανές καταστάσεις που δύναται να βρεθεί μία μεταβλητή, αποδίδονται σε δύο (ναι/όχι, μαύρο/ άσπρο, έγινε/δεν έγινε, κτλ) με το πλεονέκτημα όπως ειπώθηκε των περιορισμών των πράξεων αλλά την μη ικανοποιητική αποτύπωση της πραγματικότητας σε συγκεκριμένα φαινόμενα. Αν υπάρχουν λόγοι που σχετίζονται με την αποτελεσματική αποτύπωση μιας μεταβλητής (πχ θερμοκρασία) θα μπορούμε να υιοθετήσουμε και την επιλογή των συνεχών τιμών στην αποτύπωση των καταστάσεων μιας μεταβλητής αν υπάρχουν δεδομένα που καλύπτουν αυτή την απαίτηση και υποστηρίζεται από το λογισμικό.

Στο τρίτο στάδιο ανάλυσης, γίνεται προσπάθεια να ανιχνευθούν συνδέσεις που δεν είναι ορατές ή δεν προκύπτουν από τα δεδομένα της περιοχής με βάση το ιστορικό συμβάντων και μετρήσεων. Η κεντρική ιδέα αναφέρεται στο γεγονός ότι αν και έχει παρατηρηθεί η ύπαρξη αλλαγών στο περιβάλλον μετά την εκδήλωση μίας φυσικής καταστροφής, αυτές οι αλλαγές σπάνια ερευνώνται ως νέα αίτια που μπορεί να διεγείρουν νέα ή να ενισχύσουν υφιστάμενα φαινόμενα (δευτερογενή κίνδυνοι) στην ίδια περιοχή. Οι αλλαγές αυτές εάν θέλουμε να τις εντοπίσουμε θα λέγαμε ότι επικεντρώνονται στην χρήση γης (Land Use) και στην κάλυψη γης (Land Cover) της περιοχής που έχει υποστεί την καταστροφή. Πράγματι οι αλλαγές στην κάλυψη γης από ένα επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο

έχουν να κάνουν με αλλαγές σε υψόμετρο, μεταβολή της αναλογίας κάλυψης από φυτά μίας περιοχής, μεταβολή στην στάθμη ύδατος κ.α. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες και προϋποθέσεις για την εκδήλωση ενός άλλου φαινομένου που δεν υφίσταται στην περιοχή ή να μεταβάλλουν μεγέθη ενός υφιστάμενου φαινομένου πέρα από την τιμή (κατώφλι) ηρεμίας. Παρόμοια οι μεταβολές στην χρήση γης λόγω μίας καταστροφής ή εκδήλωσης ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου, μπορεί να δημιουργήσουν τις συνθήκες για μία νέα καταστροφή που αυτή την φορά θα έχει και τεχνολογικά χαρακτηριστικά. Η καταστροφή που συνέβη στις εγκαταστάσεις Fukushima, της Ιαπωνίας αντανάκλα ακριβώς αυτό το σενάριο. Ένα φυσικό φαινόμενο προκάλεσε μεταβολές στην χρήση της γης (κυριολεκτικά την ακύρωσε) και με την σειρά του προκάλεσε μία δεύτερη καταστροφή. Για να είναι εφικτή η αντιμετώπιση τέτοιων γεγονότων από την προτεινόμενη μεθοδολογία, ορίστηκαν οι μεταβλητές LCC και LUG (Land Cover Change) και (Land Use Change) αντίστοιχα.

Οι μεταβλητές αυτές, στόχο έχουν να αποτυπώσουν τις συνθήκες που δημιουργούν λανθάνουσες συνδέσεις (Latent Connections) στην περιοχή μελέτης. Ως λανθάνουσες συνδέσεις ονομάζουμε τις σχέσεις που συνδέουν με την λογική του «Αιτίου-Αποτελέσματος» φαινόμενα και διεργασίες, χωρίς προφανή σύνδεση μεταξύ τους και χωρίς να είναι ανιχνεύσιμες με την διαδικασία του πίνακα. Αυτές του τύπου οι συνδέσεις, μπορεί να ενεργοποιηθούν άμεσα ή να παραμένουν ανενεργές μέχρι να δημιουργηθούν οι κατάλληλες χρονικές συνθήκες για να εκδηλωθούν. Επί παραδείγματι, η καταστροφή από πυρκαγιά ενός δάσους σε μία πλαγιά το καλοκαίρι, δημιουργεί τις συνθήκες για την δημιουργία καταστροφικών ποταμιών λάσπης ή κατολισθήσεων στην ίδια περιοχή, την εποχή των βροχοπτώσεων, ενώ η φραγή ενός ρέματος από μια κατολίσθηση λόγω ενός σεισμού σε μία περιοχή μπορεί να προκαλέσει άμεσα το φαινόμενο της πλημμύρας στην ευρύτερη περιοχή. Αυτή λοιπόν η εκδήλωση επικίνδυνων φαινομένων που οφείλεται στην αλλαγή της κάλυψης γης, αποτελεί μία εξαιρετικά επικίνδυνη συνθήκη διότι τα απειλούμενα στοιχεία δεν είναι έτοιμα να ανταποκριθούν σε μία τέτοια κατάσταση καθώς δεν έχουν προετοιμαστεί για κάτι τέτοιο.

Οι μεταβλητές LCC και LUG έχουν χαρακτήρα Boolean και εισάγουν ως νέα πληροφορία (για το γράφημα του Μπεϋζιανού Δικτύου) τις αλλαγές που έγιναν στην κάλυψη της γης από το πρωταρχικό γεγονός. Με αυτό τον τρόπο, συνδέονται οι επιπτώσεις που προέκυψαν από το πρώτο γεγονός με τις απαιτούμενες συνθήκες για την εκδήλωση ενός δεύτερου επικίνδυνου φαινομένου ή διεργασίας στην ίδια περιοχή. Αυτή η πρωτότυπη προσέγγιση παρουσιάζει δύο εξαιρετικά πλεονεκτήματα. Πρώτον ότι παρέχεται πλέον η δυνατότητα να επικαιροποιηθεί η πληροφορία για την κάλυψη της γης μετά το πρώτο συμβάν στο γράφημα με αποτέλεσμα την επικαιροποίηση των αποτελεσμάτων και δεύτερον με αυτό τον τρόπο να διευρύνει την αντίληψη των χρηστών για ένα ενδεχόμενο νέο συμβάν στην περιοχή που έχει υποστεί ήδη μία καταστροφή.

Οι μεταβλητές LCC και LUC παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση με το είδος και τα χαρακτηριστικά του πρωτεύοντος φαινομένου, καθώς είναι προφανές ότι διαφορετικά φαινόμενα επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο και ένταση την κάλυψη της γης σε μία περιοχή ενδιαφέροντος. Όπως ειπώθηκε ποσοτικά οι μεταβλητές θα αποτελούν μέρος του γραφήματος ενός Μπεϋζιανού Δικτύου με την χρήση δύο δεσμευμένων πιθανοτήτων. Αυτή της πιθανότητας να αλλάξει η κάλυψη γης λόγω του πρωταρχικού φαινομένου που θα ισούται με μονάδα καθώς αφού εξετάζω την περίπτωση, σημαίνει πρακτικά ότι έχει συμβεί και της πιθανότητας να εκδηλωθεί ένα δεύτερο γεγονός έχοντας ως δεδομένο ότι έχει αλλάξει η κάλυψη της γης. Στην δεύτερη περίπτωση το μέγεθος της πιθανότητας για να υπολογιστεί απαιτεί εκτεταμένη αξιολόγηση των νέων δεδομένων και συνθηκών που ισχύουν στην περιοχή ενδιαφέροντος. Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων στην εξέταση τέτοιων στοιχείων καθώς δεν συνηθίζεται από τους ερευνητές, ο ορισμός των μεγεθών των πιθανοτήτων θα βασίζεται αρχικά στην αντίληψη και τις γνώσεις του ερευνητή.

4.4.6 Η Δημιουργία του Μπεϋζιανού Δικτύου στην Μεθοδολογία «3I»

Μετά την ολοκλήρωση και του τρίτου επιπέδου ανάλυσης των φαινομένων και των πιθανών αλληλοεπιδράσεων τους, έχει ικανοποιηθεί η διαδικασία ανίχνευσης των φαινομένων, διεργασιών και χαρακτηριστικών αλλά και των αιτιατών σχέσεων τους και αρχίζει η κατασκευή του γραφήματος του Μπεϋζιανού Δικτύου. Η κατασκευή του γραφήματος, ακολουθεί συγκεκριμένη σειρά για να αποφευχθούν λάθη ή παραλείψεις. Πρώτα εισέρχονται στο γράφημα οι μεταβλητές που δεν έχουν γονείς και αποκαλούνται και μεταβλητές εισόδου πληροφορίας (input variables) . Κατόπιν ακολουθούν οι μεταβλητές και σχέσεις τύπου Domino Effect, AUTE και MULTE και μετά οι υπόλοιπες μεταβλητές με τις αναγκαίες σχέσεις τους, όπου με αυτό τον τρόπο ολοκληρώνεται η γραφική απεικόνιση των εξαρτήσεων των μεταβλητών.

Ένα πλεονέκτημα των Μπεϋζιανών Δικτύων αποτελεί το γεγονός ότι από την στιγμή που υπάρχει το γράφημα μπορεί να παραχθούν άμεσα αποτελέσματα εάν έχουν συμπληρωθεί τα κελιά των πινάκων των δεσμευμένων πιθανοτήτων. Γι αυτό μετά την ολοκλήρωση του γραφήματος, ορίζω τις καταστάσεις των μεταβλητών για τις οποίες δεν έχει ολοκληρωθεί μέχρι τώρα η συγκεκριμένη διαδικασία. Αυτό αφορά μόνο τις μεταβλητές που ανήκουν σε Λανθάνουσες Συνδέσεις καθώς για τις υπόλοιπες έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία στο δεύτερο στάδιο.

Τελευταίο βήμα στην κατασκευή του Μπεϋζιανού Δικτύου αποτελεί η αντιστοίχιση των πιθανοτήτων στις καταστάσεις των μεταβλητών που υιοθετήθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Η αντιστοίχιση των πιθανοτήτων με τις επιλεγμένες καταστάσεις των μεταβλητών δύναται να ικανοποιηθεί με ποικίλους τρόπους, που ο καθένας τους εμπεριέχει και διαφορετικό επίπεδο αβεβαιότητας. Δύναται να γίνει μέσω μιας στατιστικής ανάλυσης και μελέτης των διαθέσιμων δεδομένων (Statistical Quantitative Approach) SQA για τα φαινόμενα που εμπεριέχονται στο δίκτυο ή αξιοποιώντας την υφιστάμενη γνώση και εμπειρία (Empirical Qualitative Approach) EQA που κατέχουν επιστήμονες και ειδικοί στον συγκεκριμένο επιστημονικό τομέα σε όλο τον κόσμο. Σε κάθε περίπτωση, οι μεταβλητές μπορεί να πάρουν συνεχείς ή διακριτές τιμές ή την πεποίθηση του ερευνητή με την μορφή πιθανοτήτων εάν απουσιάζουν τα δεδομένα, κάτι εξαιρετικά διαδεδομένο στην ανάλυση των

φυσικών φαινομένων. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της συμπλήρωσης των τιμών μπορούμε να παράγουμε αποτελέσματα σύμφωνα με τα ισχύοντα κάθε φορά δεδομένα.

Παρουσιάστηκε λοιπόν μία μεθοδολογία τεσσάρων επιπέδων (με την κατασκευή του γραφήματος) που αφορά την ανάλυση και διαχείριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων, διεργασιών και γεω-χαρακτηριστικών σε συνδυασμό με τις αλληλοεπιδράσεις τους σε μία περιοχή. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει ποσοτικά χαρακτηριστικά βασισμένη πάνω στα Μπεϋζιανά Δίκτυα με την ικανότητα όμως να μπορεί να διαχειριστεί όλων των ειδών των δεδομένων αναλόγως την διαθεσιμότητα της κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης.

Η ικανότητα των Μπεϋζιανών Δικτύων να διαχειρίζονται μεταβλητές στα γραφήματα διαφορετικού αντικειμένου και ιδιοτήτων, μας επιτρέπει να μεταβούμε από την ανάλυση των φαινομένων στην ανάλυση της διακινδύνευσης εάν προστεθούν στο ίδιο γράφημα, μεταβλητές που θα περιγράφουν τα απειλούμενα στοιχεία και μεταβλητές που θα αποτυπώνουν τις απώλειες από την εκδήλωση ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου. Κάτω από αυτό το πλαίσιο η μεθοδολογία που αναπτύξαμε σε αυτό το κεφάλαιο μπορεί να αποτελέσει το κεντρικό κομμάτι μίας ολοκληρωμένης προσέγγισης στην διαχείριση του κινδύνου που απορρέει από την παρουσία πέραν του ενός επικίνδυνου φαινομένου σε μία περιοχή σύμφωνα με το γράφημα της εικόνας (7). Αυτή η ευελιξία των BN είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που τα καθιστά κατάλληλη επιλογή για την ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων.

Η ύπαρξη μεταβλητών στο γράφημα ενός Δικτύου που εμπεριέχουν χωρική πληροφορία (κάλυψη γης, υδρολογικό δίκτυο, υψόμετρο κ.α.) επιτρέπει την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την αξιοποίησή τους μέσω των ΓΣΠ χωρίς ιδιαίτερο κόπο. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει άμεσα μόλις ολοκληρωθεί η υπολογιστική διαδικασία και χωρίς να υφίσταται ιδιαίτερη απαίτηση για μετατροπή των δεδομένων σε άλλη μορφή. Επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την υιοθέτηση σύγχρονων τρόπων οπτικοποίησης των τελικών αποτελεσμάτων χωρίς την απαίτηση μεγάλων υπολογιστικών μετασχηματισμών αυτών.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία στην λειτουργία μίας μεθοδολογίας. Αποτελέσματα που είναι ασαφή ή αξιολογούνται επισφαλώς, δεν μπορούν να αποτελούν οδηγό σχεδίασεως και αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών ούτε να βοηθήσουν τους υπεύθυνους να λάβουν μία κρίσιμη απόφαση, με αποτέλεσμα την ακύρωση της αξίας της μεθοδολογίας. Για τους ανωτέρω λόγους, αποτελεί απαίτηση και ταυτόχρονα πρόκληση ο έλεγχος των αποτελεσμάτων. Η αβεβαιότητα σε όλα τα στάδια εκδήλωσης, καταγραφής διεργασιών ενός φαινομένου σε συνδυασμό με την απουσία δεδομένων και την έλλειψη γνώσης σε πολλά από αυτά, καθιστά εξαιρετικά δύσκολη μία διαδικασία αξιολόγησης.

Τα Μπεϋζιανά Δίκτυα παρέχουν την δυνατότητα αξιολόγησης του γραφήματος, μέσω της Ανάλυσης Ευαισθησίας (Sensitive Analysis) αυτού. Ο έλεγχος ευαισθησίας επιτρέπει να εντοπιστούν οι μεταβλητές που επηρεάζουν στο μέγιστο βαθμό το αποτέλεσμα του δικτύου ώστε σε δεύτερο χρόνο να γίνει προσπάθεια μεμονωμένα να βρεθούν τρόποι για να βελτιωθεί η ποιότητα των δεδομένων των συγκεκριμένων μεταβλητών, παρέχοντας έτσι το μεγαλύτερο κέρδος για το δίκτυο.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι αν και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ως διαδικασία στο γνωστικό αντικείμενο της παρατήρησης των Φυσικών Φαινομένων βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, χωρίς την καθιέρωση προτύπων και κοινών αποδεκτών διαδικασιών, η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασιζόμενη στα Μπεϋζιανά Δίκτυα παρουσιάζει την δυνατότητα ελέγχου των αποτελεσμάτων με ποιοτικά (έλεγχος αποτελεσμάτων με ειδικούς επί του θέματος) ή ποσοτικά (sensitive analysis) κριτήρια, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο αξιόπιστα αποτελέσματα.

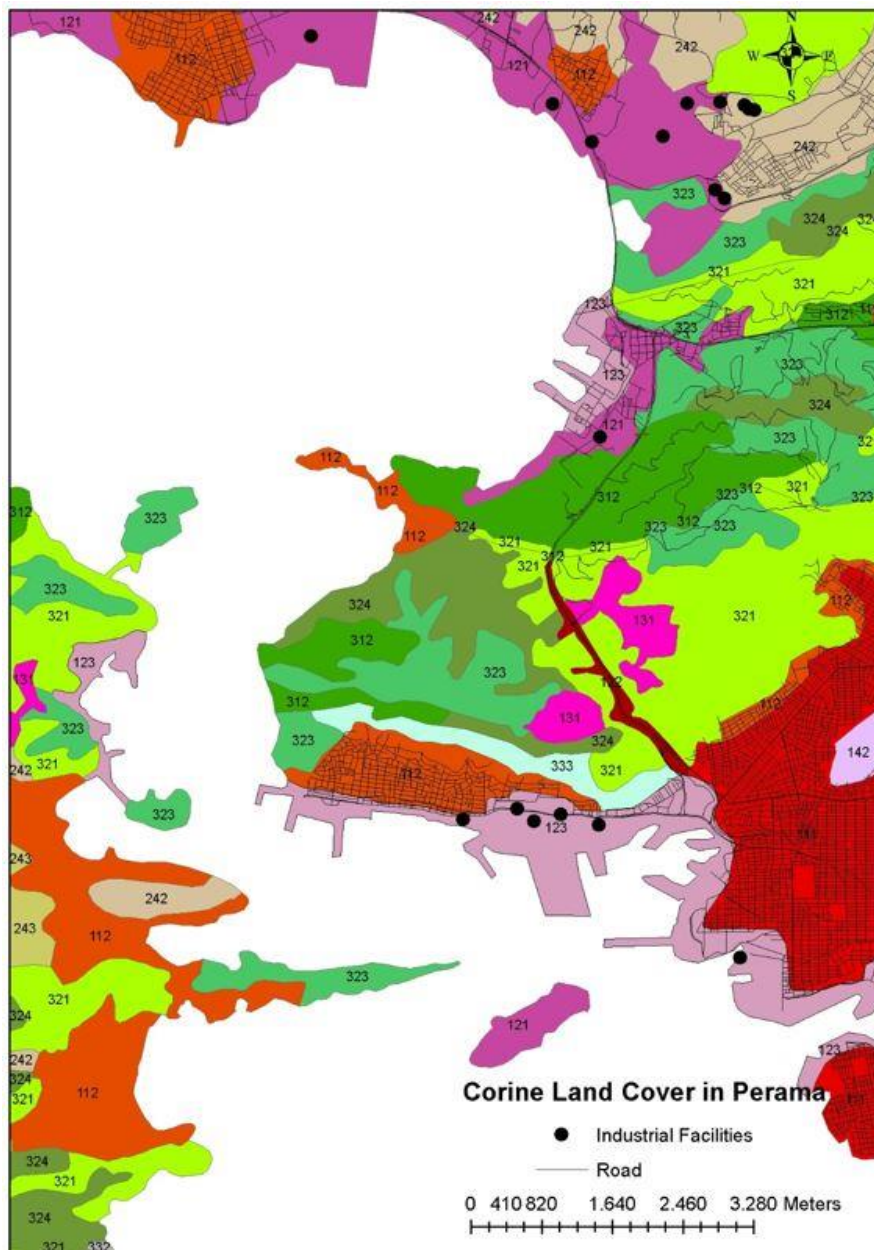
5. Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας

5.1 Η υλοποίηση ενός Δυναμικού Μπεϋζιανού Δικτύου (DBN) για την μοντελοποίηση της πιθανότητας εκδήλωσης ενός συμβάντος σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης και διαχείρισης Επικίνδυνων υγρών δεδομένου ότι υπάρχει δασική πυρκαγιά, στο Δήμο Περάματος

Ο Δήμος Περάματος βρίσκεται στην δυτική πλευρά του όρους Αιγάλεω, ανήκοντας χωρικά στην δυτική πλευρά της Αττικής. Η ιδιαιτερότητα του δήμου επικεντρώνεται στο γεγονός ότι παρουσιάζει υψηλή εξάρτηση από τις δραστηριότητες του Λιμένα Πειραιώς. Πράγματι στο Πέραμα βρίσκονται εγκαταστάσεις του λιμένα Πειραιώς, που αφορούν την αποθήκευση και διαχείριση πετρελαιοειδών και διαφόρων χημικών προϊόντων, ενώ κατά μήκος της παραλίας υπάρχουν εγκαταστάσεις ναυπηγείων που δραστηριοποιούνται στις επισκευές των εμπορικών πλοίων. Πέραν των ανωτέρω, στο Πέραμα εδρεύει και ο κύριος ναύσταθμος του Πολεμικού Ναυτικού, που εξυπηρετεί τον κύριο όγκο των μονάδων του. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι στο Πέραμα είναι συγκεντρωμένες ένας μεγάλος αριθμός δραστηριοτήτων, υψηλού κινδύνου.

Παράλληλα αν και μεγάλες πυρκαγιές στο παρελθόν έχουν καταστρέψει σχεδόν όλο το δασικό κομμάτι της περιοχής, εξακολουθεί να υπάρχει ο κίνδυνος της δασικής πυρκαγιάς με την εκδήλωση 10-12 πυρκαγιών ανά έτος, για την περιοχή γύρω από το Ναυτικό Οχυρό Σκαρμαγκά αλλά και την ευρύτερη περιοχή της ν. Σαλαμίνας. Αυτή η συνύπαρξη των δύο διαφορετικών μορφών κινδύνων, (αυτού που προέρχεται από τον χαρακτήρα των εγκαταστάσεων και του κινδύνου της εκδήλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς) μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένες επιπτώσεις σε υποδομές και ανθρώπινο δυναμικό εάν αλληλοεπιδράσουν μεταξύ τους. Επί παραδείγματι, μία πυρκαγιά στην περιοχή θα μπορούσε να προκαλέσει ζημιές στους μηχανισμούς των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και να προκαλέσει μία νέα πυρκαγιά ή μία έκρηξη και ένα τοξικό νέφος, με τεράστιες επιπτώσεις για την τοπική κοινωνία. Κάτω από αυτό το πλαίσιο, θα εξεταστεί σε περιβάλλον Μπεϋζιανής Λογικής ο κίνδυνος της δασικής πυρκαγιάς αλλά και κατά πόσο μπορεί να προκαλέσει ένα συμβάν στις

εγκαταστάσεις. Στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, υφίστανται επτά εγκαταστάσεις αποθήκευσης και διαχείρισης πετρελαιοειδών και διαφόρων χημικών προϊόντων, σύμφωνα με την εικόνα (20). Οι έξι από τις επτά εγκαταστάσεις ευρίσκονται σε περιβάλλον που δεν συνορεύει με δασικό φορτίο. Η έβδομη τεχνολογική εγκατάσταση, βρίσκεται βορειότερα και δίπλα σε δασικό φορτίο, ενώ η γειτνίαση της με δραστηριότητες του ΠΝ και των Ναυπηγείων, την καθιστά εξαιρετικά κρίσιμη. Για αυτήν, θα εξεταστεί η αλληλοεπίδρασή της με το φαινόμενο της δασικής πυρκαγιάς.



Εικόνα 20: Η κάλυψη γης κατά Corine 2000 για την περιοχή μελέτης

Η συνύπαρξη ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου, όπως οι δασικές πυρκαγιές με την παρουσία του κινδύνου που απορρέει από την αποθήκευση και διαχείριση εύφλεκτων και χημικών προϊόντων όπως τα καύσιμα, οδήγησε στην εξέταση του συνολικού κινδύνου που παράγεται από ένα φυσικό και ένα επικίνδυνο τεχνολογικό φαινόμενο στην ίδια περιοχή. Αφού συλλέχθηκαν το σύνολο των διαθέσιμων στοιχείων για τα δύο υπό εξέταση φαινόμενα και μετά από λεπτομερή ανάλυση του σύνολο των πιθανών παραγόντων που μπορεί να λάβουν μέρος στην αξιολόγηση του κινδύνου σύμφωνα με την διαθέσιμη βιβλιογραφία ([Chuvienco and Congalton 1988](#), [Chuvienco and Congalton 1989](#), [Khakzad, Khan et al. 2011](#), [Khakzad, Khan et al. 2013](#), [Komendantova, Mrzyglocki et al. 2013](#), [Gill and Malamud 2014](#)), επιλέχθηκαν δώδεκα μεταβλητές που αφορούν: τα υπό εξέταση φαινόμενα, τα χαρακτηριστικά της περιοχής και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Οι δώδεκα μεταβλητές συμπλήρωσαν την πρώτη στήλη και γραμμή του πίνακα (8), διαστάσεων 13x13 με την διαγώνιο να διαθέτει «μπλοκαρισμένα» κελιά. Εξετάστηκαν το σύνολο των σχέσεων που θα μπορούσαν να βασιστούν στην σχέση «Αιτίου-Αποτελέσματος» και αποτυπώθηκαν οι σχέσεις στον πίνακα (8). Από την ανάγνωση του συμπληρωμένου πίνακα δεν υπάρχουν βέλη διαφορετικής κατεύθυνσης στην ίδια στήλη ή γραμμή για κάποια από τις μεταβλητές. Δηλαδή δεν υπάρχει μεταβλητή που να είναι παράλληλα «Αίτιο» αλλά και «Αποτέλεσμα» ταυτόχρονα. Συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης του φαινομένου «domino effect». Επιπρόσθετα για τις μεταβλητές «Wildfire» και «Industrial Incident» υφίσταται πέραν του ενός βέλους στην ίδια στήλη ή γραμμή, συνεπώς είναι σίγουρο ότι θα εμφανιστούν φαινόμενα της Αθροιστικής Διέγερσης (Adding Up Triggerring Effect) AUTE ενώ σε πρώτο στάδιο υπάρχουν και μεταβλητές που φαίνεται ότι αναπτύσσουν σχέσεις Πολυεπίπεδης Διέγερσης (Multi Level Triggerring Effect) MULTE.

Στο κελί $k_{12 \times 13}$ παρατηρούμε ότι υπάρχουν και τα δύο βέλη μέσα σε αυτό. Αυτό σύμφωνα με την μεθοδολογία ερμηνεύεται ότι δύο μεταβλητές μπορεί να εμφανιστούν και προς στις δυο κατευθύνσεις σε μία σχέση, διαφορετική κάθε φορά, στην περιοχή μελέτης. Είναι στην διακριτική ευχέρεια του χρήστη σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα δεδομένα να εξετάσει ποια από τις δύο θα λάβει υπόψη στο Μπεϋζιανό Δίκτυο. Αναλύοντας τα δεδομένα βλέπουμε ότι το

συμβάν της πυρκαγιάς παρουσιάζει υψηλή συχνότητα εμφάνισης σε σχέση με ένα συμβάν στις εγκαταστάσεις φύλαξης των επικίνδυνων προϊόντων, οπότε και επιλέγεται τελικά να εξεταστεί μόνο η σχέση που έχει σαν αίτιο την δασική πυρκαγιά.

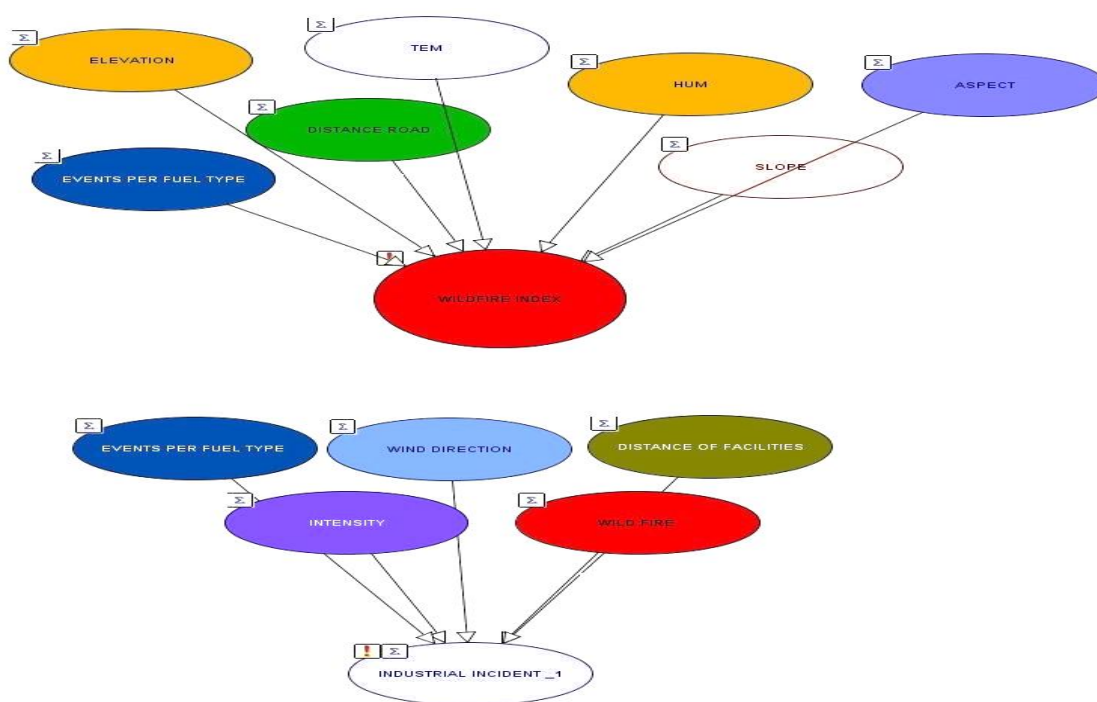
Πίνακας 8: Έλεγχος Αιτιατών Σχέσεων με την Μέθοδο του Πίνακα

cause cause	TEM	HUM	Events Fuel	Distan ce from Roads	Wind Directio	Distance from Facilities	ELEV.	ASPECT	SLOPE	Intensi of Fuel	WildFire	Indus Incid
TEM	■										→	
HUM		■									→	
Events (%)per Fuel Types			■							→	→	
Distance from Roads				■							→	
Wind Direction					■	→						→
Distance from Facilities						■						→
ELEV.							■	→			→	
ASPECT								■			→	
SLOPE									■		→	
Intensity of Fuel										■		→
Wildfire	1	1	Multi Level Triggered	1			→				■	→
Industrial Incident						Adding Up Triggered				1	→	■

Handwritten annotations on the table include: "Συμμετρικά Στοιχεία" (Symmetrical Elements) pointing to the diagonal cells; "Ανάλυση Δεδομένων" (Data Analysis) pointing to the Wildfire and Industrial Incident rows; "Domino Effect" pointing to the relationship between Wildfire and Industrial Incident; "Multi Level Triggered" and "Adding Up Triggered" pointing to specific cells in the Wildfire and Industrial Incident rows respectively.

Παράλληλα δεν αναπτύσσονται Λανθάνουσες Σχέσεις που να βασίζονται στην αλλαγή της κάλυψης γης ενώ σχέσεις που θα βασίζονταν στην αλλαγή χρήσης γης (και θα σχετίζονταν με το συμβάν στις εγκαταστάσεις λόγω της πυρκαγιάς θα μπορούσε να αξιολογηθούν κυρίως αν αναλύαμε τις επιπτώσεις από το συμβάν, αφού πρωτίστως είχε οριστεί απειλούμενο στοιχείο (συνήθως είναι ο άνθρωπος).

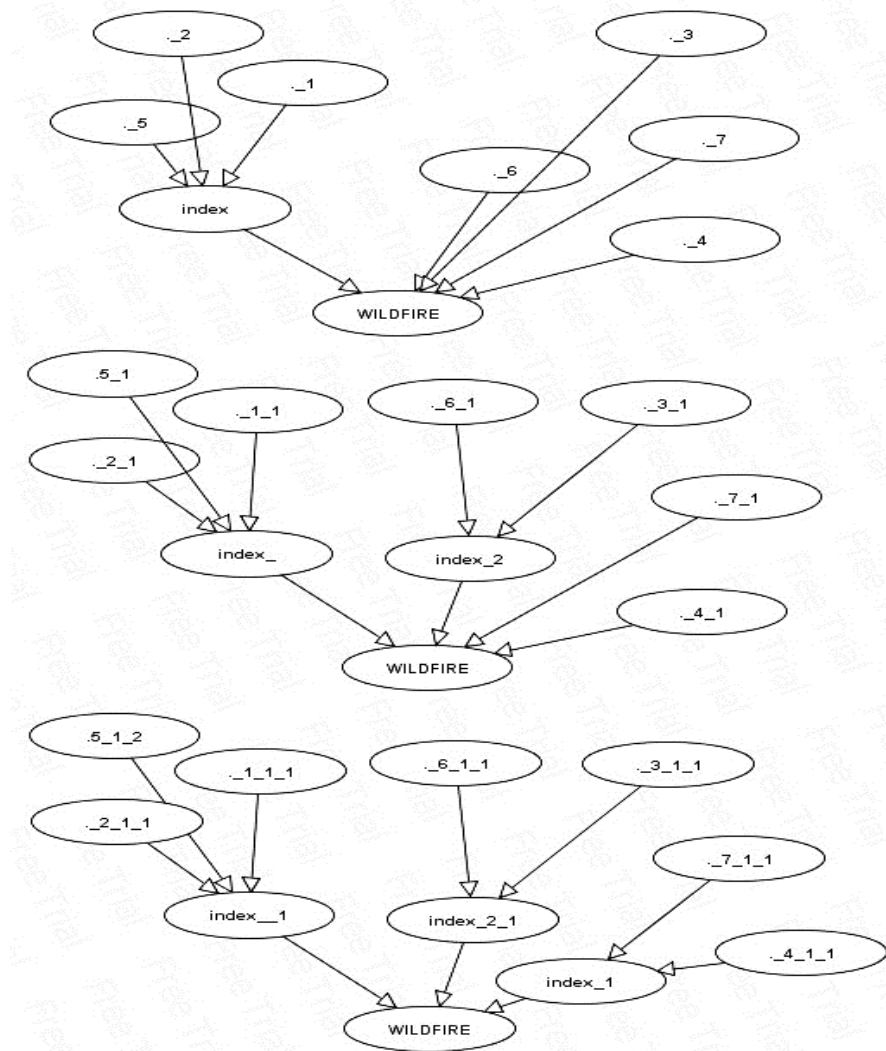
Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα (8) προέκυψαν τα ακόλουθα δίκτυα που απεικονίζονται στην εικόνα (17). Κύριο συμπέρασμα αποτελεί το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός δε καλύπτει την απαίτηση της συμπαγής κατασκευής και συγκεκριμένα τον περιορισμό των γονέων σε ένα παιδί. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός δημιουργεί ένα τεράστιο και πολύπλοκο πίνακα δεσμευμένων πιθανοτήτων που δεν είναι λειτουργικός και παράγει την απαίτηση μεγάλου αριθμού υπολογισμών. Εφαρμόζοντας την προσέγγιση της σπείρας, ξεκινάμε να βελτιώνουμε το υφιστάμενο σχεδιασμό.



Εικόνα 17: Πρώτο στάδιο σχεδιασμού με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου του πίνακα

Ένας τρόπος για να περιορίσουμε τον αριθμό των γονέων σε ένα παιδί είναι να εφαρμόσουμε την μέθοδο του «διαζυγίου» ([Korb and Nicholson 2010](#)). Στη συγκεκριμένη τακτική διαχωρίζουμε συγκεκριμένους γονείς από το παιδί δημιουργώντας ένα κόμβο-μεταβλητή κοινών χαρακτηριστικών. Επί παραδείγματι, στην συγκεκριμένη περίπτωση οι μεταβλητές υψόμετρο, προσανατολισμός και κλίση θα δημιουργήσουν τον δείκτη τοπογραφίας που θα αντανakλά την επίδραση των χαρακτηριστικών της περιοχής στην δημιουργία ενός συμβάντος πυρκαγιάς. Ομοίως θα εκτελεστεί για τις μεταβλητές θερμοκρασία και υγρασία, όπου θα αποτελούν στοιχεία ενός μετεωρολογικού δείκτη, ενώ η αποτύπωση της ανθρώπινης δραστηριότητας μέσω της απόστασης του οδικού δικτύου θα γίνει σε συνδυασμό με το ιστορικό

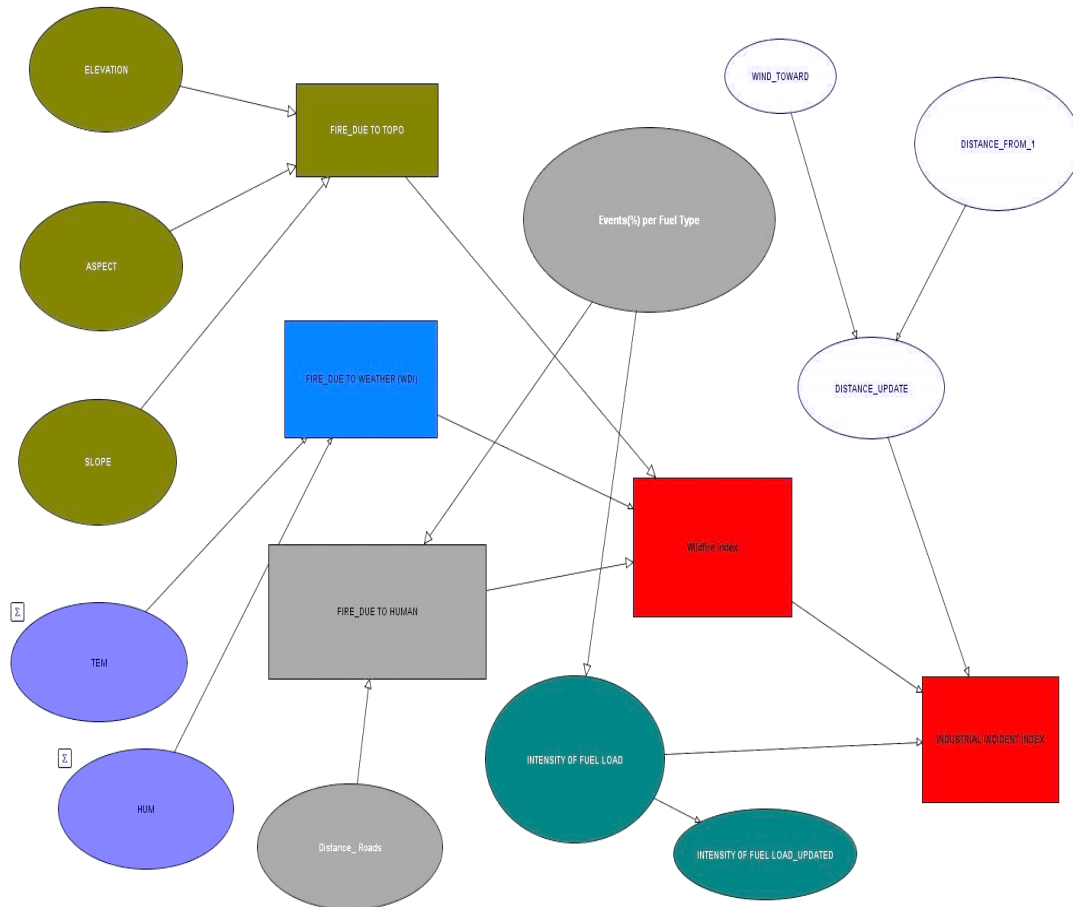
πυρκαγιών και θα αποτελούν τον δείκτη ανθρώπινης παρουσίας στην περιοχή. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουμε να περιορίσουμε τον αριθμό των μεταβλητών-γονέων στη μεταβλητή φωτιά. Ομοίως θα πράξουμε για την μεταβλητή που αναφέρεται σε συμβάν στις εγκαταστάσεις.



Εικόνα 18: Η εφαρμογή της τεχνικής της σειράς στην διαμόρφωση του Μπεϋζιανού Δικτύου

Η μεταβλητή «συμβάν στις εγκαταστάσεις» έχει ως γονείς τις μεταβλητές «φωτιά», «άνεμο», «ένταση της θερμικής ισχύος» και «απόσταση από τις εγκαταστάσεις». Σύμφωνα με τον πίνακα η «ένταση της θερμικής ισχύος» έχει γονέα την μεταβλητή «ιστορικό πυρκαγιών ανά καύσιμη ύλη». Για να περιορίσω τους γονείς στην μεταβλητή «συμβάν στις εγκαταστάσεις» θα κρατήσω την σχέση «Κατεύθυνση ανέμου - Απόσταση από εγκαταστάσεις» αλλά θα καταργήσω την «Κατεύθυνση ανέμου - Συμβάν στις εγκαταστάσεις», καθώς αποτελεί επεξηγηματική της προηγούμενης και δεν επιφέρει αξία στο δίκτυο

παρά μόνο πολυπλοκότητα. Η τελική μορφή του δικτύου είναι σύμφωνα με την εικόνα (19).



Εικόνα 19: Προτεινόμενο Μπεϋζιανό δίκτυο για την μοντελοποίηση της πιθανότητας εκδήλωσης ενός αρνητικού συμβάντος στις εγκαταστάσεις έχοντας ως δεδομένο την δασική πυρκαγιά

Στο προτεινόμενο δίκτυο καμία μεταβλητή δεν έχει γονείς πάνω από τρεις μεταβλητές, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο το μέγεθος των πράξεων. Ο δείκτης τοπογραφίας αποτελείται από τρεις μεταβλητές (κόμβοι χρώματος λαδί), ο μετεωρολογικός δείκτης από δύο μεταβλητές (κόμβοι χρώματος μπλε), ο δείκτης ανθρώπινης παρουσίας από δύο μεταβλητές (κόμβοι χρώματος γκρι), Η μεταβλητή «πυρκαγιά» εξαρτάται από τους τρεις προαναφερόμενους δείκτες ενώ η μεταβλητή «συμβάν στις εγκαταστάσεις» εξαρτάται από την δασική πυρκαγιά, την κατεύθυνση του ανέμου (δηλαδή αν η κατεύθυνση του ανέμου είναι προς τις εγκαταστάσεις σε σχέση με το σημείο της πυρκαγιάς) και την ένταση της πυρκαγιάς, που με τη σειρά της εξαρτάται από το είδος της καύσιμης ύλης.

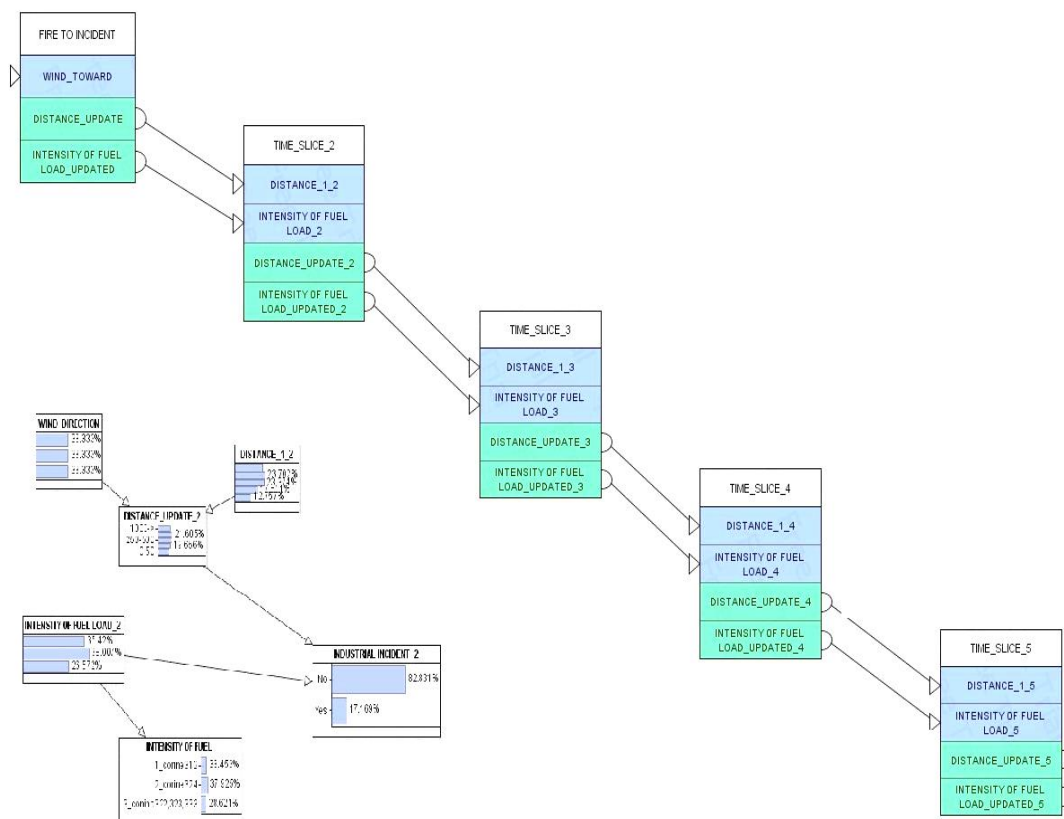
5.2 Η δυναμική διάσταση ενός Μπεϋζιανού Δικτύου

Όπως ειπώθηκε στην εισαγωγή τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα είναι ιδιαίτερος δυναμικές διαδικασίες και η αγνόηση αυτού του χαρακτηριστικού οδηγεί συνήθως σε υπερ-απλούστευση της πραγματικότητας και εσφαλμένες εκτιμήσεις. Στο προτεινόμενο μοντέλο τόσο η δασική πυρκαγιά όσο και απόσταση αυτής από μία σταθερή εγκατάσταση, παρουσιάζουν εξαιρετικά δυναμικά χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα ο χρόνος ως μεταβλητή να μην μπορεί να αγνοηθεί. Κάτω από αυτό το πλαίσιο, κατασκευάστηκε ένα δυναμικό δίκτυο πέντε σταδίων όπου μεταβλητές που συνδέονται άμεσα με τον χρόνο να μπορούν να αποτυπώσουν την πιθανή αλλαγή ($t=t_1$) απόδειξη μέσα στο γράφημα, επηρεάζοντας την ίδια μεταβλητή ή ακόμη και άλλη του γραφήματος στο αμέσως χρονικό διάστημα ($t_2=t+1$). Επί παραδείγματι, η κατεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται δυναμικά, και με τον ίδιο ρυθμό μεταβάλει τις εξαρτώμενες μεταβλητές του δικτύου, όπως η απόσταση από τις εγκαταστάσεις αλλά και το είδος της καύσιμης ύλης συναρτήσει της κάλυψης γης.

Η επιτυχία ενός Μπεϋζιανού Δικτύου έχει να κάνει με την όσο καλύτερη αποτύπωση της πραγματικότητας σε αυτό. Η καταγραφή μεταβλητών με δυναμικά χαρακτηριστικά έχει εξαιρετική δυσκολία καθότι απαιτεί την αλλαγή μεταβλητών ή μέρος του δικτύου. Αυτό αναπόφευκτα προκαλεί μία πολυπλοκότητα στο γράφημα που θα πρέπει παράλληλα να είναι «ρυθμισμένο» ώστε να αποτυπώνει τις αλλαγές στις μεταβλητές που θα περνάνε ως απόδειξη στο δίκτυο. Στο γράφημα της τρέχουσας εφαρμογής για την περιοχή του Περάματος, η μεταβλητή «κατεύθυνση ανέμου» είναι μεταβλητή εισόδου δηλαδή η αλλαγή κατεύθυνσης του ανέμου περνάει στο γράφημα ως απόδειξη και με την σειρά της, επηρεάζει την απόσταση της φωτιάς από τις εγκαταστάσεις.

Η τελική τιμή (επικαιροποιημένη) της μεταβλητής «απόσταση από εγκαταστάσεις» είναι αποτέλεσμα της αρχικής τιμής και της κατεύθυνσης του ανέμου. Αυτή η τιμή είναι η τιμή εξόδου της μεταβλητής την χρονική στιγμή $t=t_1$

και αποτελεί παράλληλα και την τιμή εισόδου της μεταβλητής την χρονική στιγμή $t=t_2$, η οποία θα επικαιροποιηθεί από την νέα κατεύθυνση ανέμου και θα «ενημερώσει» στο δίκτυο, την νέα θέση της δασικής πυρκαγιάς ως προς τις εγκαταστάσεις. Ομοίως η αλλαγή της θέσης της πυρκαγιάς στο χώρο της περιοχής μελέτης, επηρεάζει και το είδος της καύσιμης ύλης που διοχετεύεται στην πυρκαγιά. Γι' αυτό με παρόμοιο μηχανισμό η αλλαγή της καύσιμης ύλης επικαιροποιείται και «ενημερώνει» τις υπόλοιπες μεταβλητές του δικτύου που εξαρτώνται από αυτήν για το είδος της, σε κάθε χρονικό βήμα εξέλιξης του φαινομένου. Αυτή η διαδικασία μπορεί επαναλαμβάνεται όσες φορές απαιτηθεί από την φύση του προβλήματος και τα χαρακτηριστικά των μεταβλητών. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχει υιοθετηθεί μια προσέγγιση πέντε χρονικών βημάτων καθώς εκτιμάται ότι μία πυρκαγιά υπό τις κατάλληλες συνθήκες, (λαμβάνοντας υπόψη την διαδοχή στους τύπους της κάλυψης γης αλλά και την πιθανή απόσταση της από τις εγκαταστάσεις, για την κλίμακα της περιοχής) θα φτάσει εντός των πέντε χρονικών βημάτων.



Εικόνα 20: Ένα δυναμικό Μπεϋζιανό Δίκτυο πέντε χρονικών βημάτων. Οι μεταβλητές εξόδου (πράσινες) περνάνε την πληροφορία στις μεταβλητές εισόδου(μπλε) σε κάθε χρονική στιγμή.

5.3 Υπολογισμός των τιμών των καταστάσεων των μεταβλητών του Μπεϋζιανού Δικτύου

Μετά την ολοκλήρωση του γραφήματος του δικτύου, ακολουθεί ο καθορισμός των καταστάσεων των μεταβλητών του και η ποσοτικοποίηση αυτών των καταστάσεων, έχοντας αξιοποιήσει τα διαθέσιμα δεδομένα και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι καταστάσεις των μεταβλητών πρέπει να διέπονται από σαφήνεια, να μην αλληλοκαλύπτονται και να είναι αμοιβαίως αποκλειόμενες.

Το σύνολο των μεταβλητών και οι καταστάσεις τους αποτυπώνονται στον πίνακα (9).

Πίνακας 9: Σύνολο Μεταβλητών του Προτεινόμενου Μπεϋζιανού Δικτύου για την περιοχή μελέτης

α/α	Μεταβλητή	Περιγραφή	Συνάρτηση	Χαρακτηριστικά
1	Θερμοκρασία(TEM)	Η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας στην περιοχή μελέτης. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.	Συνεχής	Weibull
24	Υγρασία(HUM)	Η σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας στην περιοχή μελέτης. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.	Συνεχής	Weibull
3	Μετεωρολογικός Δείκτης Weather Danger Index(WDI)	Είναι ένας δείκτης, που αναφέρεται στο πηλίκο θερμοκρασίας δια της υγρασίας (Chuvieco and Congalton 1989) στην περιοχή μελέτης. Δεν απαιτεί εξειδικευμένα δεδομένα για τον υπολογισμό. Όσο υψηλότερη είναι η αντίθεση μεταξύ θερμοκρασίας και υγρασίας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος για πυρκαγιά.	Συνεχής	WDI = TEM / HUM (Expression type)
4	Υψόμετρο (ELEV)	Τιμές Υψομέτρων που εκδηλώθηκαν	Διακριτή	0-10 10-30

		πυρκαγιές στο παρελθόν σύμφωνα με το ιστορικό συμβάντων. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.		30-50 50-70 70-90 90-110 110-130 130->
5	Κλίση (Aspect)	Τιμές της κλίσεως εδάφους των σημείων που εκδηλώθηκαν πυρκαγιές στο παρελθόν σύμφωνα με το ιστορικό συμβάντων. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.	Διακριτή	0-2.5 2.5-7.5 7.5-12.5 12.5-17.5 17.5-22.5 22.5-27.5 27.5-32.5 32.5-37.5 37.5-42.5 42.5->
6	Προσανατολισμός(Aspect)	Τιμές μοιρών (0-360°)ως προς τον βορρά των θέσεως που εκδηλώθηκαν πυρκαγιές στο παρελθόν σύμφωνα με το ιστορικό συμβάντων. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.	Διακριτή	0-25 25-75 75-125 125-175 175-225 225-275 275-325 325-360
7	Δείκτης Τοπογραφίας (Topo Index)	Μετρά τον κίνδυνο πυρκαγιάς με βάση τα χαρακτηριστικά του χώρου. Αποτελεί μία άθροιση των μεταβλητών υψομέτρου, κλίσης και προσανατολισμού όπου το υψόμετρο συμμετέχει με τριπλάσιο συντελεστή βαρύτητας σε σχέση με τις άλλες δύο μεταβλητές (Chuvieco and Congalton 1989).	Διακριτή	TI= 2ELEV+ASP+SLOPE TNormal (Expression type)
8	Συμβάντα ανά τύπο Καύσιμης ύλης (Events(%) per Fuel Type)	Αποδίδει τα ποσοστά των πυρκαγιών με βάση το ιστορικό ανά τύπο καύσιμης ύλης συμφώνως της	Διακριτή	corine_312 corine_324 corine_322,323,333 corine_21,22,24 corine_111,112,121,123,131

		βάσης δεδομένων CORINE 2000 (CLC2000) Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.		
9	Απόσταση από Οδικό Δίκτυο (Distance_Roads)	Μετρά την απόσταση του οδικού δικτύου από την καύσιμη ύλη. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.	Διακριτή	0-10m 10-30m 30m->
10	Δείκτης Ανθρώπινης Παρουσίας (Human Index)	Μετρά τον κίνδυνο πυρκαγιάς με βάση την παρουσία του ανθρώπινου παράγοντα (ως απόσταση της καύσιμης ύλης από οδικό δίκτυο). Είναι συνδυασμός των μεταβλητών απόσταση από Οδικό Δίκτυο και ιστορικό πυρκαγιών	Διακριτή	Χαμηλός Μεσαίος Υψηλός
11	Κατεύθυνση Ανέμου (Wind Direction)	Εάν ο άνεμος κατευθύνεται προς τις εγκαταστάσεις σε σχέση με την δασική πυρκαγιά. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.	Boolean	Ναι/Όχι
12	Απόσταση (m)από Εγκαταστάσεις (Distance)	Η απόσταση της δασικής πυρκαγιάς από τις εγκαταστάσεις. Αποτελεί μεταβλητή εισόδου στοιχείων.	Διακριτή	1000m> 500-1000m 250-500m 50-250m 0-50m
13	Ένταση Θερμικού Φορτίου Καύσιμης Ύλης (Intensity)	Οι τύποι της καύσιμης ύλης κωδικοποιήθηκαν συμφώνως της βάσης δεδομένων CORINE 2000 (CLC2000) και ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες έντασης (βάσει του φορτίου καυσίμου και του μήκους της	Διακριτή	I4_(112,121,122,123,131,332) I3_(322,323,333,321) I2_(324) I1_(312)

		φλόγας) (Durda and Kring 2004 , Mitsopoulos and Dimitrakopoulos 2007).		
14	Δείκτης Πυρκαγιάς (Wildfire Index)	Οποιαδήποτε ανεπιθύμητη, μη προγραμματισμένη, φυσική και ανθρωπογενή πυρκαγιά σε δασική έκταση.	Boolean	Ναι/Όχι
15	Συμβάν σε εγκαταστάσεις	Ένα ανεπιθύμητο γεγονός (πυρκαγιά, έκρηξη, νέφος) που θα συμβεί στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης λόγω της πυρκαγιάς και θα επηρεάσει την ασφαλή λειτουργία αυτών.	Boolean	Ναι/Όχι

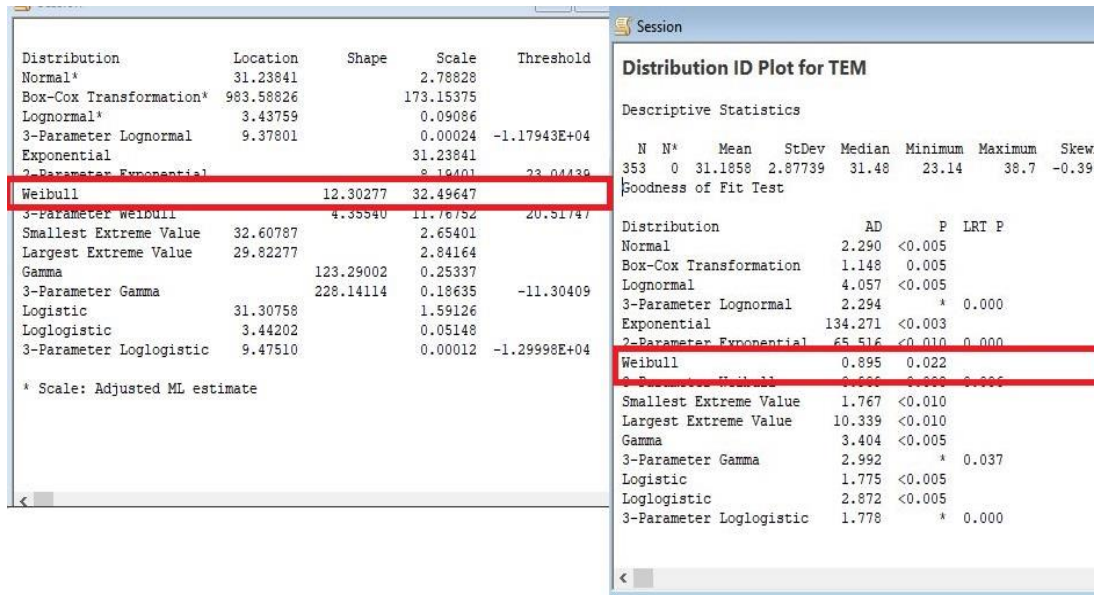
Για τον υπολογισμό του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιάς ελήφθηκε υπόψη ότι ο τελικός κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς είναι αθροιστικός συνδυασμός μετεωρολογικών, τοπογραφικών και ανθρώπινων χαρακτηριστικών και δραστηριοτήτων ([Chuvieco and Congalton 1988](#), [Chuvieco and Congalton 1989](#)) στην περιοχή ενδιαφέροντος. Για την αξιολόγηση των μετεωρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής, ελήφθησαν υπόψη η θερμοκρασία (TEM) και υγρασία (HUM) της περιοχής για τρία έτη (2016-2017-2018) και για την ημερολογιακή περίοδο από 1/6 έως 15/9 εκάστου έτους.

Goodness of Fit Test				ML Estimates of Distribution Parameters				
Distribution	AD	P	LRT P	Distribution	Location	Shape	Scale	Threshold
Normal	1.577	<0.005		Normal*	69.38919		13.54824	
Box-Cox Transformation	1.186	<0.005		Box-Cox Transformation*	502.08577		139.62685	
Lognormal	3.902	<0.005		Lognormal*	4.21909		0.20841	
3-Parameter Lognormal	1.598	*	0.000	3-Parameter Lognormal	9.81758		0.00074	-1.82842E+04
Exponential	94.871	<0.003		Exponential			69.38919	
2-Parameter Exponential	52.228	<0.010	0.000	2-Parameter Exponential			25.28642	21.28672
Weibull	0.909	0.021		Weibull		6.00920	74.88959	
3-Parameter Weibull	1.187	<0.005	0.100	3-Parameter Weibull		1.65366	69.68044	12.05605
Smallest Extreme Value	1.472	<0.010		Smallest Extreme Value	75.96642		11.91627	
Largest Extreme Value	5.622	<0.010		Largest Extreme Value	62.48166		13.47895	
Gamma	2.920	<0.005		Gamma		24.39016	2.84497	
3-Parameter Gamma	2.141	*	0.001	3-Parameter Gamma		210.98824	0.94302	-129.82502
Logistic	1.877	<0.005		Logistic	69.85042		7.97508	
Loglogistic	3.387	<0.005		Loglogistic	4.23565		0.11960	
3-Parameter Loglogistic	1.882	*	0.000	3-Parameter Loglogistic	9.77729		0.00045	-1.75590E+04
Johnson Transformation	0.245	0.759		Johnson Transformation*	0.00985		1.01245	

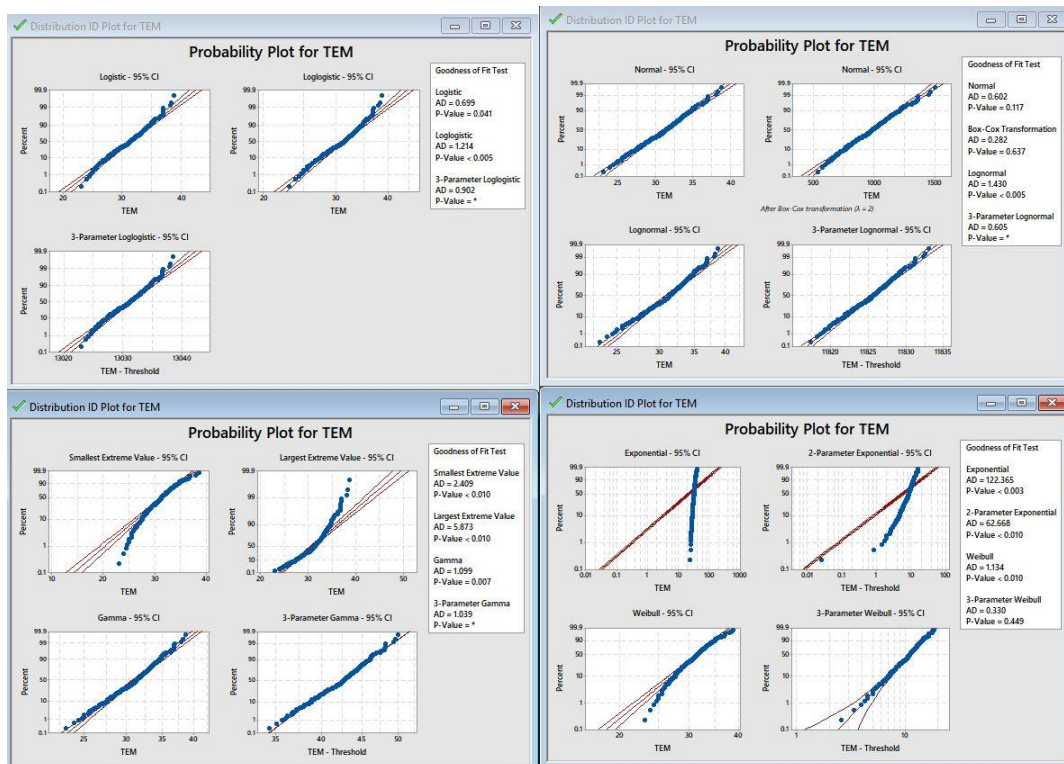
* Scale: Adjusted ML estimate

Εικόνα 21: Αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων για την σχετική υγρασία στην περιοχή ενδιαφέροντος

Σε περιβάλλον εργασίας λογισμικού «MiniTab» υλοποιήθηκε μία στατιστική ανάλυση των διαθέσιμων τιμών της θερμοκρασίας και της υγρασίας (συνολικά 321 τιμές). Με κριτήρια την τιμή p-value και AD value ανιχνεύθηκε σε ποια συνάρτηση «ταιριάζουν» τα δεδομένα.

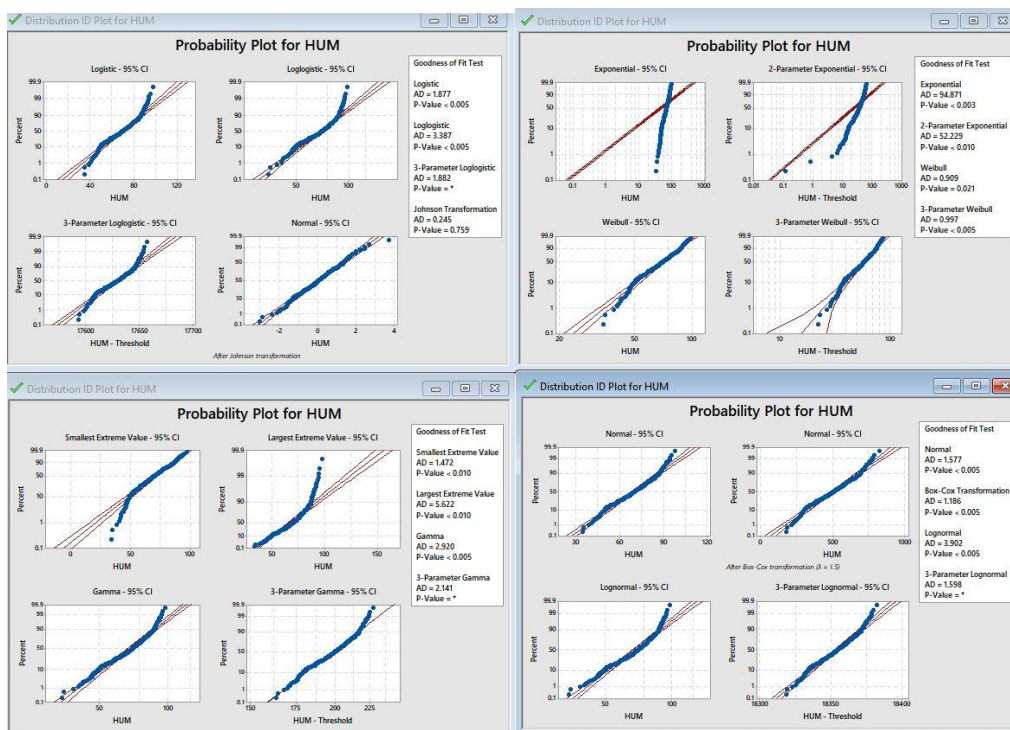


Εικόνα 22: Αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων για την θερμοκρασία στην περιοχή ενδιαφέροντος

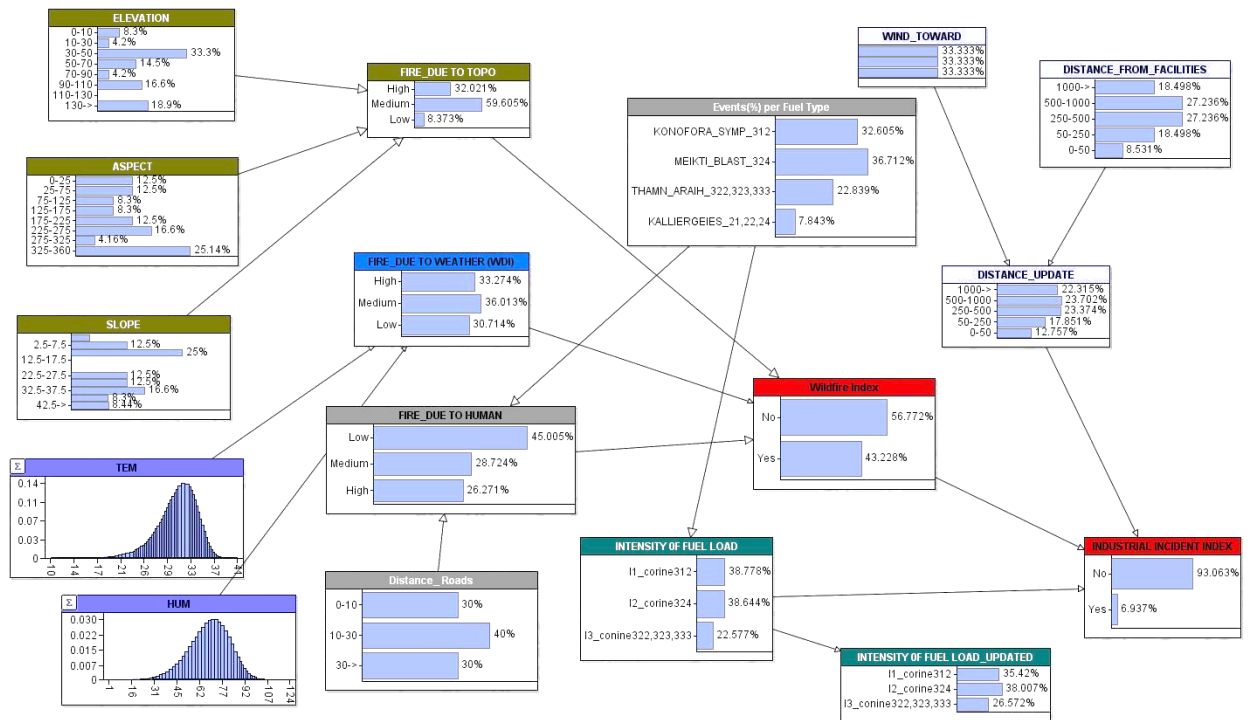


Εικόνα 223: Αποτελέσματα ελέγχου των δεδομένων της θερμοκρασίας στην περιοχή ενδιαφέροντος

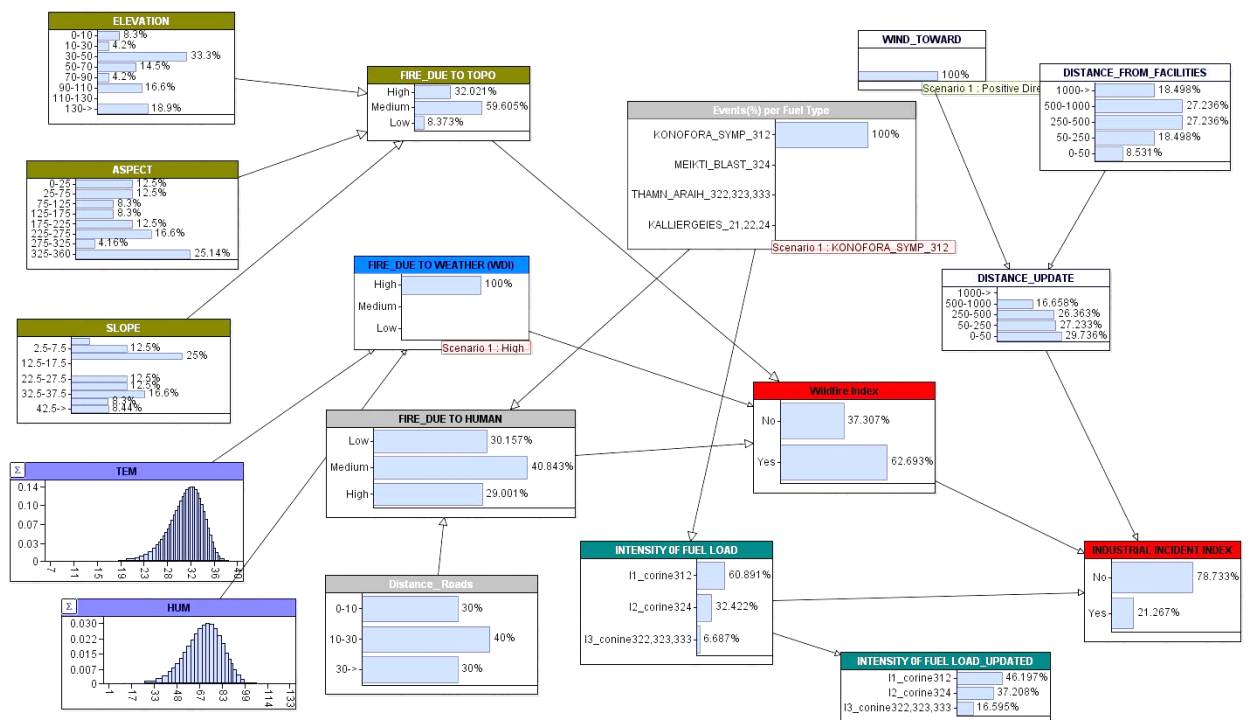
Για τις υπόλοιπες μεταβλητές πλην της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας δεν κατέστη εφικτό από την ανάλυση των δεδομένων να αντιστοιχίσουν σε κάποια συνάρτηση. Οι μεταβλητές του υψομέτρου, κλίσης και προσανατολισμού, μπήκαν ως ιστογράμματα στο γράφημα με τα δεδομένα τους να έχουν παρασχεθεί από την πυροσβεστική υπηρεσία Πειραιώς και να αφορούν συνολικά 54 συμβάντα από το 2010 έως το 2018 για την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος. Το γράφημα αξιολογεί τον κίνδυνο πυρκαγιάς ως άθροισμα των τριών επιμέρους δεικτών ([Chuvieco and Congalton 1989](#)). Η απαίτηση για την πληροφορία της κάλυψης γης καλύπτεται από το Corine 2000, ενώ οι δεσμευμένες πιθανότητες για την εκδήλωση ενός συμβάντος στις εγκαταστάσεις λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη της πυρκαγιάς υπολογίστηκαν με βάση την κλίμακα και τα μεγέθη της περιοχής μελέτης και κυρίως από τα αποτελέσματα μετρήσεων σε πειράματα ελεγχόμενης καύσης δασικών εκτάσεων που έχουν εκτελεστεί στην ύπαιθρο και σε διάφορες εγκαταστάσεις ([Durda and Kring 2004](#), [Mitsopoulos and Dimitrakopoulos 2007](#), [Khakzad, Khan et al. 2011](#), [Khakzad, Khan et al. 2013](#), [Khakzad, Khan et al. 2013](#)). Η τελική μορφή δικτύου είναι σύμφωνα με τις εικόνες (25) έως (28).



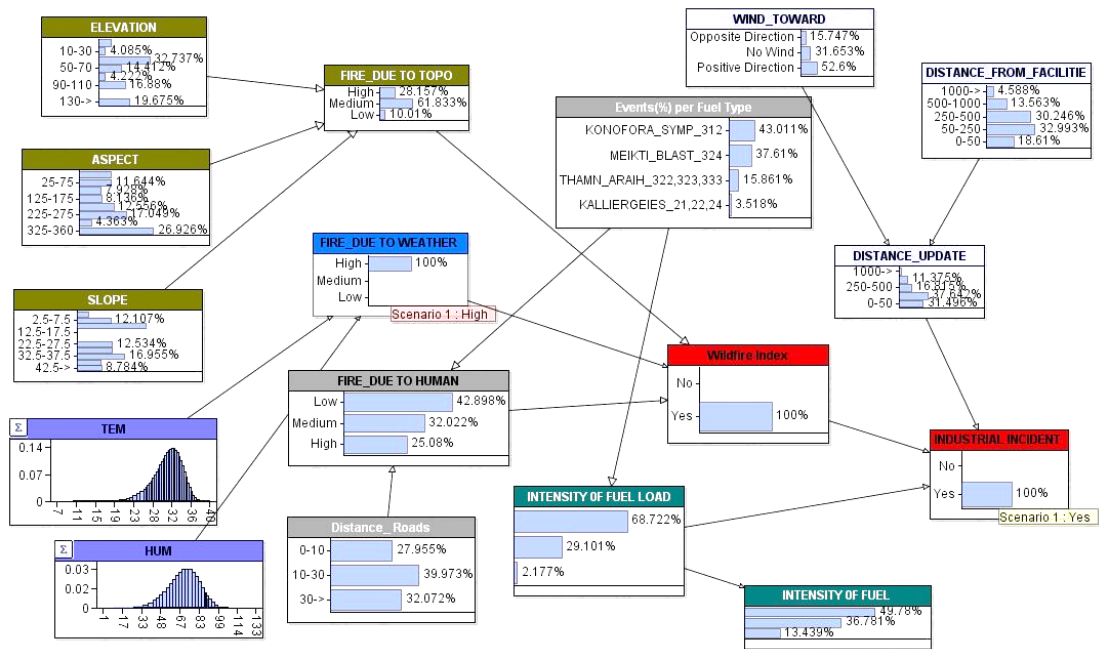
Εικόνα 234: Αποτελέσματα ελέγχου των δεδομένων της Σχετ. Υγρασίας στην περιοχή ενδιαφέροντος



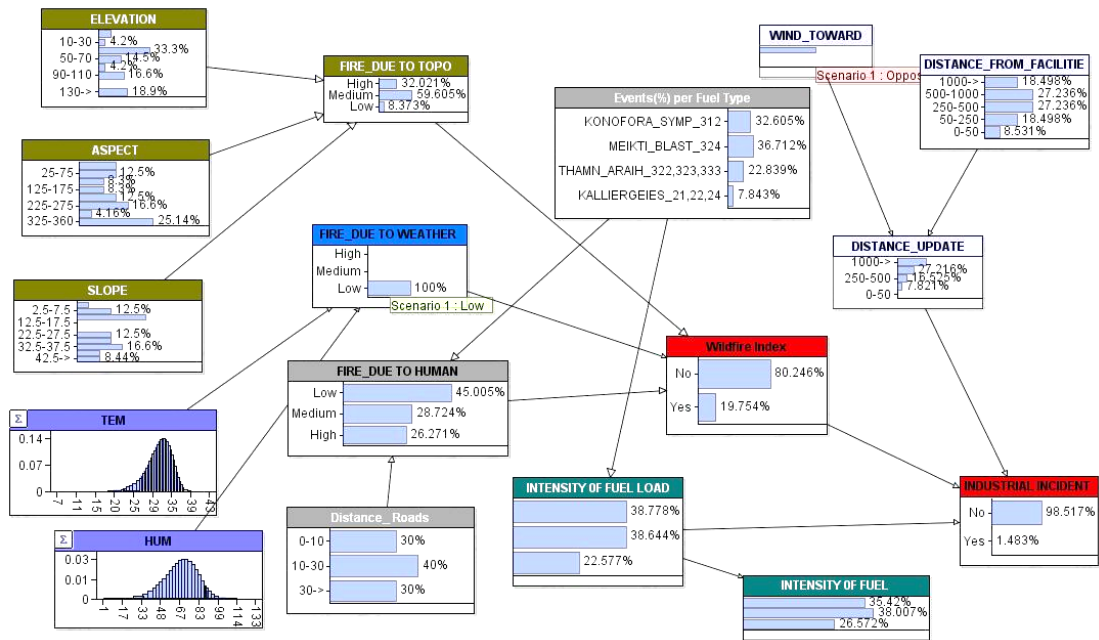
Εικόνα 25: Το προτεινόμενο Δίκτυο για την αποτύπωση της πιθανότητας πυρκαγιάς αλλά και συμβάντος στις εγκαταστάσεις



Εικόνα 26: Υπολογισμός πιθανοτήτων με δεδομένο ότι κάλυψη γης είναι κωνοφόρα, με κατεύθυνση ανέμου προς τις εγκαταστάσεις και υψηλή τιμή μετεωρολογικού δείκτη

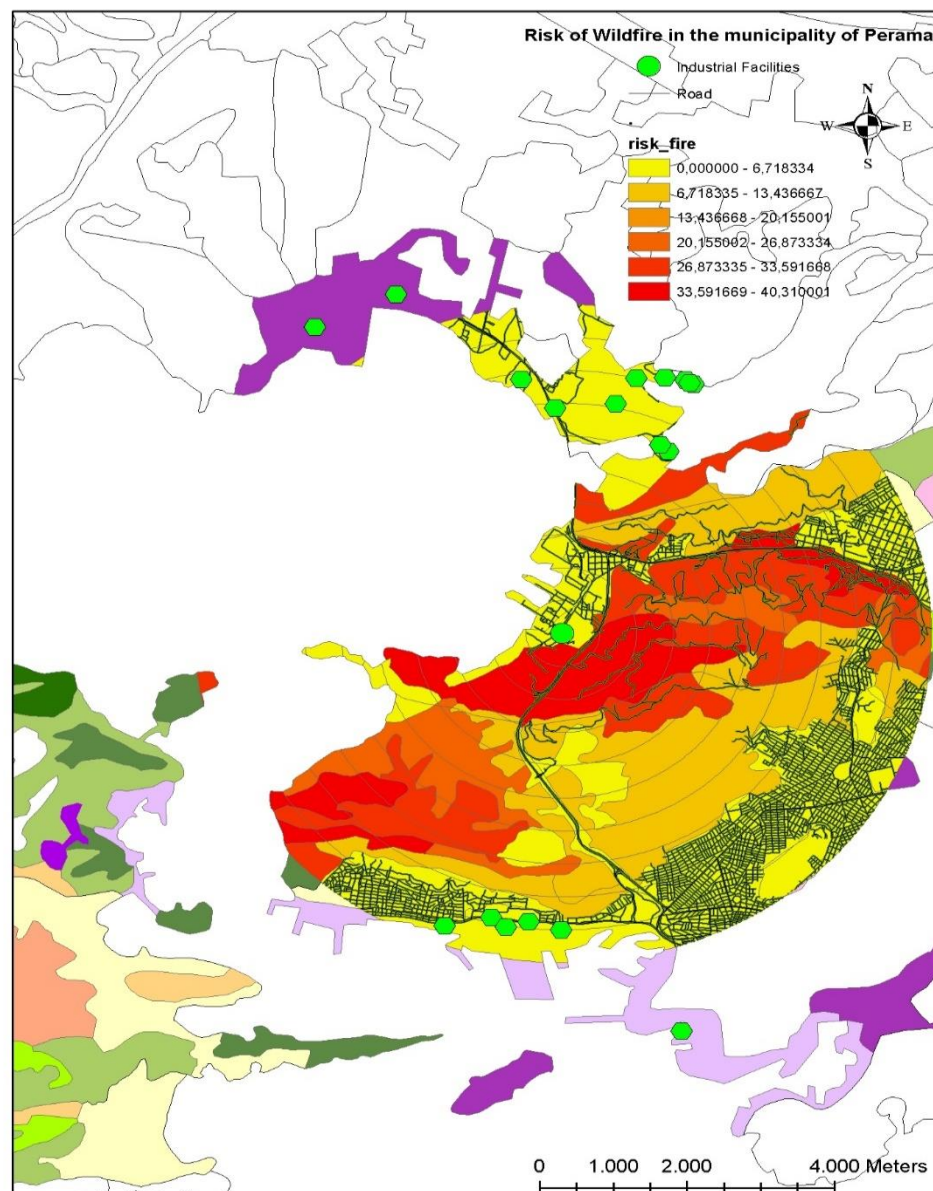


Εικόνα 27: Υπολογισμός πιθανοτήτων με δεδομένο ότι έχω συμβάν στις εγκαταστάσεις .

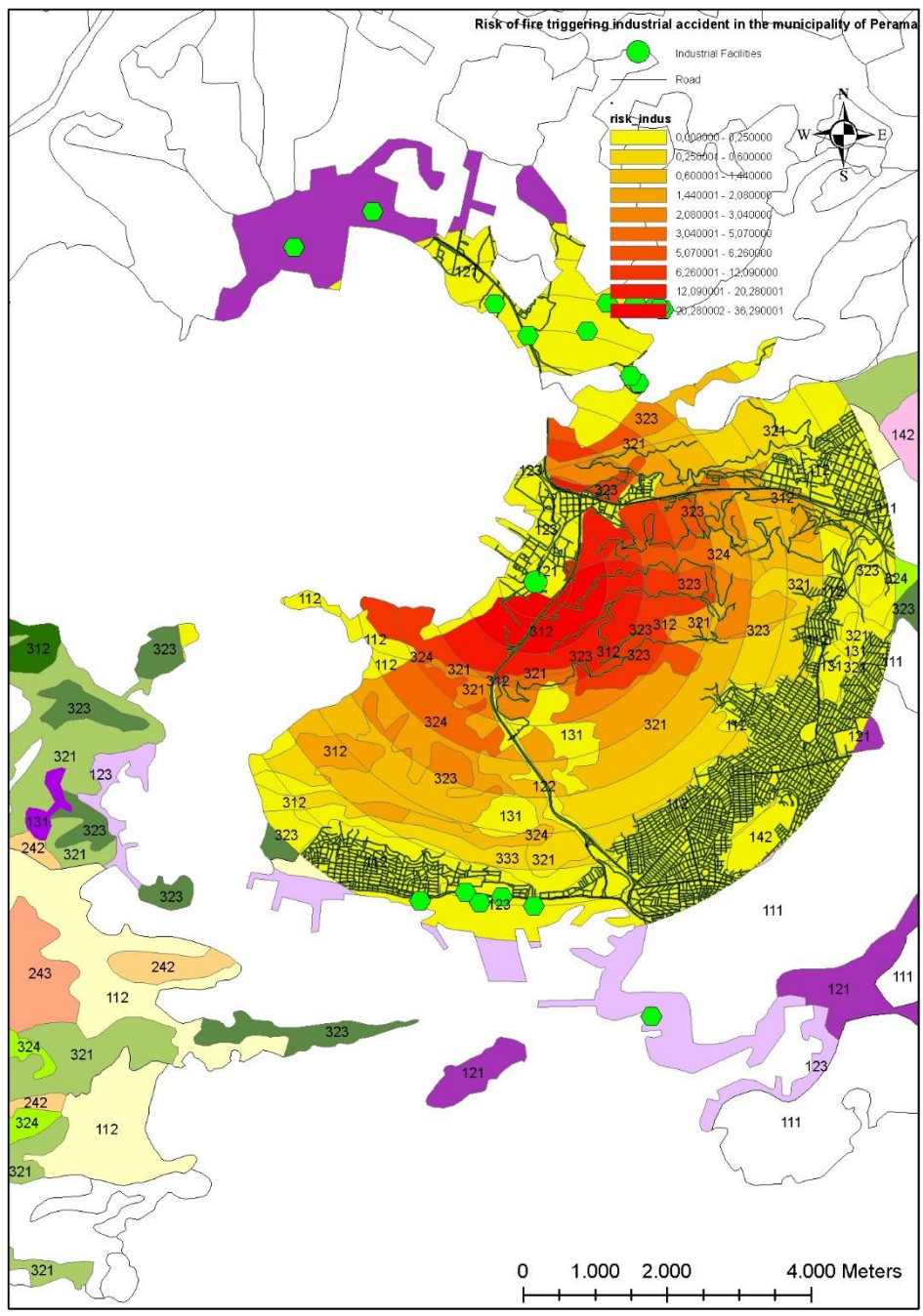


Εικόνα 28: Υπολογισμός πιθανοτήτων με χαμηλό μετεωρολογικό δείκτη και θετική κατεύθυνση αέρα.

Η χρήση μεταβλητών που εμπεριέχουν την χωρική ιδιότητα επιτρέπει με την αξιοποίηση των ΓΣΠ να οπτικοποιηθούν τα αποτελέσματα των γραφήματος με την μορφή χαρτών. Στις εικόνες (29) και (30) υπό μορφή χάρτη αποτυπώνονται χωρικά ο κίνδυνος για την εκδήλωση μιας πυρκαγιάς και ο κίνδυνος για την εκδήλωση ενός αρνητικού συμβάντος στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης σε σχέση με την εκδήλωση πυρκαγιάς σε απόσταση από αυτές.

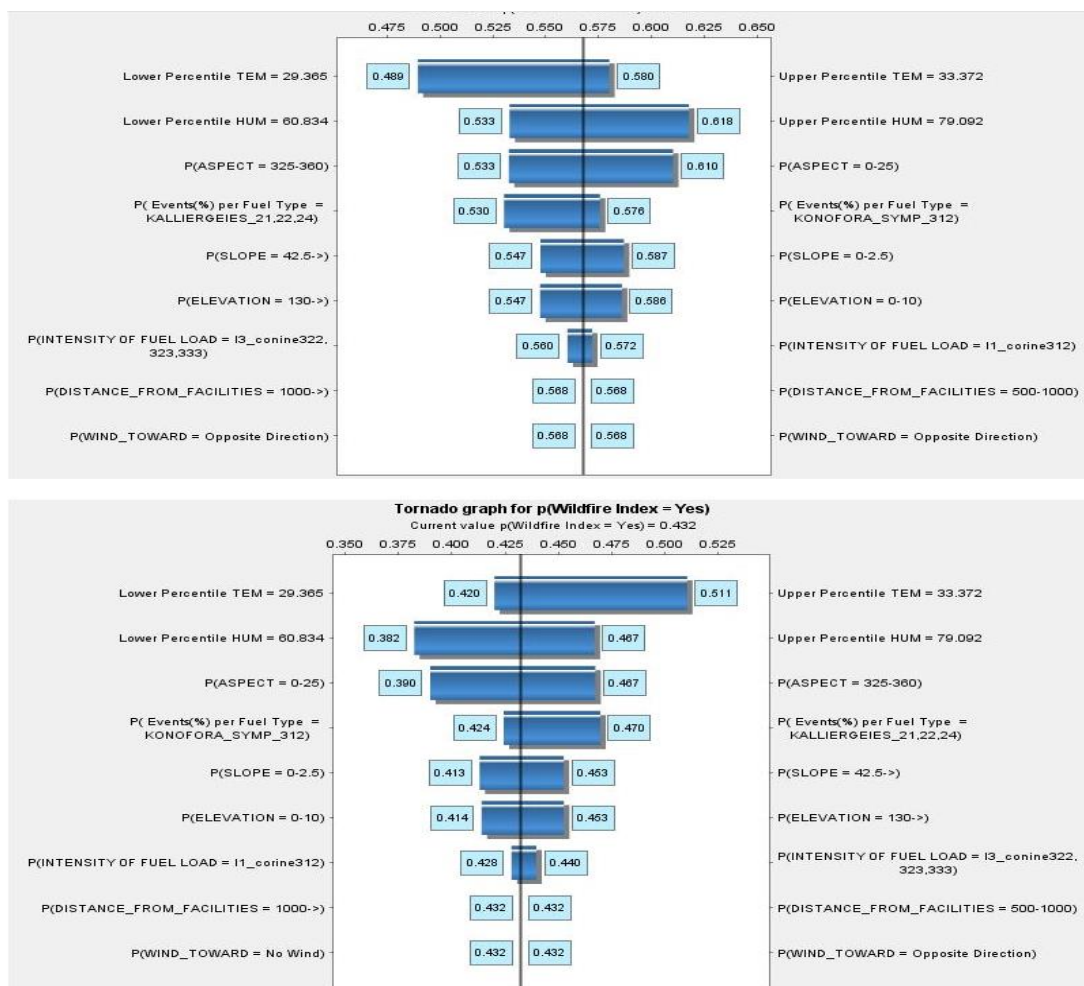


Εικόνα 29: Η διαβάθμιση του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιάς στην περιοχή ενδιαφέροντος



Εικόνα 30: Η διαβάθμιση του κινδύνου εκδήλωσης ενός συμβάντος στις εγκαταστάσεις λόγω της πυρκαγιάς

Ένα άλλο στοιχείο που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι η μεθοδολογία δεν παρουσιάζει περιορισμούς συνεργασίας με άλλες εφαρμογές, το οποίο σε συνδυασμό με την ευελιξία των Μπεϋζιανών Δικτύων επιτρέπει την μεταφορά των αποτελεσμάτων ή δεδομένων του ζητήματος που εξετάζεται, σε άλλο περιβάλλον εργασίας χωρίς απαιτήσεις μετασχηματισμών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα από το στατιστικό πρόγραμμα «Minitab», τροφοδότησαν τις μεταβλητές του δικτύου σε περιβάλλον «AgenaRisk LV» όπου τα αποτελέσματα αυτού, οδήγησαν στην παραγωγή χάρτη για την περιοχή μελέτης σε περιβάλλον ΓΣΠ που αποτυπώνει τον κίνδυνο πυρκαγιάς και συμβάντος. Παράλληλα μία ανάλυση ευαισθησίας του δικτύου, είναι εφικτή για να εντοπιστούν οι μεταβλητές με την μεγαλύτερη βαρύτητα στο δίκτυο .



Εικόνα 31: Sensitive Analysis για την μεταβλητή «WILDFIRE» σε σχέση με τις μεταβλητές του δικτύου

Μέσα από αυτό το παράδειγμα που σκοπό είχε να αναδείξει την ικανότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, εξετάστηκε η αλληλοσυσχέτιση δύο εντελώς διαφορετικών επικίνδυνων φαινομένων. Συγκεκριμένα εξετάστηκε πως μία πυρκαγιά μπορεί να προκαλέσει ένα αρνητικό συμβάν σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης πετρελαιοειδών και χημικών προϊόντων που απέχουν μεταξύ τους. Η μέθοδος κατάφερε να αναγνωρίσει το σύνολο των πιθανών σχέσεων που μπορούν να αναπτυχθούν στην περιοχή ενδιαφέροντος ενώ με δυναμικό τρόπο, κατάφερε μέσα από τις συνδέσεις που απέδωσε η μεθοδολογία να αντιγράψουν την πραγματικότητα με απόλυτη επιτυχία.

6. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και κατά την ερευνητική προσπάθεια για τον σχεδιασμό μίας πρωτότυπης μεθοδολογίας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η πρόσβαση σε αξιόπιστα δεδομένα αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα στο επιστημονικό πεδίο και ανάλυσης των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων και του κινδύνου που απορρέει από αυτά. Η εφαρμογή μιας ποσοτικής μεθόδου στην ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό δεδομένων διαφορετικής πληροφορίας (τοπολογίες φαινομένων, δεδομένα παρατήρησης, εμπειρικούς κανόνες). Στις περισσότερες περιπτώσεις η πρόσβαση σε δεδομένα είναι δύσκολη εξ' αιτίας πολλών παραγόντων όπως θέματα ιδιωτικότητας και ζητήματα διαβαθμισμένης πληροφορίας. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί τα δεδομένα είναι κυρίως προϊόν μελέτης και έρευνας ιδιωτικών οργανισμών και εταιρειών, καθώς η συλλογή δεδομένων είναι εξαιρετικά δύσκολη και δαπανηρή. Μία κοινή προσπάθεια από κρατικούς οργανισμούς, εταιρείες έρευνας και την επιστημονική κοινότητα πρέπει να οργανωθεί και να τεθεί σε ισχύ, έτσι ώστε ο καθένας υπό προϋποθέσεις να έχει πρόσβαση σε υψηλής ποιότητας δεδομένα. Η πρόσβαση σε δεδομένα μπορεί να βοηθήσει σε δύο επίπεδα. Πρώτον τα καινούργια δεδομένα να αποτελέσουν τον μηχανισμό αξιολόγησης των υφιστάμενων μοντέλων και δεύτερον να αποτελέσουν την νέα δεξαμενή πληροφορίας για την ανάπτυξη νέων και πρωτότυπων τεχνικών στην ανάλυση και αναγνώριση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων.

Επιπρόσθετα στο κομμάτι της συλλογής δεδομένων απαιτείται η δημιουργία κοινώς αποδεκτών διαδικασιών συλλογής δεδομένων για όλους. Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι μέχρι τώρα ο κάθε ερευνητής ή οργανισμός χρησιμοποιεί την δικιά του μορφή δεδομένων που εξαρτάται αποκλειστικά από τι αυτός θέλει να κάνει και το είδος του μοντέλου και τεχνικής που αξιοποιεί, μια κοινή αποδεκτή μορφή δεδομένων θα επιτρέψει την παράλληλη αξιοποίηση των δεδομένων από όλους και θα εξαλείψει το φαινόμενα του μετασχηματισμού των δεδομένων κάθε φορά

που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε σε μία διαφορετική τεχνική από αυτή που τα χρησιμοποιούμε τώρα. Αυτό θα επιτρέψει να κερδηθεί χρόνος και θα απλοποιήσει τις διαδικασίες μεταφοράς δεδομένων μεταξύ ερευνητών και οργανισμών.

Η ανάλυση και διαχείριση πέραν του ενός επικίνδυνα φυσικού φαινομένου σε μία περιοχή, αναπόφευκτα οδηγεί στην αξιοποίηση διαφορετικών τεχνικών και μεθόδων για την ανάλυση των φαινομένων. Η σύγχρονη απαίτηση να λαμβάνουμε υπ' όψη όχι μόνο τα φυσικά φαινόμενα αλλά και τις αλληλεπιδράσεις τους, απαιτεί ένα κοινό σημείο αναφοράς για την συνεργασία των διαφόρων μεθόδων. Διαφορετικοί ορισμοί αναφορικά με το μέγεθος της έντασης, τον ορισμό της διακινδύνευσης, το χαρακτήρα των απειλούμενων στοιχείων και της τρωτότητας που χρησιμοποιούνται από αρκετούς ερευνητές στα προτεινόμενα μοντέλα τους, αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα στο σχεδιασμό και δημιουργία μιας ενοποιημένης μεθοδολογίας, που όχι μόνο θα αναλύει αλλά θα αναγνωρίζει και θα αξιολογεί τα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα, λαμβάνοντας τις πιθανές αλληλοεπιδράσεις, αλληλεξαρτήσεις, αλληλοσυνδέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Η ύπαρξη διαφορετικών ορισμών για διάφορες έννοιες που χρησιμοποιούνται στο γνωστικό πεδίο ανάλυσης των επικίνδυνα φυσικών φαινομένων, συνήθως οδηγεί μέσω των εφαρμογών που αναπτύσσονται πάνω σε αυτούς τους ορισμούς, να αποτυπώνεται μέρος του συνολικού κινδύνου ή διαφορετικής κάθε φορά οπτικής γωνίας του προβλήματος. Η ύπαρξη ενός κοινού πεδίου ορισμών θα βοηθήσει τους ερευνητές να συγκρίνουν τα αποτελέσματα που παρήχθησαν από διαφορετικά μοντέλα και θα βελτιώσει την συνεργασία μεταξύ διαφορετικών μεθόδων και τεχνικών.

Ο έλεγχος εγκυρότητας μιας μεθόδου ή μιας τεχνικής παρουσιάζει εξαιρετική σημασία και δεν πρέπει να παραλείπεται από την συνολική διαδικασία. Από τις επιχειρησιακά λειτουργικές εφαρμογές μέχρι και τις πρότυπες εφαρμογές και μεθόδους που αναπτύσσονται σε ένα επιστημονικό ίδρυμα, το στάδιο του ελέγχου και της εγκυρότητας αυτών, παρέχει την απαραίτητη ανάδραση σχετικά με την λειτουργία του μοντέλου και της μεθόδου του, ώστε τυχόν δυσχέρειες και ελλειπείς σχεδιασμοί να εξαλειφθούν μέσω της αξιολόγησης και εφαρμογής διορθωτικών μέτρων. Οι μέθοδοι συνήθως αξιολογούνται συγκρίνοντας τα

αποτελέσματα του μοντέλου με τα ιστορικά δεδομένα της περιοχής που εξετάζεται το μοντέλο. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της ταύτισης των αποτελεσμάτων μοντέλου με τα πραγματικά στοιχεία του παρελθόντος για την ίδια περιοχή μελέτης, τόσο αποδοτικότερη είναι η λειτουργία του για την συγκεκριμένη περιοχή. Η διασφάλιση της μεθόδου ελέγχου εγκυρότητας, προϋποθέτει την ύπαρξη συγκεκριμένων οδηγιών και προτύπων ως προς την διαδικασία αυτή. Η απουσία αυτών των οδηγιών και η μη δέσμευση των ερευνητών σε ένα κοινό πρωτόκολλο ενεργειών δεν έχουν επιτρέψει μέχρι τώρα την ανάπτυξη ικανοποιητικών μηχανισμών αξιολόγησης των τρέχων μοντέλων και μεθοδολογιών.

Αν και τον τελευταίο καιρό υπάρχει μία συνεχώς αυξανόμενη κατανόηση ότι τα φυσικά φαινόμενα δεν είναι μεμονωμένα αλλά αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους μεταβάλλοντας έτσι τον τελικό κίνδυνο που απορρέει από αυτά, εντούτοις πολλές μεθοδολογίες και ερευνητές αξιολογούν μόνο τα πιο επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα σε μία περιοχή, αγνοώντας αυτά που είναι λιγότερα επικίνδυνα ή παρουσιάζουν μικρότερη συχνότητα εμφάνισης. Η προσέγγιση να διαφοροποιούμε την προσοχή μας απέναντι στα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα που συνυπάρχουν σε μία περιοχή, οδηγεί αναπόφευκτα στο γεγονός να αγνοήσουμε και την ύπαρξη αλληλοεπιδράσεων μεταξύ αυτών των φαινομένων, υποτιμώντας το μέγεθος του τελικού κινδύνου που υπάρχει σε μία περιοχή. Ο αντίποδας σε όλα αυτά είναι η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας που θα έχει την δυνατότητα να αναγνωρίζει, αναλύει και αποτυπώνει όχι μόνο το σύνολο των επικίνδυνα φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή αλλά και των αλληλοεπιδράσεών τους. Αυτή την προσπάθεια κατέβαλλε η παρούσα διδακτορική διατριβή που σκοπό είχε τον σχεδιασμό και υλοποίηση μίας μεθόδου που βασίζεται στη Μπεϋζιανή Λογική και μπορεί να διαχειριστεί πέραν του ενός επικίνδυνου φυσικού φαινομένου με ποσοτικά κριτήρια στην περιοχή μελέτης. Κάτω από αυτό το πλαίσιο εκτιμάται ότι η πέτυχε τον σκοπό της παρέχοντας εκτός από μία μεθοδολογία και ένα συμπαγές θεωρητικό πλαίσιο για την ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα αποτελέσματα και τη γνώση που αποκτήθηκε από τη διεξαχθείσα έρευνα, προτείνονται ορισμένα ζητήματα τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

Η μελέτη της βιβλιογραφίας ανέδειξε ότι δεν υφίστανται υπολογιστικά μοντέλα που να αξιολογούν μόνα τους, τις πιθανές συνδέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Πράγματι μεθοδολογίες που υποστηρίζουν τις αιτιατές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών έχουν το πλεονέκτημα να ορίζουν σε κατάλληλο περιβάλλον εργασίας αυτές τις σχέσεις και την απεικόνισή τους σε μία οθόνη. Ωστόσο η ανίχνευση των σχέσεων αποτελεί αποκλειστικό προνόμιο του ερευνητή και η ποιότητα των αποτελεσμάτων έχει άμεση σχέση με την διαίσθηση του ερευνητή. Εκτιμάται ότι η ανάπτυξη εφαρμογών που μπορούν να ανιχνεύουν μόνες τους, την παρουσία επικίνδυνων φαινομένων θα αποτελέσει ένα δυνατό εργαλείο στην αντιμετώπιση αυτών καθώς πλέον δεν θα υπάρχει συσχέτιση μεταξύ αντίληψης του τελικού χρήστη και της αναγνώρισης των φαινομένων.

Η μεθοδολογία που διατυπώθηκε θα μπορούσε να συνεργαστεί μέσα σε ένα κοινό περιβάλλον εργασίας με άλλες εφαρμογές ώστε η συνύπαρξή τους, να μην απαιτεί την μεταφορά ή μετατροπή δεδομένων, κερδίζοντας σε χρόνο και αριθμό υπολογισμών. Επί παραδείγματι στην μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής τα διαθέσιμα δεδομένα επεξεργάζονται στατιστικά με κατάλληλο λογισμικό (Minitab) και κατόπιν εισέρχονται στο AgenaRisk για τον σχηματισμό του γραφήματος, όπου τα αποτελέσματα του δικτύου αναλύονται με ένα πρόγραμμα επεξεργασίας χωρικών δεδομένων για την παραγωγή χαρτών. Αποτελεί εξαιρετική πρόκληση η ανάπτυξη ενός κοινού περιβάλλοντος εργασίας που θα επεξεργάζεται στατιστικά τα δεδομένα, θα ανιχνεύει τις αιτιατές σχέσεις μεταξύ των φαινομένων και θα οπτικοποιεί στο χώρο τα αποτελέσματα.

Επίλογος

Στις μέρες μας διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει ένα μεγάλο αριθμό μεθοδολογιών για την ανίχνευση και την ανάλυση των επικίνδυνα φυσικών φαινομένων σε μία περιοχή. Η εξάρτηση της μεθοδολογίας από την διαθεσιμότητα των δεδομένων, η δυνατότητα της να λαμβάνει υπόψιν τις αλληλοεπιδράσεις των φαινομένων και η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής είναι ίσως οι σημαντικότεροι παράγοντες για την ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας που θα διασφαλίζει στο μέγιστο δυνατό βαθμό τον ανθρώπινο παράγοντα σε μία περιοχή.

Καθόσον μέχρι τώρα δεν έχει υπάρξει μία ευθύς σχέση μεταξύ των εμπειριών που έχει αποκτήσει η ανθρωπότητα από τις διάφορες καταστροφές που έχουν συμβεί στο παρελθόν και μίας αποτελεσματικής προετοιμασίας και οχύρωσης απέναντι στα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα, ο στόχος παραμένει ο ίδιος. Να αναπτύξουμε κατάλληλες μεθόδους και τεχνικές, οι οποίες θα επιτρέψουν την αναγνώριση και ανάλυση των επικίνδυνων φυσικών φαινομένων πιο αποτελεσματικά από ποτέ. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η ανάλυση και η αξιολόγηση των επικίνδυνα φυσικών φαινομένων είναι μια εξελισσόμενη διαδικασία, που έχει να αντιμετωπίσει πολλές προκλήσεις στο μέλλον. Η ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, (μέσα από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε), εκτιμάται ότι συνεισφέρει θετικά στην εξελικτική πορεία των μεθόδων και τεχνικών απέναντι στα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα, ικανοποιώντας με αυτό τον τρόπο, τον αρχικό στόχο του δημιουργού της.

Βιβλιογραφία

(1992). internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management. Glossary. U. N. D. o. H. Affairs. Geneva, UNDHA. **DNA/93/36**.

(2007). "Modelling the spatial distribution of five natural hazards in the context of the WHO/EMRO Atlas of Disaster Risk as a step towards the reduction of the health impact related to disasters." Int J Health Geogr **6**: 8.

(2009). Risk management — Risk assessment techniques IEC/FDIS. **IEC/FDIS 31010:2009**.

(2011). Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. C. s. w. paper.

Aguilera, P., A. Fernández, R. Fernández, R. Rumí and A. Salmerón (2011). "Bayesian networks in environmental modelling." Environmental Modelling & Software **26**(12): 1376-1388.

Arnold, M., M. Dilley, U. Deichmann, R. S. Chen and A. L. Lerner-Lam (2005). "Natural disaster hotspots: a global risk analysis." Disaster risk management **5**: 1-145.

Asimakopoulou, E. and N. Bessis (2011). Towards an Integrated Multi-hazard Prevention Assessment for Community Threats, IEEE.

Aspinall, W. P. and G. Woo (2014). "Santorini unrest 2011–2012: an immediate Bayesian belief network analysis of eruption scenario probabilities for urgent decision support under uncertainty." Journal of Applied Volcanology **3**(1): 1-12.

Aven, T. (2013). "On the meaning of a black swan in a risk context." Safety science **57**: 44-51.

Bartel, P. and J. Muller (2007). "Horn of Africa natural hazard probability and risk analysis." US Department of State–Humanitarian Information Unit.

Bayraktarli, Y. Y. (2006). Application of Bayesian probabilistic networks for liquefaction of soil. 6th International PhD Symposium in Civil Engineering.

Bayraktarli, Y. Y., J.-P. Ulfkjaer, U. Yazgan and M. H. Faber (2005). On the application of Bayesian probabilistic networks for earthquake risk management. 9th international conference on structural safety and reliability, Italy, Rome.

Beck, U. (1992). "From industrial society to the risk society: questions of survival, social structure and ecological enlightenment." Theory, culture & society **9**(1): 97-123.

Bell, R. and T. Glade (2004). "Multi-hazard analysis in natural risk assessments."

Bennett, J. E., A. Racine-Poon and J. C. Wakefield (1996). MCMC for nonlinear hierarchical models, London, UK: Chapman and Hall.

Blaser, L., M. Ohrnberger, C. Riggelsen, A. Babeyko and F. Scherbaum (2011). "Bayesian networks for tsunami early warning." Geophysical Journal International **185**(3): 1431-1443.

Boehm, B. W. (1988). "A spiral model of software development and enhancement." Computer **21**(5): 61-72.

Bovolo, C. I., S. J. Abele, J. C. Bathurst, D. Caballero, M. Ciglan, G. Eftichidis and B. Simo (2009). "A distributed framework for multi-risk assessment of natural hazards used to model the effects of forest fire on hydrology and sediment yield." Computers & Geosciences **35**(5): 924-945.

Bruneau, M., M. Barbato, J. E. Padgett, A. E. Zaghi, J. Mitrani-Reiser and Y. Li (2017). State of the Art of Multihazard Design, American Society of Civil Engineers.

Burton, I., R. Kates, G. White, L. Clarke, D. Coppola, W. Crandall, J. Parnell, J. Spillan, H. Fayol and A. Kloskovska (2015). "UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction (2009)." International Strategy for Disaster Reduction.

Cai, B., Y. Liu, Z. Liu, X. Tian, Y. Zhang and R. Ji (2013). "Application of Bayesian networks in quantitative risk assessment of subsea blowout preventer operations." Risk Analysis **33**(7): 1293-1311.

Carpignano, A., E. Golia, C. Di Mauro, S. Bouchon and J. P. Nordvik (2009). "A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application." Journal of risk research **12**(3-4): 513-534.

Castillo, E., J. M. Gutiérrez and A. S. Hadi (1998). "Modeling probabilistic networks of discrete and continuous variables." Journal of Multivariate Analysis **64**(1): 48-65.

Cees J. van Westen, L. M., Luc Boerboom "<MULTI hazard risk costa rica westen.pdf>."

Charniak, E. (1991). "Bayesian networks without tears." AI magazine **12**(4): 50.

Chib, S. (2001). "Markov chain Monte Carlo methods: computation and inference." Handbook of econometrics **5**: 3569-3649.

Chib, S. (2001). Markov chain Monte Carlo methods: computation and inference. Handbook of econometrics, Elsevier. **5**: 3569-3649.

Chongfu, H. (1996). "Fuzzy risk assessment of urban natural hazards." Fuzzy sets and systems **83**(2): 271-282.

Chongfu, H. (1997). "Principle of information diffusion." Fuzzy Sets and Systems **91**(1): 69-90.

Chuvieco, E. and R. G. Congalton (1988). "Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data." Geocarto International **3**(4): 41-53.

Chuvieco, E. and R. G. Congalton (1989). "Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping." Remote sensing of Environment **29**(2): 147-159.

Ciscar, J. C., L. Feyen, A. Soria, C. Lavalle, F. Raes, M. Perry, F. Nemry, H. Demirel, M. Rozsai and A. Dosio (2014). "Climate Impacts in Europe The JRC PESETA II Project."

Cobb, B. R., R. Rumi and A. Salmerón (2007). Bayesian network models with discrete and continuous variables. Advances in Probabilistic Graphical Models, Springer: 81-102.

Coppock, J. T. (1995). GIS and natural hazards: an overview from a GIS perspective. Geographical information systems in assessing natural hazards, Springer: 21-34.

Corominas, J., C. van Westen, P. Frattini, L. Cascini, J. P. Malet, S. Fotopoulou, F. Catani, M. Van Den Eeckhaut, O. Mavrouli, F. Agliardi, K. Pitilakis, M. G.

- Winter, M. Pastor, S. Ferlisi, V. Tofani, J. Hervás and J. T. Smith (2013). "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk." Bulletin of Engineering Geology and the Environment **73**(2): 209-263.
- Cox Jr, L. A. (2013). Improving Individual Risk Management Decisions: Learning from Experience and Coping with Model Uncertainty. Improving Risk Analysis, Springer: 59-95.
- Cozzani, V., G. Gubinelli, G. Antonioni, G. Spadoni and S. Zanelli (2005). "The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis." Journal of Hazardous Materials **127**(1–3): 14-30.
- Cutter, S. L. (1996). "Vulnerability to environmental hazards." Progress in human geography **20**(4): 529-539.
- De Graff, J. V., S. H. Cannon, A. J. Gallegos, V. Schaefer, R. Schuster and A. Turner (2007). Reducing post-wildfire debris flow risk through the Burned Area Emergency Response (BAER) process. Conference Presentations, 1st North American Landslide Conference, Vail, CO.
- De Pippo, T., C. Donadio, M. Pennetta, F. Terlizzi and A. Valente (2009). "Application of a method to assess coastal hazard: the cliffs of the Sorrento Peninsula and Capri (southern Italy)." Geological Society, London, Special Publications **322**(1): 189-204.
- Delmonaco, G., C. Margottini and D. Spizzichino (2006). "ARMONIA methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps." Deliverable 3.1. 1, ARMONIA.
- Der Kiureghian, A. and O. Ditlevsen (2009). "Aleatory or epistemic? Does it matter?" Structural Safety **31**(2): 105-112.
- Dlamini, W. M. (2011). "Application of Bayesian networks for fire risk mapping using GIS and remote sensing data." GeoJournal **76**(3): 283-296.
- Dragicevic, S., D. Filipovic, S. Kostadinov, R. Ristic, I. Novkovic, N. Zivkovic, G. Andjelkovic, B. Abolmasov, V. Secerov and S. Djurdjic (2011). "Natural hazard assessment for land-use planning in Serbia." International Journal of Environmental Research **5**(2): 371-380.

- Durda, D. D. and D. A. Kring (2004). "Ignition threshold for impact-generated fires." Journal of Geophysical Research: Planets **109**(E8).
- Durham, K. (2003). "Treating the risks in Cairns." Natural hazards **30**(2): 251-261.
- Einstein, H., R. Sousa, K. Karam, I. Manzella and V. Kveldevisvik (2010). "Rock slopes from mechanics to decision making." Chapter 1: 3-13.
- Fenton, N., B. Littlewood, M. Neil, L. Strigini, D. Wright and P.-J. Courtois (1997). "Bayesian belief network model for the safety assessment of nuclear computer-based systems."
- Fenton, N. and M. Neil (2007). "Managing Risk in the Modern World." Application of Bayesian Networks.
- Fragiadakis, M. and S. E. Christodoulou (2014). "Seismic reliability assessment of urban water networks." Earthquake Engineering & Structural Dynamics **43**(3): 357-374.
- Friedman, N. and M. Goldszmidt (1996). Building classifiers using Bayesian networks.
- Frigerio, S. and C. J. van Westen (2010). "RiskCity and WebRiskCity: Data Collection, Display, and Dissemination in a Multi-Risk Training Package." Cartography and geographic information science **37**(2): 119-135.
- García-Herrero, S., M. Mariscal, J. M. Gutiérrez and A. Toca-Otero (2013). "Bayesian network analysis of safety culture and organizational culture in a nuclear power plant." Safety science **53**: 82-95.
- Gill, J. C. and B. D. Malamud (2014). "Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards." Reviews of Geophysics **52**(4): 680-722.
- GIS, p. e. a. r. a. l. B. n. t. a., A. Grêt-Regamey and D. Straub (2006). "Spatially explicit avalanche risk assessment linking Bayesian networks to a GIS." Natural Hazards and Earth System Science **6**(6): 911-926.
- Glade, T. (2012). "MULTI-HAZARD EXPOSURE ANALYSES WITH MULTIRISK."

Goodchild, A., E. Jessup, E. McCormack, D. Andreoli, S. Rose, C. Ta, K. Pitera and B. Ivanov (2009). Development and analysis of a GIS-based statewide freight data flow network, Washington State Department of Transportation.

Granger, K., T. G. Jones, M. Leiba and G. Scott (1999). "Community risk in Cairns: a multi-hazard risk assessment." Australian Journal of Emergency Management, The **14**(2): 25.

Greiving, S. and M. Fleischhauer (2012). "National climate change adaptation strategies of European states from a spatial planning and development perspective." European Planning Studies **20**(1): 27-48.

Greiving, S., M. Fleischhauer and J. Lückenkötter (2006). "A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards." Journal of environmental planning and management **49**(1): 1-19.

Gutierrez, B. T., N. G. Plant and E. R. Thieler (2011). "A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise." Journal of Geophysical Research: Earth Surface **116**(F2).

Hapke, C. and N. Plant (2010). "Predicting coastal cliff erosion using a Bayesian probabilistic model." Marine geology **278**(1): 140-149.

Heinl, M., A. Neuenschwander, J. Sliva and C. Vanderpost (2006). "Interactions between fire and flooding in a southern African floodplain system (Okavango Delta, Botswana)." Landscape Ecology **21**(5): 699-709.

Huang, C. and D. Ruan (2008). "Fuzzy risks and an updating algorithm with new observations." Risk Analysis **28**(3): 681-694.

Jensen, F. V. (2001). "Bayesian networks and decision graphs. Statistics for engineering and information science." Springer **32**: 34.

Ji, Z., N. Li, W. Xie, J. Wu and Y. Zhou (2013). "Comprehensive assessment of flood risk using the classification and regression tree method." Stochastic environmental research and risk assessment **27**(8): 1815-1828.

Jiao, Y. and J. Hudson (1995). The fully-coupled model for rock engineering systems. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, Elsevier.

Kappes, M. S., K. Gruber, S. Frigerio, R. Bell, M. Keiler and T. Glade (2012). "The MultiRISK platform: The technical concept and application of a regional-scale multihazard exposure analysis tool." Geomorphology **151-152**: 139-155.

Kappes, M. S., K. Gruber, S. Frigerio, R. Bell, M. Keiler and T. Glade (2012). "The MultiRISK platform: The technical concept and application of a regional-scale multihazard exposure analysis tool." Geomorphology **151**: 139-155.

Kappes, M. S., M. Keiler, K. Elverfeldt and T. Glade (2012). "Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review." Natural Hazards **64**(2): 1925-1958.

Kappes, M. S., M. Keiler, K. von Elverfeldt and T. Glade (2012). "Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review." Natural hazards **64**(2): 1925-1958.

Kappes, M. S., M. Papathoma-Köhle and M. Keiler (2012). "Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology." Applied Geography **32**(2): 577-590.

Khakzad, N. (2015). "Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures." Reliability Engineering & System Safety **138**: 263-272.

Khakzad, N., F. Khan and P. Amyotte (2011). "Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches." Reliability Engineering & System Safety **96**(8): 925-932.

Khakzad, N., F. Khan and P. Amyotte (2013). "Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network." Process Safety and Environmental Protection **91**(1-2): 46-53.

Khakzad, N., F. Khan and P. Amyotte (2013). "Risk-based design of process systems using discrete-time Bayesian networks." Reliability Engineering & System Safety **109**: 5-17.

Khakzad, N., F. Khan, P. Amyotte and V. Cozzani (2014). "Risk management of domino effects considering dynamic consequence analysis." Risk Analysis **34**(6): 1128-1138.

Khakzad, N. and G. Reniers (2015). "Risk-based design of process plants with regard to domino effects and land use planning." Journal of hazardous materials **299**: 289-297.

Komendantova, N., R. Mrzyglocki, A. Mignan, B. Khazai, F. Wenzel, A. Patt and K. Fleming (2013). "New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe."

Korb, K. B. and A. E. Nicholson (2010). Bayesian artificial intelligence, CRC press.

Lee, C.-J. and K. J. Lee (2006). "Application of Bayesian network to the probabilistic risk assessment of nuclear waste disposal." Reliability Engineering & System Safety **91**(5): 515-532.

Liang, W.-j., D.-f. Zhuang, D. Jiang, J.-j. Pan and H.-y. Ren (2012). "Assessment of debris flow hazards using a Bayesian Network." Geomorphology **171**: 94-100.

Liu, B., Y. L. Siu, G. Mitchell and W. Xu (2013). "Exceedance probability of multiple natural hazards: risk assessment in China's Yangtze River Delta." Natural hazards **69**(3): 2039-2055.

Liu, Z., F. Nadim, B. V. Vangelsten, U. Eidsvig and B. Kalsnes (2014). Quantitative Multi-risk Modelling and Management Using Bayesian Networks. Landslide Science for a Safer Geoenvironment, Springer: 773-779.

Livingstone, D. J. and D. W. Salt (2005). "Judging the significance of multiple linear regression models." Journal of medicinal chemistry **48**(3): 661-663.

Lung, T., C. Lavallo, R. Hiederer, A. Dosio and L. M. Bouwer (2013). "A multi-hazard regional level impact assessment for Europe combining indicators of climatic and non-climatic change." Global Environmental Change **23**(2): 522-536.

Malet, J.-P., T. Glade and N. Casagli (2010). "Mountain Risks: Bringing Science to Society." CERG Editions, Strasbourg.

Malet, J.-P., T. Glade and N. Casagli (2010). "Mountain Risks: Bringing Science to Society." CERG Strasbourg.

Mannan, S. (2004). Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control, Butterworth-Heinemann.

Marzocchi, W. (2009). Principles of multi-risk assessment: Interaction amongst natural and man-induced risks, EUR-OP.

Marzocchi, W., A. Garcia-Aristizabal, P. Gasparini, M. L. Mastellone and A. Di Ruocco (2012). "Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy." Natural Hazards **62**(2): 551-573.

Matellini, D. B., A. D. Wall, I. D. Jenkinson, J. Wang and R. Pritchard (2013). "Modelling dwelling fire development and occupancy escape using Bayesian network." Reliability Engineering & System Safety **114**: 75-91.

MATRIX (2010-13). New Multi-HAZard and MulTi-RIsK Assessment MethodS for Europe.

Mediero, L., L. Garrote and F. Martin-Carrasco (2007). "A probabilistic model to support reservoir operation decisions during flash floods." Hydrological sciences journal **52**(3): 523-537.

Miller, B. and D. Rowe (2012). A survey SCADA of and critical infrastructure incidents. Proceedings of the 1st Annual conference on Research in information technology, ACM.

Mitsopoulos, I. D. and A. P. Dimitrakopoulos (2007). "Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests." Annals of Forest Science **64**(3): 287-299.

Molina, J.-L., D. Pulido-Velázquez, J. L. García-Aróstegui and M. Pulido-Velázquez (2013). "Dynamic Bayesian networks as a decision support tool for assessing climate change impacts on highly stressed groundwater systems." Journal of Hydrology **479**: 113-129.

Money, E. S., K. H. Reckhow and M. R. Wiesner (2012). "The use of Bayesian networks for nanoparticle risk forecasting: model formulation and baseline evaluation." Science of the Total Environment **426**: 436-445.

Moral, S., R. Rumí and A. Salmerón (2001). Mixtures of truncated exponentials in hybrid Bayesian networks. Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty, Springer: 156-167.

Munich, R. (2005). Megacities-Megarisks: Trends and challenges for insurance and risk management, Munich Re.

Murphy, K. and Y. Weiss (2001). The factored frontier algorithm for approximate inference in DBNs. Proceedings of the Seventeenth conference on Uncertainty in artificial intelligence, Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Nadim, F. and Z. Liu (2013). Quantitative risk assessment for earthquake-triggered landslides using Bayesian network. Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Paris.

Nadim, F. and Z. Q. Liu (2013). "Quantitative risk assessment for earthquake-triggered landslides using Bayesian network."

Neapolitan, R. E. (2004). Learning bayesian networks, Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

Newhall, C. and R. Hoblitt (2002). "Constructing event trees for volcanic crises." Bulletin of Volcanology **64**(1): 3-20.

Nielsen, T. D. and F. V. Jensen (2007). Bayesian networks and decision graphs (information science and statistics), Springer.

Nielsen, T. D. and F. V. Jensen (2009). Bayesian networks and decision graphs, Springer Science & Business Media.

Nyberg, J. B., B. G. Marcot and R. Sulyma (2006). "Using Bayesian belief networks in adaptive management." Canadian Journal of Forest Research **36**(12): 3104-3116.

Obrová, V. and L. Smolíková (2013). The Comparison of Selected Risk Management Methods for Project Management. Environmental Software Systems. Fostering Information Sharing, Springer: 517-524.

Osipov, V., V. Larionov, V. Burova, N. Frolova and S. Sushchev (2017). "Methodology of natural risk assessment in Russia." Natural Hazards: 1-25.

Pagano, A., R. Giordano, I. Portoghese, U. Fratino and M. Vurro (2014). "A Bayesian vulnerability assessment tool for drinking water mains under extreme events." Natural Hazards **74**(3): 2193-2227.

Papakosta, P. and D. Straub (2013). A Bayesian network approach to assessing wildfire consequences. Proc. ICOSAR.

Pearl, J. (1982). Reverend Bayes on inference engines: A distributed hierarchical approach, Cognitive Systems Laboratory, School of Engineering and Applied Science

Pearl, J. (1986). "Fusion, propagation, and structuring in belief networks." Artificial intelligence **29**(3): 241-288.

Pearl, J. (2009). "Causal inference in statistics: An overview." Statistics surveys **3**: 96-146.

Peng, M. and L. Zhang (2012). "Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: a new model based on Bayesian networks." Natural hazards **64**(1): 903-933.

Reason, J. (2016). Managing the risks of organizational accidents, Routledge.

Ronchetti, F., A. Corsini, S. Kollarits, D. Leber, J. Papez, K. Plunger, T. Preseren, I. Schnetzer and M. Stefani (2013). Improve Information Provision for Disaster Management: MONITOR II, EU Project. Landslide Science and Practice, Springer: 47-54.

Rowe, J. P. and J. C. Lester (2010). Modeling User Knowledge with Dynamic Bayesian Networks in Interactive Narrative Environments.

Russell, S. and P. Norvig (2010). "Beyond classical search." Artificial Intelligence, A Modern Approach: 125-128.

Sandri, L., J.-C. Thouret, R. Constantinescu, S. Biass and R. Tonini (2014). "Long-term multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru)." Bulletin of Volcanology **76**(2).

Schmidt-Thomé, P., H. Kallio, J. Jarva, T. Tarvainen and S. Greiving (2006). The Spatial Effects and Management of Natural and Technological Hazards in Europe-ESPON 1.3. 1 Executive Summary. Geological Survey of Finland.

Schmidt, J., I. Matcham, S. Reese, A. King, R. Bell, R. Henderson, G. Smart, J. Cousins, W. Smith and D. Heron (2011). "Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling." Natural Hazards **58**(3): 1169-1192.

- Song, Y., J. Gong, S. Gao, D. Wang, T. Cui, Y. Li and B. Wei (2012). "Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: a case study in Beichuan, China." Computers & Geosciences **42**: 189-199.
- Špačková, O. and D. Straub (2011). Probabilistic risk assessment of excavation performance in tunnel projects using Bayesian networks: a case study. Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk.
- Sterian, P. E. (2013). "Realistic approach of the relations of uncertainty of Heisenberg." Advances in High Energy Physics **2013**.
- Straub, D. and A. Grêt-Regamey (2006). "A Bayesian probabilistic framework for avalanche modelling based on observations." Cold Regions Science and Technology **46**(3): 192-203.
- Syphard, A. D., J. E. Keeley, A. B. Massada, T. J. Brennan and V. C. Radeloff (2012). "Housing arrangement and location determine the likelihood of housing loss due to wildfire." PloS one **7**(3): e33954.
- Tarvainen, T., J. Jarva and S. Greiving (2006). "Spatial pattern of hazards and hazard interactions in Europe." SPECIAL PAPER-GEOLOGICAL SURVEY OF FINLAND **42**: 83.
- Tate, E., S. L. Cutter and M. Berry (2010). "Integrated multihazard mapping." Environment and planning. B, Planning & design **37**(4): 646.
- Thierry, P., L. Stieltjes, E. Kouokam, P. Nguéya and P. M. Salley (2007). "Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the GRINP project at Mount Cameroon." Natural Hazards **45**(3): 429-456.
- Thierry, P., L. Stieltjes, E. Kouokam, P. Nguéya and P. M. Salley (2008). "Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: the GRINP project at Mount Cameroon." Natural Hazards **45**(3): 429-456.
- Toma, C. (2013). "Wavelets-computational aspects of sterian realistic approach to uncertainty principle in high energy physics: a transient approach." Advances in High Energy Physics **2013**.

Tsiplakidis, J. and Y. N. Photis (2019). Multihazard Risk Assessment from Qualitative Methods to Bayesian Networks: Reviewing Recent Contributions and Exploring New Perspectives. Geospatial Challenges in the 21st Century, Springer: 401-429.

Uusitalo, L. (2007). "Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling." Ecological modelling **203**(3): 312-318.

van Westen, C., M. S. Kappes, B. Q. Luna, S. Frigerio, T. Glade and J.-P. Malet (2014). Medium-Scale Multi-hazard Risk Assessment of Gravitational Processes. Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance, Springer: 201-231.

Van Westen, C. J. (2013). 3.10 Remote Sensing and GIS for Natural Hazards Assessment and Disaster Risk Management. Treatise on Geomorphology. J. F. Shroder. San Diego, Academic Press: 259-298.

Van Westen, C. J., L. Montoya, L. Boerboom and E. Badilla Coto (2002). Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas: a case study for the city of Turrialba, Costa Rica. Proc. Regional workshop on Best Practise in Disaster Mitigation, Bali.

Van Westen, C. J., B. Quan Luna, R. Vargas Franco, J. P. Malet, M. Jaboyedoff, M. S. Kappes and S. Sterlacchini (2010). Development of training materials on the use of geo-information for multi-hazard risk assessment in a mountainous environment.

Venkatesan, M., A. Thangavelu and P. Prabhavathy (2013). An improved Bayesian classification data mining method for early warning landslide susceptibility model using GIS. Proceedings of Seventh International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA 2012), Springer.

Wang, J., X. Gu and T. Huang (2013). "Using Bayesian networks in analyzing powerful earthquake disaster chains." Natural hazards **68**(2): 509-527.

Westen, C. J., L. Montoya, L. Boerboom and E. Badilla Coto (2002). "Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas: a case study for the city of Turrialba, Costa Rica."

Wipulanusat, W., S. Nakrod and P. Prabnarong (2011). "Multi-hazard risk assessment using GIS and RS applications: a case study of Pak Phanang Basin." Walailak Journal of Science and Technology (WJST) **6**(1): 109-125.

Wisner, B., P. Blaikie, T. Cannon and I. Davis (2004). "The disaster pressure and release model." At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Second ed. London, England: Routledge.

Wu, X., H. Liu, L. Zhang, M. J. Skibniewski, Q. Deng and J. Teng (2015). "A dynamic Bayesian network based approach to safety decision support in tunnel construction." Reliability Engineering & System Safety **134**: 157-168.

Yates, M. and G. L. Cozannet (2012). "Brief communication" Evaluating European Coastal Evolution using Bayesian Networks"." Natural Hazards and Earth System Science **12**(4): 1173-1177.