

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

**Διδακτορική Διατριβή  
υπό ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΓΙΩΤΗ  
Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.**

**Διατριβή για τον Επιστημονικό Τίτλο του Διδάκτορα  
Υποβληθείσα στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου**

**Αθήνα, Ιούνιος 2013**

## ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Ευχαριστώ τον κ. Δημήτριο Τσαμπούλα, Καθηγητή Ε.Μ.Π., επιβλέποντα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, για την ανάθεση και επίβλεψη της Διατριβής αυτής.

Ευχαριστώ τους κ.κ. Αντώνιο Σταθόπουλο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., Διευθυντή Εργαστηρίου Σιδηροδρομικής και Μεταφορών Ε.Μ.Π. και Κωνσταντίνο Αμπακούμικιν, Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π., τέως Διευθυντή Εργαστηρίου Σιδηροδρομικής και Μεταφορών Ε.Μ.Π., μέλη της τριμελούς επιβλέπουσας επιτροπής της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, για τις πολύτιμες συμβουλές τις οποίες μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της Διατριβής αυτής.

Αισθάνομαι επίσης την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας που συνέβαλαν στην παρούσα εργασία.

Αθήνα, Ιούνιος 2013  
Γεώργιος Σ. Γιώτης

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ:**

<b>ΣΥΝΟΨΗ</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>3</b>
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ Α: ΕΙΣΑΓΩΓΗ:</b>	<b>8</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-1:</b>	
<b>ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>8</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	9
1.3 ΕΙΔΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	10
1.4 ΕΙΔΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΕΚΦΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ	11
1.5 ΕΚΦΡΑΣΗ/ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	12
1.5.1 Κριτήρια άμεσων επιρροών	12
1.5.2 Κριτήρια περιβαλλοντικών επιπτώσεων	13
1.5.3 Κριτήρια κοινωνικο-οικονομικά	14
1.6 ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	14
1.7 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	15
1.8 ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΚΑΙ ΤΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΟΜΗ	16
1.9 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	16
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ Β: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΣΥΝΘΗΚΕΣ – ΤΡΟΠΟΙ):</b>	<b>19</b>
<b>Γενική Εισαγωγή Ενότητας Β'</b>	<b>19</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-2:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>19</b>
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
2.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME	20
2.2.1. Γενικά	20
2.2.2. Οι αρχές της μεθόδου	20
2.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME	24
2.3.1. Γενικά	24
2.3.2. Εφαρμογή των βημάτων του αλγορίθμου της μεθόδου Regime	24
2.4. ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME	28
2.4.1. Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	28
2.4.2. Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	29
2.4.3. Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	29
2.4.4. Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	30
2.4.5. Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	30
2.4.6. Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	30
2.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-3:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>32</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	32
3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX	32
3.2.1 Γενικά	32
3.2.2. Οι αρχές της μεθόδου	33
3.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX	34
3.3.1. Γενικά	34
3.3.2. Εφαρμογή των βημάτων της μεθόδου Qualiflex	34
3.4. ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX	41

3.4.1. Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	41
3.4.2. Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	41
3.4.3. Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	41
3.4.4. Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	42
3.4.5. Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	42
3.4.6. Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	42
3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-4:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ELECTRE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>43</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ELECTRE	44
4.2.1 Γενικά	44
4.2.2 Στρατηγικό πρότυπο μεθόδου ή «προβληματική»	44
4.2.3 Εννοιολογικό πρότυπο μεθόδων: «Συμφωνία» και «Ασυμφωνία»	45
4.2.4 Μαθηματικό πρότυπο μεθόδων - Κατά ζεύγη συγκρίσεις	46
4.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ELECTRE	46
4.3.1 Γενικά	46
4.3.2 Electre I	46
4.3.3 Electre II	47
4.3.4 Electre III	48
4.3.5 Electre IV	49
4.4 ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ELECTRE ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	50
4.4.1 Ιδιαιτερότητες αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	50
4.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	50
4.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	50
4.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	51
4.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	51
4.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	52
4.4.7 Απόκριση των μεθόδων της οικογένειας Electre σε αξιολογήσεις Συγκοινωνιακών Έργων	52
4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ELECTRE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	54
4.5.1 Παρουσίαση των δεδομένων του προβλήματος αξιολόγησης	54
4.5.2 Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre I	54
4.5.3 Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre II	55
4.5.4 Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre III	57
4.5.5 Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre IV	59
4.5.6 Σύγκριση συμπερασμάτων από την εφαρμογή μεθόδων Electre	61
4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 5:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>63</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	63
5.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE	63
5.2.1 Γενικά	63
5.2.2 Promethee I	63
5.2.3 Promethee II	64
5.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE	64
5.3.1 Γενικά	64
5.3.2 Εφαρμογή της Promethee I	65
5.3.3 Εφαρμογή της Promethee II	66
5.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE	67
5.4.1. Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	67
5.4.2. Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	67
5.4.3. Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	68
5.4.4. Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	68
5.4.5. Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	68
5.4.6. Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	68
5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	68

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-6:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΑΙΑ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>69</b>
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	69
6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΑΙΑ	69
6.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΑΙΑ	70
6.3.1 Γενικά	70
6.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου ΓΑΙΑ	70
6.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΑΙΑ	72
6.4.1 Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	72
6.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	72
6.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	72
6.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	73
6.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	73
6.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	73
6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-7:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΒΑΜΙΧ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>74</b>
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	74
7.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΒΑΜΙΧ	74
7.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΒΑΜΙΧ	75
7.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΒΑΜΙΧ	78
7.4.1 Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	78
7.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	78
7.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	78
7.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	79
7.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	79
7.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	79
7.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-8:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>80</b>
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΟΡΙΣΜΟΙ	80
8.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE	80
8.2.1 Γενικά	80
8.2.2 Αλγόριθμος και εννοιολογικές αρχές της μεθόδου	81
8.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE	82
8.3.1 Γενικά	82
8.3.2 Εφαρμογή των βημάτων του αλγορίθμου της μεθόδου Oreste	83
8.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE	84
8.4.1 Ιδιαιτερότητες αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	84
8.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	84
8.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	85
8.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	85
8.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	85
8.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	86
8.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	86
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ-9:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM (ATTITUDE DYNAMIC ATTRIBUTE MODEL) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>	<b>87</b>
9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΟΡΙΣΜΟΙ	87
9.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM	87
9.2.1 Γενικά	87
9.2.2 Αλγόριθμος και εννοιολογικές αρχές της μεθόδου	87
9.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM	88
9.3.1 Γενικά	88
9.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου ADAM	89
9.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM	90

9.4.1	Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	90
9.4.2	Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	91
9.4.3	Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	91
9.4.4	Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	91
9.4.5	Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	91
9.4.6	Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	91
9.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 10:</b>		
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>		<b>92</b>
10.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	92
10.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS	92
10.2.1	Γενικά	92
10.2.2	Αλγόριθμος και εννοιολογικές αρχές της μεθόδου	92
10.3	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS	93
10.3.1	Γενικά	93
10.3.2	Εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS	94
10.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	96
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 11:</b>		
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ (ENTROPY METHOD) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>		<b>97</b>
11.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	97
11.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ	97
11.3	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ	98
11.3.1	Γενικά	98
11.3.2	Εφαρμογή της μεθόδου Εντροπίας	99
11.3.3	Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων της παρούσας εφαρμογής	102
11.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 12:</b>		
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΗΡ (ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>		<b>103</b>
12.1	ΜΕΘΟΔΟΣ: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ (Analytic Hierarchy Process)	103
12.1.1	Γενικά	103
12.1.2	Περιγραφή της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης	103
12.1.3	Ιδιαιτερότητες της μεθόδου	106
12.2	ΚΡΙΤΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	107
12.2.1	Πλεονεκτήματα της μεθόδου	107
12.2.2	Μειονεκτήματα της μεθόδου	108
12.3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	109
12.3.1	Γενικά	109
12.3.2	Στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης	109
12.3.3	Ανά κριτήριο βαθμολόγηση έργων	110
12.3.4	Τελική αποτίμηση των αξιολογούμενων έργων	112
12.3.5	Έλεγχοι αξιοπιστίας βαθμολόγησης	112
12.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	112
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 13:</b>		
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT (MULTI ATTRIBUTE UTILITY THEORY) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b>		<b>114</b>
13.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	114
13.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT	114
13.3	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT	115
13.3.1	Γενικά για τη δημιουργία των Συναρτήσεων Τιμών (“Value Functions”)	115
13.3.2	Δημιουργία των Συναρτήσεων Τιμών (“Value Functions”) μέσω της ανταλλαγής προτιμήσεων	115
13.3.3	Η μορφή των συναρτήσεων τιμών/χρησιμότητας	116
13.4	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	116

13.4.1	Γενικά	116
13.4.2	Εφαρμογή της μεθόδου MAUT	117
13.5	ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT	118
13.5.1	Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων	118
13.5.2	Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων	119
13.5.3	Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης	119
13.5.4	Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων	119
13.5.5	Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης	119
13.5.6	Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων	119

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 14:**

#### **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ SMART ΚΑΙ SMARTER ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

14.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	120
14.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ SMART ΚΑΙ SMARTER	120
14.2.1	Μέθοδος SMART	120
14.2.2	Μέθοδος SMARTER	120

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 15:**

#### **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UTA (UTILITY ADDITIVE) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

15.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	121
15.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UTA	122
15.3	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UTA	123
15.3.1	Κατασκευή των συναρτήσεων $u_i(g_i)$	123
15.3.2	Συναρτήσεις χρησιμότητας (“utility functions”) και συναρτήσεις τιμών (“value functions”)	123
15.3.3	Η χρήση Γραμμικού Προγραμματισμού στην UTA	123

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 16:**

#### **ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

16.1	Βελτιστοποίηση Πολυστοχικής Λήψης Αποφάσεων (Multi-Objective Optimization)	125
16.1.1	Εισαγωγή	125
16.1.2	Παρουσίαση της μεθόδου γενικά	125
16.1.3	Παρουσίαση Λύσης με Γραμμικό Προγραμματισμό	126
16.1.4	Εφαρμογή στην Αξιολόγηση Συγκοινωνιακών έργων	127
16.2	Ασαφές Σύνολα - Ασαφείς Συναρτήσεις (Fuzzy Sets - Fuzzy Functions) σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων	129
16.2.1	Εισαγωγή	129
16.2.2	Παρουσίαση των ασαφών συνόλων και συναρτήσεων	129
16.2.3	Παρατηρήσεις και περαιτέρω εφαρμογές	130

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 17:**

#### **ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥΣ:**

#### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ**

17.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	134
17.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	134
17.2.1	Γενικά	134
17.2.2	Κατάταξη των μεθόδων	135
17.2.3	Η καταλληλότητα των μεθόδων στις απαιτήσεις των συγκοινωνιακών έργων	138
17.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	139
17.3.1	Γενικά	139
17.3.2	Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων	140
17.4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	142
17.5	ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	146

#### **ΕΝΟΤΗΤΑ Γ: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 18:**

#### **ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ**

18.1	1 <sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ	152
------	--	-----

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	152
18.1.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους	152
18.1.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο	152
18.2 2 <sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ	154
18.2.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους	154
18.2.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο	154
18.3 3 <sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ	155
18.3.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους	155
18.3.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο	155
18.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	156
18.4.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους	156
18.4.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο	157
18.5 4 <sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ/ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ	158
18.5.1 Παραδείγματα	158
18.5.2 Μεθοδολογικά στοιχεία της προτεινόμενης μεθόδου	159
18.5.3 Αλγόριθμος της προτεινόμενης μεθόδου ως προς την εξάρτηση/ιεράρχηση	167
18.6 5 <sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΑΝΑΓΩΓΗΣ	169
18.6.1 Κλίμακες Αναγωγής	169
18.6.2 Προτεινόμενη Κλίμακα αποτίμησης και αναγωγής	172
18.6.3 Έλεγχοι αξιοπιστίας κατά την εφαρμογή της μεθόδου	173
18.6.4 Πλαίσιο εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου	176
18.7 6 <sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	178
18.7.1 Η Αβεβαιότητα στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων	178
18.7.2 Μετατροπή ποιοτικών σχέσεων κριτηρίων σε ποσοτικές	178
18.7.3 Δημιουργία τιμών ανά κριτήριο	179
18.7.4 Εξαγωγή χρησιμότητων	180
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 19:</b>	
<b>ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ</b>	<b>181</b>
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ Δ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ</b>	<b>187</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 20:</b>	
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ</b>	<b>187</b>
20.1 Εισαγωγικά στις Εφαρμογές της προτεινόμενης μεθοδολογίας	187
20.2 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας: 1ο Παράδειγμα (Γενική Εφαρμογή)	187
20.3 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας: 2ο Παράδειγμα (Γενική Εφαρμογή)	196
20.4 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας: 3ο Παράδειγμα (Ειδική Εφαρμογή)	208
20.4.1 Παρουσίαση των δεδομένων του προβλήματος αξιολόγησης	208
20.4.2 Βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης	208
20.4.3 Επιδόσεις ανά κριτήριο των εναλλακτικών λύσεων	209
20.4.4 Αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων	210
20.4.5 Έλεγχοι	211
20.4.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με αυτά με εφαρμογή της κλίμακας Saaty	212
<b>ΕΝΟΤΗΤΑ Ε: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ</b>	<b>213</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 21:</b>	
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</b>	<b>213</b>
21.1 Γενικά	213
21.2 Συμπεράσματα	213
21.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	216
<b>ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ (GLOSSARY)</b>	<b>217</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>218</b>



# **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

**Υπό Γεωργίου Γιώτη**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Τσαμπούλας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

## **ΣΥΝΟΨΗ**

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθόδου πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Αρχικά στη Διδακτορική Διατριβή παρουσιάζεται η συγκριτική αξιολόγηση υφισταμένων μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων. Ακολουθεί κριτική αυτών των μεθόδων και προτείνονται νέες συνθήκες-τρόποι εφαρμογής τους. Από την ανάλυση των υφισταμένων μεθόδων σε διάφορα επίπεδα (στρατηγικό – εννοιολογικό – λογισμικό) εξάγονται συμπεράσματα ως προς τις αδυναμίες των μεθόδων σε διάφορα σημεία.

Βάσει των παραπάνω αναπτύσσεται νέα μέθοδος, με σκοπό την κατά το δυνατό πληρέστερη αντιμετώπιση αυτών των αδυναμιών. Η δόμηση της νέας μεθόδου γίνεται σε έξι βασικούς θεωρητικούς άξονες, ήτοι:

- «Χρηστική» βαρύτητα των κριτηρίων αξιολόγησης
- Ενοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης σε ευρύτερα κριτήρια
- Χρονική διακύμανση των επιδόσεων του έργου ανά κριτήριο εντός της χρονικής περιόδου αξιολόγησης
- Εξάρτηση μεταξύ κριτηρίων
- Κλίμακες επιδόσεων εναλλακτικών του έργου ανά κριτήριο
- Αβεβαιότητα στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση

Για κάθε στοιχείο της προτεινόμενης μεθόδου δίδονται οι εξισώσεις και αλγόριθμοι υπολογισμού του. Τέλος, δίδονται αναλυτικά παραδείγματα εφαρμογής της και γίνεται αποτίμηση των δυνατοτήτων εφαρμογής της στα συγκοινωνιακά έργα. Η προτεινόμενη μέθοδος, αν και αναπτύσσεται για τα συγκοινωνιακά έργα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλους τομείς υποδομών.

# **DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MULTI-CRITERIA ASSESSMENT**

**By George Yiotis**

**Thesis supervisor: Dimitrios Tsamboulas, Professor N.T.U.A.**

## **ABSTRACT**

The subject of this Dissertation thesis is to develop a new multi-criteria evaluation method. Initially, in the thesis the presentation of a comparative assessment of existing multi-criteria methods for transport projects is done. Based on this, a critical analysis of them is carried out, as well as, new conditions-ways of their application are proposed. An analysis/assessment of existing methods at various levels (strategic-semantic-calculus) draws conclusions at to their weaknesses.

Based on the above, a new method is developed, aiming to remedy such weaknesses. The structure of the proposed method is based on six basic theoretical axes:

- Evaluation criteria utility weighting
- Aggregation of evaluation criteria into broader criteria
- Temporal variation of project performance per criterion within the assessment period
- Dependence amongst criteria
- Assessment scaling of project's alternatives – alternatives' performances per criterion
- Uncertainty in multi-criteria evaluation

For each element of the proposed method the corresponding equations and algorithms are presented for its computation. Finally, detailed examples of its application are provided and the potential of its application to transport projects is assessed. The proposed method, although it is developed for transport projects, it can be applied to other fields as well.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εντάσσεται στην επιστημονική περιοχή της αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων και έχει ως κύριο αντικείμενο την ανάπτυξη μεθόδου πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Αρχικά, η παρούσα εργασία σε ένα σημαντικό τμήμα της θεωρεί, αναλύει και αξιολογεί υφιστάμενες μεθόδους πολυκριτηριακής αξιολόγησης, οι οποίες ευρίσκουν εφαρμογή τόσο σε οποιοδήποτε αντικείμενο, όσο και ειδικά στα συγκοινωνιακά έργα.

Οι υφιστάμενες μέθοδοι πολυκριτηριακής αξιολόγησης θεωρούνται, αναλύονται και αξιολογούνται, με γνώμονα τρία επίπεδα:

- Το στρατηγικό επίπεδο, το οποίο αφορά την τελική μορφή του εξαγομένου της εφαρμογής της μεθόδου (όπως: πλήρης ποσοτική διάταξη εναλλακτικών, πλήρης ποιοτική διάταξη εναλλακτικών, δημιουργία ενός πυρήνα-συνόλου αποδεκτών λύσεων με αποκλεισμό των υπολοίπων αλλά χωρίς περαιτέρω ιεράρχηση των εντός του πυρήνα εναλλακτικών).
- Το εννοιολογικό επίπεδο, το οποίο αφορά το σύνολο των βασικών θεωρητικών εννοιών που μετέρχεται/χρησιμοποιεί η μέθοδος ώστε να προσομοιώσει εννοιολογικά/λογικά/μαθηματικά το πρόβλημα της πολυκριτηριακής αξιολόγησης.
- Το λογισμικό/αλγοριθμικό επίπεδο, το οποίο αφορά τον τρόπο που εφαρμόζεται η μέθοδος, που μπορεί να αποδοθεί με λογικό διάγραμμα.

Για κάθε μία από τις υφιστάμενες μεθόδους που θεωρήθηκαν και αναλύθηκαν, τα κυριότερα στοιχεία/συμπεράσματα είναι τα εξής:

- **REGIME:** επιχειρεί διανυσματική προσομοίωση των κριτηρίων αξιολόγησης, εισάγοντας την έννοια του χώρου λύσεων. Το πλεονέκτημά της είναι ότι λόγω της δομής της ευνοεί τις ποιοτικές πληροφορίες, αφού ξεκινά με απλές διατάξεις των κριτηρίων αξιολόγησης όσο και των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών. Από την άλλη πλευρά, το μειονέκτημά της είναι ότι σε περιπτώσεις υπάρχουσας σημαντικής ποσοτικής πληροφορίας, υπάρχει απώλεια μέρους της πληροφορίας αυτής.
- **QUALIFLEX:** λειτουργεί επίσης με την έννοια του χώρου λύσεων. Λειτουργεί και αυτή λειτουργεί με ποιοτικούς συσχετισμούς στη διάταξη των κριτηρίων και των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών. Σε περιπτώσεις σημαντικής ποσοτικής πληροφορίας και σε αυτή τη μέθοδο υπάρχει απώλεια μέρους της πληροφορίας αυτής.
- **ELECTRE (Οικογένεια μεθόδων):** Οι μέθοδοι αυτές (ELECTRE I, II, III, IV) λειτουργούν με ποσοτικά στοιχεία, τόσο στα βάρη των κριτηρίων, όσο και στις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων ανά κριτήριο. Πρέπει να τονισθεί ότι οι μέθοδοι ELECTRE, δημιουργούν εν δυνάμει σχέσεις υπεροχής μίας εναλλακτικής επί άλλης σε κατά ζεύγη εναλλακτικών συγκρίσεις-θεωρήσεις. Κάθε σχέση υπεροχής απεικονίζεται με ένα βέλος-διάνυσμα και για αυτό αναφερόμαστε περί προτύπου γραφήματος υπεροχής. Η ELECTRE I λειτουργεί στη βάση της προβληματικής «α», δηλαδή επιχειρεί το διαχωρισμό του συνόλου των εναλλακτικών σε δύο υποσύνολα: τον «πυρήνα λύσεων», όπου ανήκουν οι αποδεκτές εναλλακτικές και το εκτός πυρήνα υποσύνολο, όπου ανήκουν οι μη αποδεκτές εναλλακτικές. Οι άλλες ELECTRE, ήτοι οι II, III, IV, λειτουργούν στη βάση της προβληματικής «γ», ήτοι επιχειρούν μία πλήρη διάταξη των εναλλακτικών. Γενικά πάντως, οι μέθοδοι ELECTRE λειτουργούν με τις έννοιες «συμφωνία» και «ασυμφωνία», οι οποίες δομούν ένα ολόκληρο εννοιολογικό πρότυπο. Οι μέθοδοι της προβληματικής γ, ήτοι οι Electre II, Electre III, Electre IV, πρέπει να προτιμώνται, στις περιπτώσεις όπου ο περιορισμός πόρων ή άλλες εν γένει οικονομικές, τεχνικές ή χωρικές συνθήκες επιβάλλουν την

κατά το δυνατό πλήρη διάταξη των εναλλακτικών λύσεων ως αποτέλεσμα της αξιολόγησής τους.

- PROMETHEE (Οικογένεια μεθόδων): οι μέθοδοι αυτές (PROMETHEE I, II) λειτουργούν επίσης με την έννοια συμφωνίας, χωρίς όμως να έχουν και την αντίστοιχη έννοια της ασυμφωνίας. Επίσης, ανήκουν στο πρότυπο γραφήματος υπεροχής. Οι μέθοδοι PROMETHEE έχουν δυνατότητες αξιοποίησης ποσοτικών πληροφοριών/δεδομένων, τόσο στις επιδόσεις των εναλλακτικών ανά κριτήριο, όσο και στα σχετικά βάρη των κριτηρίων. Οι εν λόγω μέθοδοι, έχουν τη δυνατότητα χειρισμού ετερογενών κριτηρίων, αφού θέτουν διαφορετικές παραμέτρους-όρια υπεροχής ανά κριτήριο. Οι μέθοδοι Promethee είναι σχετικά απλές στο χειρισμό τους. Η απόκριση των υπόψη μεθόδων θεωρείται ικανοποιητική σε μεγάλο πλήθος εναλλακτικών, όπως και σε μεγάλο πλήθος κριτηρίων.
- GAIA: λειτουργεί με την προσομοίωση εκάστου κριτηρίου σε άξονα διανυσματικού χώρου.
- EVAMIX: μπορεί να χειρισθεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά στοιχεία. Η μέθοδος Evamix χειρίζεται εξίσου καλά τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά δεδομένα όσον αφορά στις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης. Ως προς τα σχετικά βάρη των κριτηρίων, απαιτεί ποσοτικά στοιχεία. Η απόκριση της μεθόδου θεωρείται ικανοποιητική σε μεγάλο πλήθος εναλλακτικών, όπως και σε μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης.
- ORESTE: λειτουργεί με ποιοτική δομή, επομένως είναι σχετικά απλή, αλλά μπορεί να μη λαμβάνει υπόψη ποσοτική πληροφόρηση όταν ποσοτικά στοιχεία είναι διαθέσιμα. Η μέθοδος ανήκει στο πρότυπο γραφήματος υπεροχής. Επισημαίνεται ότι η μέθοδος επιχειρεί συγκερασμό μεταξύ της σπουδαιότητας των κριτηρίων και της σπουδαιότητας των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών.
- ADAM: λειτουργεί με βάση την έννοια του «ιδεατού σημείου», του σημείου δηλαδή όπου για την ιδεατή εναλλακτική λύση κάθε επίδοση που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες συντεταγμένες είναι η καλύτερη από τις επιδόσεις των εναλλακτικών στο συγκεκριμένο κριτήριο. Εφαρμόζοντας νόρμα διανυσματικού χώρου, υπολογίζει τις αποστάσεις των εναλλακτικών λύσεων από το ιδεατό σημείο, επομένως μπορεί να προβεί στην αποτίμηση/αξιολόγηση των εναλλακτικών.
- TOPSIS: λειτουργεί με βάση την έννοια του ιδεατού σημείου, αλλά στηρίζεται και στην έννοια του αντι-ιδεατού σημείου, του σημείου δηλαδή όπου για την «αντι-ιδεατή» εναλλακτική λύση κάθε επίδοση (που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες συντεταγμένες) είναι η χειρότερη από τις επιδόσεις των εναλλακτικών για το συγκεκριμένο κριτήριο. Εφαρμόζοντας νόρμες διανυσματικού χώρου, υπολογίζει τις αποστάσεις των εναλλακτικών λύσεων από το ιδεατό σημείο και από το αντι-ιδεατό σημείο, επομένως μπορεί να προβεί στην αποτίμηση/αξιολόγηση των εναλλακτικών.
- Μέθοδος «Εντροπίας» (Entropy method): λειτουργεί σε δύο στάδια: Στο πρώτο στάδιο, με βάση αρχικές εκτιμήσεις βαρών των κριτηρίων, υπολογίζει τις τελικές τιμές των βαρών των κριτηρίων, χρησιμοποιώντας και την ανά κριτήριο κατανομή-διασπορά των επιδόσεων των εναλλακτικών. Στο δεύτερο στάδιο, εφαρμόζοντας κάποια νόρμα διανυσματικού χώρου, υπολογίζει τις αποστάσεις των εναλλακτικών λύσεων από το ιδεατό σημείο, επομένως μπορεί να προβεί στην αποτίμηση/αξιολόγηση των εναλλακτικών.
- Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP): Πρόκειται για διαδικασία ιεράρχησης τόσο των κριτηρίων αξιολόγησης, όσο και των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων. Η μέθοδος μπορεί να χειρίζεται ικανοποιητικά τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά στοιχεία, ενώ έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μαθηματική της δομή,

ήτοι η πινακοποίηση των επιδόσεων των εναλλακτικών ανά κριτήριο και των βαρών των κριτηρίων, καθώς και η εύρεση των ιδιοτιμών.

- MAUT: ανάγει τις φυσικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια καταρχήν σε φυσικές τιμές (values) και εν συνεχεία, μέσω της στάθμισης των κριτηρίων, σε χρησιμότητες (utilities). Η μέθοδος έχει τη δυνατότητα να αξιοποιεί σε σημαντικό βαθμό τις όποιες ποσοτικές πληροφορίες (π.χ. βάρη κριτηρίων – επιδόσεις εναλλακτικών).
- UTA: λειτουργεί θεωρώντας ενιαία φάση τις δύο προαναφερθείσες φάσεις της MAUT, ήτοι η UTA μπορεί να υπολογίζει κατευθείαν τις χρησιμότητες. Η μέθοδος αρχικά προσδιορίζει τη διάταξη των εναλλακτικών ενός συνόλου και αφού ακολούθως προσδιορισθούν από τη διάταξη αυτή οι συναρτήσεις χρησιμότητας των κριτηρίων, εν συνεχεία μπορεί να αξιοποιηθούν οι συναρτήσεις αυτές για την αποτίμηση/αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων ενός άλλου συνόλου εναλλακτικών, με τα αντίστοιχα κριτήρια. Και αυτή η μέθοδος αξιοποιεί ποσοτικές πληροφορίες.
- SMART και SMARTER: αθροιστικής δομής μέθοδοι, χαρακτηριζόμενες από απλότητα.
- Πολυστοχική Βελτιστοποίηση (Multi-Objective Optimization). Εάν έχουμε ένα δεδομένο σύνολο εναλλακτικών υπό αξιολόγηση, η υπόψη μέθοδος θα προσδιορίσει μεν το σύνολο των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών των εναλλακτικών αυτών, όμως η λύση η οποία θα προκύψει μπορεί να μην είναι μία εκ των υφισταμένων εναλλακτικών.
- Ασαφή Σύνολα-Ασαφείς Συναρτήσεις (Fuzzy Sets-Fuzzy Functions). Προτείνονται τρόποι εφαρμογής τους, όπως ως προς α) την απόδοση των επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια, β) τη χρονική διακύμανση των επιδόσεων, γ) την πιθανοτική θεώρηση τιμών.

Ακολούθως, μετά την αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων, πραγματοποιείται μία συνοπτική περιεκτική κριτική των μεθόδων οι οποίες κατηγοριοποιούνται, σε πέντε βασικούς τύπους: τον τύπο του Διανυσματικού Προτύπου (ενδεικτικός αντιπρόσωπος η μέθοδος REGIME), τον τύπο του Προτύπου Γραφήματος Υπεροχής (ενδεικτικός αντιπρόσωπος η οικογένεια μεθόδων ELECTRE), και τρεις τύπους του Αθροιστικού Προτύπου, ήτοι τον τύπο του Ιδεατού Σημείου (ενδεικτικός αντιπρόσωπος η μέθοδος ADAM), τον τύπο Συναρτήσεων Χρησιμότητας (ενδεικτικός αντιπρόσωπος η μέθοδος MAUT), τον τύπο Ιεράρχησης [ενδεικτικός αντιπρόσωπος η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP)].

Η κριτική αυτή γίνεται με βάση τις εξής γενικές αρχές: α) τις δυνατότητες εφαρμογής των προτύπων σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, β) του γενικότερου πλαισίου εφαρμογής της πολυκριτηριακής ανάλυσης, ήτοι χωρίς βλάβη της γενικότητας. Τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια είναι η Διαφάνεια, η Απλότητα, η Ισχύς (δυνατότητες απόκρισης σε μεγάλο πλήθος εναλλακτικών, μεγάλο πλήθος κριτηρίων, απαιτήσεις δεδομένων, αβεβαιότητα, ευαισθησία) και η Λογική. Επίσης πραγματοποιείται εφαρμογή σε πραγματικό πρόβλημα πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, ώστε να φανούν ξεκάθαρα οι ιδιαιτερότητες κάθε προτύπου (specifications-limitations).

Βάσει της ανάλυσης και κριτικής των υφισταμένων μεθόδων, προκύπτουν τα παρακάτω σημεία στα οποία οι υφιστάμενες μέθοδοι παρουσιάζουν έλλειμμα θεώρησης/αντιμετώπισης και για τα οποία χρειάζεται περαιτέρω έρευνα:

- Η ενδεχόμενη εξάρτηση μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης των εναλλακτικών. Προκύπτει ότι τα οποιαδήποτε κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών λύσεων, αντιμετωπίζονται ως απολύτως ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτό ενέχει τον κίνδυνο πολλαπλών υπολογισμών των ιδίων μεγεθών (multiple counting) κατά την αξιολόγηση των εναλλακτικών.

- *Η μεταβολή των επιδόσεων αξιολογούμενων εναλλακτικών συναρτήσει του χρόνου.* Σε αρκετές αξιολογήσεις οι επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια μεταβάλλονται με το χρόνο. Αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη στις υφιστάμενες μεθόδους, τουλάχιστον άμεσα. Το γεγονός αυτό ενέχει τον κίνδυνο μη θεώρησης, άρα και μη αντιμετώπισης, διαφορετικών επιδόσεων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.
- *Ενοποίηση, βαρύτητα και ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης των εναλλακτικών.* Όλες σχεδόν οι μέθοδοι πολυκριτηριακής αξιολόγησης, δεν προβαίνουν σε συστηματική ενοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης σε υπερ-κριτήρια. Επίσης, σε πολλές μεθόδους, δεν λαμβάνει χώρα διαδικασία βαρυτικής στάθμισης και ιεράρχησης των κριτηρίων αξιολόγησης με βάση το σύνολο των συγκεκριμένων δεδομένων που σχετίζονται με το εξεταζόμενο αντικείμενο. Κατά συνέπεια δεν λαμβάνονται υπόψη ουσιαστικά κατά τη στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης οι επιδόσεις των εναλλακτικών σε αυτά (ούτε ως τιμές αυτές καθαυτές ούτε ως διασπορά αυτών).
- *Οι κλίμακες αναγωγής των φυσικών επιδόσεων των εναλλακτικών σε φυσικές τιμές.* Στις περισσότερες μεθόδους πολυκριτηριακής αξιολόγησης, θεωρούνται είτε ποιοτικές διατάξεις των επιδόσεων ανά κριτήριο είτε απλές αριθμητικές κλίμακες αναγωγής των επιδόσεων. Μάλιστα, συνήθως η αναγωγή αυτή γίνεται σχεδόν εμπειρικά, χωρίς να αντιμετωπίζονται φαινόμενα αβεβαιότητας, ήτοι χωρίς να δημιουργείται με συστηματικό τρόπο συνάρτηση αναγωγής των επιδόσεων σε τεχνητές επιδόσεις/φυσικές τιμές ανά κριτήριο. Και σε μεθόδους όμως όπου δημιουργούνται κλίμακες-συναρτήσεις αναγωγής από τις αρχικές επιδόσεις στις τεχνητές επιδόσεις/φυσικές τιμές, υφίστανται ζητήματα του βαθμού αξιοπιστίας του τρόπου αναγωγής.

Ακολουθώς, αναπτύσσεται η νέα προτεινόμενη μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η οποία επιχειρεί να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερο τα ελλείμματα των υφισταμένων μεθόδων.

Οι κύριοι θεωρητικοί άξονες της προτεινόμενης παρούσας μεθόδου που αποτελούν και την πρωτοτυπία της είναι:

- 1.) Η «χρηστική» βαρύτητα των κριτηρίων αξιολόγησης, όπως αυτά καθορίζονται από τον αποφασίζοντα. Η «χρηστική» βαρύτητα σχετίζεται με τις επιδόσεις εκάστης Εναλλακτικής που αξιολογείται. Κατά συνέπεια η ως προς τις Επιδόσεις Βαρύτητα συνιστάται αντί της Συνήθους Βαρύτητας και με αυτό τον τρόπο ο βαθμός της αντικειμενικότητας στις τιμές των βαρών αυξάνεται σημαντικά.
- 2.) Η ενοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης και η ποσοτική τους αναγωγή με μία διανυσματική προσομοίωσή τους. Η ενοποίηση αυτή λαμβάνει χώρα χωρίς την παραδοχή της καθετότητας μεταξύ όλων των κριτηρίων (ενώ η παραδοχή αυτή γίνεται δεκτή σε άλλες μεθόδους διανυσματικής προσομοίωσης, όπως η Regime και η Qualiflex). Επομένως, η παρούσα μέθοδος παρουσιάζει ένα σημαντικότερο βαθμό ευελιξίας από άλλες μεθόδους.
- 3.) Η θεώρηση της διακύμανσης των επιδόσεων εντός της χρονικής περιόδου αξιολόγησης. Αυτό οδηγεί σε μία δυναμική πολυκριτηριακή αξιολόγηση ενός περιβάλλοντος χώρου που αλλάζει. Έτσι, εκτός από τις δύο κλασσικές διαστάσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης, μία τρίτη διάσταση, δηλαδή αυτή της χρονικής, εισάγεται. Η διάσταση αυτή δίδει στη μέθοδο τη δυνατότητα να λάβει υπόψη της μεταβολές στις τιμές των μεταβλητών στα κριτήρια αλλά και στα βάρη αυτών.
- 4.) Τρόποι να καθορισθεί ο βαθμός εξάρτησης μεταξύ δύο κριτηρίων (αλληλεξάρτηση) σε κατά ζεύγη θεωρήσεις. Επαγωγή των κατά ζεύγη σχέσεων σε σχέσεις μεταξύ περισσότερων κριτηρίων αξιολόγησης, χρησιμοποιώντας μία προσομοίωση διανυσματικού χώρου, όπου κάθε κριτήριο αποτελεί έναν άξονα.

Καθορισμός και αξιοποίηση της ιεράρχησης των κριτηρίων ως μία διαδικασία αμφίδρομης επιρροής με την αλληλεξάρτηση των κριτηρίων. Προτείνεται Πίνακας Αλληλεπίδρασης Κριτηρίων εάν δεν υφίσταται μία κυριαρχούσα πολιτική καθορισμού της ιεραρχίας των κριτηρίων.

- 5.) Καθορίζονται Κλίμακες Αποτίμησης Κριτηρίων και Εναλλακτικών σε Πολυκριτηριακή Αξιολόγηση και προτείνεται Κλίμακα κατάλληλη για εφαρμογή σε συγκοινωνιακά έργα.
- 6.) Εισάγεται η Αβεβαιότητα όσον αφορά στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων. Παρουσιάζονται υφιστάμενες τεχνικές χειρισμού της Αβεβαιότητας με αλγοριθμική βήμα προς βήμα υπόσταση. Προτείνονται νέοι τρόποι αντιμετώπισης της Αβεβαιότητας, με έμφαση στις περιπτώσεις πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, που περιλαμβάνουν Στάθμιση Βαρών των Κριτηρίων αξιολόγησης, υπολογισμό Φυσικών Τιμών (values) και Ολικής Χρησιμότητας (total utility) ανά εναλλακτική.

Τα κύρια αλγοριθμικά βήματα της προτεινόμενης μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- 1.) Κριτήρια αξιολόγησης: Καθορισμός-Συνάφεια-Ενοποίηση-Ιεράρχηση.
- 2.) Επιδόσεις των Εναλλακτικών στα Κριτήρια: Αναγωγή σε φυσικές τιμές / τεχνητές επιδόσεις.
- 3.) Η επιρροή του Χρόνου / Δυναμική με το Χρόνο αξιολόγησης.
- 4.) Μόρφωση της Συνολικής Επίδοσης κάθε Εναλλακτικής.

Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, θεωρούνται δύο κυρίως περιπτώσεις εξειδίκευσης, αναλόγως των διαθέσιμων στοιχείων:

- *Περίπτωση (I)*, όπου δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία ώστε να προκύψουν με αξιοπιστία οι μεταξύ των κριτηρίων βαθμοί εξάρτησης ως συνημίτονα γωνιών μεταξύ των αντιστοιχούντων σε αυτά διανυσμάτων κατά γεωμετρική-διανυσματική προσομοίωση.
- *Περίπτωση (II)*, όπου υπάρχουν επαρκή στοιχεία ώστε να προκύψουν με αξιοπιστία οι μεταξύ των κριτηρίων βαθμοί εξάρτησης ως συνημίτονα γωνιών μεταξύ των αντιστοιχούντων σε αυτά διανυσμάτων κατά γεωμετρική-διανυσματική προσομοίωση.

Για τα παραπάνω δίδονται αριθμητικά παραδείγματα εφαρμογής της παρούσας προτεινόμενης μεθόδου σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, ώστε να καταδειχθούν οι δυνατότητες εφαρμογής της. Τα δύο από τα παραδείγματα αυτά (1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup>) αφορούν την πλήρη εφαρμογή της μεθόδου και κάθε ένα εξ' αυτών αντιστοιχεί σε μία εξειδίκευση ανά σύνολο περιπτώσεων αρχικών στοιχείων/συνθηκών του προβλήματος αξιολόγησης [το 1<sup>ο</sup> στην περίπτωση (I) και το 2<sup>ο</sup> στην περίπτωση (II)]. Το τρίτο (3<sup>ο</sup>) παράδειγμα είναι εξειδικευμένο και αποσκοπεί να δείξει τις πρακτικές δυνατότητες της μεθόδου σε κλίμακες αναγωγής για τις περιπτώσεις υψηλής αβεβαιότητας (σημαντικής έλλειψης αρχικών στοιχείων).

Στο τέλος της Διδακτορικής Διατριβής παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται θέματα για περαιτέρω έρευνα.

## ΕΝΟΤΗΤΑ Α: ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ-1: ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προκειμένου να ληφθούν αποφάσεις, είναι απαραίτητο πολλές φορές να λάβουν χώρα διαδικασίες αξιολόγησης για προτεινόμενες ενέργειες, δραστηριότητες, επενδύσεις, έργα. Οι αποφάσεις λαμβάνονται από ανθρώπους που δρουν είτε ως φυσικά πρόσωπα είτε ως σύνολα, που μπορεί να αφορούν κάποιο φορέα, όπως π.χ. μία εταιρεία, ένα δημόσιο οργανισμό, μία κοινωνική, πολιτιστική ή αθλητική οργάνωση κ.λ.π.

Στο χώρο των έργων πολιτικού μηχανικού, τα συγκοινωνιακά έργα κατέχουν μία πολύ σημαντική θέση, τόσο λόγω της έκτασης και της συχνότητάς τους, όσο και λόγω των πολλαπλών επιπτώσεών τους. Η συγκεκριμένη καταγραφή των επιπτώσεων αυτών δίδει τη δυνατότητα μίας ολοκληρωμένης θεώρησης των εν λόγω έργων, μακριά από υποκειμενικότητες ή προκαταλήψεις οφειλόμενες σε περιορισμένης οπτικής γωνίας απόψεις. Σήμερα είναι αναγκαία η θεώρηση περισσότερων εφικτών λύσεων-προτάσεων σε κάθε συγκοινωνιακό πρόβλημα. Εξάλλου, η αυξανόμενη διαρκώς ευαισθησία για το περιβάλλον και η όλο και πιο επιτακτική ανάγκη για κοινωνικά δίκαιες πρακτικές επιβάλλουν τη διεύρυνση των παραγόντων αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων στους αντίστοιχους τομείς.

Τα παραπάνω στοιχεία καθιστούν την αξιολόγηση των συγκοινωνιακών έργων διαδικασία ουσιαστική και απαραίτητη, τόσο περισσότερο μάλιστα όσο σπουδαιότερα χαρακτηρίζονται τα κατά περίπτωση έργα.

Σημαντικές προσπάθειες για μία μεθοδολογική προσέγγιση της αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων έχουν γίνει στην Ελλάδα και το διεθνή χώρο (APAS, 1995), (APAS/ROAD/3, 1995), (Adler, 1987), (Button - Pearman, 1983), (Mackie et al, 1994), (Nijkamp - Blaas, 1993), (Tsamboulas et al, 1998).

#### Συμβολισμοί

P: Κόστος ανά χιλιόμετρο διαδρομής.

α: Σταθερά εξαρτωμένη από τις τοπικές συνθήκες.

A, B, C: Σταθερές εξαρτώμενες από τη σύνθεση των οχημάτων και τις

$V_M$ : Μέση ταχύτητα οχημάτων.

A: Κόστος ατυχημάτων ανά χιλιόμετρο.

$C_{A_i}$ : Το κόστος ανά κατηγορία ατυχήματος.

UA: Αναμενόμενος αριθμός ατυχημάτων, με κατάλληλη κατηγορία, ατυχημάτων (υλικές ζημιές / ελαφρά τραυματίες / σοβαρά τραυματίες / νεκροί).

A', P': Σταθερές που μπορούν να εξαχθούν από στατιστική ανάλυση (π.χ. από πρότυπα παλινδρόμησης).

ADT: Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία.

M: Κόστος Συντήρησης ανά χιλιόμετρο,

$\alpha, D_1, D_2, D_3$ : Σταθερές εξαρτώμενες από τον τύπο της οδού (αυτοκινητόδρομος ή άλλος τύπος).

WL: Συνολικό πλάτος λωρίδας σε μέτρα.

N(i): Ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος για ένα έτος, με  $i = 1, \dots, 8760$  (ώρες ενός έτους). Η ακολουθία των τιμών στο δείκτη "i" είναι από την ώρα με το μεγαλύτερο φόρτο έως και την ώρα με το χαμηλότερο.



- $V_m(i)$ : Μέση ταχύτητα διαδρομής καθοριζόμενη από το λόγο  $N(i)/N_{max}$  και από “Καμπύλες Ταχυτήτων”. (Ως  $N_{max}$  θεωρείται η κυκλοφοριακή ικανότητα).
- $\Lambda_i$ : Εναλλακτική λύση.
- $n$ : Πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης.
- $K_j$ : Κριτήριο αξιολόγησης.
- $w_j$ : Βάρος του κριτηρίου  $K_j$ .
- $\epsilon_{i,j}$ : Μερική επίδοση εναλλακτικής λύσης σε τεχνητή κλίμακα.
- $\phi_{i,j}$ : Μερική επίδοση εναλλακτικής λύσης σε φυσική κλίμακα.
- $x_{i,j}$ : Μερική επίδοση εναλλακτικής λύσης ανηγμένη σε χρηματική κλίμακα.
- $u_{i,j}$ : Μερική χρησιμότητα εναλλακτικής λύσης.
- $U_i$ : Γενική χρησιμότητα εναλλακτικής λύσης.

## 1.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Για την ολοκληρωμένη λήψη απόφασης σχετικά με τα συγκοινωνιακά έργα, η αξιολόγηση αυτών γίνεται βάσει κριτηρίων. Τα κριτήρια μπορεί να θεωρηθούν εννοιολογικά ως «οπτικές γωνίες» θεώρησης ή μαθηματικά ως άξονες πολυδιάστατης ανάλυσης στο χώρο απεικόνισης των εναλλακτικών υπό αξιολόγηση έργων/λύσεων (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), (Zeleny, 1982). Το κάθε υιοθετούμενο κριτήριο αξιολόγησης (“ $K_j$ ”) έχει την έννοια ενός άξονα διανυσματικού χώρου σε μία μαθηματική απεικόνιση του προβλήματος της αξιολόγησης.

Τα κριτήρια αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων ομαδοποιούνται κυρίως σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (APAS, 1995), (APAS/ROAD/3, 1995), (Tsamboulas et al, 1998):

- Κριτήρια άμεσων επιρροών των συγκοινωνιακών έργων.
- Κριτήρια περιβαλλοντικά.
- Κριτήρια κοινωνικο-οικονομικά.
- Κριτήρια στρατηγικής/πολιτικής μεταφορών.

Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται κυρίως κριτήρια που αφορούν τα οικονομικά στοιχεία του έργου:

- Κατασκευαστικό κόστος.
- Κόστος συντήρησης.
- Λειτουργικό κόστος.
- Κόστος χρήσης.
- Πρόσοδοι από το έργο (π.χ. διόδια).

Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται κυρίως κριτήρια που αφορούν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον:

- Θόρυβος.
- Ρύπανση περιβάλλοντος.
- Ανάλωση φυσικών πόρων.
- Αισθητική του τοπίου.
- Επιρροές στη χλωρίδα.
- Επιρροές στην πανίδα.

Στην τρίτη κατηγορία περιλαμβάνονται κυρίως κριτήρια που αφορούν τη γενικότερη οικονομία της χώρας και την κοινωνική-οικονομική ανάπτυξη:

- Επιρροές στη χρήση γης.
- Οικονομική ανάπτυξη.
- Απασχόληση-ανεργία.
- Κοινωνική συνοχή.

Στην τέταρτη κατηγορία περιλαμβάνονται κυρίως στρατηγικής/πολιτικής φύσης κριτήρια:

- Εθνικοί στόχοι.
- Διεθνείς στόχοι, όπως πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

- Ευρωπαϊκή πολιτική μεταφορών.

Υπάρχουν κριτήρια αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, τα οποία μπορούν να υπαχθούν σε περισσότερες από μία από τις τέσσερις παραπάνω κατηγορίες. Ως τέτοια κριτήρια μπορούν να αναφερθούν:

- Η περιφερειακή πολιτική στα συγκοινωνιακά έργα, η οποία μπορεί να θεωρηθεί κοινωνικο-οικονομικό κριτήριο, με την έννοια των κοινωνικο-οικονομικών της συνιστωσών, αλλά και κριτήριο άμεσης επιρροής, λόγω των συγκοινωνιακών στόχων και στοιχείων της.

- Η διαλειτουργικότητα των συγκοινωνιακών δικτύων, η οποία μπορεί να θεωρηθεί άμεσης επιρροής κριτήριο, λόγω εκπλήρωσης των απώτερων συγκοινωνιακών στόχων της ύπαρξης των δικτύων αυτών, αλλά και κριτήριο στρατηγικό/πολιτικό, λόγω “πολιτικής και διεθνούς κατάστασης”, η οποία τηρεί σχέση αμφίδρομης επιρροής με τη διαλειτουργικότητα αυτή.

- Η επίπτωση συγκοινωνιακών έργων σε σημαντικές τοποθεσίες. Το υπόψη κριτήριο μπορεί να θεωρηθεί περιβαλλοντικό, εάν οι τοποθεσίες είναι σημαντικές από άποψη φυσικού κάλλους (π.χ. δασικές εκτάσεις), αλλά και κοινωνικο-οικονομικό, εάν οι τοποθεσίες είναι σημαντικές από άποψη πολιτισμική (π.χ. αρχαία ή βυζαντινά μνημεία).

- Η αποκοπή/διαχωρισμός μίας περιοχής (στο βαθμό που αυτή συντελείται) εξαιτίας της υλοποίησης ενός συγκοινωνιακού έργου. Το κριτήριο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει σε τρεις κατηγορίες κριτηρίων: άμεσης επιρροής κριτήριο, λόγω της επίπτωσης στη λειτουργία του εσωτερικού συγκοινωνιακού δικτύου της περιοχής, αλλά και περιβαλλοντικό κριτήριο, με την έννοια της αισθητικής άποψης, όπως επίσης και κοινωνικο-οικονομικό κριτήριο, με την έννοια των κοινωνικών και αστικών επιπτώσεων από την αποκοπή/διαχωρισμό μίας περιοχής.

Πρέπει να τονιστεί ότι κάποια από τα κριτήρια, που αναφέρθηκαν, μπορούν να αναλυθούν σε “στενότερου εννοιολογικού φάσματος” κριτήρια ή υποκριτήρια. Τέτοια κριτήρια (De Brucker et al, 1995), (Leleur, 1995), (Τσαμπούλας, 2004), (Αμπακούμκιν – Τσαμπούλας, 1997), (NAMA-Ευπαλίνο, 1995) είναι:

Το κατασκευαστικό κόστος, το οποίο μπορεί να αναλυθεί σε:

- Κόστος μελετών.
- Κόστος κατασκευών.
- Κόστος απαλλοτριώσεων.

Το κόστος χρήσης, το οποίο μπορεί να αναλυθεί σε:

- Κόστος λειτουργίας οχημάτων.
- Κόστος ατυχημάτων.
- Κόστος χρόνου.

Η ρύπανση του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε:

- Ρύπανση του αέρα.
- Ρύπανση του εδάφους.
- Ρύπανση των υδάτων.

### **1.3 ΕΙΔΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

Η αξιολόγηση των συγκοινωνιακών έργων μπορεί να γίνει είτε για ιδιωτικούς φορείς είτε για το δημόσιο.

Στην πρώτη θεώρηση κυριαρχεί ο σκοπός του βέλτιστου χρηματικού αποτελέσματος, δηλαδή της βέλτιστης χρηματικής ρευστότητας και κέρδους της επιχείρησης. Το είδος αυτό της αξιολόγησης ονομάζεται “*χρηματική αξιολόγηση*”.

Στη δεύτερη θεώρηση κυριαρχεί ο σκοπός του πλεονάσματος πόρων που αφήνει μία επένδυση (υλοποίηση συγκοινωνιακού έργου) στο κοινωνικό σύνολο ή την εθνική οικονομία, δηλαδή η διαφορά του κόστους μεταξύ των πόρων που χρησιμοποιούνται και των ωφελειών που δημιουργούνται. Η αξιολόγηση αυτή ονομάζεται “*οικονομική αξιολόγηση*”.

Σε κάποιες περιπτώσεις η θεώρηση του δημοσίου είναι ευρύτερη και τότε γίνεται η λεγόμενη “κοινωνική αξιολόγηση”. Η κοινωνική αξιολόγηση λαμβάνει ως βάση τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης και εξετάζει περαιτέρω τις επιπτώσεις του αξιολογούμενου συγκοινωνιακού έργου στους ευρύτερους τομείς της οικονομικής, κοινωνικής και περιβαλλοντικής πολιτικής. Γίνεται σαφές ότι, όσο μετατοπιζόμαστε από τη χρηματική προς την κοινωνική αξιολόγηση, τόσο αυξάνονται τα θεωρούμενα κριτήρια και γίνεται πιο δύσκολη η χρηματική τους αποτίμηση. Έτσι, στη χρηματική αξιολόγηση, στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρούνται τα στοιχεία κόστους: κατασκευαστικό, συντήρησης, λειτουργίας, καθώς και οι πρόσδοδοι από το έργο. Στην οικονομική αξιολόγηση, πέρα από αυτά, που υπολογίζονται χωρίς τις μεταβατικές πληρωμές (π.χ. φόρους), θεωρείται και το κόστος χρήσης.

Στην κοινωνική αξιολόγηση, πέρα από τα κριτήρια της οικονομικής αξιολόγησης, θεωρούνται και τα υπόλοιπα κριτήρια που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.2.

#### 1.4 ΕΙΔΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΕΚΦΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

Ανεξάρτητα από το ποια και πόσα κριτήρια θεωρούνται στη διαδικασία αξιολόγησης, η έκφραση/αποτίμηση των ανά κριτήριο επιδόσεων των αξιολογούμενων λύσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Μπορούν να διακριθούν δύο τρόποι έκφρασης/αποτίμησης κριτηρίων:

α. **Ποιοτική:** Πρόκειται για έκφραση/αποτίμηση κατευθείαν σε ποιοτική κλίμακα (κλίμακα χωρίς μονάδες). Μία τέτοια κλίμακα μπορεί να είναι π.χ. η δεκαβάθμια.

β. **Ποσοτική:** Πρόκειται για έκφραση/αποτίμηση σε κλίμακα τιμών (χρηματικών ή φυσικών). Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

β1 **Ποσοτική μη χρηματική:** Πρόκειται για μία έκφραση/αποτίμηση σε κλίμακα φυσικών τιμών, αλλά όχι χρηματικών τιμών (π.χ. decibels για μέτρηση θορύβου).

β2 **Ποσοτική χρηματική:** Πρόκειται για έκφραση/αποτίμηση σε χρηματικές τιμές (π.χ. ευρώ).

Η αποτίμηση όλων των κριτηρίων αξιολόγησης τελικά σε χρηματικές αξίες οδηγεί στη λεγόμενη Αξιολόγηση “Κόστους-Ωφέλειας” [“Cost-Benefit” Evaluation] (Τσαμπούλας, 2004).

Η διατήρηση της διαφορετικής αποτίμησης των κριτηρίων αξιολόγησης με τους τρόπους που αναφέρθηκαν παραπάνω οδηγεί στη λεγόμενη “Πολυκριτηριακή” Αξιολόγηση [“Multiple-Criteria” Evaluation] (Τσαμπούλας, 2004). Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η μορφή κατάταξης των τρόπων αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων ως προς το υποκείμενο της αξιολόγησης και ως προς τον τρόπο απόδοσης των ανά κριτήριο επιδόσεων των αξιολογούμενων λύσεων.

Επισημαίνεται ότι στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση, όμως, υπάρχει διαφορά στην ένταση αυτής της “αποτίμησης” της έκφρασης των κριτηρίων μεταξύ των διαφόρων μεθόδων. Έτσι, μπορούν να διακριθούν δύο ειδικότερες κατηγορίες στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση:

α) Η κλασική πολυκριτηριακή αξιολόγηση διέπεται από την τάση μη χρηματικών θεωρήσεων. Έτσι περιορίζει τις χρηματικές θεωρήσεις μόνον σε απολύτως

Πίνακας 1.1: Μορφή κατάταξης τρόπων αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων.

Table 1.1: Classification of types of evaluation of transport projects.

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΡΟΠΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ		Ως προς την αποτίμηση των κριτηρίων αξιολόγησης	
		Α) Κόστους-Ωφέλειας	Β) Πολυκριτηριακή
Ως προς το υποκείμενο της αξιολόγησης	1) Χρηματική		
	2) Οικονομική		
	3) Κοινωνική		

χρηματοποιούμενα μεγέθη, π.χ. το κατασκευαστικό κόστος.

β) Άλλες τάσεις στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση, που κυρίως είναι περισσότερο εξειδικευμένες για την αξιολόγηση των συγκοινωνιακών έργων, έχουν μία συγκεραστική λογική μεταξύ αξιολόγησης κόστους-ωφέλειας και κλασικής πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Πρόκειται για μία αξιολόγηση που διεθνώς αποδίδεται με τον όρο: “Κόστους-Αποτελεσματικότητας” Αξιολόγηση [“Cost-Effectiveness” Evaluation] (Leleur, 1995).

Στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση η αποτίμηση των κριτηρίων σε ετερογενείς κλίμακες τιμών οδηγεί σε ανεξάρτητες ανά κριτήριο (ή ομάδα κριτηρίων) θεωρήσεις χρησιμότητας για τις διάφορες επιδόσεις των λύσεων. Έτσι, οι τιμές (ποσότητες χρησιμότητας), που προκύπτουν στη φάση αυτή, είναι σχετικές. Για να αρθεί το πρόβλημα αυτό και να γίνει αναγωγή σε απόλυτες τιμές (κοινή έκφραση χρησιμότητας), απαιτείται, εκτός της αποτίμησης των ανά κριτήριο επιδόσεων των αξιολογούμενων λύσεων (διαδικασία εντός κάθε κριτηρίου), και η στάθμιση μεταξύ των ίδιων των κριτηρίων αξιολόγησης (διακριτηριακή διαδικασία). Η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης αναπτύσσεται σε επόμενες παραγράφους.

## 1.5 ΕΚΦΡΑΣΗ/ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Η θεώρηση και η αποτίμηση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων συγκοινωνιακών έργων εξαρτώνται από το είδος της κάθε φορά εφαρμοζόμενης αξιολόγησης, διακρίνοντας (όπως ήδη αναπτύχθηκε) τις αξιολογήσεις με γνώμονες το εύρος του συνόλου των κριτηρίων και τον τρόπο απόδοσης αυτών. Η παρακάτω ανάλυση στηρίζεται σε αυτή τη διαπίστωση.

### 1.5.1 Κριτήρια άμεσων επιρροών

Στο σύνολο των ειδών αξιολόγησης τα κριτήρια των άμεσων επιρροών ποσοτικοποιούνται και μάλιστα σε χρηματικές τιμές. Το μόνο κριτήριο, που δεν εκφράζεται πάντοτε σε χρηματικές τιμές, είναι το “κόστος χρήσης”. Στην αξιολόγηση “Κόστους-Ωφέλειας” το υπόψη κριτήριο εκφράζεται σε χρηματικές τιμές. Στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση, όμως, μόνο η συνιστώσα “κόστος λειτουργίας οχημάτων” εκφράζεται και’ ανάγκη σε χρηματική αξία. Οι συνιστώσες “κόστος ατυχημάτων” και “κόστος χρόνου” μπορούν να μην εκφραστούν σε χρηματικές τιμές, αλλά να αποδοθούν τελικά κατευθείαν με τις φυσικές τους τιμές. Έτσι, π.χ. το κόστος ατυχημάτων μπορεί να εκφραστεί σε αριθμό ατυχημάτων ανά οχηματοχιλιόμετρα και το κόστος χρόνου μπορεί να εκφραστεί σε ώρες χρήσης (διαδρομής) ανάλογα με την κατηγορία του χρήστη και το είδος μετακίνησης, έχοντας υποθέσει την περίοδο αξιολόγησης, το μέσο χρονικά κυκλοφοριακό φόρτο (προβλεπόμενος, εάν πρόκειται για νέο έργο) και τη μέση πληρότητα των μεταφορικών μέσων.

Η τελική απόδοση κριτηρίων σε “φυσικούς” δείκτες (χωρίς περαιτέρω αναγωγή σε χρηματική αξία) συνιστά ποσοτική, μη χρηματική αποτίμηση. Η έννοια “φυσικός” σημαίνει, στη θεώρηση της παρούσας εργασίας, την ύπαρξη τιμών στους δείκτες (άρα την όχι απλή αριθμητική έκφραση).

Ως παράδειγμα παρατίθενται οι τύποι για την ποσοτικοποίηση κριτηρίων άμεσων επιρροών, για έργα οδοποιίας (The Highway Design and Maintenance Standards Model, 1987), (Leleur, 1995):

Για Κόστος Λειτουργίας Οχημάτων:

$$P = A \cdot V_M^a + B/V_M^{a+1} + C \quad (1.1)$$

όπου:

P: Κόστος ανά χιλιόμετρο.

a: Σταθερά εξαρτωμένη από τις τοπικές συνθήκες.

A, B, C: Σταθερές εξαρτώμενες από τη σύνθεση των οχημάτων και τις αντίστοιχες τιμές και  $V_M$ : Μέση ταχύτητα οχημάτων.

Για Κόστος Ατυχημάτων:

$$A = \sum_I C_{A,I} * UA_I \quad (1.2)$$

όπου:

A: κόστος ατυχημάτων ανά χιλιόμετρο.

$C_{A,I}$ : το κόστος της κατηγορίας ατυχήματος (I) .

$UA = A' * ADT^P$ , όπου:

UA: Αναμενόμενος αριθμός ατυχημάτων, με κατάλληλη αναλογία, για τις κατηγορίες ατυχημάτων με: (υλικές ζημιές / ελαφρά τραυματίες / σοβαρά τραυματίες / νεκροί).

A', P': Σταθερές που μπορούν να εξαχθούν από στατιστική ανάλυση (π.χ. από πρότυπα παλινδρόμησης) και ADT: Μέση ημερήσια κυκλοφορία.

Για Κόστος Συντήρησης:

$$M = (D_1 + D_2 * ADT) (a + D_3 * WL) \quad (1.3)$$

Όπου:

M: Κόστος Συντήρησης ανά χιλιόμετρο.

a,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ : Σταθερές, εξαρτώμενες από τον τύπο της οδού (αυτοκινητόδρομος ή άλλος τύπος).

ADT: Μέση ημερήσια κυκλοφορία (όπως αναφέρθηκε και πριν).

WL: Συνολικό πλάτος λωρίδας σε μέτρα.

Για Κόστος Χρόνου:

Υπολογίζονται κατ' αρχήν οι ώρες από τον τύπο:

$$T = \sum_i [N(i) / V_M (i)], \text{ με το } i \text{ να κυμαίνεται από } 1 \text{ έως } 8760. \quad (1.4)$$

όπου:

$N(i)$ : Ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος για ένα έτος, με  $i = 1, \dots, 8760$  (ώρες ενός έτους). Η ακολουθία των τιμών στο δείκτη "i" είναι από την ώρα με το μεγαλύτερο φόρτο έως και την ώρα με το χαμηλότερο.

$V_M(i)$ : Μέση ταχύτητα διαδρομής, καθοριζόμενη από το λόγο  $N(i)/N_{max}$  και από "καμπύλες ταχυτήτων".

(Ως  $N_{max}$  θεωρείται η κυκλοφοριακή ικανότητα).

Ακολουθώς, ανάλογα με την κατηγορία του χρήστη, θεωρείται η αντίστοιχη αξία χρόνου.

Για Κόστος Κατασκευής:

Εκτιμάται ανάλογα με τον τύπο της οδού και το είδος και μορφολογία του εδάφους. Ο υπολογισμός του κόστους αυτού δεν απαιτεί ιδιαίτερη ανάλυση, αφού είναι δυνατή η εκτίμησή του από υπάρχοντα απολογιστικά στοιχεία κατασκευής οδών. Εξυπακούεται ότι το κόστος κατασκευής εκφράζεται ανά τρέχον μήκος για τον εξεταζόμενο τύπο οδού. Εάν ο τύπος της οδού (άρα και το συνολικό πλάτος της διατομής) ή/και το είδος του εδάφους αλλάξει στο σύνολο του εξεταζόμενου συγκοινωνιακού έργου, τότε το κόστος υπολογίζεται χωριστά για κάθε τμήμα οδού που έχει τα ίδια χαρακτηριστικά.

## 1.5.2 Κριτήρια περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια μόνον έμμεσα μπορούν να αποτιμηθούν σε χρηματικές τιμές. Πρόκειται για τις θεωρήσεις όπου λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές στις αξίες γης και

ακινήτων εξαιτίας μεταβολών στα μεγέθη που προσδιορίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (NAMA-Ευπαλίνο, 1995), (Τσαμπούλας, 1998 και 1999).

Στις περισσότερες των περιπτώσεων τα περιβαλλοντικά κριτήρια αποτιμούνται στην τελική τους θεώρηση στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση σε φυσικές τιμές.

Σε κάθε όμως περίπτωση, ιδιαίτερα για κάποια περιβαλλοντικά κριτήρια, η χρήση φυσικών τιμών (απλώς ενδιάμεσα ή και τελικά) για την αποτίμηση επιπτώσεων είναι πολύ σημαντική. Πιο συγκεκριμένα (APAS, 1995), (APAS/ROAD/3, 1995), (Tsamboulas et al, 1998):

- *Θόρυβος:* Η ένταση του θορύβου, μετρούμενη σε dB και με αναφορά σε κάποια απόσταση από την πηγή, είναι μια ικανοποιητική τιμή για το υπόψη κριτήριο.
- *Ρύπανση περιβάλλοντος:* Υπάρχουν και θεωρούνται τιμές συγκέντρωσης ρύπων, όπως οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO).
- *Κατανάλωση φυσικών πόρων:* Το κριτήριο αυτό, από πρακτική σκοπιά, είναι ένα κριτήριο στο οποίο δύσκολα μπορεί να βρεθεί μία φυσική τιμή που να το αποδίδει ικανοποιητικά, τουλάχιστον σε μία γενική θεώρηση.
- *Αισθητική τοπίου:* Το υπόψη κριτήριο είναι από τη φύση του ποιοτικό.
- *Επιρροές στη χλωρίδα:* Επίσης ποιοτικό κριτήριο, παρ' ότι μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να αναζητηθούν τιμές που απορρέουν από τις περιοχές-βιοτόπους, π.χ. η έκταση μίας τέτοιας περιοχής.
- *Επιρροές στην πανίδα:* Ισχύουν γι' αυτό παρόμοια με το προηγούμενο κριτήριο.

Όπως γίνεται αντιληπτό, για κάποια περιβαλλοντικά κριτήρια χρησιμοποιούνται συχνά ποιοτικές θεωρήσεις, λόγω της δυσκολίας εφαρμογής επαρκώς ικανοποιητικών φυσικών τιμών.

### 1.5.3 Κριτήρια κοινωνικο-οικονομικά

Τα κριτήρια αυτά γενικά αποδίδονται ποιοτικά. Μπορούν να αναζητηθούν δείκτες έκφρασης - απόδοσης, αλλά είναι αμφίβολο κατά πόσο αυτοί μπορούν να αποδώσουν τη σημασία και να αποτιμήσουν τα κριτήρια αυτά.

Τέτοιοι δείκτες είναι π.χ. ο δείκτης ανεργίας για το κριτήριο: Απασχόληση-Ανεργία και ο δείκτης της εξέλιξης του Α.Ε.Π. για το κριτήριο: Οικονομική Ανάπτυξη. Ωστόσο, με αφορμή τα παραδείγματα αυτά, επισημαίνεται ότι είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το μέγεθος της καθαρής επιρροής των υπό θεώρηση κάθε φορά συγκοινωνιακών έργων με τους παραπάνω δείκτες.

## 1.6 ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στην αξιολόγηση κόστους-ωφέλειας η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης δεν λαμβάνει χώρα ως ανεξάρτητο τμήμα της διαδικασίας αξιολόγησης, αλλά γίνεται κατά την αποτίμηση των επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων. Δηλαδή η χρηματική κλίμακα αποτίμησης δεν αποτελεί κλίμακα που εκφράζει τις εσωτερικές μόνο μεταβολές των επιδόσεων για κάθε κριτήριο αξιολόγησης, αλλά αποδίδει την τελική χρησιμότητα των ανά κριτήριο επιδόσεων των λύσεων, οπότε αποτελεί τελική κλίμακα χρησιμότητας.

Εάν, λοιπόν, μία εσωτερική κλίμακα αποδίδει τη σχέση σημαντικότητας μεταξύ επιδόσεων του ίδιου κριτηρίου και με σχετικότητα, ενώ μία τελική (εξωτερική) κλίμακα αποδίδει την τελική χρησιμότητα των επιδόσεων λύσεων και για διάφορα κριτήρια αξιολόγησης, τότε είναι σαφές ότι στην τελική κλίμακα έχουν υπεισέλθει και τα (ειδικά) βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης.

Στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση, επειδή δεν είναι εύκολο να εκφραστούν κατευθείαν σε όρους απόλυτης χρησιμότητας οι ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, εφαρμόζεται η εξής διαδικασία: Οι ανά κριτήριο επιδόσεις ανάγονται σε μία τεχνητή κλίμακα σχετικής χρησιμότητας (η οποία εκφράζει τη σχετική χρησιμότητα μεταξύ επιδόσεων του ίδιου κριτηρίου) και ακολουθεί η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης. Η

στάθμιση (με βάση τις βαρύτητες των κριτηρίων) των ανηγμένων στην τεχνητή κλίμακα επιδόσεων τις οδηγεί σε έκφραση της απόλυτης (άρα και διακριτηριακά συγκρίσιμης) χρησιμότητάς τους. Για το λόγο αυτό γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης (γενικά και ειδικά για αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων) είναι ιδιαίτερα σημαντική για την όλη πορεία της πολυκριτηριακής αξιολόγησης και κρίνεται αναγκαία.

Κατά συνέπεια σε μεθόδους πολυκριτηριακής αξιολόγησης η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο. Αναφέρονται ενδεικτικά μερικές μόνο από τις συνήθως χρησιμοποιούμενες σε αξιολόγηση τεχνικών έργων πολυκριτηριακές μεθόδους, στις οποίες ισχύει το παραπάνω συμπέρασμα (Tsamboulas et al, 1998), (Zeleny, 1982), (Nijkamp-Blaas, 1993): MAUT, UTA, ORESTE, PROMETHEE, ELECTRE, REGIME, QUALIFLEX, GAIA, SMARTER, AHP (Analytical Hierarchy Process).

Σε θεωρητική βάση τονίζεται ότι η δυνατότητα ενσωμάτωσης ετερογενών κριτηρίων στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη στάθμιση αυτών, γιατί έτσι επιτυγχάνεται η μετατροπή του διανυσματικού προβλήματος αξιολόγησης (όπου κάθε κριτήριο παρίσταται με έναν άξονα) σε, αλγεβρικό πρόβλημα. Δηλαδή οι βαρύτητες των κριτηρίων αποτελούν παραμετρική μεταφορά σε μία μόνο ευθεία ομογενοποίησης του όλου πολυδιάστατου προβλήματος της πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η υπόψη ευθεία έχει ως συννημίτονο της γωνίας, που σχηματίζει με κάθε άξονα- κριτήριο, τη βαρύτητα του κριτηρίου αυτού.

Από πρακτικής πλευράς και με έμφαση στα συγκοινωνιακά έργα, η βαρυντική στάθμιση και η ιεράρχηση των κριτηρίων επιβάλλεται από το ότι τα διάφορα κριτήρια έχουν επιρροές και συνέπειες με σημασίες διαφορετικών μεγεθών, όπως προκύπτει και από την ανάλυση περί ωφελιμότητας, που έγινε προηγουμένως. Με τη στάθμιση επιτυγχάνεται η απόδοση ειδικών βαρών στα κριτήρια αξιολόγησης. Αυτά τα «ειδικά βάρη» πολλαπλασιάζουν τις ανά κριτήριο αποτιμημένες επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Η άθροιση των σταθμισμένων (βαρυντικά) ανά κριτήριο επιδόσεων δημιουργεί τις ολικές επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων.

### **1.7 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

Σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν προηγουμένως, οι βασικές αρχές των μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης, που τις διαφοροποιούν και από τις μεθόδους κόστους-ωφέλειας, είναι οι ακόλουθες:

- Η δυνατότητα αποτίμησης κριτηρίων και με μη χρηματικές τιμές, και
- Η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης ως ανεξάρτητο τμήμα της πορείας αξιολόγησης.

Επομένως, συνοψίζοντας τις δύο παραπάνω βασικές διαφορές της πολυκριτηριακής από την κόστους-ωφέλειας αξιολόγηση, μπορεί να επισημανθεί ότι η τελική αποτίμηση συνολικής χρησιμότητας  $U_i$  της λύσης  $L_i$  προκύπτει από τα εξής βήματα για κάθε περίπτωση:

#### *I. Αξιολόγηση κόστους-ωφέλειας:*

α. Απόδοση-αναγωγή της ανά κριτήριο επίδοσης από τη φυσική στη χρηματική κλίμακα, δηλαδή με μαθηματικούς όρους:

$$\varphi_{i,j} \rightarrow x_{i,j} \quad (1.5)$$

β. Άθροιση των ανά κριτήριο ανηγμένων επιδόσεων, δηλαδή:

$$\sum_j (x_{i,j}) = \sum_j (u_{i,j}) = U_i \quad (1.6)$$

όπου:

$u_{i,j}$  είναι η χρησιμότητα της λύσης  $L_i$  για το κριτήριο  $K_j$ .

(Το  $u_{i,j}$  παριστάνει ωφέλειες-δαπάνες).

## II. Πολυκριτηριακή αξιολόγηση:

α. Απόδοση-αναγωγή (βαθμολόγηση) τής ανά κριτήριο επίδοσης από τη φυσική στην αντίστοιχη τεχνητή κλίμακα, η οποία δεν είναι κατ' ανάγκην η χρηματική:  
 $\varphi_{i,j} \rightarrow \varepsilon_{i,j}$  (1.7)

β. Στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης, δηλαδή εύρεση των σχετικών βαρυτήτων τους:  
 $\rightarrow w_j$  (1.8)

γ. Δημιουργία των μερικών χρησιμοτήτων από τα ειδικά βάρη των κριτηρίων και την ανά κριτήριο βαθμολόγηση και άθροιση αυτών για την εκτίμηση της ολικής χρησιμότητας, ως ακολούθως:

$$\sum_j (w_j * \varepsilon_{i,j}) = \sum_j (u_{i,j}) = U_i \quad (1.9)$$

### 1.8 ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΚΑΙ ΤΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΟΜΗ

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι μπορούν να ενταχθούν σε τρεις κατηγορίες, ως προς την θεωρητική τους άποψη και την μαθηματική τους εφαρμογή:

- **I) Διανυσματικής Προσομοίωσης**, όπως οι: Regime (Nijkamp - Blaas, 1993), (Hinloopen – Nijkamp - Rietveld, 1983), Qualiflex (Paelinck, 1978). Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην παραδοχή ότι όλες οι εφικτές λύσεις ενός προβλήματος λήψης απόφασης μπορούν να παρουσιασθούν ως διανύσματα σε διανυσματικό χώρο διαστάσεων τόσων όσα τα κριτήρια αξιολόγησης.
- **II) Γραφήματος Υπεροχής**, όπως οι: Electre (Roy, 1985), Oreste (Schaerlig, 1985), Promethee (Brans – Vincke - Mareschal, 1986). Η βάση των προτύπων γραφήματος υπεροχής είναι η ιδέα της μερικής ασυγκριτότητας. Αυτή η ιδέα πηγάζει από την κατανόηση ότι στα πολυκριτηριακά προβλήματα, η σχέση κυριαρχίας μπορεί να στηριχθεί μόνον εάν υπάρχει μία ομοφωνία των διαφορετικών απόψεων αναφορικά με τη συγκεκριμένη παρατήρηση. Έτσι, μία ενέργεια «a» μπορεί να ξεπερνά μία ενέργεια «b» μόνον εάν η «a» είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η «b» κατά τη θεώρηση όλων των κριτηρίων. Τα «πρότυπα γραφήματος υπεροχής» καταγράφουν προτιμήσεις ως διατεταγμένες σχέσεις υπεροχής.
- **III) Αθροιστικές Μέθοδοι**, όπως οι: UTA (Jacquet-Lagrange - Siskos, 1982), Multiple Attributes (Zeleny, 1982), (Schaerlig, 1985), AHP (Saaty, 1980), ADAM (Zeleny, 1982). Ο πρώτος στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η θέσπιση ενός «κανόνα (νόρμας) προτιμήσεως» στη βάση της οποίας θα γίνεται η σύγκριση όλων των εναλλακτικών. Οι νόρμες προτιμήσεως είναι συνήθως γραμμικές. Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί χρησιμοποιώντας ένα απλό αθροιστικό πρότυπο. Αυτά τα πρότυπα συνήθως διαφοροποιούνται ανάλογα το πώς εφαρμόζεται η αθροιστική συνάρτηση.

### 1.9 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Η Αβεβαιότητα (Uncertainty) προκύπτει από την αδυναμία απόδοσης συγκεκριμένης τιμής σε κάποιο μέγεθος λόγω έλλειψης στοιχείων ή αδυναμίας λογιστικής μεθόδου. Ως Αβεβαιότητα μπορεί να ορισθεί η απόκλιση της εκτιμηθείσας (μετρηθείσας, προβλεφθείσας, υπολογισθείσας) τιμής ενός μεγέθους/ποσότητας από την πραγματική τιμή αυτού (Dungan – Gao – Pang, 2002).



Κλασικοί τρόποι αντιμετώπισης της Αβεβαιότητας, εφαρμοζόμενοι στην Αξιολόγηση Κόστους-Οφέλους αλλά και στην Πολυκριτηριακή Αξιολόγηση, είναι οι ακόλουθοι (Zerbe - Dively, 1994), (Τσαμπούλας, 2004):

I. Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)

II. Προσομοίωση (Simulation)

III. Δένδρα Λήψης Απόφασης (Decision Trees)

Η Ανάλυση Ευαισθησίας (I) έχει δύο επιμέρους βασικές τεχνικές:

I.α. Παράμετρος προς Παράμετρο Προσέγγιση (Variable by Variable Approach)

I.β. Προσέγγιση βάσει Σεναρίου (Scenario Approach)

Για κάθε έναν από τους παραπάνω τρόπους/τεχνικές αντιμετώπισης/χειρισμού της Αβεβαιότητας, έχουμε τα εξής:

### I. Ανάλυση Ευαισθησίας:

#### I.α. Παράμετρος προς Παράμετρο Προσέγγιση:

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου οι παράμετροι θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή μία μεταβολή της τιμής σε μία παράμετρο δεν επηρεάζει την τιμή μίας άλλης παραμέτρου. Τα βήματα της τεχνικής έχουν ως εξής:

- Καταγραφή όλων των σημαντικών παραμέτρων της Ανάλυσης.
- Για κάθε παράμετρο καθορίζεται μία σειρά πιθανών τιμών. Είναι αρκετά σύνηθες να καθορίζονται τρεις τιμές για κάθε παράμετρο: η αισιόδοξη πιθανή τιμή, η χείριστη πιθανή τιμή και η πλέον πιθανή τιμή. Οι τιμές αυτές είναι δυνατόν να ληφθούν από προηγούμενη εμπειρία στις συγκεκριμένες παραμέτρους.
- Υπολογίζεται το αποτέλεσμα του Κριτηρίου Αποτίμησης (π.χ. της NPV ή του IRR) για κάθε μία από τις ορισμένες (από το προηγούμενο βήμα) τιμές των παραμέτρων.

#### I.β. Προσέγγιση βάσει Σεναρίου:

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου οι παράμετροι (όλες ή κάποιες) θεωρούνται εξαρτημένες μεταξύ τους, δηλαδή μία μεταβολή της τιμής σε μία παράμετρο επηρεάζει την τιμή μίας άλλης παραμέτρου. Τα βήματα της τεχνικής έχουν ως εξής:

- Καταγραφή όλων των σημαντικών παραμέτρων της Ανάλυσης.
- Καθορισμός των δυνατών συνδυασμών τιμών των παραμέτρων.
- Υπολογίζεται το αποτέλεσμα του Κριτηρίου Αποτίμησης (π.χ. της NPV ή του IRR) για κάθε έναν από τους δυνατούς συνδυασμούς (όπως οι δυνατοί συνδυασμοί καθορίστηκαν από το προηγούμενο βήμα).

### II. Προσομοίωση:

Τα βήματα της τεχνικής έχουν ως εξής:

- Καταγραφή όλων των σημαντικών παραμέτρων.
- Καθορισμός των πιθανοτήτων εμφάνισης διαφορετικών τιμών κάθε παραμέτρου.
- Καθορισμός των σχέσεων που υπάρχουν μεταξύ των παραμέτρων.
- Υπολογίζεται το αποτέλεσμα του Κριτηρίου Αποτίμησης (π.χ. της NPV ή του IRR) για την πιθανοτική κατανομή των δυνατών τιμών των παραμέτρων.

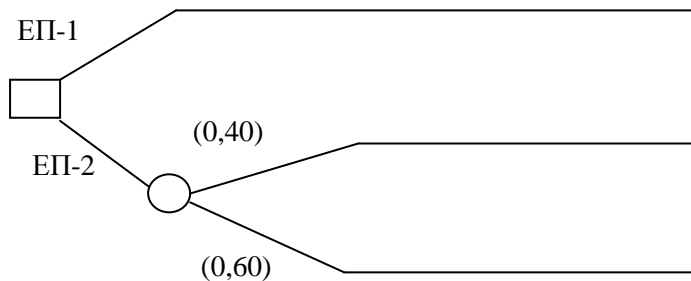
### III. Δένδρα Λήψης Απόφασης:

Τα βήματα της τεχνικής έχουν ως εξής:

- Ορίζονται τα Σημεία Απόφασης. Πρόκειται για τα σημεία στα οποία μπορεί να ληφθούν αποφάσεις επιλογών.

- Καθορίζονται τα πιθανά εξαγόμενα για κάθε επιλογή σε κάθε σημείο απόφασης. Κάποιες επιλογές έχουν μόνο ένα αποτέλεσμα, ενώ κάποιες άλλες μπορούν να δώσουν περισσότερα από ένα αποτελέσματα.
- Εκτιμάται η πιθανότητα εμφάνισης κάθε αποτελέσματος στις περιπτώσεις όπου σε επιλογές μπορεί να προκύψουν περισσότερα του ενός αποτελέσματα. Οι πιθανότητες για τα πιθανά αποτελέσματα κάθε επιλογής πρέπει να έχουν άθροισμα τη μονάδα.
- Σχηματίζεται το Διάγραμμα Δένδρου. Αυτό το διάγραμμα απεικονίζει τα Σημεία Απόφασης (Decision points) και τα πιθανά εξαγόμενα κάθε απόφασης. Το υπόψη διάγραμμα είναι οργανωμένο με το Σημείο Αφετηρίας στα αριστερά. Οι αποφάσεις παρίστανται με τετράγωνα και τα σημεία όπου εμφανίζονται διαφορετικά ενδεχόμενα παρίστανται με κύκλους. Για κάθε κλάδο του Δένδρου, το εξαγόμενο (π.χ. μία χρηματική ροή) και η πιθανότητα αυτού καταγράφονται. Οι πιθανότητες παρίστανται με δεκαδικούς αριθμούς (π.χ.  $p = 0,70$ ). Κάποιοι κλάδοι του Δένδρου μπορούν να επεκτείνονται για περισσότερες χρονικές περιόδους από ό,τι άλλοι. Ένα τυπικό Διάγραμμα Δένδρου παρίσταται στο παρακάτω σχήμα. Το τετράγωνο στο Σημείο Αφετηρίας αριστερά δηλώνει Σημείο Απόφασης, όπου αποφασίζεται εάν θα ακολουθηθεί η Επιλογή-1 (ΕΠ-1), παριστώμενη εν συνεχεία με τον άνω κλάδο ή η Επιλογή-2 (ΕΠ-2), παριστώμενη εν συνεχεία με τον κάτω κλάδο. Εάν ακολουθηθεί η Επιλογή-2 (ΕΠ-2), στη συνέχεια υφίστανται δύο επιμέρους ενδεχόμενα (δύο επιμέρους κάτω κλάδοι μετά τον κύκλο), με πιθανότητα του ενός 0,40 και του άλλου 0,60.

Σχήμα 1.1: Τυπικό Διάγραμμα Δένδρου Απόφασης.  
Figure 1.1: Typical Decision Tree.



## **ΕΝΟΤΗΤΑ Β: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΣΥΝΘΗΚΕΣ – ΤΡΟΠΟΙ):**

### **Γενική Εισαγωγή Ενότητας Β'**

Στην παρούσα Ενότητα (Ενότητα Β') γίνεται συγκριτική αξιολόγηση υφισταμένων μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η θεώρηση εκάστης μεθόδου λαμβάνει χώρα με βασικό γνώμονα θεώρησης και ανάλυσης αυτής την ανάδειξη του αντίστοιχου πρότυπου της σε τρία επίπεδα: στρατηγικό, εννοιολογικό, αλγοριθμικό.

- Ως στρατηγικό επίπεδο μπορεί να ορισθεί η τελική μορφή του εξαγομένου της μεθόδου (όπως: πλήρης ποσοτική διάταξη εναλλακτικών, πλήρης ποιοτική διάταξη εναλλακτικών, εξαγωγή ενός πυρήνα-συνόλου αποδεκτών λύσεων με αποκλεισμό των υπολοίπων αλλά χωρίς περαιτέρω ιεράρχηση των εντός του πυρήνα εναλλακτικών).
- Ως εννοιολογικό επίπεδο μπορεί να ορισθεί το σύνολο των βασικών θεωρητικών εννοιών που μετέρχεται/χρησιμοποιεί η μέθοδος ώστε να προσομοιώσει εννοιολογικά/λογικά/μαθηματικά το πρόβλημα της πολυκριτηριακής αξιολόγησης.
- Ως λογισμικό/αλγοριθμικό επίπεδο μπορεί να ορισθεί η επιχειρησιακή υπόσταση της μεθόδου, η οποία μπορεί να αποδοθεί με λογικό διάγραμμα.

Για τη θεώρηση, ανάλυση και κριτική κάθε μεθόδου, λαμβάνεται υπόψη τόσο το γενικότερο περιβάλλον της πολυκριτηριακής αξιολόγησης όσο και το ειδικότερο της εφαρμογής της σε συγκοινωνιακά έργα, όπου ιδιαίτερη σημασία δίδεται στις συνθήκες και τους τρόπους της εφαρμογής. Προκειμένου να καταδειχθούν οι εν λόγω συνθήκες και τρόποι εφαρμογής, αναπτύσσονται παραδείγματα εφαρμογής.

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ-2:**

## **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

### **2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στις αξιολογήσεις συγκοινωνιακών έργων, οι διαφαινόμενες λύσεις είναι περισσότερες της μίας, επομένως είναι χρήσιμο μία αξιολόγηση, να καταλήξει στη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης, που συμπεριλαμβάνουν όσο το δυνατό τα πιο κατάλληλα ποσοτικά κριτήρια. Μία από αυτές είναι η μέθοδος Regime (Hinloopen – Nijkamp - Rietveld, 1983), (Nijkamp - Blaas, 1993), (EUNET Project, 1997), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), (Γιώτης Γ., 2011). Η μέθοδος αυτή εισήχθη υπό των Hinloopen – Nijkamp – Rietveld (1983). Η μέθοδος λειτουργεί με την έννοια «Χώρος Λύσεων», όπου σε κάθε σημείο του Χώρου αντιστοιχεί ένας συνδυασμός βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης.

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων εφαρμογής της υπόψη μεθόδου σε πραγματικά προβλήματα πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων. Στο πλαίσιο αυτό δίδεται η μαθηματική ανάπτυξη της μεθόδου, γίνεται ανάλυση του βαθμού απόκρισής της στα χαρακτηριστικά αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων (τα οποία σε κάποιο βαθμό εμπίπτουν και σε άλλα τεχνικά έργα) και παρατίθεται εφαρμογή της σε πραγματικό πρόβλημα, η οποία και αξιολογείται.

## Συμβολισμοί

- Ai: Εναλλακτική Λύση για αξιολόγηση.  
I: Πλήθος εναλλακτικών λύσεων.  
Cj: Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.  
J: Πλήθος κριτηρίων.  
Φij: Αρχική (συνήθως φυσική) επίδοση της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.  
rii': Διάνυσμα Regime σύγκρισης των εναλλακτικών Ai και Ai' (διατεταγμένο).  
rii',j: Συνιστώσα για το κριτήριο Cj διανύσματος Regime ri,i' (διανύσματος Regime σύγκρισης των εναλλακτικών Ai και Ai').  
R: Πίνακας Regime.  
lj: Σχετική βαρύτητα του κριτηρίου Cj.  
Pij: Επίδοση Διάταξης της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.  
μii': Δείκτης Διαφοράς Ελκυστικότητας της εναλλακτικής Ai από την εναλλακτική Ai' (διατεταγμένος).  
Σj [...]: Άθροισμα ως προς το δείκτη j των όσων που ακολουθούν στη συνέχεια.  
S: Χώρος Τιμών, ήτοι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, έκαστο των οποίων έχει ως συνιστώσες τις δυνατές σχετικές βαρύτητες των κριτηρίων.  
Sk: Υπόχωρος Τιμών, δηλαδή τμήμα του Χώρου Τιμών στο οποίο πέρα από τις ισχύουσες σε ολόκληρο το Χώρο σχέσεις, ισχύουν και ιδιαίτερες σχέσεις μεταξύ των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων.  
Uii'(k): Αριθμός σύγκρισης του διατεταγμένου ζεύγους των εναλλακτικών Ai και Ai' αναφορικά με τον υπόχωρο τιμών Sk.  
V(k): Πίνακας αριθμών σύγκρισης αναφορικά με τον υπόχωρο τιμών Sk.  
Xω: Ακραίο σημείο (κορυφή) του Χώρου Τιμών.  
tk: Μέγεθος (όγκος) του υποχώρου Sk.

## 2.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME

### 2.2.1. Γενικά

Η πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης Regime (Hinloopen et al, 1983), (Nijkamp et al, 1993), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), προϋποθέτει για την εφαρμογή της τα ακόλουθα:

- Απλή ποιοτική ιεράρχηση των κριτηρίων,
- Απλή ποιοτική ιεράρχηση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών.

Η έννοια «ποιοτική ιεράρχηση ως προς τα κριτήρια», σημαίνει ότι αρχικά χρειάζεται η ποιοτική πληροφορία εάν κάποιο κριτήριο είναι σημαντικότερο από κάποιο άλλο και δεν απαιτείται η ποσοτική πληροφορία πόσο σημαντικότερο είναι.

Παρόμοια, η έννοια «ποιοτική ιεράρχηση ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών», σημαίνει ότι αρχικά χρειάζεται η ποιοτική πληροφορία εάν κάποια εναλλακτική είναι καλύτερη από κάποια άλλη ως προς κάποιο κριτήριο και δεν απαιτείται η ποσοτική πληροφορία πόσο καλύτερη είναι.

### 2.2.2. Οι αρχές της μεθόδου

*Βήμα I<sup>ο</sup>*: Από τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών, οι οποίες εκφράζονται συνήθως σε φυσικές τιμές (οι εν λόγω επιδόσεις μπορούν να συμβολισθούν με Φij) ευρίσκονται οι

αριθμοί διάταξης  $P_{ij}$ . Οι εν λόγω αριθμοί διατάσσουν τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων και αντανακλούν την προαναφερόμενη ποιοτική ιεράρχηση αυτών. Οι υπόψη αριθμοί χαρακτηρίζονται «τακτικοί», όπου, ο χαρακτηρισμός αυτός αποδίδει το ποιοτικό στοιχείο της προαναφερθείσας ιεράρχησης (Hinloopen et al, 1983), (EUNET Project, 1997), (Τσαμπούλας, 2004).

Εάν για παράδειγμα αξιολογούνται τρεις εναλλακτικές, τότε, στην περίπτωση που στο κριτήριο  $C_j$  δεν παρατηρείται κάποια ισοδυναμία επιδόσεων των εναλλακτικών, οι αριθμοί διάταξης  $P_{ij}$  λαμβάνουν τις τιμές 1, 2, 3. Στην περίπτωση ισοδυναμίας των δύο καλύτερων στο υπόψη κριτήριο λύσεων, οι αριθμοί διάταξης λαμβάνουν τις τιμές 2, 2, 1.

Ευρίσκοντας για όλα τα κριτήρια και για όλες τις εναλλακτικές, τους αριθμούς διάταξης  $P_{ij}$ , σχηματίζεται ο αντίστοιχος πίνακας.

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Εντός κάθε κριτηρίου, συγκρίνονται κατά ζεύγη εναλλακτικών λύσεων οι αριθμοί διάταξης. Έτσι για δύο εναλλακτικές λύσεις  $A_i$  και  $A_i'$ , συγκρίνονται για κάθε κριτήριο  $j$  τα αντίστοιχα  $P_{ij}$  και  $P_{i'j}$ . Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει η συνιστώσα  $rii',j$  του διανύσματος Regime  $rii'$ , το οποίο συγκρίνει διατεταγμένα τις δύο εναλλακτικές  $A_i$  και  $A_i'$ . Η εν λόγω συνιστώσα λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

$$\begin{aligned} &+1, \text{ εάν } P_{ij} > P_{i'j}, \\ &-1, \text{ εάν } P_{ij} < P_{i'j}, \\ &0, \text{ εάν } P_{ij} = P_{i'j}. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Η συνιστώσα  $ri',i,j$  του διανύσματος Regime  $ri',i$ , λαμβάνει τις αντίθετες από την συνιστώσα  $rii',j$  του διανύσματος Regime  $rii'$  τιμές, βάσει του ότι η σύγκριση των εναλλακτικών γίνεται διατεταγμένα στα διανύσματα Regime.

Εφόσον ευρεθούν όλες οι συνιστώσες  $rii',j$ , μορφώνεται το διάνυσμα Regime  $rii'$  ως εξής:

$$[rii'] = [rii',1, rii',2, rii',3, \dots, rii',j, \dots, rii',J], \tag{2.2}$$

όπου  $J$ , το πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης.

Με αυτό τον τρόπο, μορφώνονται όλα τα διανύσματα Regime, τα οποία και αποτελούν γραμμές του τελικά καταρτιζομένου πίνακα Regime, ο οποίος παρίσταται με  $R$ .

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ιεραρχούνται ποιοτικά τα κριτήρια. Επισημαίνεται ότι όσο ο δείκτης  $j$  του κριτηρίου  $C_j$  να είναι μικρότερος, τόσο σημαντικότερα ιεραρχείται το υπόψη κριτήριο. Δηλαδή είναι βολικό, εάν  $\lambda_j$  η σχετική βαρύτητα του κριτηρίου  $C_j$ , υφίσταται η εξής ακολουθία σχέσεων (διάταξη) των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_j \geq \dots \geq \lambda_J, \tag{2.3}$$

όπου  $J$ , το πλήθος των κριτηρίων.

Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί, για λόγους κανονικοποίησης των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων, ότι ισχύει και η ακόλουθη σχέση:

$$\sum_j [\lambda_j] = 1,00. \tag{2.4}$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Θεωρείται για κάθε ζεύγος εναλλακτικών (διατεταγμένως θεωρουμένων) ο Δείκτης διαφοράς ελκυστικότητας  $mii'$ , ο οποίος δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$mii' = \sum_j [\lambda_j * rii',j]. \tag{2.5}$$

Με δεδομένη από προηγούμενο βήμα ακολουθία σχέσεων (διάταξη) των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων, ευρίσκονται από τα διανύσματα Regime, εκείνα που μπορούν να δώσουν ετερόσημες τιμές σε ένα έστω δείκτη διαφοράς ελκυστικότητας. Αυτά τα διανύσματα Regime χαρακτηρίζονται «κρίσιμα».

Για παράδειγμα, εάν θεωρούνται τρία κριτήρια, κρίσιμα διανύσματα Regime είναι τα ακόλουθα (εφόσον τηρείται η αρχή του όσο μικρότερος ο δείκτης ενός κριτηρίου, άρα και όσο καλύτερη η σειρά του, τόσο σπουδαιότερο το κριτήριο αυτό):

$$[+1, -1, -1],$$

$$[-1, +1, +1]. \quad (2.6)$$

Ανά δύο τα κρίσιμα διανύσματα Regime ορίζουν μία κρίσιμη εξίσωση μεταξύ των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων. Για παράδειγμα, τα προαναφερθέντα διανύσματα Regime, ορίζουν την κρίσιμη εξίσωση:

$$\lambda_1 = \lambda_2 + \lambda_3. \quad (2.7)$$

Η υπόψη εξίσωση είναι συμβατή με τη διάταξη  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ , των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων αξιολόγησης και είναι συμβατή και με τη σχέση της κανονικότητας των βαρών, δηλαδή με:  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1,00$ .

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, έκαστο των οποίων έχει ως συνιστώσες τις δυνατές σχετικές βαρύτητες των κριτηρίων. Η έννοια «δυνατές», σημαίνει τη συναλήθευση των δεκτών ή θεσπισμένων σχέσεων που έχουν δοθεί προηγουμένως μεταξύ των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων. Πρόκειται δηλαδή για τη συναλήθευση των σχέσεων κανονικότητας και ιεράρχησης των κριτηρίων αξιολόγησης, ήτοι αντιστοίχως των σχέσεων:

$$\sum_j [\lambda_j] = 1,00,$$

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_j \geq \dots \geq \lambda_J.$$

Ο εν λόγω γεωμετρικός τόπος, χαρακτηρίζεται ως «Χώρος Τιμών» και παρίσταται με S.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση των τριών κριτηρίων που αναφέρθηκε, η συναλήθευση των προαναφερομένων σχέσεων, οδηγεί στην οριοθέτηση του γεωμετρικού τόπου των βαρών των κριτηρίων, δηλαδή του Χώρου Τιμών, ως τριγώνου, με συντεταγμένες των κορυφών-βάρη των κριτηρίων τα ακόλουθα σημεία:

$$X1: [1, 0, 0],$$

$$X2: [1/2, 1/2, 0],$$

$$X3: [1/3, 1/3, 1/3].$$

(2.8)

Παρατηρείται ότι ο Χώρος Τιμών έχει πλήθος βαθμών ελευθερίας (J-1), όπου (ως ήδη αναφέρθηκε) J είναι το πλήθος των κριτηρίων. (Για παράδειγμα στην περίπτωση τριών κριτηρίων, ο Χώρος Τιμών είναι τρίγωνο, δηλαδή τμήμα επιπέδου, άρα είναι τόπος με δύο βαθμούς ελευθερίας). Η μείωση κατά ένα βαθμό ελευθερίας έναντι του πλήθους J των κριτηρίων, οφείλεται στην ισχύ της εξίσωσης κανονικότητας, πέραν των ανισοτήτων (σχέσεων) διάταξης των βαρών των κριτηρίων.

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι «Υπόχωροι Τιμών», ήτοι οι S<sub>k</sub>, δηλαδή οι γεωμετρικοί υπόχωροι που ανήκουν στο Χώρο Τιμών S, όπου για κάθε Υπόχωρο Τιμών, πέρα από τις σχέσεις ολόκληρου του Χώρου (κανονικότητα και διάταξη των κριτηρίων), ισχύει ένα ιδιαίτερο σύνολο ανισοτήτων καθοριζομένων από τις κρίσιμες εξισώσεις.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση των τριών κριτηρίων, η κρίσιμη εξίσωση

$$\lambda_1 = \lambda_2 + \lambda_3, \text{ ορίζει δύο ανισότητες:}$$

την

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 + \lambda_3, \quad (2.9)$$

η οποία ορίζει με την ισχύ της τον Υπόχωρο Τιμών S1, και την

$$\lambda_1 \leq \lambda_2 + \lambda_3, \quad (2.10)$$

η οποία ορίζει με την ισχύ της τον Υπόχωρο Τιμών S2.

Έκαστος των δύο υπόψη Υποχώρων είναι ένα τρίγωνο. Τα ακραία σημεία (κορυφές), έχουν ανά Υπόχωρο τις εξής συντεταγμένες:

Για τον S1:

$$X1: [1, 0, 0],$$

$$X2: [1/2, 1/2, 0],$$

$$X4: [1/2, 1/4, 1/4].$$

(2.11)

Για τον S2:

$$\begin{aligned} X2: & [1/2, 1/2, 0], \\ X4: & [1/2, 1/4, 1/4], \\ X3: & [1/3, 1/3, 1/3], \end{aligned} \quad (2.12)$$

Παρατηρείται ότι ο Υπόχωρος Τιμών S1, έχει κοινές κορυφές με ολόκληρο το Χώρο Τιμών S τα σημεία X1 και X2, ενώ ο Υπόχωρος Τιμών S2, έχει κοινές κορυφές με ολόκληρο το Χώρο Τιμών S τα σημεία X2 και X3.

Μεταξύ τους οι δύο Υπόχωροι (S1 και S2) έχουν κοινές τις κορυφές X2 και X4 και το μεταξύ αυτών οριζόμενο ευθύγραμμο τμήμα.

*Βήμα 7<sup>ο</sup>:* Ευρίσκεται το «Μέγεθος» κάθε Υπόχωρου Sk, το οποίο παρίσταται με tk. Το Μέγεθος αυτό εννοιολογικά μπορεί να καθοριστεί ως το πλήθος των σημείων που ανήκουν στον υπόψη Υπόχωρο, ενώ αριθμητικά μπορεί να προσδιοριστεί ως η απόλυτη τιμή της ορίζουσας του πίνακα ο οποίος έχει ως σειρές τα ακραία σημεία του Υπόχωρου. Παρόμοια, μπορεί να ορισθεί και το μέγεθος ολόκληρου του Χώρου Λύσεων S, το οποίο παρίσταται με t.

Το πηλίκο του μεγέθους κάθε υπόχωρου τιμών προς το μέγεθος του χώρου τιμών, δηλαδή το (tk/t), εκφράζει την σχετική πιθανότητα ο συνδυασμός των βαρών των κριτηρίων να ευρίσκεται εντός του συνόλου συνδυασμών βαρών του υπόψη υπόχωρου.

Εύκολα μπορεί ναδειχθεί, με βάση την ανωτέρω πιθανοτική προσομοίωση, ότι:

$$\sum_k [(tk/t)] = 1,00. \quad (2.13)$$

*Βήμα 8<sup>ο</sup>:* Για κάθε Υπόχωρο Τιμών ευρίσκονται οι συντεταγμένες του Κεντροειδούς του, το οποίο μπορεί να προσομοιωθεί με το κέντρο βάρους του υπόψη Υπόχωρου.

Κάθε συνιστώσα του Κεντροειδούς υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των αντιστοιχών συνιστωσών των ακραίων σημείων (κορυφών) του αντίστοιχου Υπόχωρου.

*Βήμα 9<sup>ο</sup>:* Για κάθε Υπόχωρο Τιμών Sk ευρίσκονται οι Δείκτες Διαφοράς Ελκυστικότητας μii' για κάθε θεωρούμενο ζεύγος Εναλλακτικών Ai και Ai', δηλαδή ευρίσκεται το μii'(κ). Για να ευρεθεί μάλιστα και η συγκεκριμένη τιμή για κάθε Υπόχωρο τιμών και κάθε διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών, ως σχετικές βαρύτητες των κριτηρίων λαμβάνονται οι συνιστώσες του κεντροειδούς για κάθε Υπόχωρο.

Ακόμη, σημειώνεται ότι το πρόσημο κάθε Δείκτη Διαφοράς Ελκυστικότητας είναι σταθερό εντός κάθε Υπόχωρου Τιμών, όπως αυτό καθορίζεται από τις συγκεκριμένες σχέσεις ανισοτήτων μεταξύ των βαρών των κριτηρίων.

*Βήμα 10<sup>ο</sup>:* Για κάθε Υπόχωρο τιμών Sk και αναφορικά με κάθε διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών Ai και Ai', υπολογίζεται από το αντίστοιχο μii'(κ) ο «Αριθμός Σύγκρισης». Ο αριθμός σύγκρισης παρίσταται με Uii'(k), εκφράζει μονοσήμαντα την υπεροχή, υστέρηση ή ισότητα μίας εναλλακτικής έναντι μίας άλλης αναφορικά με ένα Υπόχωρο τιμών. Οι τιμές που λαμβάνει στην κλασσική μέθοδο Regime κάθε αριθμός σύγκρισης, ήτοι κάθε Uii'(k), είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} U_{ii}'(k) &= +1, \text{ εάν } \mu_{ii}'(\kappa) > 0, \\ U_{ii}'(k) &= -1, \text{ εάν } \mu_{ii}'(\kappa) < 0, \\ U_{ii}'(k) &= 0, \text{ εάν } \mu_{ii}'(\kappa) = 0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Αφού ευρεθούν για κάθε Υπόχωρο τιμών Sk όλοι οι Uii'(k), μορφώνεται ο πίνακας V(k). Στην κύρια διαγώνιο κάθε πίνακα V(k), όπου i = i', δηλαδή η κάθε εναλλακτική συγκρίνεται με τον εαυτό της, τα στοιχεία είναι μηδενικά, δηλαδή:

$$\text{Για } i = i', U_{ii}'(k) = 0. \quad (2.15)$$

*Βήμα 11<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται η γενική (στα κριτήρια) επίδοση κάθε εναλλακτικής Α<sub>i</sub> για κάθε Υπόχωρο τιμών S<sub>k</sub>. Η επίδοση αυτή συμβολίζεται με E<sub>i</sub>(κ). Η υπόψη επίδοση δίδεται από τη σχέση:

$$E_i(\kappa) = \sum_i [U_{ii}'(\kappa)]. \quad (2.16)$$

Με βάση την E<sub>i</sub>(κ), κατατάσσεται κάθε εναλλακτική Α<sub>i</sub> αναφορικά με τον υπόχωρο τιμών S<sub>k</sub> [όσο μεγαλύτερη αλγεβρικά η E<sub>i</sub>(κ), τόσο καλύτερη η εναλλακτική Α<sub>i</sub> αναφορικά με τον υπόχωρο τιμών S<sub>k</sub>].

*Βήμα 12<sup>ο</sup>*: Υπερτίθενται οι ανά υπόχωρο τιμών κατατάξεις των εναλλακτικών. Η υπέρθεση αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά μεγέθη των Υποχώρων, όπως αυτά έχουν προσδιορισθεί από προηγούμενο βήμα.

Για κάθε εναλλακτική Α<sub>i</sub>, η τελική ολική επίδοση σε ολόκληρο το χώρο τιμών, ήτοι η E<sub>i</sub>, μπορεί να υπολογισθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$E_i = \sum_k \{E_i(\kappa) * [tk/t]\} \quad (2.17)$$

Με βάση τις επιδόσεις E<sub>i</sub> κατατάσσονται σε ολόκληρο το χώρο τιμών, δηλαδή τελικά, οι εναλλακτικές Α<sub>i</sub> (όσο μεγαλύτερη αλγεβρικά η E<sub>i</sub>, τόσο καλύτερη η εναλλακτική Α<sub>i</sub>).

## 2.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME

### 2.3.1. Γενικά

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Bonifica-Doxiadis Associates-TECNIC, 1999), (Τσαμπούλας Δ. - Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«Α1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«Α2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«Α3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Αξιολογούνται για την ανάθεση του καλύτερου έργου, με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών,
- Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

Από τα τρία κριτήρια, για αυτό της χρηματικής αποδοτικότητας δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR). Στο υπόψη κριτήριο, η εναλλακτική λύση Α1 έχει τιμή 94%, η Α2 τιμή 162% και η Α3 τιμή 74%.

Για τα άλλα δύο κριτήρια υπάρχουν απλώς ποιοτικές εκτιμήσεις για τις συνέπειες/επιδόσεις των υπό αξιολόγηση έργων.

Έτσι, για το περιβαλλοντικό κριτήριο, εκτιμήθηκε ότι τα έργα Α1 και Α3 θα έχουν περίπου τις ίδιες επιπτώσεις, ενώ το έργο Α2 θα έχει αισθητά χειρότερες επιπτώσεις.

Για το κριτήριο της ποιότητας των προσφερόμενων συγκοινωνιακών υπηρεσιών, εκτιμήθηκε ότι το έργο Α1 θα έχει πολύ καλύτερη επιρροή από καθένα εκ των άλλων δύο έργων. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το Α3 θα έχει καλύτερη σχετικά με το Α2 επιρροή στο υπόψη κριτήριο.

### 2.3.2. Εφαρμογή των βημάτων του αλγορίθμου της μεθόδου Regime

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Από τις αρχικές επιδόσεις (ποσοτικές και ποιοτικές) ευρίσκονται οι αριθμοί διάταξης P<sub>ij</sub>. Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τους αριθμούς διάταξης της εφαρμογής της μεθόδου Regime στο υπόψη παράδειγμα.



Πίνακας 2.1: Αριθμοί Διάταξης  $P_{ij}$ .

Table 2.1: Order Numbers  $P_{ij}$ .

	Περιβαλλοντ. επιπτώσεις	Ποιότητα συγκοινων. υπηρεσιών	Χρηματική αποδοτικότητα
A1	2	3	2
A2	1	1	3
A3	2	2	1

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Ευρίσκονται τα διανύσματα Regime, με χρήση των προαναφερθεισών σχέσεων (2.1) και (2.2):

$$\begin{aligned}r_{12} &= [+1, +1, -1], \\r_{21} &= [-1, -1, +1], \\r_{13} &= [0, +1, +1], \\r_{31} &= [0, -1, -1], \\r_{23} &= [-1, -1, +1], \\r_{32} &= [+1, +1, -1].\end{aligned}$$

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Ιεραρχούνται τα κριτήρια και αντίστοιχα δίδονται και οι τιμές στο δείκτη  $j$  για κάθε  $C_j$ .

Έστω ότι ισχύει η ακόλουθη ιεράρχηση (με βάση γνωμοδότηση ειδημόνων):

Το κριτήριο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σπουδαιότερο του κριτηρίου της ποιότητας των συγκοινωνιακών υπηρεσιών και αυτό σπουδαιότερο του κριτηρίου της χρηματικής αποδοτικότητας, οπότε η αντιστοίχιση με τα  $C_j$ , έχει ως ακολούθως:

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις  $\rightarrow C1$ ,

Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών  $\rightarrow C2$ ,

Χρηματική αποδοτικότητα  $\rightarrow C3$ .

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Εύρεση των κρίσιμων διανυσμάτων Regime.

Είναι τα ακόλουθα:

$$[+1, -1, -1],$$

$$[-1, +1, +1].$$

Από αυτά προκύπτει η κρίσιμη εξίσωση, η οποία είναι η ακόλουθη:

$$\lambda_1 = \lambda_2 + \lambda_3.$$

Βήμα 5<sup>ο</sup>: Ευρίσκεται ο χώρος τιμών  $S$ . Για το υπόψη παράδειγμα, είναι ένα τρίγωνο, με ακραία σημεία-κορυφές τα ακόλουθα:

$$X1: [1, 0, 0],$$

$$X2: [1/2, 1/2, 0],$$

$$X3: [1/3, 1/3, 1/3].$$

Βήμα 6<sup>ο</sup>: Ευρίσκονται οι υπόχωροι τιμών. Στο υπόψη παράδειγμα, με τρία το πλήθος κριτήρια, διακρίνονται δύο υπόχωροι τιμών: ο  $S1$  και ο  $S2$ . Έκαστος εξ' αυτών είναι τρίγωνο, με ακραία σημεία-κορυφές τα ακόλουθα:

Για τον  $S1$ :

$$X1: [1, 0, 0],$$

$$X2: [1/2, 1/2, 0],$$

$$X4: [1/2, 1/4, 1/4].$$

Για τον S2:

$$X2: [1/2, 1/2, 0],$$

$$X4: [1/2, 1/4, 1/4],$$

$$X3: [1/3, 1/3, 1/3].$$

*Βήμα 7<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται το «Μέγεθος» κάθε Υπόχωρου  $S_k$ , δηλαδή το  $t_k$ .

Το μέγεθος κάθε υπόχωρου υπολογίζεται ως η απόλυτη τιμή της ορίζουσας του πίνακα, ο οποίος έχει σειρές τις συντεταγμένες των ακραίων σημείων – κορυφών του υπόχωρου αυτού.

Έτσι, η ορίζουσα του S1, ήτοι η  $\det(S1)$  ισούται με:

$$\det(S1) = +1/8,$$

οπότε το  $t1$  ισούται με την απόλυτη τιμή της, δηλαδή:

$$t1 = |\det(S1)| = 1/8 = 3/24.$$

Αντίστοιχα η ορίζουσα του S2, ήτοι η  $\det(S2)$  ισούται με:

$$\det(S2) = -1/24,$$

οπότε:

$$t2 = |\det(S2)| = 1/24.$$

Αντίστοιχα, το μέγεθος ολόκληρου του χώρου τιμών έχει ως εξής:

$$t = |\det(S)| = | +1/6 | = 1/6 = 4/24.$$

*Βήμα 8<sup>ο</sup>*: Για κάθε Υπόχωρο Τιμών ευρίσκονται οι συντεταγμένες του Κεντροειδούς του. Συγκεκριμένα, οι συντεταγμένες των Κεντροειδών των υποχώρων έχουν ως εξής:

$$\text{Συντεταγμένες Κεντροειδούς S1: } [(1+1/2+1/2)/3, (0+1/2+1/4)/3, (0+0+1/4)/3] = [24/36, 9/36, 3/36].$$

$$\text{Συντεταγμένες Κεντροειδούς S2: } [(1/2+1/3+1/2)/3, (1/2+1/3+1/4)/3, (0+1/3+1/4)/3] = [16/36, 13/36, 7/36].$$

*Βήμα 9<sup>ο</sup>*: Για κάθε Υπόχωρο Τιμών  $S_k$  ευρίσκονται οι Δείκτες Διαφοράς Ελκυστικότητας  $\mu_{ii'}$  για κάθε θεωρούμενο ζεύγος Εναλλακτικών  $A_i$  και  $A_{i'}$ , δηλαδή ευρίσκεται το  $\mu_{ii'}(k)$ , με εφαρμογή της (2.5).

Έτσι:

$$\mu_{12}(1) = +24/36 + 9/36 - 3/36 = +30/36.$$

$$\mu_{21}(1) = -24/36 - 9/36 + 3/36 = -30/36.$$

$$\mu_{13}(1) = +0 + 9/36 + 3/36 = +12/36.$$

$$\mu_{31}(1) = +0 - 9/36 - 3/36 = -12/36.$$

$$\mu_{23}(1) = -24/36 - 9/36 + 3/36 = -30/36.$$

$$\mu_{32}(1) = +24/36 + 9/36 - 3/36 = +30/36.$$

$$\mu_{12}(2) = +16/36 + 13/36 - 7/36 = +22/36.$$

$$\mu_{21}(2) = -16/36 - 13/36 + 7/36 = -22/36.$$

$$\mu_{13}(2) = +0 + 13/36 + 7/36 = +20/36.$$

$$\mu_{31}(2) = +0 - 13/36 - 7/36 = -20/36.$$

$$\mu_{23}(2) = -16/36 - 13/36 + 7/36 = -22/36.$$

$$\mu_{32}(2) = +16/36 + 13/36 - 7/36 = +22/36.$$

*Βήμα 10<sup>ο</sup>*: Για κάθε υπόχωρο τιμών  $S_k$  και αναφορικά με κάθε διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $A_i$  και  $A_{i'}$ , υπολογίζεται από το αντίστοιχο  $\mu_{ii'}(k)$  ο  $U_{ii'}(k)$ , με εφαρμογή της (2.14):

$$\begin{aligned}
U_{11}(1) &= 0, \\
U_{12}(1) &= +1, \\
U_{13}(1) &= +1, \\
U_{21}(1) &= -1, \\
U_{22}(1) &= 0, \\
U_{23}(1) &= -1, \\
U_{31}(1) &= -1, \\
U_{32}(1) &= +1, \\
U_{33}(1) &= 0,
\end{aligned}$$

οπότε ο  $V(1)$  είναι ως παρακάτω:

*Πίνακας 2.2:  $V(1)$  στο παρόν παράδειγμα.  
Table 2.2:  $V(1)$  in the present example.*

0	+1	+1
-1	0	-1
-1	+1	0

Και

$$\begin{aligned}
U_{11}(2) &= 0, \\
U_{12}(2) &= +1, \\
U_{13}(2) &= +1, \\
U_{21}(2) &= -1, \\
U_{22}(2) &= 0, \\
U_{23}(2) &= -1, \\
U_{31}(2) &= -1, \\
U_{32}(2) &= +1, \\
U_{33}(2) &= 0,
\end{aligned}$$

οπότε ο  $V(2)$  είναι ως παρακάτω:

*Πίνακας 2.3:  $V(2)$  στο παρόν παράδειγμα.  
Table 2.3:  $V(2)$  in the present example.*

0	+1	+1
-1	0	-1
-1	+1	0

*Βήμα 11<sup>ο</sup>:* Ευρίσκεται η γενική (στα κριτήρια) επίδοση κάθε εναλλακτικής  $A_i$  για κάθε υπόχωρο τιμών  $S_k$ , δηλαδή η  $E_i(k)$ , με εφαρμογή της (2.16):

Υπόχωρος  $S_1$ :

$$\begin{aligned}
E_1(1) &= U_{11}(1) + U_{12}(1) + U_{13}(1) = 0+1+1 = +2, \\
E_2(1) &= U_{21}(1) + U_{22}(1) + U_{23}(1) = -1+0-1 = -2, \\
E_3(1) &= U_{31}(1) + U_{32}(1) + U_{33}(1) = -1+1+0 = 0.
\end{aligned}$$

Επομένως στον υπόχωρο  $S_1$  βέλτιστη είναι η  $A_1$ , ακολουθεί η  $A_3$  και έπεται η  $A_2$ .

Υπόχωρος  $S_2$ :

$$\begin{aligned}
E_1(2) &= U_{11}(2) + U_{12}(2) + U_{13}(2) = 0+1+1 = +2, \\
E_2(2) &= U_{21}(2) + U_{22}(2) + U_{23}(2) = -1+0-1 = -2,
\end{aligned}$$

$$E3(2) = U31(2) + U32(2) + U33(2) = -1+1+0 = 0.$$

Επομένως στον υπόχωρο S2 βέλτιστη είναι η A1, ακολουθεί η A3 και έπεται η A2.

*Βήμα 12<sup>ο</sup>*: Υπερτίθενται οι ανά υπόχωρο τιμών κατατάξεις των εναλλακτικών, με βάση την προαναφερθείσα σχέση:  $E_i = \sum_k \{E_i(k) * [tk/t]\}$ , δηλαδή τη (2.17).

Έτσι:

- $E1 = \sum_k \{E1(k) * [tk/t]\} = E1(1) * [t1/t] + E1(2) * [t2/t] = (+2)*[(3/24)/(4/24)] + (+2)*[(1/24)/(4/24)] = +6/4 + 2/4 = +8/4.$
- $E2 = \sum_k \{E2(k) * [tk/t]\} = E2(1) * [t1/t] + E2(2) * [t2/t] = + (-2)*[(3/24)/(4/24)] + (-2)*[(1/24)/(4/24)] = -6/4 - 2/4 = -8/4.$
- $E3 = \sum_k \{E3(k) * [tk/t]\} = E3(1) * [t1/t] + E3(2) * [t2/t] = 0*[(3/24)/(4/24)] + 0*[(1/24)/(4/24)] = 0 + 0 = 0.$

Επομένως, βέλτιστη αναδεικνύεται η εναλλακτική λύση A1, με επίδοση +8/4, ακολουθεί η A3, με επίδοση 0 και έπεται η A2, με επίδοση -8/4.

Δηλαδή, η τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη, έχει ως εξής: A1 – A3 – A2.

Σημειώνεται ότι σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση που έγινε από διεθνείς φορείς και με τη συμμετοχή του Υπουργείου Μεταφορών της Βουλγαρίας (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999), η κατάταξη των τριών προαναφερθέντων έργων ήταν η ίδια με αυτή που προέκυψε από την ανάλυση της παρούσας εργασίας. Επίσης, η ίδια κατάταξη προέκυψε και με εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθόδου Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (Τσαμπούλας, 1999).

## 2.4. ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ REGIME

### 2.4.1. Χαρακτηριστικά αξιολόγησης κοινωνικών έργων

Η αξιολόγηση κοινωνικών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (Nijkamp - Blaas, 1993), (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky – Gershon - Duckstein, 1986), (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), όπως:

- το σημαντικό *πλήθος εναλλακτικών λύσεων*, αφού για τα περισσότερα κοινωνικά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω του πολυσχιδούς των οικονομικών θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό *πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης*, αφού οι επιρροές των κοινωνικών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό *πλήθος και την εν δυνάμει σημαντική ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών*, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα κοινωνικά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκόμενων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περιοίκων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την *ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης*, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά., όπου η υπόψη ετερογένεια των κριτηρίων, οπότε για τη μέτρησή τους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μεταξύ τους δείκτες και κλίμακες (:φυσικές, αριθμητικές, λεξικογραφικές κ.ά.),
- τη *δυσκολία ποσοτικής απόδοσης των επιδόσεων των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης*, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι μία μέθοδος αξιολόγησης ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρεί τα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι και η αξιολόγηση άλλων τεχνικών έργων, που αναφέρονται στην ενέργεια ή στο περιβάλλον, παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων. Έτσι, θα μπορούσε να εξετασθεί και εκεί η εφαρμογή της μεθόδου Regime.

Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση της μεθόδου Regime σύμφωνα με τα εν λόγω χαρακτηριστικά.

#### **2.4.2. Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων**

Η μέθοδος Regime δεν παρουσιάζει πρόβλημα με το μεγάλο αριθμό των εναλλακτικών λύσεων, αφού η κύρια γεωμετρική της προσομοίωση αναφέρεται στα κριτήρια αξιολόγησης και όχι στις εν λόγω εναλλακτικές λύσεις. Επομένως, το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του χώρου τιμών και των υποχώρων τιμών καθορίζονται από τον αριθμό των κριτηρίων αξιολόγησης και όχι από τον αριθμό των εναλλακτικών λύσεων.

Επίσης, η υπέρθεση των κατά ζεύγη συγκρίσεων γίνεται με σαφήνεια και απλότητα, με τη δημιουργία των επιδόσεων  $E_i(k)$  των εναλλακτικών λύσεων  $A_i$  στους υπόχωρους τιμών  $S_k$ , βάσει των πινάκων  $V(k)$  των αριθμών συγκρίσεως  $U_{ii}(k)$ , όπως προαναφέρθηκε.

#### **2.4.3. Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η βασική γεωμετρική προσομοίωση της μεθόδου Regime αναφέρεται στα κριτήρια αξιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, όπως και στην μαθηματική και εννοιολογική παρουσίαση της μεθόδου αναπτύχθηκε, κάθε κριτήριο αξιολόγησης προσομοιώνεται με άξονα ενός γεωμετρικού ευκλείδειου χώρου. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των εν λόγω κριτηρίων, τόσο μεγαλύτερη πολλαπλότητα έχει ο υπόψη γεωμετρικός χώρος. Άρα, όσο μεγαλύτερο είναι ο αριθμός των κριτηρίων αξιολόγησης, τόσο η διαδικασία λειτουργίας της μεθόδου Regime γίνεται πιο πολύπλοκη.

Για την αντιμετώπιση του υπόψη ζητήματος, έχει αναπτυχθεί μία νεότερη μέθοδος, η οποία ονομάζεται Nested Regime (Nijkamp - Blaas, 1993), (EUNET Project, 1997). Η μέθοδος αυτή λειτουργεί σε δύο επίπεδα κριτηρίων: τα απλά κριτήρια και τα υπερκριτήρια, θεωρώντας ότι σύνολα απλών κριτηρίων μπορούν να ενταχθούν σε ευρύτερα κριτήρια, δηλαδή σε υπερκριτήρια. Η ένταξη των απλών κριτηρίων σε υπερκριτήρια μπορεί να γίνει με εννοιολογικούς συσχετισμούς. Για παράδειγμα, τα κριτήρια της χημικής ρύπανσης, της ηχορρύπανσης, της αισθητικής του τοπίου, της χλωρίδας και της πανίδας, μπορούν να ενταχθούν στο υπερκριτήριο περιβάλλον. Στη Nested Regime, αφού ενταχθούν τα απλά κριτήρια αξιολόγησης σε υπερκριτήρια, γίνεται σε πρώτο επίπεδο αξιολόγηση εντός κάθε υπερκριτηρίου με την απλή Regime. Δηλαδή, επαναλαμβάνεται η εφαρμογή της απλής Regime τόσες φορές, όσες ο αριθμός των υπερκριτηρίων. Είναι σαφές ότι σε κάθε υπερκριτήριο η απλή Regime εφαρμόζεται με τα απλά κριτήρια του υπερκριτηρίου αυτού. Αφού ολοκληρωθούν οι εφαρμογές της απλής Regime για όλα τα υπερκριτήρια, λαμβάνονται τόσες το πλήθος ιεραρχήσεις εναλλακτικών λύσεων, όσα τα υπερκριτήρια (φυσικά κάποιες από αυτές συμπίπτουν μεταξύ τους). Στο δεύτερο επίπεδο λαμβάνει χώρα εφαρμογή της απλής Regime, μεταξύ πλέον των υπερκριτηρίων. Για κάθε υπερκριτήριο, λαμβάνονται ως ποιοτικές επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων αυτές της τελικής διάταξής τους στο υπόψη υπερκριτήριο όπως έχουν προκύψει από την αντίστοιχη εφαρμογή στο πρώτο επίπεδο αξιολόγησης.

#### **2.4.4. Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Η μέθοδος Regime, όπως και προηγουμένως τονίσθηκε, λειτουργεί με εισαγόμενα ποιοτικής μόνο διάταξης, δηλαδή με απλή ποιοτική ιεράρχηση, τόσο ως προς τις σχετικές βαρύτητες των κριτηρίων αξιολόγησης, όσο και ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Επομένως, δεν απαιτεί στα αρχικά της δεδομένα ακριβείς αριθμητικές τιμές. Άρα, ο συγκερασμός σημαντικού πλήθους και ετερογενών θέσεων και απόψεων είναι εφικτός σε μεγάλο βαθμό.

#### **2.4.5. Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος Regime χειρίζεται αρκετά καλά ετερογενή κριτήρια, αφού ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, δέχεται ως εισαγόμενο μία απλή ποιοτική ιεράρχηση επιδόσεων ανά κριτήριο. Δηλαδή, οι εκφρασμένες με διαφορετικούς δείκτες και σε ποικίλες κλίμακες, ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, εύκολα ιεραρχούνται (ανά κριτήριο), άρα και εύκολα τίθενται ως εισαγόμενα προς εφαρμογή της μεθόδου Regime.

#### **2.4.6. Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Η μέθοδος Regime λόγω του ότι χειρίζεται με απλές μόνον διατάξεις ιεράρχησης τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, μπορεί με αρκετή απλότητα και ευχρηστία να χειριστεί ποιοτική όσο και ποσοτική πληροφόρηση σχετικά με τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Αυτό είναι πλεονέκτημα της μεθόδου.

Ωστόσο, η λειτουργία της μεθόδου με απλές ιεραρχικές διατάξεις των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων, ενέχει το μειονέκτημα της ανεπαρκούς αξιοποίησης ποσοτικής πληροφόρησης για τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η κλασική μέθοδος Regime (όπως ήδη παρουσιάσθηκε), δεν έχει τη δυνατότητα να αξιοποιήσει πληροφορία σχετικά με το «πόσο καλύτερη» είναι η επίδοση μίας εναλλακτικής λύσης σε ένα κριτήριο, σε σχέση με την επίδοση μίας άλλης στο ίδιο κριτήριο. Δηλαδή δεν αποδίδει με ακρίβεια πλήρως την ποσοτική πληροφορία διαφορών επιδόσεων, παρά μόνο αξιοποιεί την απλή διάταξη των ανά κριτήριο επιδόσεων. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως πρόβλημα ακρίβειας.

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί το υπάρχον εν δυνάμει μειονέκτημα της μεθόδου, έχει προταθεί από αρκετούς ερευνητές (Nijkamp et al, 1993), (EUNET Project, 1997), οι συνιστώσες Regime, δηλαδή οι  $r_{ii}^j$ , να μπορούν εκτός των τιμών +1, -1, 0, να παίρνουν και τις τιμές +1/2, -1/2, ή και ακόμη περισσότερες, ενδιάμεσες τιμές.

### **2.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η μέθοδος Regime είναι μία μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η οποία στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη διανυσματική προσομοίωση των κριτηρίων αξιολόγησης. Στην υπόψη προσομοίωση κάθε κριτήριο επέχει θέση άξονα γεωμετρικού τόπου. Με δεδομένη μία απλή ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης, καθορίζεται για κάθε πρόβλημα πολυκριτηριακής αξιολόγησης, ο προαναφερθείς γεωμετρικός χώρος, ο οποίος ονομάζεται χώρος τιμών.

Η υπόψη μέθοδος, μπορεί να εφαρμοσθεί με αρκετή επιτυχία σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, αφού η δομή της ανταποκρίνεται αρκετά ικανοποιητικά, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, στις συνθήκες των έργων αυτών, άρα και στις απαιτήσεις της αξιολόγησής τους. Σημειώνεται, ότι σε κάποιο βαθμό τα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων εμφανίζονται και σε άλλα τεχνικά έργα, όπως τα σχετικά με την ενέργεια ή με το περιβάλλον, επομένως δεν πρέπει να αποκλείεται ούτε η εκεί χρήση της μεθόδου. Αναλυτικότερα, η μέθοδος Regime, ανταποκρίνεται αρκετά καλά σε μεγάλο

πλήθος εναλλακτικών λύσεων, σε μεγάλο πλήθος και ετερογένεια αποφασιζόντων, ενώ παρουσιάζει εύκολο χειρισμό τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών κριτηρίων αξιολόγησης. Η έλλειψη μεγάλης ακρίβειας απόδοσης αρχικής ποσοτικής πληροφορίας, όπως ως προς τις αρχικά δεδομένες ανά κριτήριο επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων, μπορεί να αντιμετωπισθεί με την εισαγωγή περισσότερων, ενδιάμεσων των συνήθων τιμών στις συνιστώσες των διανυσμάτων Regime. Η μαθηματική πολυπλοκότητα για αρκετά μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης, μπορεί να αντιμετωπισθεί με την εφαρμογή της Nested Regime, η οποία κατορθώνει την ενσωμάτωση απλών κριτηρίων σε υπερκριτήρια, λειτουργώντας έτσι σε δύο επίπεδα αξιολόγησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ-3: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα περισσότερα προβλήματα αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, οι διαφαινόμενες λύσεις είναι περισσότερες της μίας, επομένως είναι χρήσιμο η εν λόγω αξιολόγηση, να καταλήξει σε κάποιο εξαγόμενο σύγκρισης των λύσεων.

Για να συμπεριληφθούν όσο το δυνατό καλύτερα εννοιολογικά και ακριβέστερα ποσοτικά αρκετά κριτήρια σε μία αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μία από αυτές είναι η μέθοδος Qualiflex, η οποία εισήχθη υπό του Paelinck (Paelinck, 1978). Η μέθοδος στηρίζεται σημαντικά στην έννοια «Χώρος Λύσεων», όπου σε κάθε σημείο του Χώρου αντιστοιχεί ένας συνδυασμός των βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης.

Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή γίνεται διερεύνηση δυνατοτήτων εφαρμογής της υπόψη μεθόδου σε πραγματικά προβλήματα πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων. Στο πλαίσιο αυτό δίδεται η μαθηματική ανάπτυξη της μεθόδου, γίνεται ανάλυση του βαθμού απόκρισής της στα χαρακτηριστικά αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων (τα οποία σε κάποιο βαθμό emπίπτουν και σε άλλα τεχνικά έργα) και παρατίθεται εφαρμογή της σε πραγματικό πρόβλημα, η οποία και αξιολογείται.

#### Συμβολισμοί

$A_i$ : Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.

$I$ : Πλήθος εναλλακτικών λύσεων.

$C_j$ : Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.

$J$ : Πλήθος κριτηρίων.

$\Phi_{ij}$ : Αρχική (συνήθως φυσική) επίδοση της εναλλακτικής  $A_i$  στο κριτήριο  $C_j$ .

$w_j$ : Σχετική βαρύτητα του κριτηρίου  $C_j$ .

$S$ : Χώρος Λύσεων, ήτοι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, έκαστο των οποίων έχει ως συνιστώσες τις δυνατές σχετικές βαρύτητες των κριτηρίων.

$X_\omega$ : Ακραίο σημείο (κορυφή) του Χώρου Λύσεων.

$w_j^{(X_\omega)}$ : Τιμή σχετικής βαρύτητας κριτηρίου  $C_j$  στο ακραίο σημείο  $X_\omega$  του Χώρου Λύσεων.

$Z_k$ : Σενάριο διάταξης εναλλακτικών.

$r_k^{(X_\omega)}$ : Αριθμός Ολικής Συμβατότητας Σεναρίου  $Z_k$  Qualiflex ολικής διάταξης των εναλλακτικών λύσεων για το συνδυασμό σχετικών βαρών του σημείου  $X_\omega$  του Χώρου Λύσεων.

$r_{k,j}$ : Αριθμός Μερικής Συμβατότητας, ήτοι Σεναρίου  $Z_k$  με το κριτήριο  $C_j$ .

$r_{k,j,m}$ : Αριθμός Σημειακής Συμβατότητας, ήτοι Σεναρίου  $Z_k$  με το κριτήριο  $C_j$  για το ζεύγος "m" Εναλλακτικών.

$P_{ij}$ : Επίδοση Διάταξης (Αριθμός Διάταξης) της εναλλακτικής  $A_i$  στο κριτήριο  $C_j$ .

$\Sigma_j [\dots]$ : Άθροισμα ως προς το δείκτη  $j$  αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.

### 3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX

#### 3.2.1 Γενικά

Η πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης Qualiflex (Paelinck, 1978), (Schaerlig, 1985), (Τσαμπούλας 2004), (EUNET Project, 1997), αξιοποιεί και προϋποθέτει για τη λειτουργία της τα ακόλουθα:

- Απλή ποιοτική ιεράρχηση των κριτηρίων,



- Απλή ποιοτική ιεράρχηση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών.

Η έννοια «ποιοτική ιεράρχηση ως προς τα κριτήρια», σημαίνει ότι αρχικά χρειάζεται απλά η ποιοτική πληροφορία εάν κάποιο κριτήριο είναι σημαντικότερο από κάποιο άλλο και δεν απαιτείται η ποσοτική πληροφορία πόσο σημαντικότερο είναι.

Παρόμοια, η έννοια «ποιοτική ιεράρχηση ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών», σημαίνει ότι αρχικά χρειάζεται απλά η ποιοτική πληροφορία εάν κάποια εναλλακτική είναι καλύτερη από κάποια άλλη ως προς κάποιο κριτήριο και δεν απαιτείται η ποσοτική πληροφορία πόσο καλύτερη είναι.

### 3.2.2. Οι αρχές της μεθόδου

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Από τις αρχικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών, οι οποίες εκφράζονται συνήθως στις φυσικές κλίμακες των κριτηρίων (οι εν λόγω επιδόσεις μπορούν να συμβολισθούν με  $\Phi_{ij}$ ) ευρίσκονται οι αριθμοί διάταξης  $P_{ij}$ . Οι εν λόγω αριθμοί διατάσσουν τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων και αντανakλούν την προαναφερόμενη ποιοτική ιεράρχηση αυτών. Οι υπόψη αριθμοί χαρακτηρίζονται «τακτικοί», όπου, ο χαρακτηρισμός αυτός αποδίδει το ποιοτικό στοιχείο της προαναφερθείσας ιεράρχησης.

Εάν για παράδειγμα αξιολογούνται τρεις εναλλακτικές, τότε, στην περίπτωση που στο κριτήριο  $C_j$  δεν παρατηρείται κάποια ισοδυναμία επιδόσεων των εναλλακτικών, οι αριθμοί διάταξης  $P_{ij}$  λαμβάνουν τις τιμές 1, 2, 3. Στην περίπτωση ισοδυναμίας των δύο καλύτερων στο υπόψη κριτήριο λύσεων, οι αριθμοί διάταξης λαμβάνουν τις τιμές 2, 2, 1.

Ευρίσκοντας για όλα τα κριτήρια και για όλες τις εναλλακτικές, τους αριθμούς διάταξης  $P_{ij}$ , σχηματίζεται ο αντίστοιχος πίνακας.

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Ιεραρχούνται ποιοτικά τα κριτήρια. Επιδιώκεται ο δείκτης  $j$  του κριτηρίου  $C_j$  να είναι τόσο μικρότερος, όσο σημαντικότερο ιεραρχείται το υπόψη κριτήριο. Δηλαδή, εάν  $w_j$  η σχετική βαρύτητα του κριτηρίου  $C_j$ , να υφίσταται η εξής ακολουθία σχέσεων (διάταξη) των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων:

$$w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_j \geq \dots \geq w_J, \quad (3.1)$$

όπου  $J$ , το πλήθος των κριτηρίων.

Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί, για λόγους κανονικοποίησης των σχετικών βαρυτήτων των κριτηρίων, ότι ισχύει και η ακόλουθη σχέση:

$$\sum_j [w_j] = 1,00. \quad (3.2)$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται όλα τα ακραία σημεία  $X_\omega$  του Χώρου των Λύσεων, όπου ένα σημείο έχει ως συντεταγμένες τα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης.

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Δημιουργούνται όλα τα δυνατά σενάρια  $Z_k$  διάταξης των εναλλακτικών.

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε σενάριο  $Z_k$  και κριτήριο  $C_j$  και ανά ζεύγος “ $m$ ” εναλλακτικών, ευρίσκεται ο Αριθμός Σημειακής Συμβατότητας  $r_{k,j,m}$ . Με άθροιση των Αριθμών Σημειακής Συμβατότητας ευρίσκονται οι Αριθμοί Μερικής Συμβατότητας, ήτοι:

$$r_{k,j} = \sum_m (r_{k,j,m}). \quad (3.3)$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Από τους Αριθμούς Μερικής Συμβατότητας ευρίσκονται οι Αριθμοί Ολικής Συμβατότητας όλων των Σεναρίων για όλα τα ακραία σημεία  $X_\omega$  του Χώρου Λύσεων. Δηλαδή, ευρίσκονται οι:

$$r_k^{(X_\omega)} = \sum_j [r_{k,j} * w_j^{(X_\omega)}]. \quad (3.4)$$

*Βήμα 7<sup>ο</sup>*: Από τους Αριθμούς  $r_k^{(X\omega)}$  προκύπτει ποιο σενάριο ή ποια σενάρια κυριαρχούν ανά σημείο  $X\omega$ . Με βάση αυτά, προκύπτουν τα επικρατέστερα συνολικά σενάρια και από αυτά οι επικρατέστερες συνολικά εναλλακτικές.

### 3.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX

#### 3.3.1. Γενικά

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«Α1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«Α2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«Α3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Αξιολογούνται για την ανάθεση του καλύτερου έργου, με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών,
- Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

Από τα τρία κριτήρια, για αυτό της χρηματικής αποδοτικότητας δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR). Στο υπόψη κριτήριο, η εναλλακτική λύση Α1 έχει τιμή 94%, η Α2 τιμή 162% και η Α3 τιμή 74%. Για τα άλλα δύο κριτήρια υπάρχουν απλώς ποιοτικοί χαρακτηρισμοί για τις συνέπειες/επιδόσεις των υπό αξιολόγηση έργων. Έτσι, για το περιβαλλοντικό κριτήριο, εκτιμήθηκε ότι τα έργα Α1 και Α3 θα έχουν περίπου τις ίδιες επιπτώσεις, ενώ το έργο Α2 θα έχει αισθητά χειρότερες επιπτώσεις. Για το κριτήριο της ποιότητας των προσφερόμενων συγκοινωνιακών υπηρεσιών, εκτιμήθηκε ότι το έργο Α1 θα έχει πολύ καλύτερη επιρροή από καθένα εκ των άλλων δύο έργων. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το Α3 θα έχει καλύτερη σχετικά με το Α2 επιρροή στο υπόψη κριτήριο.

#### 3.3.2. Εφαρμογή των βημάτων της μεθόδου Qualiflex

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Από τις αρχικές επιδόσεις (ποσοτικές και ποιοτικές) ευρίσκονται οι αριθμοί διάταξης  $P_{ij}$ . Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τους αριθμούς διάταξης της εφαρμογής της μεθόδου Qualiflex στο υπόψη παράδειγμα.

*Πίνακας 3.1: Αριθμοί Διάταξης  $P_{ij}$ .*

*Table 3.1: Order Numbers  $P_{ij}$ .*

	Περιβαλλοντ. επιπτώσεις	Ποιότητα συγκοινων. υπηρεσιών	Χρηματική αποδοτικότητα
A1	2	3	2
A2	1	1	3
A3	2	2	1

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Ιεραρχούνται ποιοτικά τα κριτήρια και αντίστοιχα δίδονται και οι τιμές στο δείκτη  $j$  για κάθε  $C_j$ .

Έστω ότι ισχύει η ακόλουθη ιεράρχηση (με βάση γνωμοδότηση ειδημόνων):

Το κριτήριο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σπουδαιότερο του κριτηρίου της ποιότητας των συγκοινωνιακών υπηρεσιών και αυτό σπουδαιότερο του κριτηρίου της χρηματικής αποδοτικότητας, οπότε η αντιστοίχιση με τα  $C_j$ , έχει ως ακολούθως:

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις → C1,  
Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών → C2,  
Χρηματική αποδοτικότητα → C3.

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται τα ακραία σημεία  $X_\omega$  του Χώρου Λύσεων.

Με δεδομένη από την ιεράρχηση των κριτηρίων διάταξη των βαρών αυτών:  $w_1 \geq w_2 \geq w_3$ , καθώς επίσης και δεδομένη την ισχύ της κανονικότητας των βαρών των κριτηρίων, δηλαδή  $\sum_j w_j = 1$ , προκύπτουν τα ακόλουθα ακραία σημεία του Χώρου Λύσεων:

X1 (1, 0, 0),

X2 (1/2, 1/2, 0),

X3 (1/3, 1/3, 1/3).

Κάθε ακραίο σημείο  $X_\omega$  καθορίζεται από τη μεγιστοποίηση του σχετικού βάρους ενός κριτηρίου, ήτοι του  $w_j$  του κριτηρίου  $C_j$ .

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Δημιουργούνται όλα τα δυνατά σενάρια διάταξης  $Z_k$  των εναλλακτικών. Για την περίπτωση μας, η οποία είναι περίπτωση τριών εναλλακτικών, τα δυνατά σενάρια διάταξης εναλλακτικών (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη) έχουν ως εξής:

Z<sub>1</sub>: A1 – A2 – A3

Z<sub>2</sub>: A1 - A3 - A2

Z<sub>3</sub>: A2 - A1 - A3

Z<sub>4</sub>: A2 - A3 - A1

Z<sub>5</sub>: A3 - A1 - A2

Z<sub>6</sub>: A3 - A2 - A1

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε σενάριο  $Z_k$  και κριτήριο  $C_j$  και ανά ζεύγος “m” εναλλακτικών, ευρίσκεται ο Αριθμός Σημειακής Συμβατότητας  $r_{k,j,m}$ . Με άθροιση των Αριθμών Σημειακής Συμβατότητας ευρίσκονται οι Αριθμοί Μερικής Συμβατότητας, ήτοι:  $r_{k,j} = \sum_m (r_{k,j,m})$ .

Ορίζονται καταρχήν τα ζεύγη εναλλακτικών:

Ζεύγος «1» το ζεύγος των A1 – A2,

Ζεύγος «2» το ζεύγος των A1 – A3,

Ζεύγος «3» το ζεύγος των A2 – A3.

Για το Σενάριο Z<sub>1</sub>: A1 – A2 – A3:

Ευρίσκονται καταρχήν οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_1$  και το κριτήριο C1:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{1,1,1} = +1$ , διότι έχουμε επιβεβαίωση της υπόθεσης επικράτησης της A1 επί της A2 στο σενάριο  $Z_1$  από τη διαπίστωση υπεροχής της επίδοσης της A1 επί της A2 στις αντίστοιχες επιδόσεις ως προς το κριτήριο C1 (επίδοση 2 για την A1 και 1 για την A2).
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{1,1,2} = 0$ , διότι έχουμε ήπια αναίρεση της υπόθεσης επικράτησης της A1 επί της A3 στο σενάριο  $Z_1$  από τη διαπίστωση ισότητας των επιδόσεων των A1 και A3 στο κριτήριο C1 (επίδοση 2 για την A1 και 2 για την A3).
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{1,1,3} = -1$ , διότι έχουμε έντονη αναίρεση της υπόθεσης επικράτησης της A2 επί της A3 στο σενάριο  $Z_1$  από τη διαπίστωση υστέρησης της επίδοσης της A2 έναντι της επίδοσης της A3 στο κριτήριο C1 (επίδοση 1 για την A2 και 2 για την A3).

Υπάρχει τώρα η δυνατότητα να εξαχθεί ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_1$  και το κριτήριο C1:

$$r_{1,1} = \sum_m (r_{1,1,m}) = r_{1,1,1} + r_{1,1,2} + r_{1,1,3} = +1 + 0 -1 = 0.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_1$  και το κριτήριο C2:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{1,2,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{1,2,2} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{1,2,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_1$  και το κριτήριο C2:

$$r_{1,2} = \sum_m (r_{1,2,m}) = r_{1,2,1} + r_{1,2,2} + r_{1,2,3} = +1 +1 -1 = +1.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_1$  και το κριτήριο C3:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{1,3,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{1,3,2} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{1,3,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_1$  και το κριτήριο C3:

$$r_{1,3} = \sum_m (r_{1,3,m}) = r_{1,3,1} + r_{1,3,2} + r_{1,3,3} = -1 +1 +1 = +1.$$

#### Για το Σενάριο $Z_2$ : A1 - A3 - A2:

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_2$  και το κριτήριο C1:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{2,1,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{2,1,2} = 0$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{2,1,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_2$  και το κριτήριο C1:

$$r_{2,1} = \sum_m (r_{2,1,m}) = r_{2,1,1} + r_{2,1,2} + r_{2,1,3} = +1 +0 +1 = +2.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_2$  και το κριτήριο C2:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{2,2,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{2,2,2} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{2,2,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_2$  και το κριτήριο C2:

$$r_{2,2} = \sum_m (r_{2,2,m}) = r_{2,2,1} + r_{2,2,2} + r_{2,2,3} = +1 +1 +1 = +3.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_2$  και το κριτήριο C3:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{2,3,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{2,3,2} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{2,3,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_2$  και το κριτήριο C3:

$$r_{2,3} = \sum_m (r_{2,3,m}) = r_{2,3,1} + r_{2,3,2} + r_{2,3,3} = -1 +1 -1 = -1.$$

#### Για το σενάριο $Z_3$ : A2 - A1 - A3:

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_3$  και το κριτήριο C1:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{3,1,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{3,1,2} = 0$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{3,1,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_3$  και το κριτήριο C1:

$$r_{3,1} = \sum_m (r_{3,1,m}) = r_{3,1,1} + r_{3,1,2} + r_{3,1,3} = -1 +0 -1 = -2.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_3$  και το κριτήριο C2:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{3,2,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{3,2,2} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{3,2,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_3$  και το κριτήριο C2:  
 $r_{3,2} = \sum_m (r_{3,2,m}) = r_{3,2,1} + r_{3,2,2} + r_{3,2,3} = -1 + 1 - 1 = -1$ .

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_3$  και το κριτήριο C3:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{3,3,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{3,3,2} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{3,3,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_3$  και το κριτήριο C3:  
 $r_{3,3} = \sum_m (r_{3,3,m}) = r_{3,3,1} + r_{3,3,2} + r_{3,3,3} = +1 + 1 + 1 = +3$ .

Για το σενάριο  $Z_4$ : A2 - A3 - A1:

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_4$  και το κριτήριο C1:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{4,1,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{4,1,2} = 0$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{4,1,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_4$  και το κριτήριο C1:  
 $r_{4,1} = \sum_m (r_{4,1,m}) = r_{4,1,1} + r_{4,1,2} + r_{4,1,3} = -1 + 0 - 1 = -2$ .

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_4$  και το κριτήριο C2:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{4,2,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{4,2,2} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{4,2,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_4$  και το κριτήριο C2:  
 $r_{4,2} = \sum_m (r_{4,2,m}) = r_{4,2,1} + r_{4,2,2} + r_{4,2,3} = -1 - 1 - 1 = -3$ .

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_4$  και το κριτήριο C3:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{4,3,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{4,3,2} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{4,3,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_4$  και το κριτήριο C3:  
 $r_{4,3} = \sum_m (r_{4,3,m}) = r_{4,3,1} + r_{4,3,2} + r_{4,3,3} = +1 - 1 + 1 = +1$ .

Για το σενάριο  $Z_5$ : A3 - A1 - A2:

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_5$  και το κριτήριο C1:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{5,1,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{5,1,2} = 0$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{5,1,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_5$  και το κριτήριο C1:  
 $r_{5,1} = \sum_m (r_{5,1,m}) = r_{5,1,1} + r_{5,1,2} + r_{5,1,3} = +1 + 0 + 1 = +2$ .

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_5$  και το κριτήριο C2:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{5,2,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{5,2,2} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{5,2,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_5$  και το κριτήριο C2:

$$r_{5,2} = \sum_m (r_{5,2,m}) = r_{5,2,1} + r_{5,2,2} + r_{5,2,3} = +1 -1 +1 = +1.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_5$  και το κριτήριο C3:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{5,3,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{5,3,2} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{5,3,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_5$  και το κριτήριο C3:

$$r_{5,3} = \sum_m (r_{5,3,m}) = r_{5,3,1} + r_{5,3,2} + r_{5,3,3} = -1 -1 -1 = -3.$$

Για το σενάριο  $Z_6$ : A3 - A2 - A1:

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_6$  και το κριτήριο C1:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{6,1,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{6,1,2} = 0$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{6,1,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_6$  και το κριτήριο C1:

$$r_{6,1} = \sum_m (r_{6,1,m}) = r_{6,1,1} + r_{6,1,2} + r_{6,1,3} = -1 +0 +1 = 0.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_6$  και το κριτήριο C2:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{6,2,1} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{6,2,2} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{6,2,3} = +1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_6$  και το κριτήριο C2:

$$r_{6,2} = \sum_m (r_{6,2,m}) = r_{6,2,1} + r_{6,2,2} + r_{6,2,3} = -1 -1 +1 = -1.$$

Ευρίσκονται οι Αριθμοί Σημειακής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_6$  και το κριτήριο C3:

- Ως προς το ζεύγος «1» (των A1 – A2) έχουμε:  $r_{6,3,1} = +1$ .
- Ως προς το ζεύγος «2» (των A1 – A3) έχουμε:  $r_{6,3,2} = -1$ .
- Ως προς το ζεύγος «3» (των A2 – A3) έχουμε:  $r_{6,3,3} = -1$ .

Επομένως ο Αριθμός Μερικής Συμβατότητας για το σενάριο  $Z_6$  και το κριτήριο C3:

$$r_{6,3} = \sum_m (r_{6,3,m}) = r_{6,3,1} + r_{6,3,2} + r_{6,3,3} = +1 -1 -1 = -1.$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Από τους Αριθμούς Μερικής Συμβατότητας ευρίσκονται οι Αριθμοί Ολικής Συμβατότητας όλων των Σεναρίων για όλα τα ακραία σημεία  $X_\omega$  του Χώρου Λύσεων. Δηλαδή, ευρίσκονται οι:  $r_k^{(X_\omega)} = \sum_j [r_{kj} * w_j^{(X_\omega)}]$ .

Στο Σημείο X1 (1, 0, 0):

- Για το Σενάριο  $Z_1$ :

$$r_1^{(X1)} = \sum_j [r_{1,j} * w_j^{(X1)}] = r_{1,1} * w_1^{(X1)} + r_{1,2} * w_2^{(X1)} + r_{1,3} * w_3^{(X1)} = [0 * 1] + [(+1) * 0] + [(+1) * 0] = 0.$$

- Για το Σενάριο  $Z_2$ :

$$r_2^{(X1)} = \sum_j [r_{2,j} * w_j^{(X1)}] = r_{2,1} * w_1^{(X1)} + r_{2,2} * w_2^{(X1)} + r_{2,3} * w_3^{(X1)} = [(+2) * 1] + [(+3) * 0] + [(-1) * 0] = +2.$$

- Για το Σενάριο  $Z_3$ :

$$r_3^{(X1)} = \sum_j [r_{3,j} * w_j^{(X1)}] = r_{3,1} * w_1^{(X1)} + r_{3,2} * w_2^{(X1)} + r_{3,3} * w_3^{(X1)} = [(-2) * 1] + [(-1) * 0] + [(+3) * 0] = -2.$$

- Για το Σενάριο Z4:

$$r_4^{(X1)} = \sum_j [r_{4,j} * w_j^{(X1)}] = r_{4,1} * w_1^{(X1)} + r_{4,2} * w_2^{(X1)} + r_{4,3} * w_3^{(X1)} = [(-2) * 1] + [(-3) * 0] + [(+1) * 0] = -2.$$

- Για το Σενάριο Z5:

$$r_5^{(X1)} = \sum_j [r_{5,j} * w_j^{(X1)}] = r_{5,1} * w_1^{(X1)} + r_{5,2} * w_2^{(X1)} + r_{5,3} * w_3^{(X1)} = [(+2) * 1] + [(+1) * 0] + [(-3) * 0] = +2.$$

- Για το Σενάριο Z6:

$$r_6^{(X1)} = \sum_j [r_{6,j} * w_j^{(X1)}] = r_{6,1} * w_1^{(X1)} + r_{6,2} * w_2^{(X1)} + r_{6,3} * w_3^{(X1)} = [0 * 1] + [(-1) * 0] + [(-1) * 0] = 0.$$

### Στο Σημείο X2 (1/2, 1/2, 0):

- Για το Σενάριο Z1:

$$r_1^{(X2)} = \sum_j [r_{1,j} * w_j^{(X2)}] = r_{1,1} * w_1^{(X2)} + r_{1,2} * w_2^{(X2)} + r_{1,3} * w_3^{(X2)} = [0 * 1/2] + [(+1) * 1/2] + [(+1) * 0] = +0,5.$$

- Για το Σενάριο Z2:

$$r_2^{(X2)} = \sum_j [r_{2,j} * w_j^{(X2)}] = r_{2,1} * w_1^{(X2)} + r_{2,2} * w_2^{(X2)} + r_{2,3} * w_3^{(X2)} = [(+2) * 1/2] + [(+3) * 1/2] + [(-1) * 0] = +2,5.$$

- Για το Σενάριο Z3:

$$r_3^{(X2)} = \sum_j [r_{3,j} * w_j^{(X2)}] = r_{3,1} * w_1^{(X2)} + r_{3,2} * w_2^{(X2)} + r_{3,3} * w_3^{(X2)} = [(-2) * 1/2] + [(-1) * 1/2] + [(+3) * 0] = -1,5.$$

- Για το Σενάριο Z4:

$$r_4^{(X2)} = \sum_j [r_{4,j} * w_j^{(X2)}] = r_{4,1} * w_1^{(X2)} + r_{4,2} * w_2^{(X2)} + r_{4,3} * w_3^{(X2)} = [(-2) * 1/2] + [(-3) * 1/2] + [(+1) * 0] = -2,5.$$

- Για το Σενάριο Z5:

$$r_5^{(X2)} = \sum_j [r_{5,j} * w_j^{(X2)}] = r_{5,1} * w_1^{(X2)} + r_{5,2} * w_2^{(X2)} + r_{5,3} * w_3^{(X2)} = [(+2) * 1/2] + [(+1) * 1/2] + [(-3) * 0] = +1,5.$$

- Για το Σενάριο Z6:

$$r_6^{(X2)} = \sum_j [r_{6,j} * w_j^{(X2)}] = r_{6,1} * w_1^{(X2)} + r_{6,2} * w_2^{(X2)} + r_{6,3} * w_3^{(X2)} = [0 * 1/2] + [(-1) * 1/2] + [(-1) * 0] = -0,5.$$

### Στο Σημείο X3 (1/3, 1/3, 1/3):

- Για το Σενάριο Z1:

$$r_1^{(X3)} = \sum_j [r_{1,j} * w_j^{(X3)}] = r_{1,1} * w_1^{(X3)} + r_{1,2} * w_2^{(X3)} + r_{1,3} * w_3^{(X3)} = [0 * 1/3] + [(+1) * 1/3] + [(+1) * 1/3] = +0,67.$$

- Για το Σενάριο Z2:

$$r_2^{(X3)} = \sum_j [r_{2,j} * w_j^{(X3)}] = r_{2,1} * w_1^{(X3)} + r_{2,2} * w_2^{(X3)} + r_{2,3} * w_3^{(X3)} = [(+2) * 1/3] + [(+3) * 1/3] + [(-1) * 1/3] = +1,33$$

- Για το Σενάριο Z<sub>3</sub>:

$$r_3^{(X3)} = \sum_j [r_{3,j} * w_j^{(X3)}] = r_{3,1} * w_1^{(X3)} + r_{3,2} * w_2^{(X3)} + r_{3,3} * w_3^{(X3)} = [(-2) * 1/3] + [(-1) * 1/3] + [(+3) * 1/3] = 0$$

- Για το Σενάριο Z<sub>4</sub>:

$$r_4^{(X3)} = \sum_j [r_{4,j} * w_j^{(X3)}] = r_{4,1} * w_1^{(X3)} + r_{4,2} * w_2^{(X3)} + r_{4,3} * w_3^{(X3)} = [(-2) * 1/3] + [(-3) * 1/3] + [(+1) * 1/3] = -1,33.$$

- Για το Σενάριο Z<sub>5</sub>:

$$r_5^{(X3)} = \sum_j [r_{5,j} * w_j^{(X3)}] = r_{5,1} * w_1^{(X3)} + r_{5,2} * w_2^{(X3)} + r_{5,3} * w_3^{(X3)} = [(+2) * 1/3] + [(+1) * 1/3] + [(-3) * 1/3] = 0.$$

- Για το Σενάριο Z<sub>6</sub>:

$$r_6^{(X3)} = \sum_j [r_{6,j} * w_j^{(X3)}] = r_{6,1} * w_1^{(X3)} + r_{6,2} * w_2^{(X3)} + r_{6,3} * w_3^{(X3)} = [0 * 1/3] + [(-1) * 1/3] + [(-1) * 1/3] = -0,67.$$

**Βήμα 7<sup>ο</sup>:** Από τους Αριθμούς  $r_k^{(X\omega)}$  προκύπτει ποιο σενάριο ή ποια σενάρια κυριαρχούν ανά σημείο X $\omega$ .

Με βάση τα ανωτέρω:

- Επικρατούντα σενάρια στο σημείο X1 είναι τα Z<sub>2</sub> και Z<sub>5</sub>.
- Επικρατούν σενάριο στο σημείο X2 είναι το Z<sub>2</sub>.
- Επικρατούν σενάριο στο σημείο X3 είναι το Z<sub>2</sub>.

Με βάση αυτά, προκύπτουν τα επικρατέστερα συνολικά σενάρια και από αυτά οι επικρατέστερες συνολικά εναλλακτικές συνολικά στο Χώρο Λύσεων S:

Συνολικά στο Χώρο Λύσεων S επικρατούν τα Σενάρια Z<sub>2</sub> (σε τρία ακραία σημεία) και Z<sub>5</sub> (σε ένα ακραίο σημείο).

Ας θυμηθούμε τα δύο αυτά σενάρια:

Z<sub>2</sub>: A1 - A3 - A2

Z<sub>5</sub>: A3 - A1 - A2

Επομένως, σε κάθε περίπτωση, η εναλλακτική A2 αποδεικνύεται ως η χειρότερη από τις τρεις εναλλακτικές, αφού ευρίσκεται τελευταία στην τελική διάταξη των εναλλακτικών και στο σενάριο Z<sub>2</sub> και στο σενάριο Z<sub>5</sub>. Μεταξύ των άλλων δύο εναλλακτικών τώρα, η A1 επικρατεί στο σενάριο Z<sub>2</sub>, ενώ η A3 επικρατεί στο σενάριο Z<sub>5</sub>. Όμως, το σενάριο Z<sub>2</sub> κυριαρχεί και στα τρία ακραία σημεία (X1, X2, X3) του Χώρου Λύσεων, ενώ το σενάριο Z<sub>5</sub> κυριαρχεί μόνο σε ένα ακραίο σημείο (X1) του Χώρου Λύσεων. Επομένως, το σενάριο Z<sub>2</sub> είναι σημαντικά ισχυρότερο του σεναρίου Z<sub>5</sub>. Επομένως, η εναλλακτική A1, η οποία επικρατεί με βάση το σενάριο Z<sub>2</sub>, είναι τελικώς πιθανοτικά επικρατέστερη της εναλλακτικής A3, η οποία επικρατεί με βάση το σενάριο Z<sub>5</sub>.

Με βάση όλα τα ανωτέρω, η επικρατέστερη τελική διάταξη των εναλλακτικών (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη) έχει ως εξής:

A1 - A3 - A2.



### 3.4. ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ QUALIFLEX

#### 3.4.1. Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (Tsamboulas et al, 1999), (Szidarovszky – Gershon - Duckstein, 1986), (NAMA-Ευπαλίνο, 1995), (Nijkamp - Blaas, 1993), όπως:

- το σημαντικό πλήθος εναλλακτικών λύσεων, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω του πολυσχιδούς των οικονομικών θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό πλήθος και την εν δυνάμει σημαντική ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκομένων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περιοίκων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά., όπου η υπόψη ετερογένεια των κριτηρίων, οπότε για τη μέτρησή τους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μεταξύ τους δείκτες και κλίμακες (:φυσικές, αριθμητικές, λεξικογραφικές κ.ά.),
- τη δυσκολία ποσοτικής απόδοσης των επιδόσεων των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι μία μέθοδος αξιολόγησης ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρεί τα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι και η αξιολόγηση άλλων τεχνικών έργων, που αναφέρονται στην ενέργεια ή στο περιβάλλον, παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων. Έτσι, θα μπορούσε να εξετασθεί και εκεί η εφαρμογή της μεθόδου Qualiflex.

Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση της μεθόδου Qualiflex σύμφωνα με τα εν λόγω χαρακτηριστικά.

#### 3.4.2. Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων

Η μέθοδος Qualiflex, λόγω του ότι λειτουργεί με κατά ζεύγη συγκρίσεις, παρουσιάζει κάποια αυξημένη πολυπλοκότητα στις περιπτώσεις μεγάλου πλήθους εναλλακτικών λύσεων.

#### 3.4.3. Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η βασική γεωμετρική προσομοίωση της μεθόδου Qualiflex αναφέρεται στα κριτήρια αξιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, όπως και στην μαθηματική και εννοιολογική παρουσίαση της μεθόδου αναπτύχθηκε, κάθε κριτήριο αξιολόγησης προσομοιώνεται με άξονα ενός γεωμετρικού ευκλείδειου χώρου. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των εν λόγω κριτηρίων, τόσο μεγαλύτερη πολλαπλότητα έχει ο υπόψη γεωμετρικός χώρος. Παρόλα αυτά, η μέθοδος Qualiflex δεν παρουσιάζει σημαντική αύξηση του βαθμού δυσκολίας στην εφαρμογή της με την αύξηση του πλήθους των κριτηρίων, αφού λειτουργεί με τις κορυφές-ακραία σημεία του χώρου λύσεων, εν αντιθέσει με τη μέθοδο Regime, η οποία λειτουργεί με τα κεντροειδή υποχώρων του Χώρου Λύσεων.

#### **3.4.4. Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Η μέθοδος Qualiflex, όπως και προηγουμένως τονίσθηκε, λειτουργεί με εισαγόμενα ποιοτικής μόνο διάταξης, δηλαδή με απλή ποιοτική ιεράρχηση, τόσο ως προς τις σχετικές βαρύτητες των κριτηρίων αξιολόγησης, όσο και ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Επομένως, δεν απαιτεί στα αρχικά της δεδομένα ακριβείς αριθμητικές τιμές. Άρα, ο συγκερασμός σημαντικού πλήθους και ετερογενών θέσεων και απόψεων είναι εφικτός σε μεγάλο βαθμό.

#### **3.4.5. Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος Qualiflex χειρίζεται αρκετά καλά ετερογενή κριτήρια, αφού ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, δέχεται ως εισαγόμενο μία απλή ποιοτική ιεράρχηση επιδόσεων ανά κριτήριο. Δηλαδή, οι εκφρασμένες με διαφορετικούς δείκτες και σε ποικίλες κλίμακες, ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, εύκολα ιεραρχούνται (ανά κριτήριο), άρα και εύκολα τίθενται ως εισαγόμενα προς εφαρμογή της μεθόδου Qualiflex.

#### **3.4.6. Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Η μέθοδος Qualiflex λόγω του ότι χειρίζεται με απλές μόνον διατάξεις ιεράρχησης τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, μπορεί με αρκετή απλότητα και ευχρηστία να χειριστεί ποιοτική όσο και ποσοτική πληροφόρηση σχετικά με τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Αυτό είναι προτέρημα της μεθόδου.

Ωστόσο, η λειτουργία της μεθόδου με απλές ιεραρχικές διατάξεις των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων, ενέχει το μειονέκτημα της ανεπαρκούς αξιοποίησης ποσοτικής πληροφόρησης για τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η Qualiflex (όπως ήδη παρουσιάσθηκε), δεν έχει τη δυνατότητα να αξιοποιήσει πληροφορία σχετικά με το «πόσο καλύτερη» είναι η επίδοση μίας εναλλακτικής λύσης σε ένα κριτήριο, σε σχέση με την επίδοση μίας άλλης στο ίδιο κριτήριο. Δηλαδή δεν αποδίδει με ακρίβεια πλήρως την ποσοτική πληροφορία διαφορών επιδόσεων, παρά μόνο αξιοποιεί την απλή διάταξη των ανά κριτήριο επιδόσεων. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως πρόβλημα ακρίβειας.

### **3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η μέθοδος Qualiflex είναι μία μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η οποία στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη διανυσματική προσομοίωση των κριτηρίων αξιολόγησης. Στην υπόψη προσομοίωση κάθε κριτήριο επέχει θέση άξονα γεωμετρικού τόπου. Με δεδομένη μία απλή ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης, καθορίζεται για κάθε πρόβλημα πολυκριτηριακής αξιολόγησης, ο προαναφερθείς γεωμετρικός χώρος, ο οποίος ονομάζεται Χώρος Λύσεων.

Η υπόψη μέθοδος, μπορεί να εφαρμοσθεί με αρκετή επιτυχία σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, αφού η δομή της ανταποκρίνεται αρκετά ικανοποιητικά, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, στις συνθήκες των έργων αυτών, άρα και στις απαιτήσεις της αξιολόγησής τους. Αναλυτικότερα, η μέθοδος Qualiflex, ανταποκρίνεται αρκετά καλά σε μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης, σε μεγάλο πλήθος και ετερογένεια αποφασιζόντων, ενώ παρουσιάζει εύκολο χειρισμό τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών κριτηρίων αξιολόγησης. Πρέπει πάντως να επισημανθεί η έλλειψη μεγάλης ακρίβειας απόδοσης αρχικής ποσοτικής πληροφορίας, όπως ως προς τις αρχικά δεδομένες ανά κριτήριο επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ-4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ELECTRE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Με τον όρο «αξιολόγηση συγκοινωνιακού έργου» θεωρείται η εξέταση της σκοπιμότητας κατασκευής ενός έργου και διαδικασία εκτίμησης, αποτίμησης και ει δυνατόν κατάταξης εναλλακτικών λύσεων ενός έργου ή/και περισσότερων συγκοινωνιακών έργων (Αμπακούμκιν, 1990), (NAMA-Ευπαλίνος, 1995), (Τσαμπούλας, 1999 και 2004).

Η αξιολόγηση των συγκοινωνιακών έργων γίνεται με τη χρήση κριτηρίων, βάσει των οποίων λαμβάνει χώρα η εκτίμηση, αποτίμηση, σύγκριση και κατάταξη των υποψηφίων προς υλοποίηση εναλλακτικών λύσεων.

Μεταξύ των μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης, ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μέθοδοι της οικογένειας Electre (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovszky – Gershon - Duckstein, 1986), (Γιώτης Γ., 2006). Οι μέθοδοι αυτές άρχισαν να αναπτύσσονται στη Γαλλία από τη δεκαετία του 1960 (με την Electre I) και συνεχίζουν ακόμη και σήμερα να εξελίσσονται με νεότερες εκδοχές και παραλλαγές. Για αυτό το λόγο με το όνομα Electre γίνεται αναφορά όχι μόνο σε μία μέθοδο, αλλά σε μία ολόκληρη οικογένεια μεθόδων. Ήδη, εκτός της Electre I, έχουν καταγραφεί οι Electre II, Electre III, Electre IV, Electre «β» και άλλες.

Οι μέθοδοι Electre έχουν εφαρμοσθεί σε πολλές χώρες του κόσμου για τη λήψη πολιτικών και οικονομικών αποφάσεων.

Η συμβολή της παρούσας εργασίας εντοπίζεται στην εξέταση δυνατοτήτων εφαρμογής μεθόδων Electre στην αξιολόγηση των συγκοινωνιακών έργων, ήτοι σε ποιες περιπτώσεις και με ποιους περιορισμούς, ανά μέθοδο, μπορεί να γίνει εφαρμογή αυτής. Ειδικότερα, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις μεθόδους της οικογένειας ELECTRE που έχουν τον ίδιο σκοπό, ήτοι την πλήρη τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, δηλαδή στις μεθόδους της λεγόμενης «προβληματικής γ», οι οποίες είναι οι: Electre II, Electre III, Electre IV. Με βάση ότι και οι τρεις αυτές μέθοδοι ανήκουν στην ίδια προβληματική («γ»), είναι δυνατό να εφαρμοσθούν και οι τρεις παράλληλα σε αξιολόγηση έργων. Χρειάζεται όμως προσοχή στην επαλληλία-υπέρθηση των τελικών συμπερασμάτων, καθώς και στην τήρηση των περιορισμών εφαρμογής της κάθε μίας από αυτές, ώστε να μην υπάρξει αλληλοαναιρέση, αλλά ει δυνατόν συμπληρωματικότητα. Οπότε, η επαλληλία-υπέρθηση των πορισμάτων χειρίζεται εν δυνάμει και ζητήματα αβεβαιότητας των δεδομένων. Περαιτέρω, η παρούσα εργασία αναλύει καθεμία από αυτές σε τρία επίπεδα: στρατηγικό, εννοιολογικό, μαθηματικό.

### **Συμβολισμοί**

$b_{i,\xi}$ : Επίδοση της εναλλακτικής λύσης  $L_i$  στο κριτήριο αξιολόγησης  $K_\xi$ .

$C_{i,i'}$ : Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής  $L_i$  επί της εναλλακτικής  $L_{i'}$  στις Electre I, Electre II.

$Co$ : Τυπικό Όριο Συμφωνίας.

$D_{i,i'}$ : Δείκτης Ασυμφωνίας.

$Do$ : Τυπικό Όριο Ασυμφωνίας.

$w_\xi$ : Σχετικό βάρος του κριτηρίου  $K_\xi$ .

$C^*_{i,i'}$ : Άθροισμα των βαρών των κριτηρίων στα οποία η εναλλακτική  $L_i$  έχει καλύτερες επιδόσεις από την εναλλακτική  $L_{i'}$ .

$f_{i,i',\xi}$ : Συντελεστής Απομείωσης του σχετικού βάρους  $w_\xi$  και στις περιπτώσεις όπου η εναλλακτική  $L_i$  έχει καλύτερες επιδόσεις από την εναλλακτική  $L_{i'}$ .

$p(K_\xi)$ : Όριο Έντονης Υπεροχής σε εφαρμογή της Electre III, για το κριτήριο  $K_\xi$ .

q(Kξ): Όριο Ελαφράς Υπεροχής σε εφαρμογή της Electre III, για το κριτήριο Κξ.  
 gi,i': Συντελεστής επιρροής της μέγιστης στα κριτήρια υστέρησης της εναλλακτικής Λi έναντι της εναλλακτικής Λi'.

v(Kξ): Όριο Αρνησικυρίας για το κριτήριο Κξ.  
 Cfi,i': Συμβατικός Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής Λi επί της εναλλακτικής Λi' στην Electre III.  
 Cdi,i': Γενικευμένος Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής Λi επί της εναλλακτικής Λi' στην Electre III.  
 Cfo: Όριο Συμβατικής Συμφωνίας στην Electre III.  
 Cdo: Όριο Γενικευμένης Συμφωνίας στην Electre III.  
 P(Kξ): Όριο Έντονης Υπεροχής για το κριτήριο Κξ σε εφαρμογή της Electre IV.  
 Λi: Εναλλακτική Λύση.  
 Κξ: Κριτήριο Αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.  
 maxξ [...]: Μέγιστο ως προς το δείκτη ξ της παράστασης που ακολουθεί.

## 4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ELECTRE

### 4.2.1 Γενικά

Η κάθε μέθοδος αξιολόγησης, παρουσιάζεται με βάση την απόκρισή της στα τρία βασικά επίπεδα μίας τυπικής πορείας αξιολόγησης: τη λήψη απόφασης, την κυρίως αξιολόγηση και την αποτίμηση.

Αποτίμηση είναι η εκτίμηση των τιμών των συνιστωσών περιγραφής μίας εναλλακτικής λύσης. Κυρίως Αξιολόγηση είναι η σύνθεση των τιμών των συνιστωσών περιγραφής μίας λύσης, για τη δημιουργία της ολικής αξιολόγησης της λύσης.

Λήψη Απόφασης είναι η τελική ένταξη της λύσης που εξετάστηκε σε ένα κατάλογο ιεραρχημένων ενεργειών. Η μετάβαση από την αποτίμηση προς την κυρίως αξιολόγηση και ακόμη περισσότερο προς τη λήψη απόφασης, συνεπάγεται μετάβαση από μαθηματικά σε μεθοδολογικά χαρακτηριστικά μίας μεθόδου. Βάσει του στόχου μιας αξιολόγησης καθορίζεται το στρατηγικό πρότυπο της μεθόδου, που αντιστοιχεί στο επίπεδο της Λήψης Απόφασης. Θεωρώντας τις βασικές θεωρητικές έννοιες που μετέρχεται η μέθοδος, ορίζεται το εννοιολογικό πρότυπο της μεθόδου, που αντιστοιχεί στο επίπεδο της Κυρίως Αξιολόγησης. Θεωρώντας τη μαθηματική υπόσταση της μεθόδου, ορίζεται το μαθηματικό πρότυπο, που αντιστοιχεί στο επίπεδο της Αποτίμησης.

Η μέθοδος αξιολόγησης συνίσταται από τρία πρότυπα, το καθένα εκ των οποίων αντιστοιχεί βασικά σε ένα από τα βασικά επίπεδα μίας τυπικής διαδικασίας αξιολόγησης. Βάσει αυτών, είναι δυνατή η θεώρηση, ανάλυση και κριτική της μεθόδου.

### 4.2.2 Στρατηγικό πρότυπο μεθόδου ή «προβληματική».

#### *Είδη προβληματικής*

Οι μέθοδοι Electre θεωρούν τρεις περιπτώσεις κατάταξης λύσεων (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky et al, 1986): την «άλφα» («α»), τη «βήτα» («β») και τη «γάμμα» («γ»), με την ονομασία «προβληματική».

Η κάθε μία εκ των τριών αντανακλάται σε μία μορφή κατάταξης των εναλλακτικών υπό αξιολόγηση λύσεων. Δηλαδή:

*Προβληματική «άλφα»:* Διαχωρισμός των λύσεων σε «αποδεκτές» και «μη αποδεκτές». Εδώ πρόκειται περί διχοτόμησης του συνόλου των εναλλακτικών υπό αξιολόγηση λύσεων. Εδώ ανήκει η μέθοδος Electre I.

*Προβληματική «βήτα»:* Διαχωρισμός των λύσεων σε «καλές», «αμφίβολες» και «κακές». Εδώ πρόκειται περί τριχοτόμησης του συνόλου των εναλλακτικών υπό αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων. Εδώ ανήκει η Electre β.

*Προβληματική «γάμμα»:* Πλήρης κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Εδώ το εξαγόμενο είναι η πλήρης διάταξη. Εδώ ανήκουν οι Electre II, Electre III, Electre IV.

Κατά συνέπεια, οι μέθοδοι της οικογένειας Electre μπορούν να καταταγούν στις διάφορες κατηγορίες προβληματικής.

Στον Πίνακα 4.1 κατατάσσονται οι μέθοδοι της οικογένειας Electre με βάση την προβληματική από την οποία διέπονται.

*Πίνακας 4.1: Κατάταξη μεθόδων Electre βάσει προβληματικής.*

*Table 4.1: Electre methods classification on the basis of their “problematique”.*

ΕΙΔΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ELECTRE	ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ
«α»	Electre I	
«β»	Electre beta	
«γ»	Electre II, Electre III, Electre IV	

*Η ιδιαίτερη σημασία της προβληματικής στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων*

Κατά την αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, έχει ιδιαίτερη σημασία η προβληματική της αξιολόγησης αυτών. Η ιδιαίτερη αυτή σημασία οφείλεται στις δυνατότητες πρακτικά εύστοχων θεωρήσεων που μπορεί να προκύψουν από τις διάφορες προβληματικές. Έτσι, ανάλογα με την υιοθετούμενη προβληματική (σκοπό) κάθε αξιολόγησης, μπορεί να προκύψει και το εξαγόμενο της αξιολόγησης αυτής.

Κατά συνέπεια, η εφαρμογή κάθε αλγορίθμου μεθόδου αξιολόγησης, επέχει θέση εφαρμογής συνάρτησης στα αρχικά δεδομένα αξιολόγησης ώστε να προκύπτει το εξαγόμενο της αξιολόγησης. Δηλαδή από το αρχικό πεδίο ορισμού (αρχικές τιμές επιδόσεων των υπό αξιολόγηση λύσεων στους παράγοντες αξιολόγησης) πραγματοποιείται μετάβαση στο πεδίο τιμών (τελικές νόρμες αποτίμησης των υπό αξιολόγηση λύσεων).

Ως μαθηματική έκφραση μπορεί να γραφεί:

$$F[(\text{Αρχικών Τιμών Επιδόσεων Εναλλακτικών Λύσεων})] = (\text{Τελικές Τιμές Επιδόσεων Εναλλακτικών Λύσεων}). \quad (4.1)$$

#### **4.2.3 Εννοιολογικό πρότυπο μεθόδων: «Συμφωνία» και «Ασυμφωνία»**

Το εννοιολογικό πρότυπο μίας μεθόδου αξιολόγησης ορίζεται από τις έννοιες που θεωρεί η μέθοδος αυτή. Στην περίπτωση της οικογένειας Electre, οι βασικές έννοιες που θεωρούνται είναι η Συμφωνία και η Ασυμφωνία (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky et al, 1986).

Οι έννοιες «Συμφωνία» και «Ασυμφωνία» εκφράζουν αντίστοιχα τη συμβατότητα και την ασυμβατότητα των πραγματικών επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων με υποτιθέμενες σχέσεις υπεροχής των λύσεων αυτών έναντι άλλων εναλλακτικών λύσεων (Γιώτης Γ., 2006).

Η «Συμφωνία» είναι ο δείκτης θέσπισης των εν δυνάμει σχέσεων υπεροχής στις κατά ζεύγη συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων, ενώ η «Ασυμφωνία» είναι ο δείκτης αμφισβήτησης των εν δυνάμει σχέσεων υπεροχής στις κατά ζεύγη συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων. Εάν πληρείται ο έλεγχος Συμφωνίας τίθεται σοβαρή υποψηφιότητα για σχέσεις υπεροχής, ενώ εάν πληρείται επίσης και ο έλεγχος Ασυμφωνίας, βεβαιώνεται η διαφαινόμενη από τον προηγηθέντα έλεγχο Συμφωνίας υπεροχή.

Στην οικογένεια Electre, αρχικά θεωρούνται όλα τα δυνατά ζεύγη εναλλακτικών λύσεων. Για κάθε ζεύγος, πραγματοποιείται σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων που αποτελούν το ζεύγος αυτών. Η σύγκριση των εντός κάθε ζεύγους λύσεων πραγματοποιείται με τη χρήση των εννοιών Συμφωνία και Ασυμφωνία, που παραμετροποιούνται.

#### 4.2.4 Μαθηματικό πρότυπο μεθόδων - Κατά ζεύγη συγκρίσεις

Το μαθηματικό πρότυπο μίας μεθόδου ορίζεται από τις μαθηματικές παραμέτρους και γενικότερα από τη μαθηματική υπόσταση της μεθόδου αυτής.

Στην οικογένεια Electre, πολύ σημαντικές είναι οι κατά ζεύγη συγκρίσεις. Δηλαδή, οι εναλλακτικές υπό αξιολόγηση λύσεις συγκρίνονται κατά ζεύγη. Η δομή με τις κατά ζεύγη συγκρίσεις, κατατάσσει τις μεθόδους Electre στο λογισμικό πρότυπο των Κατά Ζεύγη Συγκρίσεων (Nijkamp - Blaas, 1993), (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky – Gershon - Duckstein, 1986), (EUNET Project, 1997).

Σε τελικό στάδιο, οι μέθοδοι Electre έχουν τη δυνατότητα υπέρθεσης των προηγούμενων κατά ζεύγη συγκρίσεων.

### 4.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ELECTRE.

#### 4.3.1 Γενικά

Παρουσιάζονται αλγοριθμικοί οι κύριες μέθοδοι της οικογένειας Electre, ήτοι οι Electre I, Electre II, Electre III, Electre IV, ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική τους ανάλυση σε επίπεδο εφαρμογών, με εστίαση μάλιστα στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων.

#### 4.3.2 Electre I

Για τον έλεγχο πιθανής σχέσεως υπεροχής της εναλλακτικής  $A_i$  επί της εναλλακτικής  $A_{i'}$ , ορίζονται ο Δείκτης Συμφωνίας  $C_{i,i'}$  και ο Δείκτης Ασυμφωνίας  $D_{i,i'}$ . (Το ζεύγος δεικτών  $i,i'$  είναι διατεταγμένο.)

Πιο συγκεκριμένα:

$$C_{i,i'} = \sum(w_{\xi}:b_{i,\xi} \geq b_{i',\xi}) \quad (4.2)$$

όπου:  $\sum(w_{\xi}:b_{i,\xi} \geq b_{i',\xi})$ : το άθροισμα των σχετικών βαρών των κριτηρίων στα οποία η επίδοση της λύσης  $A_i$  είναι καλύτερη ή ίση από την αντίστοιχη επίδοση της λύσης  $A_{i'}$ , δηλαδή:  $b_{i,\xi}$ : η επίδοση της εναλλακτικής λύσης  $A_i$  στο κριτήριο αξιολόγησης  $K_{\xi}$

και

$$D_{i,i'} = \{\max_{\xi}[b_{i',\xi} - b_{i,\xi}] / (\max \text{κλίμακας του } K_{\xi})\} \quad (4.3)$$

Όπου:  $\max_{\xi}[b_{i',\xi} - b_{i,\xi}]$ : η μεγαλύτερη υστέρηση σε ανά κριτήριο επίδοση της λύσης  $A_{i'}$  προς τη λύση  $A_i$ , έστω στο κριτήριο  $K_{\xi}$

και:  $(\max \text{κλίμακας του } K_{\xi})$ : το μέγιστο (βέλτιστο) της κλίμακας του συγκεκριμένου κριτηρίου  $K_{\xi}$ .

Στη μέθοδο Electre I (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky et al, 1986), στον έλεγχο Συμφωνίας, για έλεγχο σχέσεως υπεροχής της εναλλακτικής λύσης  $A_i$  επί της λύσης  $A_{i'}$  είναι αναγκαία η ισχύς της σχέσης:

$$C_{i,i'} \geq C_0 \quad (4.4)$$

όπου  $C_0$  το Όριο Συμφωνίας.

Η διαπίστωση της Ασυμφωνίας, λαμβάνει χώρα μέσω της ισχύος της σχέσης:

$$D_{i,i'} \leq D_0 \quad (4.5)$$

όπου  $D_0$  το Όριο Ασυμφωνίας

Η ταυτόχρονη ισχύς των σχέσεων (4.4) και (4.5) πιστοποιεί την υπεροχή της λύσης  $A_i$  επί της λύσης  $A_{i'}$ , όπου στα παραπάνω, τα Όρια Συμφωνίας και Ασυμφωνίας αποτελούν αριθμητικές παραμέτρους, οι οποίες ορίζονται με μαθηματικά κριτήρια (σύγκλιση και αποτελεσματικότητα των ανά ζεύγη συγκρίσεων των λύσεων) αλλά λαμβάνοντας υπόψη και εννοιολογικούς περιορισμούς (ακραία ελαστικές τιμές των Ορίων θα αλλοίωσαν το νόημα της διαδικασίας).

### 4.3.3 Electre II

Στη μέθοδο Electre II (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky et al, 1986), στον έλεγχο Συμφωνίας, για έλεγχο σχέσεως υπεροχής της εναλλακτικής λύσης  $i$  επί της λύσης  $i'$  είναι αναγκαία η ισχύς της σχέσης:

$$C_i, i' \geq (\text{Όριο Συμφωνίας}), \quad (4.6)$$

$$\text{ήτοι: } \Sigma(w\xi:bi, \xi \geq bi', \xi) \geq (\text{Όριο Συμφωνίας}) \quad (4.7)$$

Όπου:  $\Sigma(w\xi:bi, \xi \geq bi', \xi)$ : το άθροισμα των σχετικών βαρών των κριτηρίων στα οποία η επίδοση της λύσης  $i$  είναι καλύτερη ή ίση από την αντίστοιχη επίδοση της λύσης  $i'$ , δηλαδή:  $bi, \xi$ : η επίδοση της εναλλακτικής λύσης  $i$  στο κριτήριο αξιολόγησης  $\xi$ .

Η ανωτέρω σχέση είναι αναγκαία, αλλά όχι και ικανή για τον έλεγχο συμφωνίας, δηλαδή απαιτείται και η ισχύς της σχέσης:

$$\Sigma(w\xi:bi, \xi > bi', \xi) > \Sigma(w\xi:bi', \xi > bi, \xi) \quad (4.8)$$

όπου:

$\Sigma(w\xi:bi, \xi > bi', \xi)$ , ή άλλως παριστάμενο  $C^*i, i'$  : το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων στα οποία η λύση  $i$  έχει καλύτερες επιδόσεις από τη λύση  $i'$ , ενώ,

$\Sigma(w\xi:bi', \xi > bi, \xi)$ , ή άλλως παριστάμενο  $C^*i', i$  : το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων στα οποία η λύση  $i'$  έχει καλύτερες επιδόσεις από τη λύση  $i$ .

Η διαπίστωση της Ασυμφωνίας, λαμβάνει χώρα μέσω της ισχύος της σχέσης:

$$D_i, i' \leq (\text{Όριο Ασυμφωνίας}), \quad (4.9)$$

Όπου:  $\max[bi', \xi - bi, \xi]$  : η μεγαλύτερη υστέρηση σε ανά κριτήριο επίδοση της λύσης  $i$  προς τη λύση  $i'$ , έστω στο κριτήριο  $\xi$

και: (maxκλίμακας του  $\xi$ ): το μέγιστο (βέλτιστο) της κλίμακας του συγκεκριμένου κριτηρίου  $\xi$ .

Η ταυτόχρονη ισχύς των ακολούθων σχέσεων:

$$C_i, i' \geq (\text{Όριο Συμφωνίας})$$

$$D_i, i' \leq (\text{Όριο Ασυμφωνίας}) \quad (4.10)$$

πιστοποιεί την υπεροχή της λύσης  $i$  επί της λύσης  $i'$ ,

όπου στα παραπάνω, τα Όρια Συμφωνίας και Ασυμφωνίας αποτελούν αριθμητικές παραμέτρους, οι οποίες ορίζονται με μαθηματικά κριτήρια (σύγκλιση και αποτελεσματικότητα των ανά ζεύγη συγκρίσεων των λύσεων) αλλά λαμβάνοντας υπόψη και εννοιολογικούς περιορισμούς (ακραία ελαστικές τιμές των Ορίων θα αλλοίωναν το νόημα της διαδικασίας).

Με την εισαγωγή της απαίτησης μίας επιπλέον συνθήκης έναντι της διαπίστωσης Συμφωνίας η Electre II, αποτρέπει την εμφάνιση περιπτώσεων αμφίδρομης υπεροχής λύσεων (δηλαδή αποτρέπονται φαινόμενα ταυτόχρονης υπεροχής της  $i$  επί της  $i'$  και της  $i'$  επί της  $i$ ).

Επομένως ανατρέπονται φαινόμενα ασυγκριτότητας μεταξύ δύο λύσεων. Έτσι, οι εναπομείνουσες εκδοχές στις ανά ζεύγος συγκρίσεις, είναι η μονόδρομη υπεροχή της μίας έναντι της άλλης λύσης και η αδιαφορία μεταξύ των δύο λύσεων.

Παρατηρείται ότι στην Electre II επιδρά και το πλήθος των τελικώς διαπιστωμένων υστερήσεων έκαστης εναλλακτικής, δηλαδή διαδραματίζει ρόλο το πόσες άλλες εναλλακτικές λύσεις υπερέχουν έναντι εκάστης εξεταζόμενης εναλλακτικής. Η κατάταξη εναλλακτικών που προκύπτει από την εφαρμογή του κριτηρίου αυτού ονομάζεται «Ευθεία Κατάταξη».

Ωστόσο, στην Electre II, συχνά χρησιμοποιείται και ένα άλλο Κριτήριο Κατάταξης Εναλλακτικών. Πρόκειται για το Κριτήριο του πλήθους των εναλλακτικών των οποίων υπερέχει η κάθε εξεταζόμενη εναλλακτική. Η κατάταξη εναλλακτικών που προκύπτει με βάση το κριτήριο αυτό ονομάζεται: «Πλαγία Κατάταξη».

Η υπέρθεση των δύο κατατάξεων, λαμβάνοντας υπόψη και τα δύο προαναφερθέντα κριτήρια, ονομάζεται «Μέση Κατάταξη».

#### 4.3.4 Electre III

Στην υπόψη μέθοδο, υπάρχουν δύο νέες έννοιες έναντι των προηγουμένων Electre, αμφότερες οι οποίες αναφέρονται σε ένα Γενικευμένο Δείκτη Συμφωνίας, ο οποίος, είναι ουσιαστικά υπέρθεση τυπικά εννοουμένων Δεικτών Συμφωνίας και Ασυμφωνίας. Οι νέες έννοιες είναι:

A) Η επιρροή του ανά κριτήριο βαθμού υπεροχής στο Γενικευμένο Δείκτη Συμφωνίας,  
B) Η επιρροή της μέγιστης στο σύνολο των κριτηρίων υστέρησης της μίας εναλλακτικής λύσης (αυτής που εξετάζεται ως υποψήφια υπερέχουσα) ως προς την άλλη εναλλακτική λύση (της εξεταζομένης ως υποψήφια υστερήσασα).

Περαιτέρω, αναφορικά ως προς την έννοια (A), (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky et al, 1986), (EUNET Project, 1997), ορίζεται στην Electre III ως Συμβατικός Δείκτης Συμφωνίας ο ακόλουθος:

$$Cfi,i' = \sum (fi,i',\xi * w_{\xi} : bi,\xi \geq bi',\xi) \quad (4.11)$$

οπότε, για την πλήρωση του Ελέγχου Συμβατικής Συμφωνίας απαιτείται η ισχύς της ακόλουθης σχέσεως:

$$\sum (fi,i',\xi * w_{\xi} : bi,\xi \geq bi',\xi) \geq (\text{Όριο Συμβατικής Συμφωνίας}) = Cfo. \quad (4.12)$$

Το νέο στοιχείο έναντι των προαναφερθεισών παραλλαγών Electre είναι οι συντελεστές  $fi,i',\xi$ ,

όπου:  $fi,i',\xi$  : συντελεστής απομείωσης του βάρους του κριτηρίου  $\xi$ , όπου εμφανίζεται υπεροχή της εναλλακτικής λύσεως  $i$  έναντι της εναλλακτικής λύσεως  $i'$ . Στα προαναφερθέντα η απομείωση της υπεροχής εμφανίζεται στην περιοχή «ασθενούς» υπεροχής της λύσεως  $i$  έναντι της εναλλακτικής λύσεως  $i'$ .

Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής  $fi,i',\xi$  παίρνει τιμές στο σύνολο  $[0,1]$ , όπου:

$fi,i',\xi = 0$ , εάν  $bi,\xi - bi',\xi < q(K_{\xi})$ , όπου  $q(K_{\xi})$ : μικρή θετική ποσότητα, αναφερόμενη στο κριτήριο  $K_{\xi}$ ,

$fi,i',\xi = 1$ , εάν  $bi,\xi - bi',\xi \geq p(K_{\xi})$ , όπου  $p(K_{\xi})$ : σημαντική θετική ποσότητα, αναφερόμενη στο κριτήριο  $K_{\xi}$  [προφανώς  $p(K_{\xi}) > q(K_{\xi})$ ],

$1 > fi,i',\xi > 0$ , εάν  $p(K_{\xi}) > bi,\xi - bi',\xi \geq q(K_{\xi})$ .

Η μεταβολή του  $fi,i',\xi$ , γενικά είναι γραμμική. Δηλαδή για:  $p(K_{\xi}) > bi,\xi - bi',\xi \geq q(K_{\xi})$ , ισχύει

$$fi,i',\xi = [(bi,\xi - bi',\xi) - q(K_{\xi})] / [p(K_{\xi}) - q(K_{\xi})]. \quad (4.13)$$

Αναφορικά με τη (B) έννοια της Electre III, ορίζεται στην υπόψη μέθοδο ο Γενικευμένος Δείκτης Συμφωνίας, ο οποίος αποτελεί την έκφραση υπέρθεσης των δεικτών Συμφωνίας και Ασυμφωνίας,

Συγκεκριμένα, ο Γενικευμένος Δείκτης Συμφωνίας προέρχεται από το Συμβατικό Δείκτη Συμφωνίας, με πολλαπλασιασμό του τελευταίου με τελεστή έκφρασης ελέγχου Ασυμφωνίας.

Δηλαδή, καταρχήν υπολογίζονται οι Δείκτες Ασυμφωνίας, με βάση τον τύπο:

$$Di,i' = \{ \max_{\xi} [bi',\xi - bi,\xi] / (\max \text{κλίμακας του } \xi) \} \quad (4.14)$$

Εν συνεχεία οι δείκτες Ασυμφωνίας επηρεάζουν στη συγκρότησή του το Γενικευμένο Δείκτη Συμφωνίας, ο οποίος έχει ως εξής:

$$(\text{Γενικευμένος Δείκτης Συμφωνίας}) = Cdi,i' = gi,i' * (\text{Συμβατικός Δείκτης Συμφωνίας}) \quad (4.15)$$

ήτοι, με βάση τα προηγούμενα:

$$(\text{Γενικευμένος Δείκτης Συμφωνίας}) = Cdi,i' = gi,i' * Cfi,i' = gi,i' * \sum (fi,i',\xi * w_{\xi} : bi,\xi \geq bi',\xi) \quad (4.16)$$

όπου ο έκαστος δείκτης Ασυμφωνίας επιδρά μέσω του συντελεστή  $gi,i'$ .

Ο συντελεστής  $gi,i'$  εκφράζει την επιρροή της μέγιστης στο σύνολο των κριτηρίων- $\xi$  υστέρησης της εναλλακτικής λύσεως  $i$  έναντι της εναλλακτικής λύσεως  $i'$ .



Ο υπόψη συντελεστής λαμβάνει τιμές στο σύνολο  $[0,1]$ , όπου:

$g_{i,i'} = 0$ , εάν  $\max_{\xi} [b_{i',\xi} - b_{i,\xi}] > v(K_{\xi})$ , όπου  $v(K_{\xi})$  [όριο veto, δηλαδή αρνησικυρίας]: αρκετά σημαντική θετική ποσότητα, αναφερόμενη στο κριτήριο  $K_{\xi}$  και μάλιστα  $v(K_{\xi}) > p(K_{\xi})$ , όπου το  $p(K_{\xi})$  ορίστηκε προηγουμένως,

$g_{i,i'} = 1$ , εάν  $\max_{\xi} [b_{i',\xi} - b_{i,\xi}] \leq p(K_{\xi})$ , όπου το  $p(K_{\xi})$  έχει ορισθεί προηγουμένως,  $1 > g_{i,i'} > 0$ , εάν  $v(K_{\xi}) > \max_{\xi} [b_{i',\xi} - b_{i,\xi}] > p(K_{\xi})$ .

Η μεταβολή του  $g_{i,i'}$ , γενικά είναι γραμμική. Δηλαδή για:  $v(K_{\xi}) > \max_{\xi} [b_{i',\xi} - b_{i,\xi}] > p(K_{\xi})$  ισχύει:

$$g_{i,i'} = \{v(K_{\xi}) - \max_{\xi} [b_{i',\xi} - b_{i,\xi}]\} / \{v(K_{\xi}) - p(K_{\xi})\}. \quad (4.17)$$

Επομένως, ο τελικός έλεγχος Γενικευμένης Συμφωνίας ή άλλως Συμφωνίας-Ασυμφωνίας, γίνεται στη βάση της ισχύος ή μη της ακόλουθης σχέσης:

$$(\text{Γενικευμένος Δείκτης Συμφωνίας}) \geq (\text{Όριο Γενικευμένης Συμφωνίας}) = Cdo, \text{ ήτοι: } g_{i,i'} * \Sigma(f_{i,i',\xi} * w_{\xi} : b_{i,\xi} - b_{i',\xi}) \geq Cdo. \quad (4.18)$$

Σημειώνεται ως προς τα Κριτήρια Κατάταξης των Εναλλακτικών, ότι ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν και στην Electre II, δηλαδή και στην Electre III μπορούν να τεθούν σε εφαρμογή η Ευθεία Κατάταξη, η Πλαγία Κατάταξη και η υπερθέτουσα αυτές Μέση Κατάταξη.

#### 4.3.5 Electre IV

Η κύρια διαφορά της μεθόδου αυτής έναντι των προαναφερθεισών Electre είναι η εγκατάλειψη των βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης. Στην Electre IV (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky et al, 1986), (Tsamboulas D. – Pearman A. – Watson S. – Yiotis G., 1997), η υπεροχή μίας εναλλακτικής λύσεως  $i$  έναντι μίας άλλης εναλλακτικής λύσεως  $i'$ , ορίζεται και πιστοποιείται μέσω των ακόλουθων:

- (α) Ισχυρή υπεροχή της εναλλακτικής λύσης  $i$  έναντι της  $i'$ :

Όταν πληρούνται ταυτόχρονα οι ακόλουθες δύο συνθήκες,

1) Σε κανένα κριτήριο δεν υστερεί «έντονα» η  $i$  έναντι της  $i'$ ,

2) Το πλήθος των κριτηρίων στα οποία η  $i$  υστερεί «ελαφρά» έναντι της  $i'$  είναι όχι μεγαλύτερο από το πλήθος των κριτηρίων στα οποία η  $i$  υπερέχει («έντονα» ή «ελαφρά» έναντι της  $i'$ ).

- (β) Ασθενής υπεροχή της  $i$  έναντι της  $i'$ :

Όταν πληρείται μία εκ των δύο ακόλουθων συνθηκών:

1) Σε κανένα κριτήριο δεν υστερεί «έντονα» η εναλλακτική  $i$  έναντι της  $i'$ ,

2) Σε ένα μόνον κριτήριο υστερεί «έντονα» η εναλλακτική  $i$  έναντι της  $i'$ , αλλά η υπεροχή αυτή δεν υπερβαίνει το διπλάσιο του «Ορίου Έντονης Υπεροχής» και ταυτόχρονα, σε τρία τουλάχιστον κριτήρια η εναλλακτική  $i$  υπερέχει «έντονα» έναντι της  $i'$ .

Απαραίτητο βέβαια για την διαστασιολόγηση των ανωτέρω είναι να ορισθεί η «έντονη» και η «ελαφρό» υπεροχή μίας εναλλακτικής λύσεως επί μίας άλλης, στις κατά ζεύγη συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων. Ορίζονται:

«Ελαφρά» υπεροχή της λύσεως  $i$  έναντι της  $i'$ , ως προς το κριτήριο  $\xi$ , η περίπτωση κατά την οποία:

$$P(K_{\xi}) > b_{i,\xi} - b_{i',\xi} \geq 0 \quad (4.19)$$

ενώ,

«Έντονη» υπεροχή της λύσεως  $i$  έναντι της  $i'$ , ως προς το κριτήριο  $\xi$ , η περίπτωση κατά την οποία:

$$b_{i,\xi} - b_{i',\xi} \geq P(K_{\xi}), \quad (4.20)$$

όπου:  $P(K_{\xi})$ : «Όριο Έντονης Υπεροχής» για το κριτήριο  $K_{\xi}$  [αντίστοιχο του ορίου  $p(K_{\xi})$  της Electre III].

Και στην Electre IV ως προς τα Κριτήρια Κατάταξης των Εναλλακτικών, ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν και στις Electre II και Electre III δηλαδή μπορούν να τεθούν σε εφαρμογή η Ευθεία Κατάταξη, η Πλαγία Κατάταξη και η υπερθέτουσα αυτές Μέση Κατάταξη.

#### 4.4 ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ELECTRE ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

##### 4.4.1 Ιδιαιτερότητες αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (Αμπακούμκιν, 1990), (Nijkamp - Blaas, 1993), (EUNET Project, 1997), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), (Τσαμπούλας, 2004), όπως:

- το σημαντικό **πλήθος εναλλακτικών λύσεων**, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω οικονομικά πολυσήμαντων θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό **πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό **πλήθος** και την εν δυνάμει σημαντική **ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών**, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκόμενων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περίοικων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.,
- την **ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά.,
- τη **δυσκολία ποσοτικής απόδοσης** των επιδόσεων των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικό).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, δεν μπορεί, παρά να αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι για την αξιολόγηση ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρούνται τα χαρακτηριστικά τους.

##### 4.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων

Οι μέθοδοι Electre, λειτουργώντας με κατά ζεύγη συγκρίσεις λύσεων και ακολούθως με υπέρθεση των κατά ζεύγη πορισμάτων σε τελικά εξαγόμενα, εμπεριέχουν τα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα των κατά ζεύγη συγκρίσεων. Έτσι, ως πλεονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί η δυνατότητα εποπτείας σύγκρισης των εναλλακτικών λύσεων, αφού η εποπτεία αυτή προσφέρεται από τις κατά ζεύγη συγκρίσεις. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση μεγάλου πλήθους εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων, γίνεται η διαδικασία πιο πολύπλοκη, αφού για  $m$  το πλήθος λύσεις, απαιτούνται  $\{m / [(m-2)*2]\}$  συγκρίσεις λύσεων, όσα είναι δηλαδή και τα ζεύγη τα οποία ορίζονται. Ιδιαίτερα στην Electre I, λόγω και της εν δυνάμει εμφάνισης πολύπλοκων σχέσεων όπως η αμφίδρομη σχέση υπεροχής, η μη μεταβατικότητα και ο βρόγχος σχέσεων υπεροχής, είναι πιθανό να είναι δύσκολος ο χειρισμός μεγάλου πλήθους εναλλακτικών λύσεων.

##### 4.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης

Οι μέθοδοι Electre αποκρίνονται αρκετά καλά σε περιπτώσεις αξιολόγησης με σημαντικό πλήθος κριτηρίων. Η καλή αυτή απόκριση μπορεί να τεκμηριωθεί και από μαθηματικής αλλά και από εννοιολογικής απόψεως. Μαθηματικά, η δημιουργία των βασικών μηχανισμών συγκρίσεων, δηλαδή της Συμφωνίας και της Ασυμφωνίας, δεν παρουσιάζει πρόβλημα με το μεγάλο πλήθος κριτηρίων, αφού για τη μεν πρώτη ο αντίστοιχος Δείκτης Συμφωνίας δομείται

με απλό αθροιστικό πρότυπο, για τη δε δεύτερη, με εστίαση στην «χειρίστη» υστέρηση της μίας λύσεως ως προς την άλλη. Από εννοιολογικής πλευράς, επειδή υπάρχει η δυνατότητα σημαντικών ελέγχων (Συμφωνίας και Ασυμφωνίας), η οικογένεια Electre έχει σημαντικά εργαλεία χειρισμού του πλήθους των κριτηρίων αξιολόγησης. Η Electre IV, λόγω της χρησιμοποίησης πολυσχιδών μηχανισμών διαπίστωσης υπεροχής μεταξύ λύσεων, αντί των τυπικών δεικτών Συμφωνίας και Ασυμφωνίας (οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις Electre I, II, III), παρουσιάζει μία δυσκολότερη λειτουργία σε περιπτώσεις αξιολογήσεων με μεγάλο πλήθος κριτηρίων.

Ως προς το στρατηγικό πρότυπο (σκοπός), και τα τρία βασικά είδη προβληματικής, μπορούν να ανταποκριθούν στο πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης, αφού το καθένα από αυτά έχει τους ανάλογους μηχανισμούς εφαρμογής, συμβατούς με μεγάλο πλήθος κριτηρίων. Επομένως, από άποψης στρατηγικού επιπέδου, γενικά η οικογένεια Electre δεν παρουσιάζει πρόβλημα στο χειρισμό μεγάλου πλήθους κριτηρίων αξιολόγησης.

#### **4.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Οι αποφασίζοντες/αξιολογητές συνιστούν μία σημαντική διάσταση της διαδικασίας αξιολόγησης, αφού αυτοί καλούνται να χειριστούν παραμέτρους και μεταβλητές της διαδικασίας αυτής, και τελικά, να αποφασίσουν βάσει των αποτελεσμάτων της. Δύο πολύ σημαντικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν το σύνολο των αποφασιζόντων/αξιολογητών είναι το πλήθος τους και η ετερογένειά τους (ο βαθμός της ετερογένειας αυτής).

Η οικογένεια Electre έχει αρκετά καλή απόκριση στο μεγάλο πλήθος και την ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών, με την έννοια του ότι επιτρέπει συγκεκρισμούς-συνθέσεις διαφορετικών απόψεων, αφού διαθέτει αρκετές παραμέτρους έκφρασης των εν λόγω απόψεων, όπως:

- Τα όρια Συμφωνίας και Ασυμφωνίας (Electre I, II, III), τα οποία μάλιστα, μπορούν να διαφοροποιηθούν και ανά ομάδα κριτηρίων ή και ανά κριτήριο, με κατάλληλη βεβαίως προσαρμογή και των αντιστοιχών Δεικτών Συμφωνίας και Ασυμφωνίας.

- Τα όρια «εντάσεως υπεροχής» (Electre III, IV), δηλαδή, τα όρια «ασθενούς υπεροχής»: q (Electre III), «έντονης υπεροχής»: p ή P (αντιστοιχώς για την Electre III ή την Electre IV), «αρνησικυρίας»: v (Electre III), Τα προαναφερόμενα όρια («εντάσεως υπεροχής»), προσφέρουν με την οριοθέτηση τιμών τους, δυνατότητες παραμετρικής μεταβολής των ορίων αξιολόγησης.

Με βάση την προηγηθείσα λοιπόν ανάλυση, γενικά η οικογένεια Electre έχει δυνατότητες καλής απόκρισης απέναντι σε χαρακτηριστικά των αποφασιζόντων/αξιολογητών (πλήθος, ετερογένειά).

Την καλύτερη απόκριση μεταξύ των μεθόδων της οικογένειας έχει η Electre III, λόγω των πολλών παραμετρικών μηχανισμών που διαθέτει.

Από στρατηγικής πλευράς, η οικογένεια Electre, με τις ποικιλίες προβληματικής, άρα και εξαγομένου αξιολόγησης, παρέχει τη δυνατότητα ποικιλίας προσέγγισης. Έτσι, αναφορικά με το πολυσχιδές των υπό σύνθεση απόψεων των αποφασιζόντων/αξιολογητών, μπορεί να επιλεγεί και η κατάλληλη προβληματική, μέσω της χρήσης της κατάλληλης μεθόδου της οικογένειας Electre.

#### **4.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Οι δυνατότητες ανά κριτήριο προσαρμογής παραμέτρων της διαδικασίας αξιολόγησης, προσφέρει σημαντικές δυνατότητες απόκρισης της οικογένειας Electre στα διάφορα και διαφορετικής μεταξύ τους φύσης κριτήρια αξιολόγησης.

Πιο συγκεκριμένα, ως προς το μαθηματικό πρότυπο οι δυνατότητες ανά κριτήριο μεταβολής των ορίων εντάσεως στις μεθόδους Electre III, IV, προσφέρουν σημαντική ευελιξία

προσαρμογής του αλγορίθμου αξιολόγησης, ώστε αυτός να ανταποκρίνεται στα κριτήρια αξιολόγησης.

Από εννοιολογικής πλευράς, γενικά οι έννοιες της Συμφωνίας και της Ασυμφωνίας, μπορούν σε επαλληλία θεωρούμενες, να αποδώσουν την ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης, αφού, η γενική θεώρηση περιλαμβάνει συζευκτική (με τη συμφωνία) αλλά και διαζευκτική (με την ασυμφωνία) επισκόπηση, έτσι ώστε να μην γίνεται ολικός συμψηφισμός επιδόσεων λύσεων μεταξύ όλων των κριτηρίων αξιολόγησης.

#### 4.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων

Σε πολλές μεθόδους πολυκριτηριακής αξιολόγησης, προκειμένου να συμπεριληφθούν υπό θεώρηση όσο το δυνατόν περισσότερα κριτήρια αξιολόγησης, υπάρχει μειονέκτημα αναφορικά με την επαρκή ποσοτική απόδοση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων. Η οικογένεια Electre, μέσω των παραμέτρων Εντάσεως Υπεροχής (Electre III, IV), αλλά και του διπλού μηχανισμού Ελέγχων Συμφωνίας-Ασυμφωνίας (Electre I, II, III), εκφράζει αρκετά καλά ποσοτικά διαφορές μεταξύ των επιδόσεων των αξιολογούμενων λύσεων, και ανά κριτήριο, αλλά και συγκεντρωτικά.

#### 4.4.7 Απόκριση των μεθόδων της οικογένειας Electre σε αξιολογήσεις Συγκοινωνιακών Έργων

Στους Πίνακες που ακολουθούν και με βάση τα όσα προηγουμένως αναλύθηκαν, συνοψίζεται η απόκριση μεθόδων της οικογένειας Electre σε χαρακτηριστικά-απαιτήσεις της αξιολόγησης Συγκοινωνιακών Έργων. Επίσης παρουσιάζεται και η επιρροή στην απόκριση αυτή ανάλογα με το πρότυπο που συνθέτει τις μεθόδους (: στρατηγικό-εννοιολογικό-λογισμικό) επιρροή στην απόκριση αυτή, Επίσης παριστάνεται και η ολική απόκριση κάθε μεθόδου.

Στους Πίνακες 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, οι οποίοι ακολουθούν, η επεξήγηση των συμβόλων έχει ως εξής:

- «1»: Πλήθος Εναλλακτικών Λύσεων,
- «2»: Πλήθος Κριτηρίων Αξιολόγησης,
- «3»: Πλήθος και Ετερογένεια Αποφασιζόντων/Αξιολογητών,
- «4»: Ετερογένεια Κριτηρίων Αξιολόγησης,
- «5»: Ποσοτική Απόδοση Επιδόσεων.

Πίνακας 4.2: Απόκριση Electre I σε απαιτήσεις αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Table 4.2: Electre I: fulfilment of transport projects requirements

ELECTRE I	«1»	«2»	"3"	"4"	" 5 "
Στρατηγικό Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Εννοιολογικό Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Λογισμικό (Μαθηματικό) Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ

Πίνακας 4.3: Απόκριση Electre II σε απαιτήσεις αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων  
 Table 4.3: Electre II: fulfilment of transport projects requirements

ELECTRE II	«1»	«2»	"3"	"4"	" 5 "
Στρατηγικό Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Εννοιολογικό Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Λογισμικό (Μαθηματικό) Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ

Πίνακας 4.4: Απόκριση Electre III σε απαιτήσεις αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων  
 Table 4.4: Electre III: fulfilment of transport projects requirements

ELECTRE III	"1"	"2"	«3"	"4"	"5"
Στρατηγικό Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Εννοιολογικό Πρότυπο	Καλή	Καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Καλή
Λογισμικό (Μαθηματικό) Πρότυπο	Καλή	Καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΑΡΚΕΤΑ ΚΑΛΗ

Πίνακας 4.5: Απόκριση Electre IV σε απαιτήσεις αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων  
 Table 4.5: Electre IV: fulfilment of transport projects requirements

ELECTRE IV	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"
Στρατηγικό Πρότυπο	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Εννοιολογικό Πρότυπο	Καλή	Μέτρια	Καλή	Καλή	Καλή
Λογισμικό (Μαθηματικό) Πρότυπο	Καλή	Μέτρια	Καλή	Πολύ καλή	Καλή
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ

#### 4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ELECTRE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Ακολουθεί παράδειγμα εφαρμογής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων με χρήση μεθόδων Electre σε πραγματικό πρόβλημα.

##### 4.5.1 Παρουσίαση των δεδομένων του προβλήματος αξιολόγησης

Παρατίθεται εφαρμογή των μεθόδων Electre I, II, Electre III, Electre IV, στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), (Bonifica-Doxiadis Associates – TECNIC, 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«Λ1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«Λ2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«Λ3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων. Αξιολογούνται με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

«Κ1»: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

«Κ2»: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

«Κ3»: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Από ομάδα ειδημόνων (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999) δόθηκαν τα εξής βάρη στα Κριτήρια (η  $w_x$  αντιστοιχεί στο κριτήριο  $K_x$ ):

$w_1 = 0,16$ ,  $w_2 = 0,54$ ,  $w_3 = 0,30$ .

(Παρατηρείται ότι  $\sum w_x = 1,00$ , δηλαδή οι βαρύτητες των κριτηρίων δίδονται σε κανονικοποιημένη μορφή.)

Σημειώνεται ότι παρά το ότι οι βαρύτητες δόθηκαν από ειδήμονες, δεν παύουν να υπόκεινται σε κάποιο βαθμό υποκειμενικότητας, άρα και αβεβαιότητας. Επομένως, παράλληλα με την εφαρμογή των Electre I, Electre II, Electre III, θα λάβει χώρα και εφαρμογή της Electre IV.

Από τα τρία κριτήρια, για το  $K_1$  δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR).

Στα άλλα δύο κριτήρια ( $K_2$ ,  $K_3$ ) οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων εκφράζονται σε αριθμητική κλίμακα από 0 έως και 10, με βήμα 1.

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι ανά κριτήριο αξιολόγησης επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, όπως προέκυψαν από εφαρμογή των δεδομένων:

Πίνακας 4.6: Επιδόσεις Εναλλακτικών Λύσεων στα Κριτήρια Αξιολόγησης  
Table 4.6: Performances of Alternatives in Evaluation Criteria

ΚΡΙΤΗΡΙΟ / ΕΝΑΛΛΑΚΤΙ ΚΗ	«Κ1» : IRR	«Κ2» : Περιβαλλοντι- κές επιπτώσεις	«Κ3»: Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών
Λύση «Λ1»	94%	8	9
Λύση «Λ2»	162%	5	5
Λύση «Λ3»	74%	8	6

##### 4.5.2. Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre I

Καταρτίζονται οι δείκτες Συμφωνίας και Ασυμφωνίας στις ανά ζεύγη συγκρίσεις. Προκειμένου να ευρεθούν οι Δείκτες Ασυμφωνίας, καθορίζονται μέγιστες τιμές στις κλίμακες μέτρησης των Κριτηρίων.

Τα μέγιστα στο συγκεκριμένο παράδειγμα καθορίζονται στην τιμή  $IRR = 200\%$  για το κριτήριο της Χρηματικής αποδοτικότητας και στο 10 των αριθμητικών κλιμάκων για τα κριτήρια Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Κατά τον έλεγχο Συμφωνίας ευρίσκονται οι Δείκτες Συμφωνίας  $C_{i,i'}$ :

$$\Lambda 1 - \Lambda 2: C_{1,2} = 0,84$$

$$\Lambda 2 - \Lambda 1: C_{2,1} = 0,16$$

$$\Lambda 1 - \Lambda 3: C_{1,3} = 1,00$$

$$\Lambda 3 - \Lambda 1: C_{3,1} = 0,54$$

$$\Lambda 2 - \Lambda 3: C_{2,3} = 0,16$$

$$\Lambda 3 - \Lambda 2: C_{3,2} = 0,84$$

Καταρχήν, οι δείκτες  $C_{i,i'}$  συγκρίνονται με το επιλεγμένο όριο Συμφωνίας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγεται για την εφαρμογή της Electre I όριο Συμφωνίας  $C_0 = 0,500$ .

Ο έλεγχος των δεικτών  $C_{i,i'}$  σε σχέση με το όριο Συμφωνίας δίδει τις εξής διαφαινόμενες υπεροχές στις κατά ζεύγη συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων:

$\Lambda 1$  κυριαρχεί της  $\Lambda 2$ ,  $\Lambda 1$  κυριαρχεί της  $\Lambda 3$ ,

$\Lambda 3$  κυριαρχεί της  $\Lambda 1$ ,  $\Lambda 3$  κυριαρχεί της  $\Lambda 2$ ,

Οι δείκτες Ασυμφωνίας πρακτικά χρειάζεται να ευρεθούν μόνο για τα ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για τα οποία διεφάνη κάποια σχέση υπεροχής από τους ελέγχους Συμφωνίας,

Επομένως, έχουμε:

$$D_{1,2} = 0,34,$$

$$D_{1,3} = 0,$$

$$D_{3,1} = 0,30,$$

$$D_{3,2} = 0,44.$$

Οριοθετώντας Όριο Ασυμφωνίας  $D_0 = 0,30$ , από τις διαφαινόμενες από τον Έλεγχο Συμφωνίας σχέσεις υπεροχής μεταξύ των λύσεων τελικά παραμένουν μόνον οι εξής:

$\Lambda 1$  κυριαρχεί της  $\Lambda 3$ ,

$\Lambda 3$  κυριαρχεί της  $\Lambda 1$ .

Δηλαδή, οι τελικά παραμένουσες σχέσεις υπεροχής εναλλακτικών μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας των κατά ζεύγη συγκρίσεων κατά την εδώ εφαρμογή της Electre I έχουν ως εξής:

$\Lambda 1$  κυριαρχεί της  $\Lambda 3$ ,

$\Lambda 3$  κυριαρχεί της  $\Lambda 1$ .

Επομένως, οι Εναλλακτικές  $\Lambda 1$  και  $\Lambda 3$  απορρίπτονται, αφού έκαστη εξ'αυτών υστερεί σε κάποια σχέση υπεροχής, ήτοι καμία εξ'αυτών δεν ανήκει στον Πυρήνα Λύσεων. Ενώ η Εναλλακτική  $\Lambda 2$  δεν υστερεί σε καμία σχέση υπεροχής, επομένως ανήκει στον Πυρήνα Λύσεων.

#### 4.5.3 Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre II

Καταρτίζονται οι δείκτες Συμφωνίας και Ασυμφωνίας στις ανά ζεύγη συγκρίσεις. Προκειμένου να ευρεθούν οι Δείκτες Ασυμφωνίας, καθορίζονται μέγιστες τιμές στις κλίμακες μέτρησης των Κριτηρίων.

Τα μέγιστα στο συγκεκριμένο παράδειγμα καθορίζονται στην τιμή  $IRR = 200\%$  για το κριτήριο της Χρηματικής αποδοτικότητας και στο 10 των αριθμητικών κλιμάκων για τα κριτήρια Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Κατά την αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre II λαμβάνουν χώρα ο έλεγχος Συμφωνίας και ο έλεγχος Ασυμφωνίας.

Κατά τον έλεγχο Συμφωνίας, ευρίσκονται οι δείκτες Συμφωνίας  $C_{i,i'}$  και  $C^*_{i,i'}$  Έτσι, προκύπτουν:

Πίνακας 4.7: Δείκτες  $C_{i,i'}$  και  $C^*_{i,i'}$  κατά την εφαρμογή της Electre II

Table 4.7: Indicators  $C_{i,i'}$  and  $C^*_{i,i'}$  in application of Electre II

Διατεταγμένα Ζεύγη Εναλλακτικών Λύσεων (με έλεγχο για πιθανή υπεροχή της πρώτης επί της δεύτερης λύσης)	Δείκτες $C_{i,i'}$	Δείκτες $C^*_{i,i'}$
$\Lambda_1 - \Lambda_2$	$C_{1,2} = 0,84.$	$C^*_{1,2} = 0,84$
$\Lambda_2 - \Lambda_1$	$C_{2,1} = 0,16.$	$C^*_{2,1} = 0,16$
$\Lambda_1 - \Lambda_3$	$C_{1,3} = 1,00.$	$C^*_{1,3} = 0,46$
$\Lambda_3 - \Lambda_1$	$C_{3,1} = 0,54.$	$C^*_{3,1} = 0$
$\Lambda_2 - \Lambda_3$	$C_{2,3} = 0,16.$	$C^*_{2,3} = 0,16$
$\Lambda_3 - \Lambda_2$	$C_{3,2} = 0,84.$	$C^*_{3,2} = 0,84$

Καταρχήν, οι δείκτες  $C_{i,i'}$  συγκρίνονται με το επιλεγμένο όριο Συμφωνίας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγεται για την εφαρμογή της Electre II όριο Συμφωνίας  $C_0 = 0,500$ .

Ο έλεγχος των δεικτών  $C_{i,i'}$  σε σχέση με το όριο Συμφωνίας δίδει τις εξής διαφαινόμενες υπεροχές στις κατά ζεύγη συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων:

$\Lambda_1$  κυριαρχεί της  $\Lambda_2$ ,  $\Lambda_1$  κυριαρχεί της  $\Lambda_3$ ,

$\Lambda_3$  κυριαρχεί της  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_3$  κυριαρχεί της  $\Lambda_2$ ,

Όπως αναφέρθηκε και στη θεωρητική μαθηματική παρουσίαση των μεθόδων Electre, στη μέθοδο Electre II ο έλεγχος Συμφωνίας συμπληρώνεται πέραν σημείου αυτού και με τον έλεγχο μεταξύ των ποσοτήτων  $C^*_{i,i'}$  και  $C^*_{i',i}$ , ήτοι αντιστοίχως των  $\Sigma(w_{\xi}: b_{i,\xi} > b_{i',\xi})$  και  $\Sigma(w_{\xi}: b_{i',\xi} > b_{i,\xi})$ , για κάθε ζεύγος λύσεων  $i$  και  $i'$ .

Παρατηρείται ότι από τις συγκρίσεις των ανωτέρω ποσοτήτων ανά ζεύγη, δηλαδή  $C^*_{i,i'}$  με  $C^*_{i',i}$ , η διαφαινόμενη αμφίδρομη σχέση υπεροχής  $\Lambda_1$  επί  $\Lambda_3$  με  $\Lambda_3$  επί  $\Lambda_1$  γίνεται μονόδρομη  $\Lambda_1$  επί  $\Lambda_3$ .

Οπότε, ολοκληρώνονται οι έλεγχοι Συμφωνίας για την εφαρμογή της Electre II, με παραμένουσες ως διαφαινόμενες τις ακόλουθες σχέσεις υπεροχής στις ανά ζεύγη συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων:

$\Lambda_1$  κυριαρχεί της  $\Lambda_2$ ,

$\Lambda_1$  κυριαρχεί της  $\Lambda_3$ ,

$\Lambda_3$  κυριαρχεί της  $\Lambda_2$ .

Εν συνεχεία, λαμβάνει χώρα ο έλεγχος Ασυμφωνίας. Ευρίσκονται οι δείκτες Ασυμφωνίας, οι οποίοι, όπως εγράφη και στη θεωρητική παρουσίαση των μεθόδων Electre, και εδώ, στην Electre II, δίδονται από την εκεί προαναφερθείσα σχέση.

Οι δείκτες Ασυμφωνίας πρακτικά χρειάζεται να ευρεθούν μόνο για τα ζεύγη των εναλλακτικών λύσεων για τα οποία διεφάνη κάποια σχέση υπεροχής από τους ελέγχους Συμφωνίας,

Επομένως, έχουμε:

$D_{1,2} = 0,34$ ,

$D_{1,3} = 0$ ,

$D_{3,2} = 0,44$ .



Οριοθετώντας Όριο Ασυμφωνίας  $D_0 = 0,45$ , παραμένουν οι διαφαινόμενες από τον Έλεγχο Συμφωνίας σχέσεις υπεροχής μεταξύ των λύσεων.

Δηλαδή, οι τελικά παραμένουσες σχέσεις υπεροχής εναλλακτικών μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας των κατά ζεύγη συγκρίσεων κατά την εδώ εφαρμογή της Electre II έχουν ως εξής:

$\Lambda_1$  κυριαρχεί της  $\Lambda_2$ ,

$\Lambda_1$  κυριαρχεί της  $\Lambda_3$ ,

$\Lambda_3$  κυριαρχεί της  $\Lambda_2$ .

Ως προς την τελική κατάταξη των εναλλακτικών μπορεί να ισχύσουν και τα δύο Κριτήρια Κατάταξης, όπως έχει αναφερθεί και στην παρουσίαση της μεθόδου, προηγουμένως.

Συμπερασματικά:

(α) Καταρχήν, με βάση το κριτήριο Ευθείας Κατάταξης, οι Εναλλακτικές κατατάσσονται από την καλύτερη έως τη χειρότερη ως εξής:

$\Lambda_1$  (:καμία σχέση υστέρησης),

$\Lambda_3$  (:μία σχέση υστέρησης),

$\Lambda_2$  (:δύο σχέσεις υστέρησης),

(β) Εν συνεχεία, με βάση το κριτήριο Πλαγίας Κατάταξης, οι Εναλλακτικές κατατάσσονται από την καλύτερη έως τη χειρότερη ως εξής:

$\Lambda_1$  (:δύο σχέσεις υπεροχής),

$\Lambda_3$  (:μία σχέση υπεροχής),

$\Lambda_2$  (:καμία σχέση υπεροχής),

(γ) Παρατηρείται ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή, οι δύο κατατάξεις (ευθεία και πλαγία) συμπίπτουν. Επομένως, η υπέρθεσή τους, δηλαδή η Μέση Κατάταξη έχει ως εξής (από την καλύτερη έως τη χειρότερη εναλλακτική):

$\Lambda_1$ ,

$\Lambda_3$ ,

$\Lambda_2$ .

Αυτή θεωρείται και ως η τελική κατάταξη των εναλλακτικών στην εδώ εφαρμογή της μεθόδου Electre II.

#### 4.5.4 Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre III

Εδώ υπεισέρχονται οι «εντάσεις» υπεροχής και υστέρησης, αντίστοιχα στον Έλεγχο Συμφωνίας και τον Έλεγχο Ασυμφωνίας,

Για την παρούσα εφαρμογή ορίζονται:

Για το ΚΙ κριτήριο:  $q(K1) = 10\%$  και  $p(K1) = 30\%$ .

Για τα κριτήρια  $K2$  και  $K3$ , από κοινού:

$q(K2) = 0,5$ ,  $q(K3) = 0,5$  και  $p(K2) = 2,0$  και  $p(K3) = 2,0$ .

Η επιλογή των τιμών αυτών δεν είναι μονοσήμαντη και εναπόκειται στην κρίση του χρήστη της μεθόδου. Πάντως, η επιλογή αυτή πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης και με γνώμονα την ενεργοποίηση των αντίστοιχων μηχανισμών των παραμέτρων που υλοποιούν οι εν λόγω τιμές.

Ακολούθως, υπολογίζονται οι Συμβατικοί Δείκτες Συμφωνίας  $Cf_i, i'$ , όπως αναφέρθηκαν στην μαθηματική παρουσίαση της μεθόδου:

Πίνακας 4.8: Δείκτες  $Cf_{i,i'}$  κατά την εφαρμογή της Electre III  
 Table 4.8: Indicators  $Cf_{i,i'}$  in application of Electre III

Διατεταγμένα Εναλλακτικών (με έλεγχο για πιθανή υπεροχή της πρώτης επί της δεύτερης λύσης)	Ζεύγη Λύσεων	Δείκτες $Cf_{i,i'}$
Λ1 - Λ2		$Cf_{1,2} = 0,84.$
Λ2 - Λ1		$Cf_{2,1} = 0,16.$
Λ1 - Λ3		$Cf_{1,3} = 0,38.$
Λ3 - Λ1		$Cf_{3,1} = 0,08.$
Λ2 - Λ3		$Cf_{2,3} = 0,16.$
Λ3 - Λ2		$Cf_{3,2} = 0,64.$

Παρατηρείται ότι έναντι των δεικτών  $C_{i,i'}$  που υπολογίσθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου Electre II, κάποιοι από τους εδώ δείκτες  $Cf_{i,i'}$  είναι διαφορετικοί ως προς την τιμή τους. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην επιρροή των συντελεστών  $f_{i,i'}$ . Κατά την εφαρμογή της Electre III, οι εν λόγω συντελεστές διαδραμάτισαν ουσιαστικό ρόλο εντός των κατά ζεύγη συγκρίσεων μόνον όπου η διαφορά της υπερέχουσας επίδοσης έναντι της υστερήσασας ήταν μικρότερη από το όριο  $p$ .

Εάν ως Όριο Συμβατικής Συμφωνίας τηρηθεί η τιμή  $C_{fo} = 0,350$ , από τους παραπάνω δείκτες  $Cf_{i,i'}$  αυτοί που είναι μεγαλύτεροι ή ίσοι από την τιμή αυτή είναι οι ακόλουθοι:  
 $Cf_{1,2} = 0,84$ ,  $Cf_{1,3} = 0,38$ ,  $Cf_{3,2} = 0,64$ .

Βάσει αυτών, οι αρχικά (από τη Συμβατική Συμφωνία) διαφαινόμενες σχέσεις υπεροχής στις κατά ζεύγη συγκρίσεις είναι οι:

- Λ1 κυριαρχεί της Λ2,
- Λ1 κυριαρχεί της Λ3,
- Λ3 κυριαρχεί της Λ2.

Ακολουθεί η τελική φάση ελέγχου των σχέσεων υπεροχής.

Στη φάση αυτή υπολογίζονται οι Δείκτες Ασυμφωνίας  $Di_{i,i'}$ , οι συντελεστές  $gi_{i,i'}$ , και οι Γενικευμένοι Δείκτες Συμφωνίας  $Cdi_{i,i'}$ .

Γίνονται δεκτά τα εξής όρια αρνησικυρίας:

Για το κριτήριο  $K1$ ,  $v(K1) = 120\%$ ,

Για τα κριτήρια  $K2$  και  $K3$  ορίζονται από κοινού:  $v(K2) = 5,0$ ,  $v(K3) = 5,0$ .

Πίνακας 4.9: Δείκτες Ασυμφωνίας  $Di,i'$ , Συντελεστές  $gi,i'$  και Γενικευμένοι Δείκτες Συμφωνίας  $Cdi,i'$  κατά την εφαρμογή της Electre III.

Table 4.9: Discordance Indicators  $Di,i'$ , Factors  $gi,i'$  and General Concordance Indicators  $Cdi,i'$  in application of Electre III.

Διατεταγμένα Ζεύγη Εναλλακτικών Λύσεων (με έλεγχο για πιθανή υπεροχή της πρώτης επί της δεύτερης λύσης)	Δείκτες Ασυμφωνίας $Di,i'$	Συντελεστές $gi,i'$	Γενικευμένοι Δείκτες Συμφωνίας $Cdi,i'$
$\Lambda 1 - \Lambda 2$	$D1,2 = 0,340$	$g1,2 = 0,578$	$Cd1,2 = 0,485$
$\Lambda 2 - \Lambda 1$	$D2,1 = 0,400$	$g2,1 = 0,333$	$Cd2,1 = 0,053$
$\Lambda 1 - \Lambda 3$	$D1,3 = 0$	$g1,3 = 1,000$	$Cd1,3 = 0,380$
$\Lambda 3 - \Lambda 1$	$D3,1 = 0,300$	$g3,1 = 0,667$	$Cd3,1 = 0,053$
$\Lambda 2 - \Lambda 3$	$D2,3 = 0,300$	$g2,3 = 0,667$	$Cd2,3 = 0,107$
$\Lambda 3 - \Lambda 2$	$D3,2 = 0,440$	$g3,2 = 0,356$	$Cd3,2 = 0,228$

Εν συνεχεία γίνεται έλεγχος ισχύος της σχέσης:  $Cdi,i' \geq Cdo$ , όπου στην παρούσα εφαρμογή καθορίζεται  $Cdo = 0,200$ .

Με βάση αυτή την τιμή για την παρούσα εφαρμογή, μεταξύ των Γενικευμένων Δεικτών Συμφωνίας το υπόψη όριο φθάνουν ή ξεπερνούν οι παρακάτω:

$Cd1,2 = 0,485$ ,  $Cd1,3 = 0,380$ ,  $Cd3,2 = 0,228$ .

Επομένως, τελικά ισχύουν τελικά οι εξής σχέσεις υπεροχής:

$\Lambda 1$  κυριαρχεί της  $\Lambda 2$ ,

$\Lambda 1$  κυριαρχεί της  $\Lambda 3$ ,

$\Lambda 3$  κυριαρχεί της  $\Lambda 2$ ,

Κατά συνέπεια, όπως και στην εφαρμογή της Electre II ισχύουν τα παρακάτω:

(α) Με βάση το Κριτήριο της Ευθείας Κατάταξης, οι Εναλλακτικές κατατάσσονται από τη βέλτιστη έως τη χειριστή ως εξής:

- $\Lambda 1$  (καμία σχέση υστέρησης),
- $\Lambda 3$  (μία σχέση υστέρησης),
- $\Lambda 2$  (δύο σχέσεις υστέρησης).

(β) Με βάση το Κριτήριο της Πλαγίας Κατάταξης, οι Εναλλακτικές κατατάσσονται ως εξής (από τη βέλτιστη έως τη χειριστή):

- $\Lambda 1$  (δύο σχέσεις υπεροχής),
- $\Lambda 3$  (μία σχέση υπεροχής),
- $\Lambda 2$  (καμία σχέση υπεροχής).

(γ) Τελικά η υπέρθεση των δύο προηγούμενων κατατάξεων, δηλαδή η Μέση Κατάταξη, η οποία θεωρείται και ως η τελική κατάταξη στην εφαρμογή της Electre III, έχει ως εξής (από τη βέλτιστη έως τη χειριστή εναλλακτική):

- $\Lambda 1$ ,
- $\Lambda 3$ ,
- $\Lambda 2$ .

#### 4.5.5 Αξιολόγηση με τη μέθοδο Electre IV

Στην εδώ εφαρμογή καθορίζονται τα ανά κριτήριο όρια έντονης υπεροχής  $P(K\xi)$  ως εξής:  $P(K1) = 90\%$ ,  $P(K2) = 2,0$ ,  $P(K3) = 2,0$ .

Οι τιμές αυτές επελέγησαν ώστε να επιτρέψουν στη συνέχεια την ενεργοποίηση των μηχανισμών της μεθόδου Electre IV, έτσι ώστε να διαφανεί καθαρά η λειτουργία της. Καταρχήν διερευνώνται οι πιθανές σχέσεις Ισχυρής Υπεροχής, με βάση αυτά που αναπτύχθηκαν στην μαθηματική παρουσίαση της μεθόδου.

- Ζεύγος Λ1, Λ2: Υπάρχει «έντονη» υπεροχή της Λ1 επί της Λ2 σε δύο κριτήρια αξιολόγησης (Κ2, Κ3). Η Λ1 υστερεί μόνον σε ένα κριτήριο (Κ1) της Λ2 και η υστέρηση αυτή είναι ελαφρά. Επομένως η Λ1 υπερέχει ισχυρά της Λ2, ενώ δεν ισχύει το αντίστροφο.

- Ζεύγος Λ1, Λ3: Υπάρχει «έντονη» υπεροχή της Λ1 επί της Λ3 σε ένα κριτήριο αξιολόγησης (Κ3). Η Λ1 δεν υστερεί σε κανένα κριτήριο της Λ3. Επομένως η Λ1 υπερέχει ισχυρά της Λ3, ενώ δεν ισχύει το αντίστροφο.

- Ζεύγος Λ2, Λ3: Υπάρχει «έντονη» υπεροχή της Λ3 επί της Λ2 σε ένα κριτήριο (Κ2). Η Λ3 υστερεί μόνον σε ένα κριτήριο (Κ1) της Λ2 και η υστέρηση αυτή είναι ελαφρά. Επομένως η Λ3 υπερέχει ισχυρά της Λ2, ενώ δεν ισχύει το αντίστροφο. Ανακεφαλαιώνοντας τα περί Ισχυρών Υπεροχών μεταξύ Εναλλακτικών και ως προς την παρούσα εφαρμογή της Electre IV, διαπιστώνονται τελικά οι εξής σχέσεις Ισχυρής Υπεροχής;

Λ1 κυριαρχεί της Λ2,

Λ1 κυριαρχεί της Λ3,

Λ3 κυριαρχεί της Λ2,

Στη συνέχεια, διερευνώνται οι πιθανές σχέσεις Ασθενούς Υπεροχής, με βάση αυτά που αναπτύχθηκαν στην μαθηματική παρουσίαση της μεθόδου. Είναι σαφές ότι οι πιθανές σχέσεις Ασθενούς Υπεροχής δεν διερευνώνται εκεί που από προηγουμένως πιστοποιήθηκαν σχέσεις Ισχυρής Υπεροχής.

- Ζεύγος: Λ1, Λ2: Η Λ2 υστερεί έντονα σε δύο κριτήρια (Κ2, Κ3) της Λ1. Επομένως η Λ2 δεν υπερέχει ούτε ελαφρό της Λ1.

- Ζεύγος: Λ1, Λ3: Η Λ3 υστερεί έντονα σε ένα κριτήριο (Κ3) της Λ1. Επίσης, η Λ3 δεν υπερέχει σε κανένα κριτήριο της Λ1. Επομένως η Λ3 δεν υπερέχει ούτε ελαφρά της Λ1.

- Ζεύγος Λ2, Λ3: Η Λ2 υστερεί έντονα σε ένα κριτήριο (Κ2) της Λ3. Η Λ2 υπερέχει μόνον σε ένα κριτήριο (Κ1) της Λ3. Επομένως η Λ2 δεν υπερέχει ούτε ελαφρά της Λ3. Ανακεφαλαιώνοντας τα περί Ασθενών Υπεροχών μεταξύ Εναλλακτικών και ως προς την παρούσα εφαρμογή της Electre IV, διαπιστώνεται τελικά ότι καμία σχέση Ασθενούς Υπεροχής δεν υφίσταται.

Επομένως, στην παρούσα εφαρμογή της Electre IV διαπιστώθηκαν μόνο σχέσεις Ισχυρής Υπεροχής, οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως. Με βάση αυτές προκύπτει η κατάταξη των εναλλακτικών.

(α) Με βάση το Κριτήριο της Ευθείας Κατάταξης (όπως αναπτύχθηκε και στις εφαρμογές των Electre II και Electre III), οι Εναλλακτικές κατατάσσονται ως εξής (από τη βέλτιστη έως τη χειριστή):

- Λ1 (καμία σχέση υστέρησης),

- Λ3 (μία σχέση υστέρησης),

- Λ2 (δύο σχέσεις υστέρησης).

(β) Με βάση τα Κριτήρια της Πλαγίας Κατάταξης (όπως αναπτύχθηκε και στις εφαρμογές των Electre II και Electre III), οι Εναλλακτικές κατατάσσονται ως εξής (από τη βέλτιστη έως τη χειριστή):

- Λ1 (δύο σχέσεις υπεροχής).

- Λ3 (μία σχέση υπεροχής),

- Λ2 (καμία σχέση υπεροχής).

(γ) Η υπέρθεση των δύο προηγουμένων κατατάξεων, δηλαδή η Μέση Κατάταξη, η οποία θα θεωρηθεί (ως υπέρθεση) και η τελικά επικρατέστερη στην εδώ εφαρμογή της Electre IV, έχει ως εξής (από τη βέλτιστη έως τη χειριστή εναλλακτική):

- Λ1,
- Λ3,
- Λ2.

#### 4.5.6 Σύγκριση συμπερασμάτων από την εφαρμογή μεθόδων Electre

Από την οικογένεια των μεθόδων Electre, η μεν Electre I ανήκει στην προβληματική «α», οι δε Electre II, III, IV ανήκουν στην προβληματική «γ», ως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Επομένως, έχει ιδιαίτερο νόημα η σύγκριση των αποτελεσμάτων για μεθόδους που ανήκουν στην ίδια προβληματική. Ιδιαίτερο επομένως ενδιαφέρον παρουσιάζει η συνοπτική συγκεντρωτική παράθεση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής μεθόδων Electre της προβληματικής γ στο παρόν παράδειγμα και η συγκριτική τους αξιολόγηση. Έτσι στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα αυτά (οι κατατάξεις των Εναλλακτικών από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη).

*Πίνακας 4.10: Σύνοψη κατατάξεων εναλλακτικών λύσεων παραδείγματος με εφαρμογή μεθόδων Electre της προβληματικής γ.*

*Table 4.10: Summarizing classifications of example's alternatives due to application of Electre methods of problematique «γ».*

<i>Κατάταξη με Electre II</i>	<i>Κατάταξη με Electre III</i>	<i>Κατάταξη με Electre IV</i>
Λ1	Λ1	Λ1
Λ3	Λ3	Λ3
Λ2	Λ2	Λ2

Παρατηρείται ότι η εφαρμογή οποιοσδήποτε από τις τρεις μεθόδους προβληματικής γ της οικογένειας Electre (Electre II, Electre III, Electre IV) έδωσε την ίδια κατάταξη των εναλλακτικών.

Κατά την εφαρμογή της Electre III, αξιοποιήθηκαν τα αρχικά ποσοτικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, στο οικονομικό κριτήριο (K1), δόθηκε ελαστικό (αρκετά μεγάλο) όριο αρνησικυρίας, οπότε η τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων συνέκλινε με αυτή της Electre II. Το γεγονός της σύγκλισης αποτελεσμάτων μεταξύ της Electre II και της Electre III, ξεπερνά σε σημαντικό βαθμό την αβεβαιότητα των ποσοτικών αρχικών δεδομένων τιμών των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων.

Επίσης, στις προηγούμενες εφαρμογές, παρά το ότι η Electre IV (από τη φύση της) δεν αξιοποίησε την αρχική πληροφόρηση των βαρών των κριτηρίων, συνέκλινε στην ίδια με τις Electre II και Electre III κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Το γεγονός αυτό ενισχύει ακόμη περισσότερο την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, αφού υπερκερνά και την όποια αβεβαιότητα υπολογισμού των τιμών των βαρών των κριτηρίων.

Σημειώνεται ότι και σε αντίστοιχες πολυκριτηριακές αξιολογήσεις (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), (Bonifica-Doxiadis Associates-TECNIC, 1999), με άλλες πολυκριτηριακές μεθόδους, οι οποίες δεν ανήκαν στην οικογένεια Electre, η κατάταξη των εναλλακτικών ήταν ίδια με τις εδώ εφαρμογές.

#### 4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως καταδείχθηκε και από τα προηγούμενα, οι μέθοδοι της οικογένειας Electre, προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες εφαρμογής σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, λόγω των δυνατοτήτων τους στην προσαρμογή στις ιδιαίτερες παραμέτρους αυτών, όπως το

σημαντικό πλήθος εναλλακτικών λύσεων, το μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης, το αξιόλογο πλήθος και την ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών, την ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης, την ποιοτική ή ποσοτική φύση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων. Η κάθε μία από τις προαναφερθείσες μεθόδους προσφέρει κάποια συγκεκριμένα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων της οικογένειας. Καμία όμως μέθοδος δεν έχει ολική υπεροχή και σε όλα τα επίπεδα και τομείς εφαρμογής της, άρα καμία από τις εν λόγω μεθόδους, όπως άλλωστε και καμία γενικά μέθοδος αξιολόγησης δεν πρέπει να θεωρείται «πανάκεια». Επομένως, πρέπει να επιλέγεται κάθε φορά η καταλληλότερη μέθοδος αναλόγως με τα στοιχεία τα οποία παρέχονται ως δεδομένα μίας αξιολόγησης, ενός συγκοινωνιακού έργου. Είναι δυνατή σε πολλά έργα η παράλληλη εφαρμογή διαφόρων μεθόδων της οικογένειας Electre, όπως για παράδειγμα η παράλληλη εφαρμογή και των τριών μεθόδων προβληματικής «γ» της οικογένειας Electre (II, III, IV), αλλά πρέπει να γίνεται με προσοχή και να λαμβάνει χώρα υπέρθεση των πορισμάτων. Οι μέθοδοι της προβληματικής γ, ήτοι οι Electre II, Electre III, Electre IV, γενικά πρέπει να προτιμώνται, εκεί όπου ο περιορισμός πόρων ή άλλες εν γένει οικονομικές, τεχνικές ή χωρικές συνθήκες επιβάλλουν την κατά το δυνατό πλήρη διάταξη των εναλλακτικών λύσεων ως αποτέλεσμα της αξιολόγησής τους.

Μία άλλη διάσταση επιλογής της κατάλληλης μεθόδου για αξιολόγηση, είναι ο βαθμός εμπιστοσύνης των αρχικών ποσοτικών δεδομένων της αξιολόγησης. Δηλαδή, σημαντική είναι η αντιμετώπιση της αβεβαιότητας στα στοιχεία/προβλέψεις (πρωτογενής αβεβαιότητα). Έτσι, εάν, για παράδειγμα δεν υπάρχει σαφής και αξιόπιστη εκτίμηση των σχετικών βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης, τότε, πλεονεκτεί η Electre IV, από την άποψη ότι δεν απαιτεί τη χρήση των σχετικών αυτών βαρών. Εάν τα αρχικά δεδομένα ποσοτικά στοιχεία (δηλαδή οι βαρύτητες κριτηρίων και οι ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων) είναι πολύ αξιόπιστα, τότε οι μέθοδοι μεγάλης αξιοποίησης των στοιχείων αυτών επικρατούν, δηλαδή επικρατούν οι Electre I και II και ακόμη περισσότερο η Electre III.

Η εισαγωγή παραμέτρων από τις ίδιες τις μεθόδους αξιολόγησης οδηγεί στη δευτερογενή αβεβαιότητα, που σχετίζεται με το βαθμό εμπιστοσύνης της εισαγωγής των παραμέτρων αυτών. Από την άποψη αυτή, στις περιπτώσεις που δύσκολα μπορεί να εκτιμηθούν με ακρίβεια και μεγάλη αξιοπιστία οι παράμετροι αυτές, είναι προτιμότερο να αποφεύγονται μέθοδοι με πολλές τέτοιες παραμέτρους, όπως η Electre III και να προτιμώνται οι Electre I, II, IV.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, βασιζόμενοι στο ότι οι τρεις μέθοδοι Electre II, III, IV ανήκουν στην ίδια προβληματική, δηλαδή στη γ, ήτοι οδηγούν τελικά σε πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, είναι δυνατό σε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, να εφαρμοσθούν και περισσότερες της μίας από αυτές (ακόμη και οι τρεις), εξάγοντας συνολικά συμπεράσματα και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Αυτό βέβαια, όπως και στο παράδειγμα που παρουσιάστηκε, πρέπει να γίνεται σε σχέση με τις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου κάθε φορά προβλήματος και με επίγνωση των περιορισμών της κάθε μεθόδου. Τηρώντας αυτά, η παράλληλη εφαρμογή περισσότερων της μίας (εάν είναι δυνατόν και των τριών) μεθόδων Electre της προβληματικής «γ», μπορεί να αντιμετωπίσει ζητήματα αβεβαιότητας των δεδομένων της αξιολόγησης (βάρη κριτηρίων, επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων ανά κριτήριο), όπως έγινε και στο παράδειγμα και αναλύθηκε κατά τη σύγκριση των συμπερασμάτων κατάταξης των εναλλακτικών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις περισσότερες αξιολογήσεις συγκοινωνιακών έργων, οι διαφαινόμενες λύσεις είναι περισσότερες της μίας, επομένως είναι χρήσιμο η εν λόγω αξιολόγηση, να καταλήξει σε κάποιο εξαγόμενο σύγκρισης των λύσεων.

Για να συμπεριληφθούν όσο το δυνατό ακριβέστερα ποσοτικά αρκετά κριτήρια σε μία αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μία οικογένεια μεθόδων είναι η Promethee, η οποία εισήχθη υπό του Brans.

#### Συμβολισμοί

- $L_i$ : Εναλλακτική Λύση.  
 $I$ : Πλήθος εναλλακτικών λύσεων.  
 $K_\xi$ : Κριτήριο Αξιολόγησης.  
 $w_\xi$ : Σχετικό βάρος του κριτηρίου  $K_\xi$ .  
 $\max_\xi [\dots]$ : Μέγιστο ως προς το δείκτη  $\xi$  της παράστασης που ακολουθεί.  
 $bi, \xi$ : Επίδοση της εναλλακτικής λύσης  $L_i$  στο κριτήριο αξιολόγησης  $K_\xi$ .  
 $r_{\xi, i, i'}$ : Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής  $L_i$  επί της εναλλακτικής  $L_{i'}$  για το κριτήριο  $K_\xi$ .  
 $Pi, i'$ : Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής  $L_i$  επί της εναλλακτικής  $L_{i'}$  συνολικά.  
 $Q_i^+$ : Γενική Θετική κατά Promethee Επίδοση της εναλλακτικής  $L_i$ .  
 $Q_i^-$ : Γενική Αρνητική κατά Promethee Επίδοση της εναλλακτικής  $L_i$ .  
 $Q_i$ : Γενική Μεικτή κατά Promethee Επίδοση της εναλλακτικής  $L_i$ .  
 $q_\xi$ : Όριο Υπεροχής της Promethee για το Κριτήριο  $K_\xi$ .

### 5.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE

#### 5.2.1. Γενικά

Η οικογένεια πολυκριτηριακών μεθόδων αξιολόγησης Promethee (Brans et al, 1986), (Brans, 1994), (Tsamboulas et al, 1999), (Schaerlig, 1985), αξιοποιεί και προϋποθέτει για τη λειτουργία της τα ακόλουθα:

- Τα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης,
- Ποσοτική έκφραση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων.

#### 5.2.2 Promethee I

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Έχουμε τις εναλλακτικές  $L_i$  και τα Κριτήρια αξιολόγησης  $K_\xi$ , καθώς και τις επιδόσεις  $bi, \xi$  των εναλλακτικών στα κριτήρια. Δίδονται τα σχετικά βάρη  $w_\xi$  των κριτηρίων  $K_\xi$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται ο Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής  $L_i$  επί της εναλλακτικής  $L_{i'}$  για κάθε κριτήριο  $K_\xi$ , ήτοι ο  $r_{\xi, i, i'}$ . (Σημειώνεται ότι στον  $r_{\xi, i, i'}$  το ζεύγος των δεικτών « $i, i'$ » είναι διατεταγμένο.)

Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι:

$$r_{\xi, i, i'} = 1 \text{ εάν } bi, \xi - bi', \xi > q_\xi$$

$$p_{\xi, i, i'} = 0 \text{ εάν } b_{i, \xi} - b_{i', \xi} \leq q_{\xi} \quad (5.1)$$

όπου

$q_{\xi}$ : Όριο Υπεροχής της Promethee για το Κριτήριο  $K_{\xi}$ . Για κάθε  $K_{\xi}$  ορίζεται και το αντίστοιχο  $q_{\xi}$ .

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται ο Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής  $L_i$  επί της εναλλακτικής  $L_{i'}$  συνολικά, ήτοι ο  $P_{i, i'}$ .

Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι:

$$P_{i, i'} = \sum_{\xi} (p_{\xi, i, i'} * w_{\xi}) \quad (5.2)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $L_i$  ευρίσκονται δύο ποσότητες:

Η Γενική Θετική κατά Promethee Επίδοση, ήτοι η  $Q_i^+$ , από τη σχέση:

$$Q_i^+ = [1 / (I-1)] * \sum_{i'} (P_{i, i'}) \quad (5.3)$$

Η Γενική Αρνητική κατά Promethee Επίδοση, ήτοι η  $Q_i^-$ , από τη σχέση:

$$Q_i^- = [1 / (I-1)] * \sum_{i'} (P_{i', i}) \quad (5.4)$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Με βάση έκαστη των ποσοτήτων  $Q_i^+$  και  $Q_i^-$  λαμβάνει και αντίστοιχη θέση η εναλλακτική  $L_i$  σε έκαστη εκ των δύο αντίστοιχων διατάξεων των εναλλακτικών λύσεων (ήτοι όσο μεγαλύτερη η ποσότητα  $Q_i^+$  τόσο καλύτερη η θέση της  $L_i$  στην αντίστοιχη κατάταξη, ενώ όσο μικρότερη η ποσότητα  $Q_i^-$  τόσο καλύτερη η θέση της  $L_i$  στην αντίστοιχη κατάταξη).

### 5.2.3 Promethee II

*Βήματα 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup>, 4<sup>ο</sup>*: Όπως στην Promethee I.

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $L_i$ , ευρίσκεται η Γενική Μεικτή κατά Promethee Επίδοση της εναλλακτικής  $L_i$ , ήτοι η  $Q_i$  από τη σχέση:

$$Q_i = + Q_i^+ - Q_i^- \quad (5.5)$$

Η κατάταξη των εναλλακτικών  $L_i$  λαμβάνει χώρα αναλόγως των ποσοτήτων  $Q_i$  (όσο μεγαλύτερη η ποσότητα  $Q_i$  τόσο καλύτερη η θέση της  $L_i$  στη διάταξη).

## 5.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE

### 5.3.1 Γενικά

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, για την αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), (Bonifica-Doxiadis Associates-TECNIC, 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«Λ1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«Λ2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«Λ3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Αξιολογούνται για την ανάθεση του καλύτερου έργου, με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

«Κ1»: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

«Κ2»: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

«Κ3»: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Από ομάδα ειδημόνων (Τσαμπούλας, 1999) δόθηκαν τα εξής βάρη στα Κριτήρια (η  $w_{\xi}$  αντιστοιχεί στο κριτήριο  $K_{\xi}$ ):



$w_1 = 0,16, w_2 = 0,54, w_3 = 0,30$ .

(Παρατηρείται ότι  $\Sigma w_i = 1,00$ , δηλαδή οι βαρύτητες των κριτηρίων δίδονται σε κανονικοποιημένη μορφή.)

Από τα τρία κριτήρια, για αυτό της χρηματικής αποδοτικότητας δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR). Στο υπόψη κριτήριο, η εναλλακτική λύση Λ1 έχει τιμή 94%, η Λ2 τιμή 162% και η Λ3 τιμή 74%.

Για τα άλλα δύο κριτήρια υπάρχουν απλώς ποιοτικοί χαρακτηρισμοί για τις συνέπειες/επιδόσεις των υπό αξιολόγηση έργων.

Έτσι, για το περιβαλλοντικό κριτήριο, εκτιμήθηκε ότι τα έργα Λ1 και Λ3 θα έχουν περίπου τις ίδιες επιπτώσεις, ενώ το έργο Λ2 θα έχει αισθητά χειρότερες επιπτώσεις.

Για το κριτήριο της ποιότητας των προσφερόμενων κοινωνικών υπηρεσιών, εκτιμήθηκε ότι το έργο Λ1 θα έχει πολύ καλύτερη επιρροή από καθένα εκ των άλλων δύο έργων. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το Λ3 θα έχει καλύτερη σχετικά με το Λ2 επιρροή στο υπόψη κριτήριο.

### 5.3.2 Εφαρμογή της Promethee I

Γίνεται εφαρμογή της μεθόδου Promethee I, με βάση τα βήματα του αλγορίθμου της.

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Εμφανίζονται πινακοποιημένες οι επιδόσεις  $b_{i,\xi}$  των εναλλακτικών στα κριτήρια.

*Πίνακας 5.1: Επιδόσεις Εναλλακτικών Λύσεων στα Κριτήρια Αξιολόγησης*  
*Table 5.1: Performances of Alternatives in Evaluation Criteria*

ΚΗ	ΚΡΙΤΗΡΙΟ / ΕΝΑΛΛΑΚΤΙ	«Κ1» : IRR	«Κ2» : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	«Κ3»: Ποιότητα κοινωνικών υπηρεσιών
	Λύση «Λ1»	94%	8	9
	Λύση «Λ2»	162%	5	5
	Λύση «Λ3»	74%	8	6

Τα σχετικά βάρη των κριτηρίων έχουν ως εξής:  $w_1 = 0,16, w_2 = 0,54, w_3 = 0,30$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Έστω ότι αποφασίζεται:

$q_1 = 10\%, q_2 = 0,5, q_3 = 0,5$ ,

Ευρίσκεται ο Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής  $\Lambda_i$  επί της εναλλακτικής  $\Lambda_j$  για έκαστο κριτήριο  $K_\xi$ , ήτοι ο  $p_{\xi,i,j}$ .

• Διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $\Lambda_1 - \Lambda_2$ :

$p_{1,1,2} = 0, p_{2,1,2} = 1, p_{3,1,2} = 1$ .

• Διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $\Lambda_2 - \Lambda_1$ :

$p_{1,2,1} = 1, p_{2,2,1} = 0, p_{3,2,1} = 0$ .

• Διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $\Lambda_1 - \Lambda_3$ :

$p_{1,1,3} = 1, p_{2,1,3} = 0, p_{3,1,3} = 1$ .

• Διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $\Lambda_3 - \Lambda_1$ :

$p_{1,3,1} = 0, p_{2,3,1} = 0, p_{3,3,1} = 0$ .

• Διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $\Lambda_2 - \Lambda_3$ :

$p_{1,2,3} = 1, p_{2,2,3} = 0, p_{3,2,3} = 0$ .

- Διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $\Lambda_3 - \Lambda_2$ :  
 $p_{1,3,2} = 0, \quad p_{2,3,2} = 1, \quad p_{3,3,2} = 1.$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται ο Δείκτης Συμφωνίας ελέγχου υπεροχής της εναλλακτικής  $\Lambda_i$  επί της εναλλακτικής  $\Lambda_i'$  συνολικά, ήτοι ο  $P_{i,i'}$ . Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι:  $P_{i,i'} = \sum_{\xi} (p_{\xi,i,i'} * w_{\xi})$ . Ήτοι:

- $P_{1,2} = + p_{1,1,2} * w_1 + p_{2,1,2} * w_2 + p_{3,1,2} * w_3 = +0 * 0,16 + 1 * 0,54 + 1 * 0,30 = 0,84.$
- $P_{2,1} = + p_{1,2,1} * w_1 + p_{2,2,1} * w_2 + p_{3,2,1} * w_3 = +1 * 0,16 + 0 * 0,54 + 0 * 0,30 = 0,16.$
- $P_{1,3} = + p_{1,1,3} * w_1 + p_{2,1,3} * w_2 + p_{3,1,3} * w_3 = +1 * 0,16 + 0 * 0,54 + 1 * 0,30 = 0,46.$
- $P_{3,1} = + p_{1,3,1} * w_1 + p_{2,3,1} * w_2 + p_{3,3,1} * w_3 = +0 * 0,16 + 0 * 0,54 + 0 * 0,30 = 0.$
- $P_{2,3} = + p_{1,2,3} * w_1 + p_{2,2,3} * w_2 + p_{3,2,3} * w_3 = +1 * 0,16 + 0 * 0,54 + 0 * 0,30 = 0,16.$
- $P_{3,2} = + p_{1,3,2} * w_1 + p_{2,3,2} * w_2 + p_{3,3,2} * w_3 = +0 * 0,16 + 1 * 0,54 + 1 * 0,30 = 0,84.$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $\Lambda_i$  ευρίσκονται δύο ποσότητες:

Επομένως:

Η Γενική Θετική κατά Promethee Επίδοση, ήτοι η  $Q^+_i$ , από τη σχέση:

$$Q^+_i = [1 / (I-1)] * \sum_{i'} (P_{i,i'})$$

- Εναλλακτική  $\Lambda_1$ :

$$Q^+_1 = [1/ (3-1)] * [P_{1,2} + P_{1,3}] = (1/2) * [0,84 + 0,46] = (1/2) * 1,30 = 0,65.$$

- Εναλλακτική  $\Lambda_2$ :

$$Q^+_2 = [1/ (3-1)] * [P_{2,1} + P_{2,3}] = (1/2) * [0,16 + 0,16] = (1/2) * 0,32 = 0,16.$$

- Εναλλακτική  $\Lambda_3$ :

$$Q^+_3 = [1/ (3-1)] * [P_{3,1} + P_{3,2}] = (1/2) * [0 + 0,84] = (1/2) * 0,84 = 0,42.$$

Και: Η Γενική Αρνητική κατά Promethee Επίδοση, ήτοι η  $Q^-_i$ , από τη σχέση:

$$Q^-_i = [1 / (I-1)] * \sum_{i'} (P_{i',i})$$

- Εναλλακτική  $\Lambda_1$ :

$$Q^-_1 = [1/ (3-1)] * [P_{2,1} + P_{3,1}] = (1/2) * [0,16 + 0] = (1/2) * 0,16 = 0,08.$$

- Εναλλακτική  $\Lambda_2$ :

$$Q^-_2 = [1/ (3-1)] * [P_{1,2} + P_{3,2}] = (1/2) * [0,84 + 0,84] = (1/2) * 1,68 = 0,84.$$

- Εναλλακτική  $\Lambda_3$ :

$$Q^-_3 = [1/ (3-1)] * [P_{1,3} + P_{2,3}] = (1/2) * [0,46 + 0,16] = (1/2) * 0,62 = 0,31.$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Επομένως, με βάση τα  $Q^+_i$ , αφού  $Q^+_1 > Q^+_3 > Q^+_2$ , οι εναλλακτικές διατάσσονται ως εξής (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη):  $\Lambda_1 - \Lambda_3 - \Lambda_2$ .

Ενώ, με βάση τα  $Q^-_i$ , αφού  $Q^-_1 < Q^-_3 < Q^-_2$ , οι εναλλακτικές διατάσσονται ως εξής (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη):  $\Lambda_1 - \Lambda_3 - \Lambda_2$ .

Άρα οι δύο διατάξεις των εναλλακτικών συμπίπτουν.

### 5.3.3 Εφαρμογή της Promethee II

*Βήματα 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup>, 4<sup>ο</sup>*: Όπως στην Promethee I.

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $\Lambda_i$ , ευρίσκεται η Γενική Μεικτή κατά Promethee Επίδοση της εναλλακτικής  $\Lambda_i$ , ήτοι η  $Q_i$  από τη σχέση:  $Q_i = + Q_i^+ - Q_i^-$

Επομένως:

- Εναλλακτική  $\Lambda_1$ :  $Q_1 = + Q_1^+ - Q_1^- = + 0,65 - 0,08 = + 0,57$
- Εναλλακτική  $\Lambda_2$ :  $Q_2 = + Q_2^+ - Q_2^- = + 0,16 - 0,84 = - 0,68$
- Εναλλακτική  $\Lambda_3$ :  $Q_3 = + Q_3^+ - Q_3^- = + 0,42 - 0,31 = + 0,11$

Άρα, η διάταξη των εναλλακτικών (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη), έχει ως εξής:  
 $\Lambda_1 - \Lambda_3 - \Lambda_2$ .

## 5.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ PROMETHEE

### 5.4.1. Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (NAMA-Ευπαλίνος, 1995), (Nijkamp - Blaas, 1993), (Tsamboulas et al, 1999), όπως:

- το σημαντικό **πλήθος εναλλακτικών λύσεων**, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω του πολυσχιδούς των οικονομικών θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό **πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό **πλήθος και την εν δυνάμει σημαντική ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών**, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκομένων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, ενδιαφερομένων φορέων, περιοίκων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την **ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά., όπου η υπόψη ετερογένεια των κριτηρίων, οπότε για τη μέτρησή τους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μεταξύ τους δείκτες και κλίμακες (:φυσικές, αριθμητικές, λεξικογραφικές κ.ά.),
- τη **δυσκολία ποσοτικής απόδοσης των επιδόσεων** των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, δεν μπορεί, παρά να αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι μία μέθοδος αξιολόγησης ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρεί τα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι και η αξιολόγηση άλλων τεχνικών έργων, που αναφέρονται στην ενέργεια ή στο περιβάλλον, παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων. Έτσι, θα μπορούσε να εξετασθεί και εκεί η εφαρμογή των μεθόδων Promethee.

Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση των μεθόδων Promethee σύμφωνα με τα εν λόγω χαρακτηριστικά.

### 5.4.2. Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων

Οι μέθοδοι Promethee δεν παρουσιάζουν πρόβλημα με το μεγάλο αριθμό των εναλλακτικών λύσεων, αφού ο τρόπος ενσωμάτωσης σημαντικού αριθμού εναλλακτικών

είναι απλός, ήτοι πραγματοποιείται υπερθέτοντας τις κατά ζεύγη συγκρίσεις με αθροιστική τελικώς δομή. Το σημαντικό πλήθος εναλλακτικών αυξάνει βέβαια τα θεωρούμενα ζεύγη εναλλακτικών, αλλά ο συνολικός χειρισμός παραμένει σχετικά απλός.

#### **5.4.3. Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης**

Επειδή και τα κριτήρια αντιμετωπίζονται υπερτιθέμενα σε τελικά αθροιστική δομή, ούτε ο σημαντικός αριθμός κριτηρίων δημιουργεί σημαντικά προβλήματα εποπτείας.

#### **5.4.4. Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Οι μέθοδοι Promethee, όπως και προηγουμένως τονίσθηκε, λειτουργούν με εισαγόμενα κυρίως ποσοτικά, ήτοι με ποσοτικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών και με ποσοτική έκφραση των σχετικών βαρών των κριτηρίων. Πέρα όμως από αυτά, η οικογένεια μεθόδων Promethee απαιτεί τη θέσπιση των  $q_\xi$ , δηλαδή ενός ορίου υπεροχής ανά κριτήριο. Επομένως, αφήνει τα περιθώρια για να εκφρασθούν οι ανά κριτήριο απόψεις των αποφασιζόντων, άρα επιτρέπει το συγκερασμό απόψεων.

#### **5.4.5. Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Οι μέθοδοι Promethee χειρίζονται αρκετά καλά ετερογενή κριτήρια, αφού θέτει διαφορετικό όριο υπεροχής  $q_\xi$  για κάθε κριτήριο  $K_\xi$  και επομένως σέβεται τις κλίμακες και μονάδες μέτρησης κάθε κριτηρίου.

#### **5.4.6. Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Οι μέθοδοι Promethee κατορθώνουν σε σημαντικό βαθμό να αξιοποιήσουν ποσοτικές πληροφορίες/δεδομένα που σχετίζονται με τις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια. Αυτό το επιτυγχάνουν μέσω της διαδικασίας μόρφωσης των Δεικτών Συμφωνίας, όπου θεσπίζονται και χρησιμοποιούνται και τα Όρια Υπεροχής.

### **5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Οι μέθοδοι Promethee είναι μέθοδοι πολυκριτηριακής αξιολόγησης, οι οποίες στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στην έννοια της Συμφωνίας, καθώς επίσης και στην έννοια της Υπεροχής. Η εφαρμογή των εννοιών αυτών σε μαθηματικό επίπεδο, δίδει τις δυνατότητες για αξιοποίηση ποσοτικών πληροφοριών/δεδομένων, τόσο στις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια, όσο και στα σχετικά βάρη των κριτηρίων. Οι εν λόγω μέθοδοι, έχουν τη δυνατότητα χειρισμού ετερογενών κριτηρίων, αφού θέτουν διαφορετικές παραμέτρους-όρια υπεροχής ανά κριτήριο. Οι μέθοδοι Promethee είναι σχετικά απλές στο χειρισμό τους. Καλή είναι η απόκριση των υπόψη μεθόδων σε μεγάλο αριθμό εναλλακτικών, όπως και σε μεγάλο αριθμό κριτηρίων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ-6: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ GAIA ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις περισσότερες αξιολογήσεις συγκοινωνιακών έργων, οι διαφαινόμενες λύσεις είναι περισσότερες της μίας, επομένως είναι χρήσιμο η εν λόγω αξιολόγηση, να καταλήξει σε κάποιο εξαγόμενο σύγκρισης των λύσεων.

Για να συμπεριληφθούν όσο το δυνατό περισσότερα και ακριβέστερα ποσοτικά αρκετά κριτήρια σε μία αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μία από αυτές είναι η μέθοδος GAIA (Mareschal - Brans, 1988), η οποία εισήχθη υπό των Mareschal – Brans.

#### Συμβολισμοί

- Ai: Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.  
I: Πλήθος εναλλακτικών.  
Cj: Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.  
J: Πλήθος κριτηρίων.  
Φij: Αρχική (συνήθως φυσική) επίδοση της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.  
wj: Σχετικό βάρος του κριτηρίου Cj.  
Pij: Επίδοση ανηγμένη σε κοινή για όλα τα κριτήρια κλίμακα της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.  
Σj [...]: Άθροισμα ως προς το δείκτη j αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.  
δι: Προβολή δι επί του Άξονα Αξιολόγησης της εναλλακτικής λύσης Ai.  
δι,j: Συντεταγμένη της προβολής δι επί του Άξονα Αξιολόγησης της εναλλακτικής λύσης Ai ως προς το κριτήριο Cj.  
[Μέτρο δι]: Μέτρο της προβολής δι.

### 6.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ GAIA

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης. Ήτοι σε κάθε κριτήριο Cj δίδεται το αντίστοιχο σχετικό βάρος wj. Ο Άξονας ο οποίος έχει ως συνημίτονα κατεύθυνσης τα σχετικά βάρη wj, ονομάζεται Άξονας Αξιολόγησης.

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Για κάθε κριτήριο Cj και εναλλακτική λύση Ai ευρίσκεται η τεχνητή επίδοση Pij η οποία είναι ανηγμένη σε κοινή μεταξύ των κριτηρίων κλίμακα (π.χ. σε δεκαβάθμια κλίμακα). Εάν λοιπόν καταρχήν έχουμε τις φυσικές επιδόσεις Φij οι οποίες εκφράζονται σε διάφορες μεταξύ των κριτηρίων κλίμακες, ανάγονται στις τεχνητές επιδόσεις Pij.

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Υπολογίζονται οι συντεταγμένες δι,j των προβολών δι των εναλλακτικών λύσεων επί του Άξονα Αξιολόγησης, από τη σχέση:

$$di,j = w_j * P_{ij} \quad (6.1)$$

Οπότε:

$$di = [di,1, di,2, \dots, di,J] \quad (6.2)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται το μέτρο κάθε προβολής δι από τη σχέση:

$$[Μέτρο di] = \{ \sum_j [di,j^2] \}^{1/2} \quad (6.3)$$

Η κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων γίνεται ανάλογα του μεγέθους των μέτρων των προβολών τους, ήτοι όσο μεγαλύτερο το μέτρο της προβολής μίας εναλλακτικής τόσο καλύτερη η εναλλακτική αυτή.

### 6.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ GAIA

#### 6.3.1 Γενικά

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), (Bonifica-Doxiadis Associates-TECNIC, 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«A1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«A2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«A3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Αξιολογούνται για την ανάθεση του καλύτερου έργου, με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

«C1»: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

«C2»: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

«C3»: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Από ομάδα ειδημόνων (Τσαμπούλας, 1999) δόθηκαν τα εξής βάρη στα Κριτήρια (η  $w_x$  αντιστοιχεί στο κριτήριο  $K_x$ ):

$w_1 = 0,16$ ,  $w_2 = 0,54$ ,  $w_3 = 0,30$ .

(Παρατηρείται ότι  $\sum w_x = 1,00$ , δηλαδή οι βαρύτητες των κριτηρίων δίδονται σε κανονικοποιημένη μορφή.)

Από τα τρία κριτήρια, για αυτό της χρηματικής αποδοτικότητας δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR). Στο υπόψη κριτήριο, η εναλλακτική λύση A1 έχει τιμή 94%, η A2 τιμή 162% και η A3 τιμή 74%.

Για τα άλλα δύο κριτήρια υπάρχουν απλώς ποιοτικοί χαρακτηρισμοί για τις συνέπειες/επιδόσεις των υπό αξιολόγηση έργων.

Έτσι, για το περιβαλλοντικό κριτήριο, εκτιμήθηκε ότι τα έργα A1 και A3 θα έχουν περίπου τις ίδιες επιπτώσεις, ενώ το έργο A2 θα έχει αισθητά χειρότερες επιπτώσεις.

Για το κριτήριο της ποιότητας των προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών, εκτιμήθηκε ότι το έργο A1 θα έχει πολύ καλύτερη επιρροή από καθένα εκ των άλλων δύο έργων. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το A3 θα έχει καλύτερη σχετικά με το A2 επιρροή στο υπόψη κριτήριο.

#### 6.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου GAIA

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται η στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης. Ήτοι σε κάθε κριτήριο  $C_j$  δίδεται το αντίστοιχο σχετικό βάρος  $w_j$ . Ο Άξονας ο οποίος έχει ως συνημίτονα κατεύθυνσης τα σχετικά βάρη  $w_j$ , ονομάζεται Άξονας Αξιολόγησης.

Έστω λοιπόν ότι οι αποφασίζοντες δίδουν:  $w_1 = 0,16$ ,  $w_2 = 0,54$ ,  $w_3 = 0,30$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Για κάθε κριτήριο  $C_j$  και εναλλακτική λύση  $A_i$  ευρίσκεται η τεχνητή επίδοση  $P_{ij}$  η οποία είναι ανηγμένη σε κοινή μεταξύ των κριτηρίων κλίμακα (π.χ. σε δεκαβάθμια κλίμακα). Εάν λοιπόν καταρχήν έχουμε τις φυσικές επιδόσεις  $F_{ij}$  οι οποίες εκφράζονται σε διάφορες μεταξύ των κριτηρίων κλίμακες, ανάγονται στις τεχνητές επιδόσεις  $P_{ij}$ . Έστω ότι οι εν λόγω επιδόσεις έχουν ως εξής (όπου για το κριτήριο IRR θεωρείται στο 10 της τεχνητής κλίμακας η τιμή 200% και με γραμμική αναλογία προκύπτουν οι λοιπές τιμές):

Πίνακας 6.1: Επιδόσεις  $P_{ij}$  των Εναλλακτικών Λύσεων στα Κριτήρια Αξιολόγησης  
 Table 6.1: Performances  $P_{ij}$  of Alternatives in Evaluation Criteria

ΚΡΙΤΗΡΙΟ / ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΛΥΣΗ	«C1» : IRR	«C2» : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	«C3»: Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών
Λύση «Α1»	5	8	9
Λύση «Α2»	8	5	5
Λύση «Α3»	4	8	6

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Υπολογίζονται οι συντεταγμένες  $\delta_{i,j}$  των προβολών  $\delta_i$  των εναλλακτικών λύσεων επί του Άξονα Αξιολόγησης, από τη σχέση:

$$\delta_{i,j} = w_j * P_{ij}$$

Ήτοι:

$$\delta_{1,1} = w_1 * P_{1,1} = 0,16 * 5 = 0,80.$$

$$\delta_{1,2} = w_2 * P_{1,2} = 0,54 * 8 = 4,32.$$

$$\delta_{1,3} = w_3 * P_{1,3} = 0,30 * 9 = 2,70.$$

$$\delta_{2,1} = w_1 * P_{2,1} = 0,16 * 8 = 1,28.$$

$$\delta_{2,2} = w_2 * P_{2,2} = 0,54 * 5 = 2,70.$$

$$\delta_{2,3} = w_3 * P_{2,3} = 0,30 * 5 = 1,50.$$

$$\delta_{3,1} = w_1 * P_{3,1} = 0,16 * 4 = 0,64.$$

$$\delta_{3,2} = w_2 * P_{3,2} = 0,54 * 8 = 4,32.$$

$$\delta_{3,3} = w_3 * P_{3,3} = 0,30 * 6 = 1,80.$$

Οπότε, με βάση τη σχέση:

$$\delta_i = [\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{iJ}],$$

προκύπτουν:

$$\delta_1 = [0,80, 4,32, 2,70]$$

$$\delta_2 = [1,28, 2,70, 1,50]$$

$$\delta_3 = [0,64, 4,32, 1,80]$$

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Ευρίσκεται το μέτρο κάθε προβολής  $\delta_i$  από τη σχέση:

$$[\text{Μέτρο } \delta_i] = \{\sum_j [\delta_{i,j}^2]\}^{1/2}$$

Επομένως:

$$[\text{Μέτρο } \delta_1] = \{0,80^2 + 4,32^2 + 2,70^2\}^{1/2} = \{26,59\}^{1/2} = 5,1565.$$

$$[\text{Μέτρο } \delta_2] = \{1,28^2 + 2,70^2 + 1,50^2\}^{1/2} = \{11,18\}^{1/2} = 3,3437.$$

$$[\text{Μέτρο } \delta_3] = \{0,64^2 + 4,32^2 + 1,80^2\}^{1/2} = \{22,31\}^{1/2} = 4,7233.$$

Επομένως οι εναλλακτικές κατατάσσονται (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη) ως εξής:  
 Α1 – Α3 – Α2.

## 6.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ GAIA

### 6.4.1 Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (NAMA-Ευπαλίνος, 1995), (Nijkamp - Blaas, 1993), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), όπως:

- το σημαντικό **πλήθος εναλλακτικών λύσεων**, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω του πολυσχιδούς των οικονομικών θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό **πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό **πλήθος** και την εν δυνάμει σημαντική **ετερογένεια** των **αποφασιζόντων/αξιολογητών**, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκομένων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περιοίκων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την **ετερογένεια** των **κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά., όπου η υπόψη ετερογένεια των κριτηρίων, οπότε για τη μέτρησή τους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μεταξύ τους δείκτες και κλίμακες (:φυσικές, αριθμητικές, λεξικογραφικές κ.ά.),
- τη **δυσκολία ποσοτικής απόδοσης των επιδόσεων** των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, δεν μπορεί, παρά να αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι μία μέθοδος αξιολόγησης ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρεί τα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι και η αξιολόγηση άλλων τεχνικών έργων, που αναφέρονται στην ενέργεια ή στο περιβάλλον, παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων. Έτσι, θα μπορούσε να εξετασθεί και εκεί η εφαρμογή της μεθόδου GAIA.

Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση της μεθόδου GAIA σύμφωνα με τα εν λόγω χαρακτηριστικά.

### 6.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων

Η μέθοδος GAIA δεν παρουσιάζει πρόβλημα με το μεγάλο πλήθος των εναλλακτικών λύσεων, αφού λειτουργεί με απλές προβολές των εναλλακτικών λύσεων στον Άξονα Αξιολόγησης. η κύρια γεωμετρική της προσομοίωση αναφέρεται στα κριτήρια αξιολόγησης και όχι στις εν λόγω εναλλακτικές λύσεις.

### 6.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η βασική γεωμετρική προσομοίωση της μεθόδου GAIA αναφέρεται στα κριτήρια αξιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, όπως και στην μαθηματική και εννοιολογική παρουσίαση της μεθόδου αναπτύχθηκε, κάθε κριτήριο αξιολόγησης προσομοιώνεται με άξονα ενός γεωμετρικού ευκλείδειου χώρου, ενώ ο Άξονας Αξιολόγησης έχει ως συνημίτονα κατεύθυνσης τα σχετικά βάρη των κριτηρίων. Πάντως, επειδή η δόμηση των ποσοτήτων αξιολόγησης, όπως των προβολών δι<sub>j</sub> και δι, γίνεται απλά, δεν υπάρχει πρόβλημα πολυπλοκότητας ακόμη και με μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης.



#### **6.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Η μέθοδος GAIA, όπως προκύπτει από την προηγηθείσα ανάλυση, λειτουργεί με εισαγόμενα ποσοτικά, τόσο ως προς τα βάρη των κριτηρίων, όσο και ως προς τις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια. Οπότε, χρειάζεται προσεκτική επιλογή κρίσιμων κατάλληλων αποφάσεων, όπως αυτών που αφορούν στις τιμές των βαρών των κριτηρίων, καθώς και στην αντιστοίχιση φυσικών επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων σε τεχνητές. Στα πεδία αυτά μπορεί να γίνει και σύνθεση διαφόρων απόψεων αποφασιζόντων, άρα μπορεί να αντιμετωπισθεί ικανοποιητικά και η ενδεχόμενη ετερογένεια των αποφασιζόντων.

#### **6.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος GAIA χειρίζεται αρκετά καλά ετερογενή κριτήρια, αφού ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, ενδεχόμενες ετερογενείς αρχικές φυσικές κλίμακες τις ανάγει σε τεχνητές συμβατές μεταξύ τους κλίμακες (π.χ. ανάγει όλες τις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια σε δεκαβάθμιες κλίμακες).

#### **6.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Η μέθοδος GAIA χειρίζεται με ποσοτικό τρόπο τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Επομένως, μπορεί να αποδώσει με σχετική ακρίβεια τις ενδεχόμενες αρχικές πληροφορίες/δεδομένα. Χρειάζεται πάντως προσοχή κατά τη μετατροπή φυσικών κλιμάκων σε τεχνητές, ώστε να υπάρχει αξιοπιστία κατά την απόδοση και να μην χαθούν ή υποτιμηθούν στοιχεία.

### **6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η μέθοδος GAIA είναι μία μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η οποία στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη διανυσματική προσομοίωση των κριτηρίων αξιολόγησης. Στην υπόψη προσομοίωση κάθε κριτήριο επέχει θέση άξονα γεωμετρικού τόπου.

Επίσης, ορίζεται ο Άξονας Αξιολόγησης, ο οποίος έχει ως συνημίτονα κατεύθυνσης τα σχετικά βάρη των κριτηρίων.

Η υπόψη μέθοδος, μπορεί να εφαρμοσθεί με αρκετή επιτυχία σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, αφού η δομή της ανταποκρίνεται αρκετά ικανοποιητικά, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, στις συνθήκες των έργων αυτών, άρα και στις απαιτήσεις της αξιολόγησής τους. Σημειώνεται, ότι σε κάποιο βαθμό τα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων εμφανίζονται και σε άλλα τεχνικά έργα, όπως τα σχετικά με την ενέργεια ή με το περιβάλλον, επομένως δεν πρέπει να αποκλείεται ούτε η εκεί χρήση της μεθόδου. Αναλυτικότερα, η μέθοδος GAIA, ανταποκρίνεται αρκετά καλά σε μεγάλο πλήθος εναλλακτικών λύσεων, σε μεγάλο πλήθος και ετερογένεια αποφασιζόντων, ενώ παρουσιάζει σχετικά απλό αλγόριθμο εφαρμογής. Να σημειωθεί επίσης, ότι επειδή η μέθοδος λειτουργεί με ποσοτικά στοιχεία (σχετικά βάρη κριτηρίων, επιδόσεις εναλλακτικών στα κριτήρια), έχει τη δυνατότητα αξιοποίησης ποσοτικής πληροφορίας/δεδομένων, γεγονός που είναι υπέρ της ακρίβειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ-7: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ EVAMIX ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις περισσότερες αξιολογήσεις συγκοινωνιακών έργων, οι διαφαινόμενες λύσεις είναι περισσότερες της μίας, επομένως είναι χρήσιμο η εν λόγω αξιολόγηση, να καταλήξει σε κάποιο εξαγόμενο σύγκρισης των λύσεων.

Για να συμπεριληφθούν όσο το δυνατό περισσότερα και ακριβέστερα ποσοτικά κριτήρια σε μία αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μία από αυτές είναι η μέθοδος Evamix (Voogd, 1982), (Tsamboulas et al, 1999). Η μέθοδος πήρε το όνομά της από τμήματα των λέξεων **Evaluation Matrix**.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση δυνατοτήτων εφαρμογής της υπόψη μεθόδου σε πραγματικά προβλήματα πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων. Στο πλαίσιο αυτό δίδεται μαθηματική ανάπτυξη της μεθόδου, γίνεται ανάλυση του βαθμού απόκρισής της στα χαρακτηριστικά αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων (τα οποία σε κάποιο βαθμό εμπίπτουν και σε άλλα τεχνικά έργα) και παρατίθεται εφαρμογή της, η οποία και αξιολογείται.

#### Συμβολισμοί

$A_i$ :	Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.
$C_j$ :	Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.
$w_j$ :	Σχετικό βάρος του κριτηρίου $C_j$ .
$P_{i,j}$ :	Αρχική (μη κανονικοποιημένη) Επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$e_{i,j}$ :	Κανονικοποιημένη Επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$\text{sign}(e_{i,j}' - e_{i',j}')$ :	Πρόσημο της διαφοράς $(e_{i,j}' - e_{i',j}')$ .
$\max_i[\dots]$ :	Μέγιστο (max) ως προς το δείκτη $i$ αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.
$\sum_j [\dots]$ :	Άθροισμα ως προς το δείκτη $j$ αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.
$o_{i,i'}$ :	Ποιοτικός (από τη λέξη "ordinal") Δείκτης Υπεροχής της εναλλακτικής $A_i$ επί της εναλλακτικής $A_{i'}$ .
$c_{i,i'}$ :	Ποσοτικός (από τη λέξη "cardinal") Δείκτης Υπεροχής της εναλλακτικής $A_i$ επί της εναλλακτικής $A_{i'}$ .
$(o+c)_{i,i'}$ :	Μεικτός Δείκτης Υπεροχής της εναλλακτικής $A_i$ επί της εναλλακτικής $A_{i'}$ .
$(O+C)_i$ :	Γενικός Μεικτός Δείκτης της Εναλλακτικής $A_i$ .

### 7.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ EVAMIX

Τα βήματα του αλγορίθμου της μεθόδου αυτής έχουν ως εξής:

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται θεώρηση των εναλλακτικών λύσεων  $A_i$  και των κριτηρίων αξιολόγησης  $C_j$ . Γίνεται διαχωρισμός των κριτηρίων σε ποιοτικά και ποσοτικά. Δίδονται τα βάρη  $w_j$  στα κριτήρια.

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Η επίδοση της εναλλακτικής  $A_i$  στο κριτήριο  $C_j$  παρίσταται με  $P_{i,j}$  όταν είναι αρχική (μη κανονικοποιημένη) και με  $e_{i,j}$  όταν είναι κανονικοποιημένη. Ένας τρόπος κανονικοποίησης για τα ποσοτικά κριτήρια (τα  $C_j''$ ) είναι μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$e_{i,j}'' = P_{i,j}'' / \max_i [P_{i,j}''] \quad (7.1)$$

όπου  $\max_i [P_{i,j''}]$  η μέγιστη (βέλτιστη) επίδοση για το ποσοτικό κριτήριο  $C_{j''}$  μεταξύ των εναλλακτικών  $A_i$ .

Πινακοποιούνται οι ποσοτικές επιδόσεις και τίθενται σε διάταξη οι ποιοτικές.

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Υπολογίζονται ανά διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών λύσεων  $A_i - A_{i'}$  ο Ποιοτικός Δείκτης Υπεροχής και ο Ποσοτικός Δείκτης Υπεροχής, ήτοι οι:

$$o_{i,i'} = \sum_{j'} [w_{j'} * \text{sign}(e_{i,j'} - e_{i',j'})] \quad (7.2)$$

όπου  $\text{sign}(e_{i,j'} - e_{i',j'})$  το πρόσημο της διαφοράς  $(e_{i,j'} - e_{i',j'})$

και

$$c_{i,i'} = \sum_{j''} [w_{j''} * (e_{i,j''} - e_{i',j''})] \quad (7.3)$$

όπου αντιστοίχως οι  $j'$  και  $j''$  είναι ο δείκτης ποιοτικών και ο δείκτης ποσοτικών κριτηρίων.

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Ανά διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών, προστίθενται οι δύο δείκτες υπεροχής και σχηματίζεται ο Μεικτός Δείκτης Υπεροχής  $(o+c)_{i,i'}$ , από τη σχέση:

$$(o+c)_{i,i'} = o_{i,i'} + c_{i,i'} \quad (7.4)$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $A_i$  ευρίσκεται ο Γενικός Μεικτός Δείκτης Εναλλακτικής  $(O+C)_i$ , από τη σχέση:

$$(O+C)_i = \sum_{i'} (o+c)_{i,i'} \quad (7.5)$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Με βάση το Γενικό Μεικτό Δείκτη Εναλλακτικής κατατάσσεται κάθε εναλλακτική (όσο μεγαλύτερος είναι ο Γενικός Μεικτός Δείκτης Εναλλακτικής τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική).

### 7.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ EVAMIX

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Δίδονται τρεις εναλλακτικές:  $A_1, A_2, A_3$ .

Δίδονται πέντε κριτήρια αξιολόγησης, με τα αντίστοιχα βάρη τους:

- IRR (C1), με  $w_1 = 0,30$
- Μείωση Ανεργίας (C2), με  $w_2 = 0,30$
- Μείωση Ατυχημάτων (C3), με  $w_3 = 0,15$
- Περιβάλλον (C4), με  $w_4 = 0,15$
- Πολιτιστική συνεισφορά (C5), με  $w_5 = 0,10$

Τα ανωτέρω κριτήρια χωρίζονται σε ποιοτικά, ήτοι τα C4 και C5 και ποσοτικά, ήτοι τα C1, C2 και C3.

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Πινακοποιούνται οι αρχικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα ποσοτικά κριτήρια.

*Πίνακας 7.1: Αρχικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα ποσοτικά κριτήρια, ήτοι  $P_{ij''}$*

*Table 7.1: Initial performances of alternatives in quantitative criteria, that is  $P_{ij''}$*

	IRR (C1)	Μείωση Ανεργίας (C2)	Μείωση Ατυχημάτων (C3)
A1	11,5%	3,0%	6,5%
A2	8,0%	5,5%	10,0%
A3	7,0%	9,0%	5,0%

Κατόπιν, κανονικοποιούνται οι ανωτέρω επιδόσεις από τον τύπο:  $e_{i,j''} = P_{i,j''} / \max_i [P_{i,j''}]$ . Γίνεται πινακοποίηση και των κανονικοποιημένων επιδόσεων των εναλλακτικών στα ποσοτικά κριτήρια.

Πίνακας 7.2: Κανονικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα ποσοτικά κριτήρια, ήτοι  $e_{ij}''$   
 Table 7.2: Normalized performances of alternatives in quantitative criteria, that is  $e_{ij}''$

	IRR (C1)	Μείωση Ανεργίας (C2)	Μείωση Ατυχημάτων (C3)
A1	1	0,33	0,65
A2	0,70	0,61	1
A3	0,61	1	0,50

Για τα ποιοτικά κριτήρια, ήτοι τα C4, C5, διατάσσονται οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων.

Αφού τα κριτήρια αυτά είναι ποιοτικά, δεν γνωρίζουμε ακριβώς τις τιμές των επιδόσεών τους  $P_{i,j}'$  και κατά συνέπεια ούτε τις τιμές των κανονικοποιημένων επιδόσεών τους  $e_{i,j}'$ . Όμως, έχουμε και για αυτά τα κριτήρια την εικόνα της διάταξης των επιδόσεων των εναλλακτικών.

Έστω λοιπόν ότι:

για το Κριτήριο Περιβάλλον (C4):

$$e_{1,4} > e_{2,4} > e_{3,4}$$

και

για το Κριτήριο Πολιτιστική συνεισφορά (C5):

$$e_{3,5} > e_{2,5} > e_{1,5}$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Υπολογίζονται ανά διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών λύσεων  $A_i - A_i'$  ο Ποιοτικός Δείκτης Υπεροχής και ο Ποσοτικός Δείκτης Υπεροχής, ήτοι οι:

$$o_{i,i'} = \sum_j' [w_j' * \text{sign}(e_{i,j}' - e_{i',j}')] ]$$

όπου  $\text{sign}(e_{i,j}' - e_{i',j}')$  το πρόσημο της διαφοράς  $(e_{i,j}' - e_{i',j}')$

και

$$c_{i,i'} = \sum_j'' [w_j'' * (e_{i,j}'' - e_{i',j}'')] ]$$

όπου αντιστοίχως οι  $j'$  και  $j''$  είναι ο δείκτης ποιοτικών και ο δείκτης ποσοτικών κριτηρίων.

Έχουμε λοιπόν ανά διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών:

A1-A2:

$$o_{1,2} = w_4 * [\text{sign}(e_{1,4} - e_{2,4})] + w_5 * [\text{sign}(e_{1,5} - e_{2,5})] = + 0,15 * (+1) + 0,10 * (-1) = +0,05.$$

$$c_{1,2} = w_1*(e_{1,1} - e_{2,1}) + w_2*(e_{1,2} - e_{2,2}) + w_3*(e_{1,3} - e_{2,3}) = 0,30*(1,00-0,70) + 0,30*(0,33-0,61) + 0,15*(0,65-1) = -0,05.$$

A2-A1:

$$o_{2,1} = w_4 * [\text{sign}(e_{2,4} - e_{1,4})] + w_5 * [\text{sign}(e_{2,5} - e_{1,5})] = + 0,15 * (-1) + 0,10 * (+1) = - 0,05.$$

$$c_{2,1} = w_1*(e_{2,1} - e_{1,1}) + w_2*(e_{2,2} - e_{1,2}) + w_3*(e_{2,3} - e_{1,3}) = 0,30*(0,70-1) + 0,30*(0,61-0,33) + 0,15*(1-0,65) = +0,05.$$

A1-A3:

$$o_{1,3} = w_4 * [\text{sign}(e_{1,4} - e_{3,4})] + w_5 * [\text{sign}(e_{1,5} - e_{3,5})] = 0,15*(+1) + 0,10 * (-1) = +0,05.$$

$$c_{1,3} = w_1*(e_{1,1} - e_{3,1}) + w_2*(e_{1,2} - e_{3,2}) + w_3*(e_{1,3} - e_{3,3}) = 0,30*(1-0,61) + 0,30*(0,33-1) + 0,15*(0,65-0,50) = -0,06.$$

A3-A1:

$$o_{3,1} = w_4 * [\text{sign}(e_{3,4} - e_{1,4})] + w_5 * [\text{sign}(e_{3,5} - e_{1,5})] = 0,15*(-1) + 0,10 * (+1) = -0,05.$$

$$c_{3,1} = w1*(e3,1 - e1,1) + w2*(e3,2 - e1,2) + w3*(e3,3 - e1,3) = 0,30*(0,61-1) + 0,30*(1-0,33) + 0,15*(0,50-0,65) = +0,06.$$

A2-A3:

$$o_{2,3} = w4 * [\text{sign}(e2,4 - e3,4)] + w5 * [\text{sign}(e2,5 - e3,5)] = 0,15*(+1) + 0,10*(-1) = +0,05.$$

$$c_{2,3} = w1*(e2,1 - e3,1) + w2*(e2,2 - e3,2) + w3*(e2,3 - e3,3) = 0,30*(0,70-0,61) + 0,30*(0,61-1) + 0,15*(1-0,50) = -0,02.$$

A3-A2:

$$o_{3,2} = w4 * [\text{sign}(e3,4 - e2,4)] + w5 * [\text{sign}(e3,5 - e2,5)] = 0,15*(-1) + 0,10*(+1) = -0,05.$$

$$c_{3,2} = w1*(e3,1 - e2,1) + w2*(e3,2 - e2,2) + w3*(e3,3 - e2,3) = 0,30*(0,61-0,70) + 0,30*(1-0,61) + 0,15*(0,50-1) = +0,02.$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Ανά διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών, προστίθενται οι δύο δείκτες υπεροχής και σχηματίζεται ο Μεικτός Δείκτης Υπεροχής  $(o+c)_{i,i'}$ , από τη σχέση:

$$(o+c)_{i,i'} = o_{i,i'} + c_{i,i'}$$

Οπότε:

A1-A2:

$$(o+c)_{1,2} = o_{1,2} + c_{1,2} = +0,05 + (-0,05) = 0.$$

A2-A1:

$$(o+c)_{2,1} = o_{2,1} + c_{2,1} = +(-0,05) + 0,05 = 0.$$

A1-A3:

$$(o+c)_{1,3} = o_{1,3} + c_{1,3} = +0,05 + (-0,06) = -0,01.$$

A3-A1:

$$(o+c)_{3,1} = o_{3,1} + c_{3,1} = +(-0,05) + 0,06 = +0,01.$$

A2-A3:

$$(o+c)_{2,3} = o_{2,3} + c_{2,3} = +0,05 + (-0,02) = +0,03.$$

A3-A2:

$$(o+c)_{3,2} = o_{3,2} + c_{3,2} = +(-0,05) + 0,02 = -0,03.$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $A_i$  ευρίσκεται ο Γενικός Μεικτός Δείκτης Εναλλακτικής  $(O+C)_i$ , από τη σχέση:

$$(O+C)_i = \sum_{i'} (o+c)_{i,i'}$$

Οπότε:

A1:

$$(O+C)_1 = \sum_{i'} (o+c)_{1,i'} = 0 + (-0,01) = -0,01.$$

A2:

$$(O+C)_2 = \sum_{i'} (o+c)_{2,i'} = 0 + (+0,03) = +0,03.$$

A3:

$$(O+C)_3 = \sum_{i'} (o+c)_{3,i'} = +(+0,01) + (-0,03) = -0,02.$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Με βάση το Γενικό Μεικτό Δείκτη Εναλλακτικής κατατάσσεται κάθε εναλλακτική (όσο μεγαλύτερος είναι ο Γενικός Μεικτός Δείκτης Εναλλακτικής τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική).

Οπότε, αφού  $(O+C)_2 > (O+C)_1 > (O+C)_3$ ,

Η σειρά κατάταξης των εναλλακτικών (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη) έχει ως εξής:

## 7.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ EVAMIX

### 7.4.1 Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), (Αμπακούμκιν, 1990), (Nijkamp - Blaas, 1993), όπως:

- το σημαντικό **πλήθος εναλλακτικών λύσεων**, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω του πολυσχιδούς των οικονομικών θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό **πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό **πλήθος** και την εν δυνάμει σημαντική **ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών**, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκομένων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περιοίκων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την **ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά., όπου η υπόψη ετερογένεια των κριτηρίων, οπότε για τη μέτρησή τους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μεταξύ τους δείκτες και κλίμακες (:φυσικές, αριθμητικές, λεξικογραφικές κ.ά.),
- τη **δυσκολία ποσοτικής απόδοσης των επιδόσεων** των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, δεν μπορεί, παρά να αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι μία μέθοδος αξιολόγησης ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρεί τα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι και η αξιολόγηση άλλων τεχνικών έργων, που αναφέρονται στην ενέργεια ή στο περιβάλλον, παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων. Έτσι, θα μπορούσε να εξετασθεί και εκεί η εφαρμογή της μεθόδου Evamix.

Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση της μεθόδου Evamix σύμφωνα με τα εν λόγω χαρακτηριστικά.

### 7.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων

Η μέθοδος Evamix επειδή χειρίζεται καταρχήν με κατά ζεύγη θεωρήσεις τις εναλλακτικές, οδηγείται σε περισσότερους υπολογισμούς με την αύξηση του αριθμού των εναλλακτικών. Παρόλα αυτά όμως, δεν παρουσιάζει πρόβλημα εποπτείας και σαφήνειας, αφού στο τελικό της στάδιο υπερθέτει τους κατά ζεύγη εναλλακτικών χειρισμούς σε συνολικούς χειρισμούς.

### 7.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης

Η Evamix μπορεί να χειρισθεί με απλότητα και αποτελεσματικότητα μεγάλο αριθμό κριτηρίων, αφού έχει απλούς υπολογιστικούς χειρισμούς ενσωμάτωσης των κριτηρίων. Επειδή μάλιστα καταλήγει σε μέθοδο αθροιστικής δομής έχει και καλή εποπτεία κατά την ενσωμάτωση πολλών κριτηρίων αξιολόγησης.

#### **7.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Η μέθοδος Evamix, όπως προκύπτει από την προηγηθείσα ανάλυση, λειτουργεί με ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών, ενώ ως προς τα βάρη των κριτηρίων, λειτουργεί με ποσοτικά στοιχεία. Λόγω της ευελιξίας των χειρισμών της, ήτοι χειρισμοί ποιοτικών και ποσοτικών στοιχείων, η Evamix επιτρέπει τη σύνθεση διαφορετικών απόψεων, οπότε επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων μεγάλου πλήθους ή και ετερογενών αποφασιζόντων.

#### **7.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος Evamix χειρίζεται αρκετά καλά ετερογενή κριτήρια, αφού ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, μπορεί να χειρίζεται τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά δεδομένα. Επίσης, ιδιαίτερα για ετερογενείς ποσοτικές κλίμακες, μπορεί να επιτύχει ικανοποιητικό χειρισμό, αφού χρησιμοποιεί την κανονικοποίηση των επιδόσεων, υπερκερνώντας έτσι την ετερογένεια των κλιμάκων των κριτηρίων.

#### **7.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Η μέθοδος Evamix χειρίζεται αρκετά καλά τόσο ποσοτικές όσο και ποιοτικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Αυτό μάλιστα είναι το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου. Όπως είδαμε στην μαθηματική και εννοιολογική ανάλυση της μεθόδου, ενεργοποιούνται δύο ξεχωριστοί καταρχήν δείκτες υπεροχής στις κατά ζεύγη εναλλακτικών θεωρήσεις: ο ποιοτικός για τα ποιοτικά κριτήρια και ο ποσοτικός για τα ποσοτικά κριτήρια.

### **7.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η μέθοδος Evamix χειρίζεται εξίσου καλά τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά δεδομένα όσον αφορά στις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης. Παρά το ότι αρχικώς διαχωρίζει τα ποιοτικά από τα ποσοτικά κριτήρια αξιολόγησης, στη συνέχεια κατορθώνει να ενσωματώσει και τα μεν και τα δε και μάλιστα με απλούς χειρισμούς και αξιοπιστία. Ως προς τα σχετικά βάρη των κριτηρίων, απαιτεί ποσοτικά στοιχεία. Είναι καλή η απόκριση της μεθόδου σε μεγάλο πλήθος εναλλακτικών, όπως και σε μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης. Με βάση όλα αυτά, γίνεται σαφές ότι μεταξύ άλλων, μπορεί να εφαρμοσθεί και σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ-8: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

### **8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ**

Στις περισσότερες αξιολογήσεις συγκοινωνιακών έργων, οι διαφαινόμενες λύσεις είναι περισσότερες της μίας, επομένως είναι χρήσιμο η εν λόγω αξιολόγηση, να καταλήξει σε κάποιο εξαγόμενο σύγκρισης των λύσεων.

Για να συμπεριληφθούν όσο το δυνατό περισσότερα καλύτερα ακριβέστερα ποσοτικά κριτήρια σε μία αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μία από αυτές είναι η μέθοδος Oreste, η οποία εισήχθη υπό του Roubens (Roubens, 1982).

#### **Συμβολισμοί**

- Ai: Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.
- I: Πλήθος εναλλακτικών.
- Cj: Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.
- J: Πλήθος κριτηρίων.
- Φij: Αρχική (συνήθως φυσική) επίδοση της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.
- λj: Σχετική βαρύτητα του κριτηρίου Cj.
- Λj: Αντίστοιχος τακτικός αριθμός της σχετικής βαρύτητας λj του κριτηρίου Cj.
- Pij: Επίδοση Διάταξης της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.
- Σj [...]: Άθροισμα ως προς το δείκτη j αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.
- a: Παράμετρος συγκερασμού ανά κριτήριο επιδόσεων εναλλακτικών και βαρυτήτων κριτηρίων.
- Ψ\*ij: Μη ανηγμένη τελική επίδοση της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.
- Ψij: Ανηγμένη τελική επίδοση της εναλλακτικής Ai στο κριτήριο Cj.
- Ψi: Ανηγμένη τελική ολική επίδοση της εναλλακτικής Ai.
- DOi i': Δείκτης ασυμφωνίας για το διατεταγμένο ζεύγος Ai, Ai' εναλλακτικών.
- cOii': Ανηγμένος δείκτης συμφωνίας.
- dOii': Ανηγμένος δείκτης ασυμφωνίας.
- cl: Όριο Ανηγμένης συμφωνίας.
- dl: Όριο Ανηγμένης ασυμφωνίας.

### **8.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE**

#### **8.2.1 Γενικά**

Η πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης Oreste (Roubens, 1982), (Pastijn - Leysen, 1989), (Givescu, 2007) αξιοποιεί και προϋποθέτει για τη λειτουργία της τα ακόλουθα:

- Απλή ποιοτική ιεράρχηση των κριτηρίων,
- Απλή ποιοτική ιεράρχηση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών.

Η έννοια «ποιοτική ιεράρχηση» ως προς τα κριτήρια, σημαίνει ότι αρχικά χρειάζεται απλά η ποιοτική πληροφορία εάν κάποιο κριτήριο είναι σημαντικότερο από κάποιο άλλο και δεν απαιτείται η ποσοτική πληροφορία πόσο σημαντικότερο είναι.

Παρόμοια, η έννοια «ποιοτική ιεράρχηση» ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών, σημαίνει ότι αρχικά χρειάζεται απλά η ποιοτική πληροφορία εάν κάποια εναλλακτική είναι καλύτερη από κάποια άλλη σε κάποιο κριτήριο και δεν απαιτείται η ποσοτική πληροφορία πόσο καλύτερη είναι.



## 8.2.2 Αλγόριθμος και εννοιολογικές αρχές της μεθόδου

*Βήμα 1<sup>ο</sup>:* Από τις αρχικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών, οι οποίες εκφράζονται συνήθως στις φυσικές κλίμακες των κριτηρίων (οι εν λόγω επιδόσεις μπορούν να συμβολισθούν με  $\Phi_{ij}$ ) ευρίσκονται οι αριθμοί διάταξης  $P_{ij}$ . Οι εν λόγω αριθμοί διατάσσουν τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων και αντανακλούν την προαναφερόμενη ποιοτική ιεράρχηση αυτών. Οι υπόψη αριθμοί χαρακτηρίζονται «τακτικοί», όπου, ο χαρακτηρισμός αυτός αποδίδει το ποιοτικό στοιχείο της προαναφερθείσας ιεράρχησης.

Εάν για παράδειγμα αξιολογούνται τρεις εναλλακτικές, τότε, στην περίπτωση που στο κριτήριο  $C_j$  δεν παρατηρείται κάποια ισοδυναμία επιδόσεων των εναλλακτικών, οι αριθμοί διάταξης  $P_{ij}$  λαμβάνουν τις τιμές 1, 2, 3. Στην περίπτωση ισοδυναμίας των δύο καλύτερων στο υπόψη κριτήριο λύσεων, οι αριθμοί διάταξης λαμβάνουν τις τιμές 2, 2, 1.

Ευρίσκοντας για όλα τα κριτήρια και για όλες τις εναλλακτικές, τους αριθμούς διάταξης  $P_{ij}$ , σχηματίζεται ο αντίστοιχος πίνακας.

*Βήμα 2<sup>ο</sup>:* Γίνεται ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης. Η ιεράρχηση είναι μία απλή ποιοτική διάταξη, δηλαδή εκφράζεται με ακολουθία ανισοτήτων του τύπου:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_j \geq \dots \geq \lambda_J \quad (8.1)$$

όπου  $\lambda_j$  η σχετική βαρύτητα του κριτηρίου  $C_j$ .

(Βέβαια, πάντα ισχύει η συνθήκη κανονικότητας των βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης, δηλαδή:  $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j + \dots + \lambda_J = 1,00$ .)

Από την προαναφερθείσα διάταξη, προκύπτει μία αντιστοίχιση των βαρών των κριτηρίων με διαδοχικούς τακτικούς αριθμούς, όπου η βαρύτητα  $\lambda_j$ , αντιστοιχίζεται στον αριθμό  $\Lambda_j$ . Για παράδειγμα, για τρία κριτήρια, η αντιστοίχιση που λαμβάνει χώρα είναι η:

$$\lambda_1 \rightarrow 3, \lambda_2 \rightarrow 2, \lambda_3 \rightarrow 1, \text{ δηλαδή: } \Lambda_1=3, \Lambda_2=2, \Lambda_3=1.$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>:* Η τελική επίδοση κάθε εναλλακτικής  $A_i$  σε ένα κριτήριο  $C_j$ , δίδεται ως μία γραμμική συνάρτηση του αριθμού διάταξης των επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων στο υπόψη κριτήριο, ήτοι του  $P_{ij}$  και του αριθμού  $\Lambda_j$  διάταξης των κριτηρίων αξιολόγησης. Η τελική αυτή επίδοση καταρχήν μπορεί να παρασταθεί με  $\Psi^*_{ij}$  και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Psi^*_{ij} = \alpha * P_{ij} + (1-\alpha) * \Lambda_j \quad (8.2)$$

όπου:

$\alpha$ : παράμετρος, η οποία ανήκει στην περιοχή τιμών  $[0,1]$  και ονομάζεται παράμετρος συγκερασμού ανά κριτήριο επιδόσεων εναλλακτικών και βαρυτήτων κριτηρίων.

Γίνεται σαφές ότι όσο η  $\alpha$  πλησιάζει την τιμή 1, τόσο ενισχύεται η επιρροή της διατεταγμένης ανά κριτήριο επίδοσης, ήτοι της  $P_{ij}$ , ενώ όσο η  $\alpha$  πλησιάζει προς την τιμή 0, τόσο ενισχύεται η επιρροή της διάταξης του κριτηρίου, ήτοι η  $\Lambda_j$ . Συχνά, όπως θα φανεί και σε παραδείγματα, αρκεί η επιλογή μίας υποπεριοχής τιμών της περιοχής  $[0,1]$  για την παράμετρο  $\alpha$  και δεν απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός της σε μία συγκεκριμένη τιμή. Η επιλογή της εν λόγω υποπεριοχής, συνιστά και την ολοκλήρωση του παρόντος βήματος της Oreste. Τονίζεται ότι ο διαμερισμός της περιοχής  $[0,1]$  σε υποπεριοχές, γίνεται έτσι για κάθε πρόβλημα αξιολόγησης, ώστε από την επιλογή μίας εξ'αυτών να προκύπτει μονοσήμαντα μία αυστηρή διάταξη των  $\Psi^*_{ij}$ , που προκύπτουν από τις τιμές των  $P_{ij}$  και  $\Lambda_j$ .

*Βήμα 4<sup>ο</sup>:* Με δεδομένη πλέον την υποπεριοχή τιμών που ανήκει η παράμετρος  $\alpha$ , μορφώνεται η διάταξη των  $\Psi^*_{ij}$ . Η διάταξη αυτή αντιστοιχίζεται σε διαδοχικούς φυσικούς αριθμούς, όπου ο μικρότερος είναι η μονάδα, όπου αντιστοιχεί και ο μικρότερος από τους  $\Psi^*_{ij}$ . Ο αμέσως μεγαλύτερος αντιστοιχεί στον ακέραιο δύο, ο επόμενος στον τρία και ούτω καθεξής.

Οι εν λόγω φυσικοί αριθμοί μπορούν να παρασταθούν με  $\Psi_{ij}$  και να ονομαστούν ανηγμένες τελικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών.

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $A_i$ , υπολογίζεται η ανηγμένη τελική ολική επίδοσή της, ήτοι η  $\Psi_i$ , αθροίζοντας τις ανά κριτήριο ανηγμένες τελικές επιδόσεις της υπόψη εναλλακτικής, δηλαδή αθροίζοντας τις  $\Psi_{ij}$ . Επομένως:

$$\Psi_i = \sum_j [\Psi_{ij}]. \quad (8.3)$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Θεωρείται κάθε διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $A_i$  και  $A_i'$  και ορίζεται ο «Δείκτης ασυμφωνίας»  $DO_{ii'}$ , όπου:

$$DO_{ii'} = \sum [( \Psi_i' - \Psi_{ij} ) : \Psi_i' - \Psi_{ij} > 0 ]. \quad (8.4)$$

Ήτοι, ο  $DO_{ii'}$  ισούται με το άθροισμα των διαφορών  $\Psi_i' - \Psi_{ij}$  για τα  $C_j$  εκείνα που οι υπόψη διαφορές είναι θετικές. Δηλαδή ο δείκτης ασυμφωνίας  $DO_{ii'}$  είναι το άθροισμα των υστερήσεων των ανά κριτήριο ανηγμένων τελικών επιδόσεων της εναλλακτικής  $A_i$  έναντι της εναλλακτικής  $A_i'$ .

Πρακτικά, υπολογίζονται μόνον εκείνοι οι δείκτες ασυμφωνίας  $DO_{ii'}$  για τα διατεταγμένα ζεύγη εναλλακτικών που ισχύει  $\Psi_i > \Psi_i'$ . Εάν δεν ισχύει η υπόψη σχέση, αποκλείεται η υπεροχή της  $A_i$  επί της  $A_i'$ , επομένως, δεν έχει πρακτική σημασία ο υπολογισμός του  $DO_{ii'}$  και ο περαιτέρω έλεγχος για εν δυνάμει υπεροχή (της  $A_i$  επί της  $A_i'$ ).

*Βήμα 7<sup>ο</sup>*: Ορίζονται και υπολογίζονται για τα προαναφερόμενα ζεύγη (με  $\Psi_i > \Psi_i'$ ), ο «Ανηγμένος Δείκτης Συμφωνίας»  $cO_{ii'}$  και ο «Ανηγμένος Δείκτης Ασυμφωνίας»  $dO_{ii'}$ , όπου:

$$cO_{ii'} = (\Psi_i - \Psi_i') / [J^2 (I-1)] \quad (8.5)$$

(όπου  $J$  και  $I$  αντιστοίχως πλήθος κριτηρίων και εναλλακτικών), και

$$dO_{ii'} = DO_{ii'} / (\Psi_i - \Psi_i'). \quad (8.6)$$

*Βήμα 8<sup>ο</sup>*: Ο δείκτης ανηγμένης συμφωνίας  $cO_{ii'}$  και ο δείκτης ανηγμένης ασυμφωνίας  $dO_{ii'}$  συγκρίνονται αντίστοιχα με το «Όριο Ανηγμένης Συμφωνίας»  $c_l$  και το «Όριο Ανηγμένης Ασυμφωνίας»  $d_l$ , όπου τα όρια αυτά είναι θετικές ποσότητες, οι οποίες ορίζονται από τους χρήστες της μεθόδου.

Για να ισχύει τελικά σχέση υπεροχής της  $A_i$  επί της  $A_i'$ , πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα οι ακόλουθες δύο σχέσεις:

$$cO_{ii'} > c_l \quad (8.7)$$

$$dO_{ii'} \leq d_l. \quad (8.8)$$

*Βήμα 9<sup>ο</sup>*: Αφού ευρεθούν όλες οι τελικά ισχύουσες σχέσεις υπεροχής στις κατά ζεύγη των εναλλακτικών συγκρίσεις, είναι δυνατή η τελική κατάταξη των εναλλακτικών.

## 8.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE

### 8.3.1 Γενικά

Δίδονται τρεις εναλλακτικές:  $A_1, A_2, A_3$ , οι οποίες παρουσιάζουν τις εξής αρχικές (φυσικές) επιδόσεις στα ακόλουθα κριτήρια:

Πίνακας 8.1: Φυσικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια, ήτοι  $\Phi_{ij}$ .

Table 8.1: Physical per criterion performances of alternatives, that is  $\Phi_{ij}$ .

	IRR	Μείωση Ανεργίας	Μείωση Ατυχημάτων
A1	11,5%	3,0%	6,5%
A2	8,0%	5,5%	10,0%
A3	7,0%	9,0%	5,0%

### 8.3.2 Εφαρμογή των βημάτων του αλγορίθμου της μεθόδου Oreste

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Από τον πίνακα των φυσικών επιδόσεων  $\Phi_{ij}$  εφίσκονται οι επιδόσεις διάταξης  $P_{ij}$ . Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τους αριθμούς διάταξης της εφαρμογής της μεθόδου Oreste στο υπόψη παράδειγμα.

Πίνακας 8.2: Επιδόσεις Διάταξης  $P_{ij}$ .

Table 8.2: Ordinal Performances  $P_{ij}$ .

	IRR (C1)	Μείωση Ανεργίας (C2)	Μείωση Ατυχημάτων (C3)
A1	3	1	2
A2	2	2	3
A3	1	3	1

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Ιεραρχούνται τα προαναφερόμενα κριτήρια. Η ιεράρχηση αποδίδεται με την ακόλουθη διάταξη των αντιστοιχών σχετικών βαρυτήτων τους:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3,$$

ήτοι: C1 σπουδαιότερο του C2 σπουδαιότερο του C3,

δηλαδή: IRR σπουδαιότερο της Μείωσης Ανεργίας σπουδαιότερο της Μείωσης Ατυχημάτων.

Επομένως, οι αντίστοιχοι των βαρυτήτων των κριτηρίων αριθμοί έχουν ως εξής:

$$\Lambda_1=3, \Lambda_2=2, \Lambda_3=1.$$

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Μορφώνονται οι μη ανηγμένες τελικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια, με βάση την προαναφερθείσα σχέση:  $\Psi^*_{ij} = \alpha * P_{ij} + (1-\alpha) * \Lambda_j$ .

Πίνακας 8.3: Μη ανηγμένες τελικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια, ήτοι  $\Psi^*_{ij}$ .

Table 8.3: Non converted final partial performances of alternatives, that is  $\Psi^*_{ij}$ .

	IRR (C1)	Μείωση Ανεργίας (C2)	Μείωση Ατυχημάτων (C3)
A1	3	2- $\alpha$	1+ $\alpha$
A2	3- $\alpha$	2	1+2 $\alpha$
A3	3-2 $\alpha$	2+ $\alpha$	1

Ακολούθως, επιλέγεται υποπεριοχή της περιοχής τιμών [0,1], στην οποία ανήκει η παράμετρος  $\alpha$ .

Εδώ επιλέγεται η υποπεριοχή (2/3, 1), δηλαδή επιλέγεται:

$$1 > \alpha > 2/3.$$

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Εφίσκονται οι ανηγμένες τελικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια:

Πίνακας 8.4: Ανηγμένες τελικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια, ήτοι  $\Psi_{ij}$ .

Table 8.4: Converted final partial performances of alternatives, that is  $\Psi_{ij}$ .

	IRR (C1)	Μείωση Ανεργίας (C2)	Μείωση Ατυχημάτων (C3)
A1	9	2	4
A2	6	5	7
A3	3	8	1

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $A_i$ , υπολογίζεται η ανηγμένη τελική ολική επίδοσή της, ήτοι η  $\Psi_i$ , από τη σχέση:  $\Psi_i = \sum_j [\Psi_{ij}]$ . Επομένως:

$$\Psi_1 = 9+2+4 = 15,$$

$$\Psi_2 = 6+5+7 = 18,$$

$$\Psi_3 = 3+8+1 = 12.$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Θεωρείται κάθε διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $A_i$  και  $A_i'$  και ορίζεται ο δείκτης ασυμφωνίας  $DO_{ii'}$ , όπου:  $DO_{ii'} = \sum_j [(\Psi_i'j - \Psi_{ij}) : \Psi_i'j - \Psi_{ij} > 0]$ . Πρακτικά, υπολογίζονται μόνον εκείνοι οι δείκτες ασυμφωνίας  $DO_{ii'}$  για τα διατεταγμένα ζεύγη εναλλακτικών που ισχύει  $\Psi_i > \Psi_i'$ . Επομένως, υπολογίζονται οι εξής δείκτες ασυμφωνίας:

$$DO_{2,1} = (9-6) = 3,$$

$$DO_{1,3} = (8-2) = 6,$$

$$DO_{2,3} = (8-5) = 3.$$

*Βήμα 7<sup>ο</sup>*: Υπολογίζονται για τα προαναφερόμενα ζεύγη (με  $\Psi_i > \Psi_i'$ ), ο Ανηγμένος Δείκτης Συμφωνίας  $cO_{ii'}$  και ο Ανηγμένος Δείκτης Ασυμφωνίας  $dO_{ii'}$ , όπου:  $cO_{ii'} = (\Psi_i - \Psi_i') / [J^2 (I-1)]$  και  $dO_{ii'} = DO_{ii'} / (\Psi_i - \Psi_i')$ .

*Πίνακας 8.5: Ανηγμένοι δείκτες συμφωνίας ( $cO_{ii'}$ ) και ασυμφωνίας ( $dO_{ii'}$ ).*

*Table 8.5: Converted indicators of concordance ( $cO_{ii'}$ ) and discordance ( $dO_{ii'}$ ).*

	$cO_{ii'}$ (Ανηγμένοι δείκτες συμφωνίας)	$dO_{ii'}$ (Ανηγμένοι δείκτες ασυμφωνίας)
$A_2 \rightarrow A_1$	0,167	1,000
$A_1 \rightarrow A_3$	0,167	2,000
$A_2 \rightarrow A_3$	0,333	0,500

*Βήμα 8<sup>ο</sup>*: Καθορίζονται το όριο ανηγμένης συμφωνίας  $c_l$  και το όριο ανηγμένης ασυμφωνίας  $d_l$ . Συγκεκριμένα:  $cO_{ii'} = 0,150$  και  $dO_{ii'} = 2,000$ .

Ακολουθώντας εξετάζεται η συναλήθευση των σχέσεων:

$$cO_{ii'} > c_l \text{ και } dO_{ii'} \leq d_l.$$

Δηλαδή:

$$cO_{21} = 0,167 > 0,150 = c_l \text{ και } dO_{21} = 1,000 \leq 2,000 = d_l,$$

$$cO_{13} = 0,167 > 0,150 = c_l \text{ και } dO_{13} = 2,000 \leq 2,000 = d_l,$$

$$cO_{23} = 0,333 > 0,150 = c_l \text{ και } dO_{23} = 0,500 \leq 2,000 = d_l.$$

Επομένως, ισχύουν και οι τρεις διαφαινόμενες από πριν σχέσεις υπεροχής, δηλαδή οι:

$$A_2 \rightarrow A_1, A_1 \rightarrow A_3, A_2 \rightarrow A_3.$$

*Βήμα 9<sup>ο</sup>*: Αφού ευρέθησαν όλες οι τελικά ισχύουσες σχέσεις υπεροχής στις κατά ζεύγη των εναλλακτικών συγκρίσεις, είναι δυνατή η τελική κατάταξη των εναλλακτικών. Η εν λόγω κατάταξη έχει ως εξής (από τη βέλτιστη έως και τη χειρίστη εναλλακτική):

$$A_2, A_1, A_3.$$

## 8.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ORESTE

### 8.4.1 Ιδιαιτερότητες αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (Tsamboulas D. - Yiotis G. - Panou K., 1999), (Nijkamp - Blaas, 1993), (Αμπακούμκιν, 1990), όπως:

- το σημαντικό **πλήθος εναλλακτικών λύσεων**, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των

συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω οικονομικά πολυσήμαντων θεωρήσεων των υπόψη έργων,

- το σημαντικό **πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό **πλήθος** και την εν δυνάμει σημαντική **ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών**, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκομένων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περιοίκων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την **ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά.,
- τη **δυσκολία ποσοτικής απόδοσης των επιδόσεων** των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, δεν μπορεί, παρά να αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι για την αξιολόγηση ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρούνται τα χαρακτηριστικά τους. Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση της μεθόδου Oreste σύμφωνα με αυτά τα χαρακτηριστικά.

#### **8.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογουμένων λύσεων**

Η μέθοδος Oreste, λόγω του ότι λειτουργεί με κατά ζεύγη συγκρίσεις, παρουσιάζει κάποια αυξημένη πολυπλοκότητα στις περιπτώσεις μεγάλου αριθμού εναλλακτικών λύσεων. Το μόνο σημείο που χρειάζεται προσοχή σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού εναλλακτικών, είναι ο προσδιορισμός της ποσότητας  $\alpha$ , διότι με το σημαντικό πλήθος των εναλλακτικών αυξάνονται οι υποπεριοχές τιμών της παραμέτρου  $\alpha$  εντός της ευρύτερης περιοχής  $[0,1]$ .

#### **8.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης**

Η Oreste δεν επηρεάζεται σημαντικά στην πολυπλοκότητα των υπολογισμών της από τον αριθμό των κριτηρίων αξιολόγησης. Το μόνο σημείο που χρειάζεται προσοχή σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού κριτηρίων, είναι ο προσδιορισμός της ποσότητας  $\alpha$ , διότι με το σημαντικό πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης αυξάνονται οι υποπεριοχές τιμών της παραμέτρου  $\alpha$  εντός της ευρύτερης περιοχής  $[0,1]$ .

#### **8.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Η μέθοδος Oreste, όπως και προηγουμένως τονίσθηκε, δημιουργεί με ποιοτικές διατάξεις, δηλαδή με απλή ποιοτική ιεράρχηση τόσο ως προς τις σχετικές βαρύτητες των κριτηρίων αξιολόγησης, όσο και ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Επομένως, δεν απαιτεί στα αρχικά της δεδομένα ακριβείς αριθμητικές τιμές. Άρα, ο συγκερασμός σημαντικού πλήθους και ετερογενών θέσεων και απόψεων είναι εφικτός σε μεγάλο βαθμό.

#### **8.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος Oreste χειρίζεται αρκετά καλά ετερογενή κριτήρια, αφού ως προς τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, δημιουργεί μία απλή ποιοτική ιεράρχηση επιδόσεων ανά κριτήριο. Δηλαδή, οι εκφρασμένες με διαφορετικούς δείκτες και σε ποικίλες κλίμακες, ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, εύκολα ιεραρχούνται (ανά κριτήριο), άρα και εύκολα τίθενται ως εισαγόμενα προς εφαρμογή της μεθόδου Oreste.

#### **8.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Η μέθοδος Oreste λόγω του ότι χειρίζεται με απλές μόνον διατάξεις ιεράρχησης τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, μπορεί με αρκετή απλότητα και ευχρηστία να χειριστεί ποιοτική όσο και ποσοτική πληροφόρηση σχετικά με τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Αυτό είναι προτέρημα της μεθόδου.

Ωστόσο, η λειτουργία της μεθόδου με απλές ιεραρχικές διατάξεις των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων, ενέχει το μειονέκτημα της ανεπαρκούς αξιοποίησης ποσοτικής πληροφόρησης για τις ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η Oreste (όπως ήδη παρουσιάσθηκε), δεν έχει την δυνατότητα να αξιοποιήσει πληροφορία σχετικά με το «πόσο καλύτερη» είναι η επίδοση μίας εναλλακτικής λύσης σε ένα κριτήριο, σε σχέση με την επίδοση μίας άλλης στο ίδιο κριτήριο. Δηλαδή, δεν αποδίδει με ακρίβεια πλήρως την ποσοτική πληροφορία διαφορών επιδόσεων, παρά μόνο αξιοποιεί την απλή διάταξη των ανά κριτήριο επιδόσεων. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως πρόβλημα ακρίβειας.

### **8.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η μέθοδος Oreste είναι μία μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η οποία μέσω της παραμέτρου  $\alpha$  την οποία χρησιμοποιεί, κατορθώνει να συγκερνά τις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια με τα βάρη των κριτηρίων. Η υπόψη μέθοδος, μπορεί να εφαρμοσθεί με αρκετή επιτυχία σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, αφού η δομή της ανταποκρίνεται αρκετά ικανοποιητικά, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, στις συνθήκες των έργων αυτών, άρα και στις απαιτήσεις της αξιολόγησής τους. Αναλυτικότερα, η μέθοδος Oreste, ανταποκρίνεται αρκετά καλά σε μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης, σε μεγάλο πλήθος και ετερογένεια αποφασιζόντων, ενώ παρουσιάζει εύκολο χειρισμό τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών κριτηρίων αξιολόγησης. Πρέπει πάντως να σημειωθεί η έλλειψη μεγάλης ακρίβειας απόδοσης αρχικής ποσοτικής πληροφορίας, όπως ως προς τις αρχικά δεδομένες ανά κριτήριο επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ-9: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM (ATTITUDE DYNAMIC ATTRIBUTE MODEL) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

### **9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΙ**

Στις περισσότερες αξιολογήσεις συγκοινωνιακών έργων, οι διαφαινόμενες λύσεις είναι περισσότερες της μίας, επομένως είναι χρήσιμο η εν λόγω αξιολόγηση, να καταλήξει σε κάποιο εξαγόμενο σύγκρισης των λύσεων.

Για να συμπεριληφθούν όσο το δυνατό καλύτερα εννοιολογικά και ακριβέστερα ποσοτικά αρκετά κριτήρια σε μία αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μία από αυτές είναι η μέθοδος ADAM (Zeleny, 1982), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση δυνατοτήτων εφαρμογής της υπόψη μεθόδου σε πραγματικά προβλήματα πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων. Στο πλαίσιο αυτό δίδεται μαθηματική ανάπτυξη της μεθόδου, γίνεται ανάλυση του βαθμού απόκρισής της στα χαρακτηριστικά αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων (τα οποία σε κάποιο βαθμό εμπίπτουν και σε άλλα τεχνικά έργα) και παρατίθεται εφαρμογή της σε πραγματικό πρόβλημα, η οποία και αξιολογείται.

#### **Συμβολισμοί**

$A_i$ :	Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.
$I$ :	Πλήθος εναλλακτικών.
$C_j$ :	Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.
$J$ :	Πλήθος κριτηρίων.
$w_j$ :	Σχετικό βάρος του κριτηρίου $C_j$ .
$\Phi_{ij}$ :	Αρχική επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$\Phi^*j$ :	Αρχική επίδοση του Ιδεατού Σημείου στο κριτήριο $C_j$ .
$d_{i,j}$ :	Ανηγμένη επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$d^*j$ :	Ανηγμένη επίδοση του Ιδεατού Σημείου στο κριτήριο $C_j$ .
$b$ :	Εκθέτης Ευκλείδειας Νόρμας.
$L_i$ :	Απόσταση της εναλλακτικής $A_i$ από το Ιδεατό Σημείο.
$\Sigma_j [\dots]$ :	Άθροισμα ως προς το δείκτη $j$ αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.
$\max_{\xi} [\dots]$ :	Μέγιστο ως προς το δείκτη $\xi$ της παράστασης που ακολουθεί.

### **9.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM**

#### **9.2.1 Γενικά**

Η πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης ADAM, αξιοποιεί και προϋποθέτει για τη λειτουργία της τα ακόλουθα:

- Ποσοτική έκφραση των βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης.
- Ποσοτική έκφραση των επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης.

#### **9.2.2 Αλγόριθμος και εννοιολογικές αρχές της μεθόδου**

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται η Πινακοποίηση των Αρχικών Επιδόσεων  $\Phi_{ij}$  των εναλλακτικών λύσεων  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ . Επίσης, δίδονται τα βάρη  $w_j$  στα κριτήρια  $C_j$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Καθορίζονται οι αρχικές επιδόσεις  $\Phi^*j$  του Ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ . Εφόσον οι αρχικές κλίμακες των κριτηρίων θεωρούνται όχι ανεστραμμένες (δηλαδή θεωρείται ότι όσο μεγαλύτερη η επίδοση τόσο καλύτερα), τότε καθορίζεται:

$$\Phi^*j = \max_i [\Phi_{i,j}] \quad (9.1)$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_{i,j}$  των εναλλακτικών  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ , από τη σχέση:

$$d_{i,j} = \Phi_{i,j} / \Phi^*j \quad (9.2)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Επιλέγεται ο εκθέτης  $b$  της ευκλείδιας νόρμας. Οπότε, ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η απόστασή της  $L_i$  από το Ιδεατό Σημείο, από τη σχέση:

$$L_i = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{i,j})^b]\}^{1/b} \quad (9.3)$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Η τελική κατάταξη των εναλλακτικών από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη γίνεται αντιστρόφως ανάλογα των αποστάσεων  $L_i$  από το Ιδεατό Σημείο, αφού όσο μικρότερη είναι η απόσταση μίας εναλλακτικής από το Ιδεατό σημείο, τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική αυτή  $A_i$ .

### 9.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM

#### 9.3.1 Γενικά

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, για αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Τσαμπούλας et al, 1999), (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«A1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«A2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«A3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Αξιολογούνται για την ανάθεση του καλύτερου έργου, με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

«C1»: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

«C2»: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

«C3»: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Από τα τρία κριτήρια, για αυτό της χρηματικής αποδοτικότητας δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR). Στο υπόψη κριτήριο, η εναλλακτική λύση A1 έχει τιμή 94%, η A2 τιμή 162% και η A3 τιμή 74%.

Για τα άλλα δύο κριτήρια υπάρχουν απλώς ποιοτικοί χαρακτηρισμοί για τις συνέπειες/επιδόσεις των υπό αξιολόγηση έργων.

Έτσι, για το περιβαλλοντικό κριτήριο, εκτιμήθηκε ότι τα έργα A1 και A3 θα έχουν περίπου τις ίδιες επιπτώσεις, ενώ το έργο A2 θα έχει αισθητά χειρότερες επιπτώσεις.

Για το κριτήριο της ποιότητας των προσφερόμενων συγκοινωνιακών υπηρεσιών, εκτιμήθηκε ότι το έργο A1 θα έχει πολύ καλύτερη επιρροή από καθένα εκ των άλλων δύο έργων. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το A3 θα έχει καλύτερη σχετικά με το A2 επιρροή στο υπόψη κριτήριο.



### 9.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου ADAM

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται η Πινακοποίηση των Αρχικών Επιδόσεων  $\Phi_{ij}$  των εναλλακτικών λύσεων  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ . Επίσης, δίδονται τα βάρη  $w_j$  στα κριτήρια  $C_j$ . Αυτά εμφανίζονται στον κάτωθι πίνακα.

*Πίνακας 9.1: Αρχικές επιδόσεις  $\Phi_{ij}$  των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης και σχετικά βάρη  $w_j$  των κριτηρίων.*

*Table 9.1: Initial performances  $\Phi_{ij}$  of alternatives in evaluation criteria and relative weights  $w_j$  of criteria.*

ΚΡΙΤΗΡΙΟ / ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΛΥΣΗ	«C1» : IRR	«C2» : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	«C3»: Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών
	$w_1 = 0,16$	$w_2 = 0,54$	$w_3 = 0,30$
Λύση «A1»	94%	8	9
Λύση «A2»	162%	5	5
Λύση «A3»	74%	8	6

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Καθορίζονται οι αρχικές επιδόσεις  $\Phi^*j$  του Ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ . Εφόσον οι αρχικές κλίμακες των κριτηρίων θεωρούνται όχι ανεστραμμένες (δηλαδή θεωρείται ότι όσο μεγαλύτερη η επίδοση τόσο καλύτερα), τότε καθορίζεται:

$$\Phi^*j = \max_i [\Phi_{i,j}]$$

Επομένως, ανά κριτήριο έχουμε:

$$\Phi^*1 = \max_i [\Phi_{i,1}] = \max \{94\%, 162\%, 74\%\} = 162\%.$$

$$\Phi^*2 = \max_i [\Phi_{i,2}] = \max \{8, 5, 8\} = 8.$$

$$\Phi^*3 = \max_i [\Phi_{i,3}] = \max \{9, 5, 6\} = 9.$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_{i,j}$  των εναλλακτικών  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ , από τη σχέση:

$$d_{i,j} = \Phi_{i,j} / \Phi^*j$$

Επομένως, έχουμε:

$$d_{1,1} = 94\% / 162\% = 0,580.$$

$$d_{2,1} = 162\% / 162\% = 1.$$

$$d_{3,1} = 74\% / 162\% = 0,457.$$

$$d_{1,2} = 8 / 8 = 1.$$

$$d_{2,2} = 5 / 8 = 0,625.$$

$$d_{3,2} = 8 / 8 = 1.$$

$$d_{1,3} = 9 / 9 = 1.$$

$$d_{2,3} = 5 / 9 = 0,555.$$

$$d_{3,3} = 6 / 9 = 0,667.$$

Είναι προφανές ότι εκάστη Ανηγμένη επίδοση  $d^*j$  του Ιδεατού Σημείου στο κριτήριο  $C_j$  ισούται με 1, ήτοι:

$$d^*1 = 1, \quad d^*2 = 1, \quad d^*3 = 1.$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Επιλέγεται ο εκθέτης  $b$  της ευκλείδειας νόρμας. Οπότε, ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η απόστασή της  $L_i$  από το Ιδεατό Σημείο, από τη σχέση:

$$L_i = \left\{ \sum_j [w_j^b * (1 - d_{i,j})^b] \right\}^{1/b}$$

Έστω ότι για την εδώ εφαρμογή επιλέγεται η φυσική νόρμα, ήτοι  $b = 2$ .

Οπότε, ανά εναλλακτική:

- Εναλλακτική A1:

$$L1 = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{1,j}^b)]\}^{1/b} = \{0,16^2 * (1-0,580)^2 + 0,54^2 * (1-1)^2 + 0,30^2 * (1-1)^2\}^{1/2} = \\ = \{0,0256 * 0,1764 + 0,2916 * 0 + 0,09 * 0\}^{1/2} = \{0,004516\}^{1/2} = 0,0672.$$

- Εναλλακτική A2:

$$L2 = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{2,j}^b)]\}^{1/b} = \{0,16^2 * (1-1)^2 + 0,54^2 * (1-0,625)^2 + 0,30^2 * (1-0,555)^2\}^{1/2} \\ = \{0,0256 * 0 + 0,2916 * 0,1406 + 0,09 * 0,1980\}^{1/2} = \{0,058819\}^{1/2} = 0,2425.$$

- Εναλλακτική A3:

$$L3 = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{3,j}^b)]\}^{1/b} = \{0,16^2 * (1-0,457)^2 + 0,54^2 * (1-1)^2 + 0,30^2 * (1-0,667)^2\}^{1/2} \\ = \{0,0256 * 0,2948 + 0,2916 * 0 + 0,09 * 0,1109\}^{1/2} = \{0,017528\}^{1/2} = 0,1324.$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Η τελική κατάταξη των εναλλακτικών από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη γίνεται αντιστρόφως ανάλογα των αποστάσεων από το Ιδεατό Σημείο, αφού όσο μικρότερη είναι η απόσταση μίας εναλλακτικής από το Ιδεατό σημείο, τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική αυτή. Επομένως, αφού στην περίπτωσή μας:

$$L1 < L3 < L2,$$

η κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη έχει ως εξής:

$$A1 - A3 - A2.$$

## 9.4 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ADAM

### 9.4.1 Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (Αμπακούμκιν, 1990), (Tsamboulas et al, 1999), (Schaerlig, 1985), όπως:

- το σημαντικό **πλήθος εναλλακτικών λύσεων**, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω του πολυσχιδούς των οικονομικών θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό **πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό **πλήθος** και την εν δυνάμει σημαντική **ετερογένεια των αποφασιζόντων/αξιολογητών**, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκομένων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περιοίκων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την **ετερογένεια των κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά., όπου η υπόψη ετερογένεια των κριτηρίων, οπότε για τη μέτρησή τους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μεταξύ τους δείκτες και κλίμακες (:φυσικές, αριθμητικές, λεξικογραφικές κ.ά.),
- τη **δυσκολία ποσοτικής απόδοσης των επιδόσεων** των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, δεν μπορεί, παρά να αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι μία μέθοδος αξιολόγησης ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρεί τα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι και η αξιολόγηση άλλων τεχνικών έργων, που αναφέρονται στην ενέργεια ή στο περιβάλλον, παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά

των συγκοινωνιακών έργων. Έτσι, θα μπορούσε να εξετασθεί και εκεί η εφαρμογή της μεθόδου ADAM.

Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση της μεθόδου ADAM σύμφωνα με τα εν λόγω χαρακτηριστικά.

#### **9.4.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων**

Η μέθοδος ADAM δεν παρουσιάζει πρόβλημα με το μεγάλο πλήθος των εναλλακτικών λύσεων, αφού λειτουργεί μέσω της δημιουργίας νόρμας-απόστασης από το ιδεατό σημείο για κάθε εναλλακτική. Να τονισθεί επίσης ότι επειδή δεν λειτουργεί με κατά ζεύγη συγκρίσεις, δεν χρειάζεται καν μηχανισμό υπέρθεσης ανά ζεύγη θεωρήσεων σε ευρύτερες θεωρήσεις.

#### **9.4.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος ADAM δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα με μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης. Μπορεί δηλαδή να ενσωματώσει αρκετά καλά μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης, αφού λειτουργεί με απλή αθροιστική δομή, χωρίς πολυπλοκότητες.

#### **9.4.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Η μέθοδος ADAM, λειτουργεί με ποσοτικό τρόπο, οπότε πρέπει να δίδεται σημαντική προσοχή στα αρχικά βήματα της μεθόδου ώστε να καθορίζονται προσεκτικά οι τιμές βασικών παραμέτρων της, όπως τα σχετικά βάρη των κριτηρίων. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα εκλογής και δευτερογενών παραμέτρων, όπως του εκθέτη της νορμικής απόστασης από το ιδεατό σημείο, οπότε δίδεται και εδώ η δυνατότητα συγκερασμού απόψεων αποφασιζόντων.

#### **9.4.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος ADAM χειρίζεται αρκετά καλά ετερογενή κριτήρια, αφού δημιουργεί το ιδεατό σημείο, όπου κάθε συνιστώσα του αναφέρεται σε κάθε κριτήριο ξεχωριστά. Μάλιστα και στη δημιουργία της τελικής νορμικής απόστασης από το ιδεατό σημείο για κάθε λύση, μπορεί να χειρίζεται πολύ καλά τα ετερογενή κριτήρια.

#### **9.4.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Η μέθοδος ADAM δέχεται, λειτουργεί και αξιοποιεί ποσοτικές πληροφορίες/δεδομένα, τόσο στις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων ανά κριτήριο, όσο και στα βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης. Αυτό είναι υπέρ της ακρίβειας της μεθόδου. Πρέπει να επισημανθεί πάντως, ότι επειδή η μέθοδος λειτουργεί με βάση το ιδεατό σημείο, πρέπει να είναι εξ'αρχής προσεκτικά επιλεγμένες οι εναλλακτικές λύσεις, διότι ενδεχόμενη εναλλακτική που θα υπεισήρχετο δευτερογενώς στη διαδικασία της μεθόδου, εν δυνάμει θα άλλαζε όλα τα έως τότε αποτελέσματα.

### **9.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η μέθοδος ADAM είναι μία μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η οποία στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην έννοια του Ιδεατού Σημείου, του σημείου δηλαδή που έχει ως επίδοση σε κάθε κριτήριο τη βέλτιστη από τις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων στο κριτήριο αυτό. Η μέθοδος είναι αθροιστικής δομής και λειτουργεί με τη δημιουργία μία νορμικής απόστασης από το Ιδεατό Σημείο για κάθε εναλλακτική, όπου όσο μικρότερη η απόσταση αυτή τόσο καλύτερη η αντίστοιχη νορμική. Η μέθοδος λειτουργεί με ποσοτικές πληροφορίες/δεδομένα, τόσο στις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης, όσο και στα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης. Η μέθοδος καταλήγει επίσης σε ποσοτικό εξαγόμενο, αφού αφενός δίδει μία πλήρη διάταξη των εναλλακτικών (complete ranking), αφετέρου δίδει και το «πόσο» καλύτερη ή χειρότερη είναι μία εναλλακτική έναντι μίας άλλης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 10: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), λειτουργεί με την έννοια του Ιδεατού Σημείου και την έννοια του Αντι-ιδεατού Σημείου. Το Ιδεατό Σημείο (Zeleny, 1982), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999) χρησιμοποιείται και σε άλλες μεθόδους, όπως η μέθοδος ADAM. Το Αντι-ιδεατό Σημείο αποτελεί ιδιοτυπία της μεθόδου TOPSIS. Οι βασικές εννοιολογικές αρχές της μεθόδου TOPSIS οφείλονται στον Dasarathy (1976).

#### Συμβολισμοί

$A_i$ :	Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.
$I$ :	Πλήθος εναλλακτικών.
$C_j$ :	Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.
$J$ :	Πλήθος κριτηρίων.
$w_j$ :	Σχετικό βάρος του κριτηρίου $C_j$ .
$\Phi_{ij}$ :	Αρχική επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$\Phi^*_j$ :	Αρχική επίδοση του Ιδεατού Σημείου στο κριτήριο $C_j$ .
$\Phi^-_j$ :	Αρχική επίδοση του Αντι-ιδεατού Σημείου στο κριτήριο $C_j$ .
$d_{i,j}$ :	Ανηγμένη επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$d^*_j$ :	Ανηγμένη επίδοση του Ιδεατού Σημείου στο κριτήριο $C_j$ .
$d^-_j$ :	Ανηγμένη επίδοση του Αντι-ιδεατού Σημείου στο κριτήριο $C_j$ .
$b$ :	Εκθέτης Ευκλείδειας Νόρμας.
$L_i$ :	Απόσταση της εναλλακτικής $A_i$ από το Ιδεατό Σημείο.
$M_i$ :	Απόσταση της εναλλακτικής $A_i$ από το Αντι-ιδεατό Σημείο.
$\Sigma_j [\dots]$ :	Άθροισμα ως προς το δείκτη $j$ αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.
$\max_{\xi} [\dots]$ :	Μέγιστο ως προς το δείκτη $\xi$ της παράστασης που ακολουθεί.
$\min_{\xi} [\dots]$ :	Ελάχιστο ως προς το δείκτη $\xi$ της παράστασης που ακολουθεί.
$N_i$ :	Λόγος (πηλίκο) $M_i/L_i$ , ήτοι λόγος της απόστασης της εναλλακτικής $A_i$ από το Αντι-ιδεατό Σημείο προς την απόσταση της ίδιας εναλλακτικής από το Ιδεατό Σημείο.

### 10.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS

#### 10.2.1 Γενικά

Η πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης TOPSIS (Hwang - Yoon, 1981), (Lai et al, 1994), αξιοποιεί και προϋποθέτει για τη λειτουργία της τα ακόλουθα:

- Ποσοτική έκφραση των βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης.
- Ποσοτική έκφραση των επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης.

#### 10.2.2 Αλγόριθμος και εννοιολογικές αρχές της μεθόδου

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται η Πινακοποίηση των Αρχικών Επιδόσεων  $\Phi_{ij}$  των εναλλακτικών λύσεων  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ . Επίσης, δίδονται τα βάρη  $w_j$  στα κριτήρια  $C_j$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Καθορίζονται οι αρχικές επιδόσεις  $\Phi^*j$  του Ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ . Εφόσον οι αρχικές κλίμακες των κριτηρίων θεωρούνται όχι ανεστραμμένες (δηλαδή θεωρείται ότι όσο μεγαλύτερη η επίδοση τόσο καλύτερα), τότε καθορίζεται:

$$\Phi^*j = \max_i [\Phi_{i,j}] \quad (10.1)$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_{i,j}$  των εναλλακτικών  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ , από τη σχέση:

$$d_{i,j} = \Phi_{i,j} / \Phi^*j \quad (10.2)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Επιλέγεται ο εκθέτης  $b$  της ευκλείδιας νόρμας. Οπότε, ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η απόστασή της  $L_i$  από το Ιδεατό Σημείο, από τη σχέση:

$$L_i = \left\{ \sum_j [w_j^b * (1 - d_{i,j})^b] \right\}^{1/b} \quad (10.3)$$

(αφού κάθε ανηγμένη επίδοση του Ιδεατού Σημείου  $d^*j$  ισούται με 1).

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Καθορίζονται οι αρχικές επιδόσεις  $\Phi_*j$  του Αντι-ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ . Εφόσον οι αρχικές κλίμακες των κριτηρίων θεωρούνται όχι ανεστραμμένες (δηλαδή θεωρείται ότι όσο μικρότερη η επίδοση τόσο χειρότερα), τότε καθορίζεται:

$$\Phi_*j = \min_i [\Phi_{i,j}] \quad (10.4)$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_*j$  του Αντι-ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ , από τον τύπο:

$$d_*j = \Phi_*j / \Phi^*j \quad (10.5)$$

*Βήμα 7<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η απόστασή της  $M_i$  από το Αντι-ιδεατό Σημείο, από τη σχέση (ο εκθέτης  $b$  της ευκλείδιας νόρμας  $M_i$  είναι ο ίδιος με αυτόν της  $L_i$ ):

$$M_i = \left\{ \sum_j [w_j^b * (d_{i,j} - d_*j)^b] \right\}^{1/b} \quad (10.6)$$

*Βήμα 8<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η ποσότητα  $N_i$ , όπου:

$$N_i = M_i / L_i \quad (10.7)$$

Δηλαδή πρόκειται για το λόγο της απόστασης της εναλλακτικής από το Αντι-ιδεατό σημείο προς την απόσταση της εναλλακτικής από το Ιδεατό σημείο.

*Βήμα 9<sup>ο</sup>*: Η τελική κατάταξη των εναλλακτικών από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη γίνεται ανάλογα του  $N_i$ , ήτοι όσο μεγαλύτερο το  $N_i$  τόσο καλύτερη η αντίστοιχη εναλλακτική  $A_i$ .

### 10.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TOPSIS

#### 10.3.1 Γενικά

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, για αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Bonifica - Doxiadis Associates –TECNIC, 1999), (Τσαμπούλας et al, 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«A1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«A2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«A3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Αξιολογούνται για την ανάθεση του καλύτερου έργου, με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

«C1»: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

«C2»: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

«C3»: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Από τα τρία κριτήρια, για αυτό της χρηματικής αποδοτικότητας δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR). Στο υπόψη κριτήριο, η εναλλακτική λύση A1 έχει τιμή 94%, η A2 τιμή 162% και η A3 τιμή 74%.

Για τα άλλα δύο κριτήρια υπάρχουν απλώς ποιοτικοί χαρακτηρισμοί για τις συνέπειες/επιδόσεις των υπό αξιολόγηση έργων.

Έτσι, για το περιβαλλοντικό κριτήριο, εκτιμήθηκε ότι τα έργα A1 και A3 θα έχουν περίπου τις ίδιες επιπτώσεις, ενώ το έργο A2 θα έχει αισθητά χειρότερες επιπτώσεις.

Για το κριτήριο της ποιότητας των προσφερόμενων συγκοινωνιακών υπηρεσιών, εκτιμήθηκε ότι το έργο A1 θα έχει πολύ καλύτερη επιρροή από καθένα εκ των άλλων δύο έργων. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το A3 θα έχει καλύτερη σχετικά με το A2 επιρροή στο υπόψη κριτήριο.

### 10.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται η Πινακοποίηση των Αρχικών Επιδόσεων  $\Phi_{ij}$  των εναλλακτικών λύσεων  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ . Επίσης, δίδονται τα βάρη  $w_j$  στα κριτήρια  $C_j$ . Αυτά εμφανίζονται στον κάτωθι πίνακα.

*Πίνακας 10.1: Αρχικές επιδόσεις  $\Phi_{ij}$  των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης και σχετικά βάρη  $w_j$  των κριτηρίων.*

*Table 10.1: Initial performances  $\Phi_{ij}$  of alternatives in evaluation criteria and relative weights  $w_j$  of criteria.*

ΚΡΙΤΗΡΙΟ / ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΛΥΣΗ	«C1» : IRR	«C2» : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	«C3»: Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών
	$w_1 = 0,16$	$w_2 = 0,54$	$w_3 = 0,30$
Λύση «A1»	94%	8	9
Λύση «A2»	162%	5	5
Λύση «A3»	74%	8	6

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Καθορίζονται οι αρχικές επιδόσεις  $\Phi^*j$  του Ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ . Εφόσον οι αρχικές κλίμακες των κριτηρίων θεωρούνται όχι ανεστραμμένες (δηλαδή θεωρείται ότι όσο μεγαλύτερη η επίδοση τόσο καλύτερα), τότε καθορίζεται:

$$\Phi^*j = \max_i [\Phi_{i,j}]$$

Επομένως, ανά κριτήριο έχουμε:

$$\Phi^*1 = \max_i [\Phi_{i,1}] = \max \{94\%, 162\%, 74\%\} = 162\%.$$

$$\Phi^*2 = \max_i [\Phi_{i,2}] = \max \{8, 5, 8\} = 8.$$

$$\Phi^*3 = \max_i [\Phi_{i,3}] = \max \{9, 5, 6\} = 9.$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_{i,j}$  των εναλλακτικών  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ , από τη σχέση:

$$d_{i,j} = \Phi_{i,j} / \Phi^*j$$

Επομένως, έχουμε:

$$d_{1,1} = 94\% / 162\% = 0,580.$$

$$d_{2,1} = 162\% / 162\% = 1.$$

$$d_{3,1} = 74\% / 162\% = 0,457.$$

$$d_{1,2} = 8 / 8 = 1.$$

$$d_{2,2} = 5 / 8 = 0,625.$$

$$d_{3,2} = 8 / 8 = 1.$$

$$d_{1,3} = 9 / 9 = 1.$$

$$d_{2,3} = 5 / 9 = 0,555.$$

$$d_{3,3} = 6 / 9 = 0,667.$$

Είναι προφανές ότι εκάστη Ανηγμένη επίδοση  $d^*j$  του Ιδεατού Σημείου στο κριτήριο  $C_j$  ισούται με 1, ήτοι:

$$d^*1 = 1, \quad d^*2 = 1, \quad d^*3 = 1.$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Επιλέγεται ο εκθέτης  $b$  της ευκλείδιας νόρμας. Οπότε, ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η απόστασή της  $L_i$  από το Ιδεατό Σημείο, από τη σχέση:

$$L_i = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{i,j})^b]\}^{1/b}$$

Έστω ότι για την εδώ εφαρμογή επιλέγεται η φυσική νόρμα, ήτοι  $b = 2$ .

Οπότε, ανά εναλλακτική:

- Εναλλακτική A1:

$$L_1 = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{1,j})^b]\}^{1/b} = \{0,16^2 * (1-0,580)^2 + 0,54^2 * (1-1)^2 + 0,30^2 * (1-1)^2\}^{1/2} = \{0,0256 * 0,1764 + 0,2916 * 0 + 0,09 * 0\}^{1/2} = \{0,004516\}^{1/2} = 0,0672.$$

- Εναλλακτική A2:

$$L_2 = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{2,j})^b]\}^{1/b} = \{0,16^2 * (1-1)^2 + 0,54^2 * (1-0,625)^2 + 0,30^2 * (1-0,555)^2\}^{1/2} = \{0,0256 * 0 + 0,2916 * 0,1406 + 0,09 * 0,1980\}^{1/2} = \{0,058819\}^{1/2} = 0,2425.$$

- Εναλλακτική A3:

$$L_3 = \{\sum_j [w_j^b * (1 - d_{3,j})^b]\}^{1/b} = \{0,16^2 * (1-0,457)^2 + 0,54^2 * (1-1)^2 + 0,30^2 * (1-0,667)^2\}^{1/2} = \{0,0256 * 0,2948 + 0,2916 * 0 + 0,09 * 0,1109\}^{1/2} = \{0,017528\}^{1/2} = 0,1324.$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Καθορίζονται οι αρχικές επιδόσεις  $\Phi_{*j}$  του Αντι-ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ . Εφόσον οι αρχικές κλίμακες των κριτηρίων θεωρούνται όχι ανεστραμμένες (δηλαδή θεωρείται ότι όσο μικρότερη η επίδοση τόσο χειρότερα), τότε καθορίζεται:

$$\Phi_{*j} = \min_i [\Phi_{i,j}]$$

Επομένως, ανά κριτήριο έχουμε:

$$\Phi_{*1} = \min_i [\Phi_{i,1}] = \min \{94\%, 162\%, 74\%\} = 74\%.$$

$$\Phi_{*2} = \min_i [\Phi_{i,2}] = \min \{8, 5, 8\} = 5.$$

$$\Phi_{*3} = \min_i [\Phi_{i,3}] = \min \{9, 5, 6\} = 5.$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_{*j}$  του Αντι-ιδεατού Σημείου στα κριτήρια  $C_j$ , από τον τύπο:

$$d_{*j} = \Phi_{*j} / \Phi_{i,j}$$

Ήτοι:

$$d_{*1} = \Phi_{*1} / \Phi_{1,1} = 74\% / 162\% = 0,4568.$$

$$d_{*2} = \Phi_{*2} / \Phi_{2,2} = 5 / 8 = 0,6250.$$

$$d_{*3} = \Phi_{*3} / \Phi_{3,3} = 5 / 9 = 0,5556.$$

*Βήμα 7<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η απόστασή της  $M_i$  από το Αντι-ιδεατό Σημείο, από τη σχέση (ο εκθέτης  $b$  της ευκλείδιας νόρμας  $M_i$  είναι ο ίδιος με αυτόν της  $L_i$ ):

$$M_i = \{\sum_j [w_j^b * (d_{i,j} - d_{*j})^b]\}^{1/b}$$

Με  $b=2$  (δηλαδή όπως και για την  $L_i$ ), έχουμε:

$$M1 = \{\sum_j [w_j^2 * (d_{1,j} - d_{*j})^2]\}^{1/2} = \{0,16^2 * (0,5800-0,4568)^2 + 0,54^2 * (1-0,6250)^2 + 0,30^2 * (1-0,5556)^2\}^{1/2} = \{0,16^2 * (0,1232)^2 + 0,54^2 * (0,3750)^2 + 0,30^2 * (0,4444)^2\}^{1/2} = \{0,05917\}^{1/2} = 0,2432.$$

$$M2 = \{\sum_j [w_j^2 * (d_{2,j} - d_{*j})^2]\}^{1/2} = \{0,16^2 * (1-0,4568)^2 + 0,54^2 * (0,6250 - 0,6250)^2 + 0,30^2 * (0,5556-0,5556)^2\}^{1/2} = \{0,16^2 * (0,5432)^2 + 0,54^2 * (0)^2 + 0,30^2 * (0)^2\}^{1/2} = \{0,00755\}^{1/2} = 0,0869.$$

$$M3 = \{\sum_j [w_j^2 * (d_{3,j} - d_{*j})^2]\}^{1/2} = \{0,16^2 * (0,4568-0,4568)^2 + 0,54^2 * (1-0,6250)^2 + 0,30^2 * (0,667-0,5556)^2\}^{1/2} = \{0,16^2 * (0)^2 + 0,54^2 * (0,3750)^2 + 0,30^2 * (0,1114)^2\}^{1/2} = \{0,0421\}^{1/2} = 0,2052.$$

*Βήμα 8<sup>ο</sup>*: Ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική  $A_i$  η ποσότητα  $N_i$ , όπου:

$$N_i = M_i/L_i.$$

Οπότε:

$$N1 = M1/L1 = 0,2432 / 0,0672 = 3,6190.$$

$$N2 = M2/L2 = 0,0869 / 0,2425 = 0,3583.$$

$$N3 = M3/L3 = 0,2052 / 0,1324 = 1,5498.$$

*Βήμα 9<sup>ο</sup>*: Η τελική κατάταξη των εναλλακτικών από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη γίνεται ανάλογα του  $N_i$ , ήτοι όσο μεγαλύτερο το  $N_i$  τόσο καλύτερη η αντίστοιχη εναλλακτική  $A_i$ .

Στην παρούσα εφαρμογή έχουμε:  $N1 > N3 > N2$ , οπότε η κατάταξη των εναλλακτικών (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη) έχει ως εξής:  $A1 - A3 - A2$ .

#### 10.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος TOPSIS είναι μία μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η οποία στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στις έννοιες του Ιδεατού Σημείου και του Αντι-ιδεατού Σημείου, ήτοι αντιστοίχως του σημείου που έχει ως επίδοση σε κάθε κριτήριο τη βέλτιστη από τις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων στο κριτήριο αυτό και του σημείου που έχει ως επίδοση σε κάθε κριτήριο τη χειρίστη από τις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων στο κριτήριο αυτό.

Η μέθοδος είναι αθροιστικής δομής και λειτουργεί με τη δημιουργία μία νορμικής απόστασης από το Ιδεατό Σημείο και μίας νορμικής απόστασης από το Αντι-ιδεατό Σημείο, για κάθε εναλλακτική. Τελικά, συνθέτει τις δύο νορμικές αυτές, ευρίσκοντας το λόγο της δεύτερης νορμική προς την πρώτη νορμική. Ο λόγος αυτός αποτελεί και την τελική νόρμα βάσει της οποίας αποτιμάται/αξιολογείται κάθε εναλλακτική, ήτοι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος, τόσο καλύτερη η αντίστοιχη εναλλακτική.

Η μέθοδος λειτουργεί με ποσοτικές πληροφορίες/δεδομένα, τόσο στις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης, όσο και στα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης. Η μέθοδος καταλήγει επίσης σε ποσοτικό εξαγόμενο, αφού αφενός δίδει μία πλήρη διάταξη των εναλλακτικών (complete ranking), αφετέρου δίδει και το «πόσο» καλύτερη ή χειρότερη είναι μία εναλλακτική έναντι μίας άλλης.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 11: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ (ENTROPY METHOD) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

## 11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος Εντροπίας [Entropy method] (Zeleny, 1982) είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, κυρίως για την εύρεση των Τελικών Βαρών των Κριτηρίων αξιολόγησης. Μπορεί όμως, κατόπιν του προσδιορισμού των τελικών βαρών των κριτηρίων, να λάβει χώρα και η τελική αποτίμηση/αξιολόγηση των Εναλλακτικών, συνήθως με την ένταξη-αξιοποίηση των τελικών βαρών των κριτηρίων σε κάποια αθροιστικής μορφής νόρμα «απόστασης από το Ιδεατό Σημείο».

### Συμβολισμοί

- $A_k$ : Εναλλακτική (λύση) υπό αξιολόγηση.  
 $m$ : Πλήθος εναλλακτικών λύσεων.  
 $C_i$ : Κριτήριο αξιολόγησης.  
 $n$ : Πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης.  
 $X_{k,i}$ : Επίδοση της  $A_k$  εναλλακτικής στο  $C_i$  κριτήριο αξιολόγησης.  
 $X^*_i$ : Μέγιστη (βέλτιστη γενικά) επίδοση μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων στο  $C_i$  κριτήριο αξιολόγησης.  
 $X_{*i}$ : Ελάχιστη (χειρίστη γενικά) επίδοση μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων στο  $C_i$  κριτήριο αξιολόγησης.  
 $d_{k,i}$ : Ανηγμένη επίδοση της  $A_k$  εναλλακτικής στο  $C_i$  κριτήριο.  
 $d^*_i$ : Μέγιστη ανηγμένη επίδοση μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων στο  $C_i$  κριτήριο.  
 $D_i$ : Άθροισμα των ανηγμένων επιδόσεων των εναλλακτικών  $A_k$  στο  $C_i$  κριτήριο.  
 $e_i$ : Ποσότητα Εντροπίας για το κριτήριο  $C_i$ .  
 $E$ : Συνολική Ποσότητα Εντροπίας.  
 $K$ : Συντελεστής Επιρροής του Πλήθους Εναλλακτικών στην ποσότητα εντροπίας.  
 $w_i$ : Αρχική εκτίμηση σχετικού βάρους του κριτηρίου  $C_i$ .  
 $\Lambda_i$ : Πολλαπλασιαστής βάρους κριτηρίου  $C_i$ .  
 $\lambda_i$ : Τελικό σχετικό βάρος κριτηρίου  $C_i$ .  
 $\sum_k[\dots]$ : Άθροισμα των στοιχείων που ακολουθούν ως προς το δείκτη  $k$ .  
 $L_k$ : Νόρμα «απόστασης» της εναλλακτικής  $A_k$  από το «Ιδεατό Σημείο».  
 $b$ : Εκθέτης Ευκλείδειας Νόρμας.

## 11.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ

### I.) Για την εύρεση των Τελικών Βαρών των Κριτηρίων αξιολόγησης:

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Σχηματίζεται ο πίνακας των επιδόσεων  $X_{k,i}$  των εναλλακτικών  $A_k$  στα κριτήρια αξιολόγησης  $C_i$ .

Δίδονται τα αρχικά σχετικά βάρη  $w_i$  των κριτηρίων  $C_i$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Σε κάθε κριτήριο  $C_i$ , εύσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_{k,i}$  των εναλλακτικών  $A_k$ , από τον τύπο:

$$d_{k,i} = X_{k,i} / X^*_i \quad (11.1)$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Σε κάθε κριτήριο  $C_i$ , υπολογίζονται τα  $D_i$  αθροίσματα των ανηγμένων επιδόσεων  $d_{k,i}$ , από τον τύπο:

$$D_i = \sum_k (d_{k,i}) \quad (11.2)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Υπολογίζεται ο Κ Συντελεστής Επιρροής του Πλήθους των Εναλλακτικών στην ποσότητα εντροπίας. Για κάθε κριτήριο C<sub>i</sub>, υπολογίζεται η Ποσότητα Εντροπίας e<sub>i</sub>. Κατόπιν ευρίσκεται η Συνολική Ποσότητα Εντροπίας E. Δηλαδή:

$$K = 1 / \ln(m) \quad (11.3)$$

$$e_i = -K * \sum_k [(d_{k,i} / D_i) * \ln(d_{k,i} / D_i)] \quad (11.4)$$

$$E = \sum_i (e_i) \quad (11.5)$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε κριτήριο C<sub>i</sub>, υπολογίζεται ο Λ<sub>i</sub> Πολλαπλασιαστής βάρους. Δηλαδή:

$$\Lambda_i = [1/(n-E)] * (1 - e_i) \quad (11.6)$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Για κάθε κριτήριο C<sub>i</sub>, υπολογίζεται το λ<sub>i</sub> Τελικό σχετικό βάρος. Δηλαδή:

$$\lambda_i = (\Lambda_i * w_i) / \sum_i (\Lambda_i * w_i) \quad (11.7)$$

## II.) Για την τελική αποτίμηση/αξιολόγηση των Εναλλακτικών:

*Βήμα 7<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική σχηματίζεται η νόρμα «απόστασης» από το «Ιδεατό Σημείο». Ιδεατό σημείο είναι εκείνη η ιδεατή εναλλακτική (μη υπαρκτή κατ'ανάγκην), η οποία έχει ως επίδοσή της σε κάθε κριτήριο C<sub>i</sub> τη μέγιστη (βέλτιστη γενικά) μεταξύ των επιδόσεων των υπαρκτών (υπό αξιολόγηση) εναλλακτικών. Σε κάθε λοιπόν κριτήριο C<sub>i</sub>, επίδοση του ιδεατού σημείου είναι η X<sup>\*</sup><sub>i</sub>. Επομένως, ανηγμένη επίδοση του Ιδεατού σημείου σε κάθε κριτήριο C<sub>i</sub> είναι η d<sup>\*</sup><sub>i</sub>, η οποία είναι προφανές ότι ισούται με 1. Άρα:

$$d_i^* - d_{k,i} = 1 - d_{k,i} \quad (11.8)$$

Με βάση όλα τα προηγούμενα, η νόρμα «απόστασης» L<sub>k</sub> κάθε εναλλακτικής A<sub>k</sub> από το Ιδεατό σημείο έχει ως εξής:

$$L_k = \{ \sum_i [\lambda_i^b * (1 - d_{k,i})^b] \}^{1/b} \quad (11.9)$$

όπου b, ο εκθέτης της ευκλείδειας νόρμας ο οποίος γίνεται αποδεκτός για την περίπτωση αυτή.

Οι εναλλακτικές κατατάσσονται (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη) αντιστρόφως ανάλογα της νόρμας «απόστασης» από το Ιδεατό σημείο. Ήτοι, όσο μικρότερη η L<sub>k</sub>, τόσο καλύτερη η εναλλακτική A<sub>k</sub>.

## **11.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ**

### **11.3.1 Γενικά**

Η μέθοδος θα εφαρμοσθεί στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

A<sub>1</sub>: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

A<sub>2</sub>: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

A<sub>3</sub>: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπιών.

Αξιολογούνται με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

C<sub>1</sub>: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

C<sub>2</sub>: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

C<sub>3</sub>: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

### 11.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου Εντροπίας

Ι.) Για την εύρεση των Τελικών Βαρών των Κριτηρίων αξιολόγησης:

*Βήμα 1<sup>ο</sup>:* Από τα τρία κριτήρια, για το  $C_1$  δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR). Στα άλλα δύο κριτήρια ( $C_2, C_3$ ) οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων εκφράζονται σε αριθμητική κλίμακα από 0 έως και 10, με βήμα 1. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι  $X_{k,i}$  ανά κριτήριο αξιολόγησης επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, όπως προέκυψαν από εφαρμογή των δεδομένων:

Πίνακας 11.1: Επιδόσεις Εναλλακτικών Λύσεων στα Κριτήρια Αξιολόγησης  
Table 11.1: Performances of Alternatives in Evaluation Criteria

ΚΡΙΤΗΡΙΟ / ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ	$C_1$ : IRR	$C_2$ : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	$C_3$ : Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών
$A_1$	94%	8	9
$A_2$	162%	5	5
$A_3$	74%	8	6

Από ομάδα ειδημόνων (Τσαμπούλας, 1999) δόθηκαν τα εξής Αρχικά βάρη στα Κριτήρια:  $w_1 = 0,16$ ,  $w_2 = 0,54$ ,  $w_3 = 0,30$ .  
[Παρατηρείται ότι  $\sum_i (w_i) = 1,00$ , δηλαδή οι βαρύτητες των κριτηρίων δίδονται σε κανονικοποιημένη μορφή.]

*Βήμα 2<sup>ο</sup>:* Σε κάθε κριτήριο  $C_i$ , ευρίσκονται οι ανηγμένες επιδόσεις  $d_{k,i}$  των εναλλακτικών  $A_k$ , από τον τύπο:

$d_{k,i} = X_{k,i} / X_{i}^*$ . Ήτοι, ανά κριτήριο:

- Κριτήριο  $C_1$ :

$$d_{1,1} = X_{1,1} / X_{1}^* = 94\% / 162\% = 0,5802.$$

$$d_{2,1} = X_{2,1} / X_{1}^* = 162\% / 162\% = 1,0000.$$

$$d_{3,1} = X_{3,1} / X_{1}^* = 74\% / 162\% = 0,4568.$$

- Κριτήριο  $C_2$ :

$$d_{1,2} = X_{1,2} / X_{2}^* = 8/8 = 1,0000.$$

$$d_{2,2} = X_{2,2} / X_{2}^* = 5/8 = 0,6250.$$

$$d_{3,2} = X_{3,2} / X_{2}^* = 8/8 = 1,0000.$$

- Κριτήριο  $C_3$ :

$$d_{1,3} = X_{1,3} / X_{3}^* = 9/9 = 1,0000.$$

$$d_{2,3} = X_{2,3} / X_{3}^* = 5/9 = 0,5556.$$

$$d_{3,3} = X_{3,3} / X_{3}^* = 6/9 = 0,6667.$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>:* Σε κάθε κριτήριο  $C_i$ , υπολογίζονται τα  $D_i$  αθροίσματα των ανηγμένων επιδόσεων  $d_{k,i}$ , από τον τύπο:

$D_i = \sum_k (d_{k,i})$ . Ήτοι, ανά κριτήριο:

- Κριτήριο  $C_1$ :

$$D_1 = d_{1,1} + d_{2,1} + d_{3,1} = 0,5802 + 1,0000 + 0,4568 = 2,0370.$$

- Κριτήριο  $C_2$ :

$$D_2 = d_{1,2} + d_{2,2} + d_{3,2} = 1,0000 + 0,6250 + 1,0000 = 2,6250.$$

- Κριτήριο  $C_3$ :

$$D_3 = d_{1,3} + d_{2,3} + d_{3,3} = 1,0000 + 0,5556 + 0,6667 = 2,2223.$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Υπολογίζεται ο Κ Συντελεστής Επιρροής του Πλήθους των Εναλλακτικών στην ποσότητα εντροπίας. Για κάθε κριτήριο  $C_i$ , υπολογίζεται η Ποσότητα Εντροπίας  $e_i$ . Κατόπιν ευρίσκεται η Συνολική Ποσότητα Εντροπίας Ε. Δηλαδή διαδοχικώς:

$$K = 1 / \ln(m), e_i = -K * \sum_k [(d_{k,i} / D_i) * \ln(d_{k,i} / D_i)], E = \sum_i (e_i)$$

Οπότε, στην παρούσα εφαρμογή:

$$K = 1 / \ln(3) = 0,9102.$$

Εν συνεχεία, ανά κριτήριο:

- Κριτήριο  $C_1$ :

$$\begin{aligned} e_1 &= -K * \sum_k [(d_{k,1} / D_1) * \ln(d_{k,1} / D_1)] = \\ &= -0,9102 * [(d_{1,1} / D_1) * \ln(d_{1,1} / D_1) + (d_{2,1} / D_1) * \ln(d_{2,1} / D_1) + (d_{3,1} / D_1) * \ln(d_{3,1} / D_1)] = \\ &= -0,9102 * [(0,5802/2,0370) * \ln(0,5802/2,0370) + (1,0000/2,0370) * \ln(1,0000/2,0370) + \\ &+ (0,4568/2,0370) * \ln(0,4568/2,0370)] = -0,9102 * [0,28483 * \ln(0,28483) + 0,4909 * \\ &\ln(0,4909) + 0,2243 * \ln(0,2243)] = \\ &= -0,9102 * [-0,3576 - 0,3493 - 0,3353] = -0,9102 * [-1,0422] = +0,9486. \end{aligned}$$

- Κριτήριο  $C_2$ :

$$\begin{aligned} e_2 &= -K * \sum_k [(d_{k,2} / D_2) * \ln(d_{k,2} / D_2)] = \\ &= -0,9102 * [(d_{1,2} / D_2) * \ln(d_{1,2} / D_2) + (d_{2,2} / D_2) * \ln(d_{2,2} / D_2) + (d_{3,2} / D_2) * \ln(d_{3,2} / D_2)] = \\ &= -0,9102 * [(1,0000/2,6250) * \ln(1,0000/2,6250) + (0,6250/2,6250) * \ln(0,6250/2,6250) + \\ &+ (1,0000/2,6250) * \ln(1,0000/2,6250)] = -0,9102 * [0,3809 * \ln(0,3809) + 0,2381 * \ln(0,2381) \\ &+ 0,3809 * \ln(0,3809)] = \\ &= -0,9102 * [-0,3677 - 0,3417 - 0,3677] = -0,9102 * [-1,0771] = +0,9804. \end{aligned}$$

- Κριτήριο  $C_3$ :

$$\begin{aligned} e_3 &= -K * \sum_k [(d_{k,3} / D_3) * \ln(d_{k,3} / D_3)] = \\ &= -0,9102 * [(d_{1,3} / D_3) * \ln(d_{1,3} / D_3) + (d_{2,3} / D_3) * \ln(d_{2,3} / D_3) + (d_{3,3} / D_3) * \ln(d_{3,3} / D_3)] = \\ &= -0,9102 * [(1,0000/2,2223) * \ln(1,0000/2,2223) + (0,5556/2,2223) * \ln(0,5556/2,2223) + \\ &+ (0,6667/2,2223) * \ln(0,6667/2,2223)] = -0,9102 * [0,4499 * \ln(0,4499) + 0,2500 * \ln(0,2500) \\ &+ 0,3000 * \ln(0,3000)] = \\ &= -0,9102 * [-0,3593 - 0,3466 - 0,3612] = -0,9102 * [-1,0671] = +0,9713. \end{aligned}$$

Οπότε:

$$E = e_1 + e_2 + e_3 = +0,9486 + 0,9804 + 0,9713 = 2,9003.$$

*Βήμα 5<sup>ο</sup>*: Για κάθε κριτήριο  $C_i$ , υπολογίζεται ο  $\Lambda_i$  Πολλαπλασιαστής βάρους. Δηλαδή:

$$\Lambda_i = [1/(n-E)] * (1 - e_i)$$

Οπότε, ανά κριτήριο:

- Κριτήριο  $C_1$ :

$$\Lambda_1 = [1/(n-E)] * (1 - e_1) = [1/(3-2,9003)] * (1-0,9486) = (1/0,0997) * 0,0514 = 0,5155.$$

- Κριτήριο  $C_2$ :

$$\Lambda_2 = [1/(n-E)] * (1 - e_2) = [1/(3-2,9003)] * (1-0,9804) = (1/0,0997) * 0,0196 = 0,1966.$$

- Κριτήριο  $C_3$ :

$$\Lambda_3 = [1/(n-E)] * (1 - e_3) = [1/(3-2,9003)] * (1-0,9713) = (1/0,0997) * 0,0287 = 0,2879.$$

*Βήμα 6<sup>ο</sup>*: Για κάθε κριτήριο  $C_i$ , υπολογίζεται το  $\lambda_i$  Τελικό σχετικό βάρος. Δηλαδή:

$$\lambda_i = (\Lambda_i * w_i) / \sum_i (\Lambda_i * w_i)$$

Οπότε, ανά κριτήριο:

- Κριτήριο C<sub>1</sub>:  
 $\lambda_1 = (\Lambda_1 * w_1) / \sum_i (\Lambda_i * w_i) = (0,5155 * 0,16) / [(0,5155 * 0,16) + (0,1966 * 0,54) + (0,2879 * 0,30)] =$   
 $= 0,0825 / (0,0825 + 0,1062 + 0,0864) = 0,0825 / 0,2751 = 0,3000.$
- Κριτήριο C<sub>2</sub>:  
 $\lambda_2 = (\Lambda_2 * w_2) / \sum_i (\Lambda_i * w_i) = (0,1966 * 0,54) / [(0,5155 * 0,16) + (0,1966 * 0,54) + (0,2879 * 0,30)] =$   
 $= 0,1062 / (0,0825 + 0,1062 + 0,0864) = 0,1062 / 0,2751 = 0,3860.$
- Κριτήριο C<sub>3</sub>:  
 $\lambda_3 = (\Lambda_3 * w_3) / \sum_i (\Lambda_i * w_i) = (0,2879 * 0,30) / [(0,5155 * 0,16) + (0,1966 * 0,54) + (0,2879 * 0,30)] =$   
 $= 0,0864 / (0,0825 + 0,1062 + 0,0864) = 0,0864 / 0,2751 = 0,3140.$

Παρατηρείται ότι:

$$\sum_i (\lambda_i) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0,3000 + 0,3860 + 0,3140 = 1,0000.$$

Στον ακόλουθο Πίνακα, συνοψίζονται τα αρχικά και τα τελικά βάρη των κριτηρίων.

Πίνακας 11.2: Αρχικά και τελικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης  
 Table 11.2: Initial and final weights of evaluation criteria

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
Αρχικά Βάρη w <sub>i</sub>	0,1600	0,5400	0,3000
Τελικά Βάρη λ <sub>i</sub>	0,3000	0,3860	0,3140

## II.) Για την τελική αποτίμηση/αξιολόγηση των Εναλλακτικών:

Βήμα 7<sup>ο</sup>: Για κάθε εναλλακτική A<sub>k</sub>, ευρίσκεται η L<sub>k</sub> νόρμα «απόστασης» από το Ιδεατό σημείο, ήτοι:

$$L_k = \left\{ \sum_i [\lambda_i^b * (1 - d_{k,i})^b] \right\}^{1/b}$$

Εάν γίνει αποδεκτό το b = 1, δηλαδή εάν υιοθετηθεί η γραμμική ευκλείδια νόρμα, τότε έχουμε:

$$L_k = \left\{ \sum_i [\lambda_i * (1 - d_{k,i})] \right\}.$$

Ανά εναλλακτική λοιπόν έχουμε:

$$L_1 = \left\{ \sum_i [\lambda_i * (1 - d_{1,i})] \right\} = 0,3000 * (1 - 0,5802) + 0,3860 * (1 - 1,0000) + 0,3140 * (1 - 1,0000) = 0,3000 * 0,4198 + 0,3860 * 0 + 0,3140 * 0 = 0,1259.$$

$$L_2 = \left\{ \sum_i [\lambda_i * (1 - d_{2,i})] \right\} = 0,3000 * (1 - 1,0000) + 0,3860 * (1 - 0,6250) + 0,3140 * (1 - 0,5556) = 0,3000 * 0 + 0,3860 * 0,3750 + 0,3140 * 0,4444 = 0,2843.$$

$$L_3 = \left\{ \sum_i [\lambda_i * (1 - d_{3,i})] \right\} = 0,3000 * (1 - 0,4568) + 0,3860 * (1 - 1,0000) + 0,3140 * (1 - 0,6667) = 0,3000 * 0,5432 + 0,3860 * 0 + 0,3140 * 0,3333 = 0,2676.$$

Άρα, αφού:

$$L_1 < L_3 < L_2$$

Η κατάταξη των εναλλακτικών (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη) είναι η εξής:

$$A_1 - A_3 - A_2.$$

### 11.3.3 Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων της παρούσας εφαρμογής

Από τα αρχικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης, μέσω της διαδικασίας της μεθόδου Εντροπίας, οδηγηθήκαμε στα τελικά βάρη των κριτηρίων.

Συγκρίνοντας τα αρχικά με τα τελικά βάρη των κριτηρίων, προκύπτει ότι ναι μεν διατηρήθηκε η αρχική διάταξη των βαρών, ήτοι αρχικά είχαμε  $w_2 > w_3 > w_1$  και τελικά παρέμεινε  $\lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_1$ , αλλά υπήρξαν σημαντικές επιδράσεις στις αναλογίες των βαρών, ήτοι αρχικά είχαμε  $w_2/w_3 = 0,54/0,30 = 1,80$  και  $w_2/w_1 = 0,54/0,16 = 3,37$ , ενώ τελικά είχαμε αντιστοίχως  $\lambda_2/\lambda_3 = 0,3860/0,3140 = 1,23$  και  $\lambda_2/\lambda_1 = 0,3860/0,3000 = 1,29$ . Δηλαδή υπήρξε μία άμβλυνση των αρχικών αναλογιών των βαρών των κριτηρίων. Αυτή η άμβλυνση επήλθε καθότι το κριτήριο  $C_2$ , το οποίο είχε το μεγαλύτερο βάρος, είχε παράλληλα τη μικρότερη διασπορά επιδόσεων των εναλλακτικών σε αυτό (έτσι  $X_2^*/X_{*2} = 8/5 = 1,60$ ), ενώ το κριτήριο  $C_1$ , το οποίο είχε το μικρότερο βάρος, είχε τη μεγαλύτερη διασπορά επιδόσεων εναλλακτικών σε αυτό (έτσι  $X_1^*/X_{*1} = 162\%/74\% = 2,19$ ) και τέλος το κριτήριο  $C_3$ , το οποίο είχε ενδιάμεσο βάρος, είχε και ενδιάμεση διασπορά των επιδόσεων των εναλλακτικών σε αυτό (έτσι  $X_3^*/X_{*3} = 9/5 = 1,80$ ). Επομένως, η διάταξη των κριτηρίων με βάση τη διασπορά των επιδόσεων των εναλλακτικών σε αυτά, ήταν αντίστροφη αυτής των αρχικών βαρών των κριτηρίων, οπότε οι έντονες αναλογίες των αρχικών βαρών αμβλύθηκαν στις πολύ ηπιότερες αναλογίες των τελικών βαρών των κριτηρίων.

## 11.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση το προηγούμενο παράδειγμα εφαρμογής και τη γενική προηγηθείσα ανάλυση, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μέθοδος Εντροπίας δέχεται αρχικές εκτιμήσεις  $w_i$  των σχετικών βαρών των κριτηρίων, αλλά επιδρά επί αυτών με τους πολλαπλασιαστές  $\Lambda_i$ , ώστε να προκύψουν τα τελικά σχετικά βάρη  $\lambda_i$ . Κάθε πολλαπλασιαστής  $\Lambda_i$  διαμορφώνεται κυρίως βάσει της διασποράς των επιδόσεων των εναλλακτικών στο κριτήριο  $C_i$ . Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των επιδόσεων των εναλλακτικών σε ένα κριτήριο, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αντίστοιχος πολλαπλασιαστής, οπότε τόσο λιγότερο απομειώνεται η αρχική εκτίμηση βάρους για το κριτήριο αυτό. Αντίθετα, όσο μικρότερη είναι η διασπορά των επιδόσεων των εναλλακτικών σε ένα κριτήριο, τόσο μικρότερος είναι ο αντίστοιχος πολλαπλασιαστής, άρα τόσο περισσότερο απομειώνεται η αρχική εκτίμηση βάρους του κριτηρίου αυτού. Επομένως η μέθοδος έχει τη λογική του να εστιάζει η αποτίμηση/αξιολόγηση των εναλλακτικών στα κριτήρια ανάλογα με τη διασπορά των επιδόσεων των εναλλακτικών σε αυτά.
- Η μέθοδος προσδιορίζει τα τελικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης [Στάδιο (I)]. Ωστόσο, μπορεί να συνεχισθεί [Στάδιο (II)], ολοκληρώνοντας την αποτίμηση/αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων. Στο Στάδιο (II) χρησιμοποιείται γενικά κάποια Ευκλείδεια νόρμα, η οποία μετρά την «απόσταση από το Ιδεατό Σημείο».

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 12:

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΗΡ (ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

#### Συμβολισμοί

- K<sub>j</sub>: Κριτήριο αξιολόγησης.  
A<sub>i</sub>: Εναλλακτική λύση.  
n: Πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης.  
m: Πλήθος των εναλλακτικών λύσεων.  
w<sub>j</sub>: Βαρύτητα του κριτηρίου K<sub>j</sub>.  
τ: Ιδιοτιμή πίνακα.  
σ: Βοηθητική μεταβλητή για την εύρεση ιδιοτιμών.  
C./I.: Δείκτης Συνέπειας μεθόδου πολυκριτηριακής αξιολόγησης.  
ει,j: Μερική επίδοση εναλλακτικής λύσης, ήτοι επίδοση της εναλλακτικής A<sub>i</sub> στο κριτήριο K<sub>j</sub>.  
u<sub>i</sub><sup>j</sup>: Μερική χρησιμότητα εναλλακτικής λύσης A<sub>i</sub> (στο κριτήριο αξιολόγησης K<sub>j</sub>).  
U<sub>i</sub>: Γενική χρησιμότητα της εναλλακτικής λύσης A<sub>i</sub>.  
λ<sub>j,j'</sub>: Αριθμός που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της σπουδαιότητας του κριτηρίου K<sub>j</sub> και του κριτηρίου K<sub>j'</sub>.  
E<sup>j</sup>: Ιδιοδιάνυσμα.  
[W]: Πίνακας Βαρών των Κριτηρίων.  
[Π<sub>κ</sub>]: Μητρώο συγκρίσεως κατά ζεύγη των σημαντικοτήτων (βαρών) των κριτηρίων αξιολόγησης.  
[P<sup>j</sup><sub>κ</sub>]: Μητρώο συγκρίσεως κατά ζεύγη των επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων στο κριτήριο K<sub>j</sub>.  
det(Π<sub>κ</sub>): Ορίζουσα (“determinant”) του μητρώου [Π<sub>κ</sub>].

#### 12.1 ΜΕΘΟΔΟΣ: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ (Analytic Hierarchy Process)

##### 12.1.1 Γενικά

Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (Saaty, 1980 και 1990), (Holder, 1990), (Choi et al, 1994), μπορεί να εφαρμοσθεί με επιτυχία σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, όπως θα φανεί και πιο κάτω (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999).

*Ο όρος ιεράρχηση εδώ δεν αναφέρεται μόνο στη στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης αλλά και στην ιεράρχηση-αποτίμηση (δηλαδή τη βαθμολογία) των ανά κριτήριο επιδόσεων των λύσεων.*

Έτσι, δεν ευρίσκονται μόνο οι βαρύτητες των κριτηρίων w<sub>j</sub> αλλά και οι αποτιμήσεις των επιδόσεων, δηλαδή οι ει,j. Η ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης, όπως και των ανά κριτήριο επιδόσεων, γίνεται μέσω της τεχνικής των ιδιοτιμών, η οποία θα αναφερθεί συνοπτικά.

##### 12.1.2 Περιγραφή της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης

Η μέθοδος αυτή έχει δύο επίπεδα ανάλυσης: το επίπεδο της βαθμολόγησης των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων και το στάδιο της αποτίμησης των κριτηρίων.

##### α) Εξαγωγή των βαρών των κριτηρίων (Στάθμιση κριτηρίων)

Αρχικά γίνεται κατά ζεύγη σύγκριση κριτηρίων αξιολόγησης. Θεωρείται γενικά ότι είναι πιο αξιόπιστο, να συγκρίνονται ανά δύο τα κριτήρια.

Στην υπόψη μέθοδο, κατά την έκφραση των κατά ζεύγη συγκρίσεων των κριτηρίων αξιολόγησης, δημιουργείται ο πίνακας  $\Pi_1$  των  $\lambda_{j,j'}$ , όπου ο αριθμός  $\lambda_{j,j'}$  εκφράζει τη σχετική σπουδαιότητα του κριτηρίου  $j$  ως προς το κριτήριο  $j'$ , δηλαδή πόσες φορές σημαντικότερο είναι το κριτήριο  $j$  από το κριτήριο  $j'$ .

Από τη βιβλιογραφία (Saaty, 1980 και 1990), ως δυνατές τιμές για έναν αριθμό  $\lambda_{j,j'}$  προτείνονται κατά περίπτωση οι:

- Ακέραιοι αριθμοί από 2 έως και 9, εάν το κριτήριο  $j$  είναι περισσότερο σημαντικό από το κριτήριο  $j'$ .
- Οι αντίστροφοι κλασματικοί αριθμοί των παραπάνω ακεραίων, εάν το κριτήριο  $j$  είναι λιγότερο σημαντικό από το κριτήριο  $j'$ .

*Πίνακας 12.1: Κατά ζεύγη σύγκριση ποσοτήτων στο μητρώο  $\Pi_1$ .*

*Table 12.1: Pairwise comparison in matrix  $\Pi_1$ .*

	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$K_1$	1	5	5
$K_2$	1/5	1	2
$K_3$	1/5	1/2	1

*Πίνακας 12.2: Μετατροπή του μητρώου  $\Pi_1$  σε  $\Pi_2$ .*

*Table 12.2: Transformation of matrix  $\Pi_1$  to  $\Pi_2$ .*

	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$K_1$	1- $\sigma$	5	5
$K_2$	1/5	1- $\sigma$	2
$K_3$	1/5	1/2	1 - $\sigma$

*Πίνακας 12.3: Αντικατάσταση μεγίστης ιδιοτιμής στο μητρώο  $\Pi_2$ .*

*Table 12.3: Substitution of maximum eigenvalue in matrix  $\Pi_2$ .*

	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$K_1$	-2,055	5	5
$K_2$	1/5	-2,055	2
$K_3$	1/5	1/2	-2,055

- Η τιμή 1, εάν το κριτήριο  $j$  είναι το ίδιο σημαντικό με το κριτήριο  $j'$ .

Στην κατά ζεύγη σύγκριση της αναλυτικής διαδικασίας ιεράρχησης ισχύει η συμμετρικότητα, δηλαδή:

$$\lambda_{j',j} = 1 / \lambda_{j,j'} \quad (12.1)$$

Ακολουθώντας, θεωρείται το μετασχηματισμένο μητρώο  $\Pi_2$ , το οποίο είναι ίδιο με το  $\Pi_1$ , με εξαίρεση τα στοιχεία της κυρίας διαγώνιου, όπου αντί για τη μονάδα έχει τεθεί η ποσότητα 1- $\sigma$  (με  $\sigma$  ως άγνωστη παράμετρο).

Οι ιδιοτιμές (eigenvalues)  $\tau_k$  ευρίσκονται ως οι ρίζες (του αγνώστου  $\sigma$ ) της εξίσωσης μηδενισμού της ορίζουσας του  $\Pi_2$ , δηλαδή ως οι ρίζες της:

$$\det(\Pi_2) = 0 \quad (12.2)$$

Λαμβάνεται η μέγιστη ιδιοτιμή  $\tau_{\max}$  και ευρίσκεται το ιδιοδιάνυσμα (eigenvector)  $[W]$ , που αντιστοιχεί σε αυτή, από τον τύπο:

$$[\Pi_3] * [W] = [0] \quad (12.3)$$

όπου:



[ $\Pi_3$ ]: το μητρώο που προκύπτει από την αντικατάσταση της /παραμέτρου  $\sigma$  με την αριθμητική τιμή της  $\tau_{\max}$  στο μητρώο  $\Pi_2$ .

[W]: ιδιοδιάνυσμα - πίνακας των βαρών των κριτηρίων.

[0]: ο μηδενικός πίνακας.

Το ακόλουθο αριθμητικό παράδειγμα παρουσιάζεται για περαιτέρω διασαφήνιση της εφαρμογής της τεχνικής ιδιοτιμών.

*Αριθμητικό παράδειγμα εύρεσης βαρών κριτηρίων*

Έστω ότι δίδεται το μητρώο ( $\Pi_1$ ) κατά ζεύγη συγκρίσεων για τα κριτήρια  $K_j$ , όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, π.χ.

$K_1$ : Εσωτερικός δείκτης ανταποδοτικότητας (IRR).

$K_2$ : Μείωση ατυχημάτων.

$K_3$ : Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Προσδιορίζουμε τις ιδιοτιμές του μητρώου ( $\Pi_1$ ), δηλαδή τις ρίζες της εξίσωσης:  $\det(\Pi_2) = 0$

Το μητρώο  $\Pi_2$  παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Η μεγαλύτερη ιδιοτιμή του πίνακα  $\Pi_1$  είναι η:  $\tau_{\max} = 3,055$ .

Αντικαθιστώντας την τιμή της  $\tau_{\max}$  στο μητρώο  $\Pi_2$ , προκύπτει το μητρώο  $\Pi_3$ , όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Από τη σχέση:

$$[\Pi_3] * [W] = [0]$$

προκύπτει το ιδιοδιάνυσμα της μέγιστης ιδιοτιμής. Το ιδιοδιάνυσμα αυτό είναι το:

[W] = ( $w_1, w_2, w_3$ ) = (0,7087, 0,1786, 0,1125) το οποίο και εκφράζει τις βαρύτητες των κριτηρίων αξιολόγησης. Έτσι, επιτυγχάνεται η ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης και ταυτόχρονα η εύρεση των αντίθετων βαρών των κριτηρίων. Επισημαίνεται ότι:

$$\sum_j (w_j) = 1 \quad (12.4)$$

### **β) Βαθμολόγηση τών ανά κριτήριο επιδόσεων**

Στη δεύτερη φάση της μεθόδου «Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης» γίνεται η απόδοση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων.

Εφαρμόζεται και πάλι η τεχνική των ιδιοτιμών ως υπέρθεση συγκρίσεων κατά ζεύγη. Εδώ, όμως, δεν πρόκειται για ζεύγη κριτηρίων αλλά για ζεύγη εναλλακτικών λύσεων κατά κριτήριο.

Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι στη φάση αυτή διενεργούνται τόσες υποφάσεις όσα και τα κριτήρια αξιολόγησης, οπότε για η το πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης εφαρμόζεται στη φάση αυτή η φορές η τεχνική των ιδιοτιμών.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε κριτήριο αξιολόγησης  $j$  σχηματίζονται διαδοχικά τα μητρώα  $P^j_1, P^j_2, P^j_3$  ( $j$  δείκτης και όχι εκθέτης) αντίστοιχα των  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ , που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 12.1.2. Αντιστοίχως λοιπόν των  $\lambda_{j,j}$  που αποτελούν στοιχεία των μητρώων  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ , στα μητρώα  $P^j_1, P^j_2, P^j_3$ , υπάρχουν αριθμοί  $\lambda^j_{i,i}$  ( $j$  δείκτης και όχι εκθέτης).

Ο  $\lambda^j_{i,i}$  εκφράζει το σχετικό βαθμό επιτυχίας της εναλλακτικής λύσης  $i$  σε σχέση με την εναλλακτική λύση  $i'$  και αναφορικά με το κριτήριο  $j$ . Οι δυνατές τιμές του  $\lambda^j_{i,i}$  είναι ίδιες κατά περίπτωση με αυτές του αριθμού  $\lambda_{j,j}$  που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Από την εφαρμογή της μεθόδου των ιδιοτιμών για κάθε κριτήριο  $j$ , δηλαδή για κάθε μητρώο  $P^j_1$  (και αφού χρησιμοποιηθεί το παράγωγο αυτού μητρώο:  $P^j_2$ ), προκύπτει η αντίστοιχη μέγιστη ιδιοτιμή. Ακολουθώντας, με τη χρησιμοποίησή της δημιουργείται το μητρώο  $P^j_3$  και έπειτα, από τη συνθήκη:

$$[P^j_3] * [E^j] = [0] \quad (12.5)$$

προκύπτει το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα  $E^j$  ( $j$  δείκτης και όχι εκθέτης), όπου:

$$[E^j] = (\varepsilon^j_1, \varepsilon^j_2, \varepsilon^j_3, \dots, \varepsilon^j_m) \quad (12.6)$$

όπου  $m$  το πλήθος των εναλλακτικών λύσεων.

Το υπόψη ιδιοδιάνυσμα εκφράζει τη βαθμολογία των λύσεων ως προς το κριτήριο αξιολόγησης  $j$ .

Κατά συνέπεια, εξάγονται οι ανηγμένες σε τεχνητή κλίμακα επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων για κάθε κριτήριο αξιολόγησης.

Έτσι, μορφώνεται ένα μητρώο  $n \times m$ , όπου το τυχόν στοιχείο  $e^j_i$  εκφράζει την ανηγμένη απόδοση της λύσης  $i$  στο κριτήριο  $j$ . Το αναφερόμενο μητρώο έχει την εξής μορφή:

$e^1_1, e^1_2, \dots, e^1_m$
$e^2_1, e^2_2, \dots, e^2_m$
.....
.....
.....
$e^n_1, e^n_2, \dots, e^n_m$

Οι σειρές δηλαδή του προηγούμενου μητρώου είναι τα ιδιοδιανύσματα  $E^j$  που έχουν ευρεθεί. Επισημαίνεται, λοιπόν, η εφαρμογή η φορές της τεχνικής των ιδιοτιμών στη δεύτερη φάση της μεθόδου «Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης».

### γ) Σύνθεση της τελικής συνάρτησης αποτίμησης των εναλλακτικών λύσεων

Αφού εξαχθούν οι βαρύτητες των κριτηρίων αξιολόγησης και οι βαθμολογημένες σε τεχνητή κλίμακα επιδόσεις των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων, προκύπτει η τελική αποτίμηση κάθε εναλλακτικής λύσης. Η αποτίμηση - νόρμα  $U_i$  κάθε εναλλακτικής λύσης είναι το άθροισμα των σταθμισμένων (με τις βαρύτητες των κριτηρίων  $w_j$ ) επιδόσεών της  $e^j_i$  στα κριτήρια αξιολόγησης.

Με μαθηματικούς όρους, λοιπόν, ισχύει:

$$\sum_j (w_j * e^j_i) = \sum_j (u^j_i) = U_i \quad (12.7)$$

(όπου  $j$  δείκτης).

## 12.1.3 Ιδιαιτερότητες της μεθόδου

### α) Σχετικά με την απόδοση/βαθμολόγηση των ανά κριτήριο επιδόσεων

Σε σχέση με την παροχή των αριθμών πρέπει να διασαφηνιστούν τα ακόλουθα:

Για ποιοτικές εκφράσεις κριτηρίων η παροχή τέτοιων αριθμών βρίσκεται σε εννοιολογική αντιστοιχία με την κατασκευή μιας πρωτογενούς κλίμακας για την έκφραση των κριτηρίων αυτών.

Στις περιπτώσεις, όμως, ποσοτικής έκφρασης υπάρχει μεν η πρωτογενής (φυσική εδώ) κλίμακα, αλλά η παροχή τέτοιων αριθμών είναι μία ανεξάρτητη διαδικασία απόδοσης επιδόσεων από την πλευρά της χρησιμότητας. Άρα, υπάρχει αντιστοιχία με την κατασκευή μιας δευτερογενούς κλίμακας έκφρασης επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης. Τέτοιες δευτερογενείς κλίμακες μπορούν να ονομαστούν: “συναρτήσεις χρησιμότητας”, αποδίδοντας το διεθνή όρο: “Utility Functions”. Βέβαια, η χρησιμότητα, που απεικονίζεται εδώ, είναι σχετική, δηλαδή εκφράζει τη σχέση χρησιμότητας μεταξύ επιδόσεων λύσεων στο ίδιο κριτήριο αξιολόγησης. Για να εκφρασθεί με απόλυτο τρόπο η χρησιμότητα των επιδόσεων λύσεων σε διάφορα κριτήρια, δηλαδή για να υπάρχει ολική θεώρηση, πρέπει να γίνει στάθμιση των σχετικών χρησιμοτήτων με τα ειδικά βάρη (βαρύτητες) των κριτηρίων αξιολόγησης, οπότε προκύπτουν απόλυτες χρησιμότητες.

Τέλος, στις περιπτώσεις χρηματικής έκφρασης είναι δεδομένη η δευτερογενής κλίμακα χρησιμότητας (αφού μία τέτοια κλίμακα είναι η χρηματική).

### β) Σχετικά με τη μεταβατικότητα

Αντίθετα με την ισχύ της συμμετρικότητας (σχέση 12.1), στη φάση της δημιουργίας των πινάκων των κατά ζεύγη συγκρίσεων (της μεθόδου «Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης») δεν ισχύει η μεταβατικότητα. Έτσι, δεν ισχύει πάντα η ισότητα:

$$(\lambda_{1,3} = \lambda_{1,2} * \lambda_{2,3}) \quad (12.8)$$

Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί παράδοξο της μεθόδου. Εξηγείται από τη φιλοσοφία της κατά ζεύγη σύγκρισης. Έτσι, η σύγκριση αυτή γίνεται φυσικά και αβίαστα (ανακλαστικά θα μπορούσε να ειπωθεί). Η μη μεταβατικότητα, που αναφέρθηκε πριν, μπορεί να ξεπεραστεί με το μηχανισμό υπέρθεσης της μεθόδου: την εύρεση ιδιοτιμών.

### γ) Αντιμετώπιση της υποκειμενικότητας

Η μη μεταβατικότητα, η οποία μόλις εξετάστηκε, είναι μεν δεκτή στις σχέσεις των ανά ζεύγος συγκρίσεων, όταν όμως εμφανισθεί συνολικά και με ακραίες τιμές σε έναν πίνακα συγκρίσεων κατά ζεύγη, τότε εγείρει ζητήματα αξιοπιστίας της όλης μεθοδολογίας. Η Αναλυτική Διαδικασία Ιεράρχησης, μέσω της μαθηματικής της δομής, δίδει τη δυνατότητα ελέγχου αυτού του προβλήματος σε κάθε περίπτωση εφαρμογής της, χρησιμοποιώντας το Δείκτη Συνέπειας (Consistency Index):

$$C.I. = (\tau_{\max} - n) / (n-1) \quad (12.9)$$

όπου  $n$  το πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης (όταν σταθμίζονται τα κριτήρια) ή το πλήθος των υπό αξιολόγηση λύσεων/έργων (όταν βαθμολογούνται ανά κριτήριο οι αξιολογούμενες λύσεις.) Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο μικρός είναι ο πάντα θετικός δείκτης συνέπειας (Saaty, 1980 και 1990), τόσο πιο αξιόπιστη και άρα αποδεκτή είναι η συγκεκριμένη εφαρμογή της μεθόδου.

Για πλήρη μεταβατικότητα στις σχέσεις των κατά ζεύγη συγκρίσεων ενός πίνακα  $\Pi_1$ , η μέγιστη ιδιοτιμή  $\tau_{\max}$  τείνει στο  $n$ , οπότε ο δείκτης συνέπειας τείνει στο 0. Σύμφωνα με τον Saaty (Saaty, 1980 και 1990), η μέγιστη αποδεκτή τιμή του δείκτη συνέπειας είναι 0,1, ώστε η τεχνική ιδιοτιμών (άρα και η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης) να είναι αξιόπιστη.

## 12.2 ΚΡΙΤΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 12.2.1 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Η μέθοδος «Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης» συνιστά μία προσπάθεια αντικειμενικής προσέγγισης του προβλήματος της πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η αντικειμενική προσέγγιση επιχειρείται μέσω των παρακάτω στοιχείων της όλης διαδικασίας:

α. *Την κατά ζεύγη σύγκριση:* Η σύγκριση επιδόσεων ή κριτηρίων αξιολόγησης ανά ζεύγη έχει το πλεονέκτημα της καλύτερης εποπτείας, άρα και του σημαντικού βαθμού αξιοπιστίας. Αποφεύγεται έτσι η διάχυση μιας γενικής εξαρχής θεώρησης και επιτυγχάνεται μία αξιόλογη εστίαση στην ανά ζεύγος κάθε φορά διαδικασία.

β. *Την εύρεση ιδιοτιμών:* Η εύρεση των ιδιοτιμών και η κατόπιν χρησιμοποίηση της μεγαλύτερης από αυτές είναι ο τρόπος, μέσω του οποίου οδηγούμαστε στην υπέρθεση των κατά ζεύγη συγκρίσεων. Έτσι, η τελική εξαγωγή ενός διανύσματος (ιδιοδιανύσματος) έχει τη σημασία της μεταφοράς σε κάθε άξονα (άξονα-κριτήριο είτε άξονα-επίδοση εναλλακτικής λύσης ως προς κριτήριο) του συνόλου των σχέσεων του υπόψη άξονα με τους λοιπούς.

γ. *Την αποσύνθεση του πολυκριτηριακού προβλήματος:* Η όλη πορεία εξελίσσεται σε δύο βασικά επίπεδα: το επίπεδο της ανάλυσης ανά Κριτήριο - εντός κάθε κριτηρίου (ανάλυση ιεράρχησης επιδόσεων στα κριτήρια) και το επίπεδο της ανάλυσης στο σύνολο των κριτηρίων (ιεράρχηση μεταξύ των κριτηρίων). Μπορεί μάλιστα να τονιστεί το πολυσχιδές της ανάλυσης στο πρώτο επίπεδο, αφού για κάθε κριτήριο έχουμε ιδιαίτερη ανάλυση.

δ. *Τη δυνατότητα ελέγχου σε κάθε περίπτωση εφαρμογής:* Με βάση ό,τι αναφέρθηκε για το δείκτη συνέπειας, συνάγεται ότι στην αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης υπάρχει η δυνατότητα εκ των υστέρων ελέγχου των αποτελεσμάτων.

Εστιάζοντας τώρα στις απαιτήσεις της πολυκριτηριακής αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων, μπορούν να υπογραμμισθούν τόσο τα παραπάνω τέσσερα χαρακτηριστικά στοιχεία της γενικευμένης διαδικασίας ιεράρχησης όσο και τα παρακάτω:

1. *Τη δυνατότητα έκφρασης ποσοτικών και ποιοτικών επιδόσεων με τρόπο αξιόλογο:* Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης μπορεί να εκφράσει ποσοτικές αλλά και ποιοτικές επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων. Η δυνατότητα αυτή καταδεικνύεται με βάση αυτά που αναφέρθηκαν. Έτσι γίνεται εφικτή μια σφαιρική αξιολόγηση των έργων, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις που επιφέρουν σε όλους τους τομείς.

2. *Τη δυνατότητα να εκφράζονται πολλοί αποφασίζοντες:* Η συγκεκριμένη μέθοδος λειτουργεί με τρόπο φιλικό προς τους αποφασίζοντες, σε σχέση με άλλες πολυκριτηριακές μεθόδους. Αυτό απορρέει από την αναλογική-συγκριτική διαδικασία, που ακολουθείται στη στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης, αλλά και την αποτίμηση/βαθμολόγηση των ανά κριτήριο επιδόσεων των υπό αξιολόγηση λύσεων. Έχει παρατηρηθεί ότι η συγκριτική διαδικασία είναι πιο φυσική και αποτελεσματική από την έκφραση σε απόλυτους αριθμούς. Στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων η ανάγκη εκπροσώπησης πολλών φορέων και συνιστωσών στη λήψη της τελικής απόφασης υποδεικνύει τη χρησιμοποίηση μεθόδων με όσο το δυνατόν πιο φυσική, ορθολογική πορεία.

3. *Τη δυνατότητα της διαδικασίας ενσωματώσεων περιορισμένων εννοιών σε ευρύτερες:* Αυτό είναι σχετικό με ό,τι αναφέρθηκε στο (γ), αλλά μπορεί να τονιστεί η δυνατότητα ενσωματώσεων περιορισμένης έννοιας κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί, όταν, εκτός από την ιεράρχηση μεταξύ ευρύτερων κριτηρίων, γίνει και ιεράρχηση μικρότερων κριτηρίων που απαρτίζουν το ευρύτερο. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή διεθνώς ως “Διαδικασία Ενσωμάτωσης” (Nijkamp - Blaas, 1993). Η εφαρμογή μίας μεθόδου, που να πληροί τη διαδικασία ενσωμάτωσης, είναι ιδιαίτερα σημαντική για αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων.

4. *Τη δυνατότητα συμβατότητας της μεθόδου με άλλες τεχνικές:* Η αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε συνδυασμό και με άλλες τεχνικές λήψης αποφάσεων. Σημαντική είναι η προσπάθεια που έχει γίνει διεθνώς για το συνδυασμό της μεθόδου με την κλασική τεχνική, Delphi. Ο συνδυασμός έχει ονομαστεί D.H.P. [Delphic Hierarchy Process] (Khorramshahgol - Moustakis, 1988). Συνδυασμοί τεχνικών είναι συχνά χρήσιμο να εφαρμόζονται σε περιπτώσεις λήψης δύσκολων αποφάσεων, όπως η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, όπου μετέχουν πολλοί ειδικοί. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε τεχνικής που μετέχει στην επαλληλία.

5. *Την ύπαρξη αρκετών και εξελιγμένων προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή:* Για την εφαρμογή της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης έχουν αναπτυχθεί αρκετά αξιόλογα προγράμματα για ηλεκτρονικό υπολογιστή (Buede, 1992).

### **12.2.2 Μειονεκτήματα της μεθόδου**

Είναι χρήσιμο να επισημανθούν και κάποια δυνάμει μειονεκτήματα της μεθόδου ως σημεία, στα οποία μπορεί να αναζητηθεί περαιτέρω βελτίωση αυτής:

α. *Η έλλειψη μηχανισμού ελέγχου ικανοποίησης «κατωφλίων» επιδόσεων:* Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης δεν ενεργοποιεί κάποιο μηχανισμό ελέγχου ικανοποίησης «κατωφλίων» (thresholds) στις ανά κριτήριο εκφράσεις των επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων. Ελλοχεύει έτσι ο κίνδυνος έγκρισης λύσεων, οι οποίες πιθανόν να έχουν ακραία κακές επιδόσεις σε κάποια κριτήρια αξιολόγησης (π.χ. σε περιβαλλοντικά κριτήρια), παρά τη γενικά σημαντική ωφελιμότητά τους.

β. Η ασυνέχεια στις τιμές των βαρών στάθμισης των κριτηρίων και στις κλίμακες αναγωγής των ανά κριτήριο επιδόσεων: Οι βαρύτητες  $w_j$  των κριτηρίων αξιολόγησης προκύπτουν με την τεχνική ιδιοτιμών από τους αριθμούς  $\lambda_{j,j}$ , οι οποίοι παρουσιάζουν ασυνεχές πεδίο τιμών. Επίσης, η έκφραση των ανά κριτήριο επιδόσεων των λύσεων γίνεται τελικά με τα  $e_i^j$ , αφού όμως αρχικά χρησιμοποιθούν οι αριθμοί  $\lambda_{i,i}^j$ , οι οποίοι έχουν επίσης γενικά ασυνεχές πεδίο τιμών. Η ασυνέχεια των πεδίων τιμών των παραπάνω μπορεί να θεωρηθεί αδυναμία της μεθόδου, με την έννοια της ανεπάρκειας ακρίβειας.

## 12.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 12.3.1 Γενικά

Παρατίθεται εφαρμογή της μεθόδου Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999). Πιο συγκεκριμένα, με την εφαρμογή της υπόψη μεθόδου αξιολογούνται τρία συγκοινωνιακά έργα που εντάσσονται στην προσπάθεια βελτίωσης του σιδηροδρομικού δικτύου της γειτονικής αυτής χώρας.

Τα αξιολογούμενα έργα είναι τα εξής:

A<sub>1</sub>: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

A<sub>2</sub>: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

A<sub>3</sub>: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Τα κριτήρια αξιολόγησης είναι τα ακόλουθα:

K<sub>1</sub>: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

K<sub>2</sub>: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

K<sub>3</sub>: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Από τα τρία παραπάνω κριτήρια αξιολόγησης μόνο για το πρώτο δόθηκε ένας δείκτης κατ' αρχήν ποσοτικής έκφρασης. Αυτός ο δείκτης είναι ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR) για τον ιδιώτη επενδυτή.

Συγκεκριμένα, για τα τρία αξιολογούμενα έργα, ο IRR έλαβε τις ακόλουθες τιμές: για το A<sub>1</sub> το 94%, για το A<sub>2</sub> το 162% και για το A<sub>3</sub> το 74%. Για τα άλλα δύο κριτήρια υπάρχουν απλώς ποιοτικοί χαρακτηρισμοί για τις συνέπειες/επιδόσεις των υπό αξιολόγηση έργων. Έτσι, για το περιβαλλοντικό κριτήριο εκτιμήθηκε ότι τα έργα A<sub>1</sub> και A<sub>3</sub> θα έχουν περίπου τις ίδιες επιπτώσεις, ενώ το έργο A<sub>2</sub> θα έχει αισθητά χειρότερες επιπτώσεις. Για το κριτήριο της ποιότητας των προσφερόμενων συγκοινωνιακών υπηρεσιών εκτιμήθηκε ότι το έργο A<sub>1</sub> θα έχει πολύ καλύτερη επιρροή από καθένα εκ των άλλων δύο έργων. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το A<sub>3</sub> θα έχει καλύτερη σχετικά με το A<sub>2</sub> επιρροή στο υπόψη κριτήριο.

### 12.3.2 Στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης

Για τα τρία κριτήρια που προαναφέρθηκαν, μία ομάδα ειδικών έδωσε τις ακόλουθες τιμές στην κατά ζεύγος σύγκριση, δημιουργώντας το μητρώο Π<sub>1</sub>) αξιολόγησης για την παρούσα εφαρμογή (Πίνακας 12.4).

Ακολουθώς (με βάση όσα αναφέρθηκαν), ευρίσκονται οι ιδιοτιμές του παραπάνω μητρώου (μέσω του βοηθητικού μητρώου Π<sub>2</sub>). Η μέγιστη (μη μιγαδική) ιδιοτιμή είναι η  $\tau_{\max} = 3,0092$ .

Από αυτή προκύπτει το μητρώο Π<sub>3</sub>, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 12.5.

Από την επίλυση της εξίσωσης  $[\Pi_3] \cdot [W] = [0]$ , ευρίσκεται το διάνυσμα των βαρών των κριτηρίων, δηλαδή:

$[W] = (w_1, w_2, w_3) = (0,1634, 0,5396, 0,2970)$ .

Πίνακας 12.4: Μητρώο  $\Pi_1$  εφαρμογής.  
Table 12.4: Matrix  $\Pi_1$  of application example.

	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$K_1$	1	1/3	1/2
$K_2$	3	1	2
$K_3$	2	1/2	1

Πίνακας 12.5: Μητρώο  $\Pi_3$  εφαρμογής.  
Table 12.5: Matrix  $\Pi_3$  of application example.

	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$K_1$	-2,0092	1/3	1/2
$K_2$	3	-2,0092	2
$K_3$	2	1/2	-2,0092

### 12.3.3 Ανά κριτήριο βαθμολόγηση έργων

Στην παρούσα φάση γίνεται η αρχική απόδοση τής κατά ζεύγη σύγκρισης. Έτσι, για κάθε κριτήριο αξιολόγησης  $j$  σχηματίζεται το μητρώο  $P_1^j$  ( $j$  δείκτης), με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες, ένα σύνολο ειδημόνων έδωσε τα εξής μητρώα  $P_1^j$ :

Μητρώο  $P_1^1$ , ήτοι απόδοση σε κλίμακα Saaty κατά ζεύγη σύγκρισης έργων ως προς το κριτήριο αξιολόγησης  $K_1$  (Πίνακας 12.6).

Μητρώο  $P_1^2$ , ήτοι απόδοση σε κλίμακα Saaty κατά ζεύγη σύγκρισης έργων ως προς το κριτήριο αξιολόγησης  $K_2$  (Πίνακας 12.7).

Μητρώο  $P_1^3$ , ήτοι απόδοση σε κλίμακα Saaty κατά ζεύγη σύγκρισης έργων ως προς το κριτήριο αξιολόγησης  $K_3$  (Πίνακας 12.8).

Πίνακας 12.6: Μητρώο  $P_1^1$  εφαρμογής.  
Table 12.6: Matrix  $P_1^1$  of application example.

	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1/2	2
$A_2$	2	1	3
$A_3$	1/2	1/3	1

Πίνακας 12.7: Μητρώο  $P_1^2$  εφαρμογής.  
Table 12.7: Matrix  $P_1^2$  of application example.

	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	2	1
$A_2$	1/2	1	1/2
$A_3$	1	2	1

Πίνακας 12.8: Μητρώο  $P_1^3$  εφαρμογής.  
 Table 12.8: Matrix  $P_1^3$  of application example.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	4	3
A <sub>2</sub>	1/4	1	1/2
A <sub>3</sub>	1/3	2	1

Ακολούθως, με βάση αυτά που αναφέρθηκαν, δημιουργούνται τα βοηθητικά μητρώα  $P_2^j$  μέσω αυτών ευρίσκονται οι ιδιοτιμές  $\tau_k$  των μητρώων  $P_1^j$ . Η μέγιστη (πραγματική-όχι μιγαδική) ιδιοτιμή  $\tau_{\max}$  για κάθε μητρώο είναι η εξής:

- Για το μητρώο  $P_1^1$ ,  $\tau_{\max}^1 = +3,0092$
- Για το μητρώο  $P_1^2$ ,  $\tau_{\max}^2 = +3,0000$
- Για το μητρώο  $P_1^3$ ,  $\tau_{\max}^3 = +3,0183$

Μετά την εύρεση των μεγίστων ιδιοτιμών, δημιουργούνται τα μητρώα  $P_3^j$ . Τα μητρώα  $P_3^j$  για την εδώ εφαρμογή παρουσιάζονται στους Πίνακες 12.9, 12.10, 12.11.

Πίνακας 12.9: Μητρώο  $P_3^1$  εφαρμογής.  
 Table 12.9: Matrix  $P_3^1$  of application example.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	-2,0092	1/2	2
A <sub>2</sub>	2	-2,0092	3
A <sub>3</sub>	-1/2	1/3	-2,0092

Πίνακας 12.10: Μητρώο  $P_3^2$  εφαρμογής.  
 Table 12.10: Matrix  $P_3^2$  of application example.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	-2,0000	2	1
A <sub>2</sub>	1/2	-2,0000	1/2
A <sub>3</sub>	1	2	-2,0000

Πίνακας 12.11: Μητρώο  $P_3^3$  εφαρμογής.  
 Table 12.11: Matrix  $P_3^3$  of application example.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	-2,0183	4	3
A <sub>2</sub>	1/4	-2,0183	1/2
A <sub>3</sub>	1/3	2	-2,0183

Στη συνέχεια, προκύπτουν οι ανά κριτήριο βαθμολογίες των εναλλακτικών λύσεων (αποτίμηση των ανά κριτήριο επιδόσεων) από τη σχέση:

$$[P_3^j] * [E^j] = [0] \quad (12.10)$$

Πιο συγκεκριμένα:

Από τη σχέση  $[P_3^1] * [E^1] = [0]$ , προκύπτει:

$$[E^1] = (\varepsilon_1^1, \varepsilon_2^1, \varepsilon_3^1) = (0,2969, 0,5396, 0,1634).$$

Από τη σχέση  $[P_3^2] * [E^2] = [0]$ , προκύπτει:

$$[E^2] = (\varepsilon_1^2, \varepsilon_2^2, \varepsilon_3^2) = (0,4000, 0,2000, 0,4000) \text{ και}$$

από τη σχέση  $[P_3^3] * [E^3] = [0]$ , προκύπτει:  
 $[E^3] = (\varepsilon_1^3, \varepsilon_2^3, \varepsilon_3^3) = (0,6251, 0,1365, 0,2385)$ .

#### 12.3.4 Τελική αποτίμηση των αξιολογούμενων έργων

Βάσει όσων έχουν αναφερθεί, η τελική αποτίμηση των αξιολογούμενων έργων γίνεται από τη βαρυντικά σταθμισμένη άθροιση των ανά κριτήριο αποδόσεων (βαθμολογιών) τους.

Κάθε έργο  $A_i$  αποτιμάται από την τιμή  $U_i$  όπου:

$$U_i = \sum_j (w_j * \varepsilon_i^j) \quad (12.11)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση αυτή για κάθε αξιολογούμενο έργο προκύπτει:

- $U_1 = w_1 * \varepsilon_1^1 + w_2 * \varepsilon_1^2 + w_3 * \varepsilon_1^3 = 0,1634 * 0,2969 + 0,5396 * 0,4000 + 0,2970 * 0,6251 = \mathbf{0,4500}$

- $U_2 = w_1 * \varepsilon_2^1 + w_2 * \varepsilon_2^2 + w_3 * \varepsilon_2^3 = 0,1634 * 0,5396 + 0,5396 * 0,2000 + 0,2970 * 0,1365 = \mathbf{0,2366}$

- $U_3 = w_1 * \varepsilon_3^1 + w_2 * \varepsilon_3^2 + w_3 * \varepsilon_3^3 = 0,1634 * 0,1634 + 0,5396 * 0,4000 + 0,2970 * 0,2385 = \mathbf{0,3134}$

Επομένως, ισχύει η ακόλουθη διάταξη:

$$U_1 > U_3 > U_2 \quad (12.12)$$

Άρα, τα έργα κατατάσσονται ως εξής (από το περισσότερο μέχρι το λιγότερο επωφελές):

$$A_1 - A_3 - A_2$$

Σημειώνεται ότι σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση που έγινε από διεθνείς φορείς και με τη συμμετοχή του Υπουργείου Μεταφορών της Βουλγαρίας (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999), η κατάταξη για τα τρία προαναφερθέντα έργα ήταν η ίδια με αυτή που προέκυψε από την ανάλυση της παρούσας εργασίας.

#### 12.3.5 Έλεγχοι αξιοπιστίας βαθμολόγησης

Εφαρμόζονται εδώ οι έλεγχοι αξιοπιστίας της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα, ευρίσκεται ο Δείκτης Συνέπειας: C.I. για κάθε πίνακα  $P_1^j$  καθώς και για τον  $\Pi_1$  (σχέση 12.6). Εδώ, προκύπτουν:

- Μητρώο  $\Pi_1$ :  $(C.I.)^0 = (3,0092-3) / (3-1) = 0,0046$
- Μητρώο  $P_1^1$ :  $(C.I.)^1 = (3,0092-3) / (3-1) = 0,0046$
- Μητρώο  $P_1^2$ :  $(C.I.)^2 = (3,0000-3) / (3-1) = 0$
- Μητρώο  $P_1^3$ :  $(C.I.)^3 = (3,0183-3) / (3-1) = 0,0092$

Συγκρίνοντας τους δείκτες συνέπειας με την ποσότητα 0,1, διαπιστώνεται πως ο καθένας από αυτούς είναι πολύ μικρότερος. Επομένως, όλα τα μητρώα των κατά ζεύγη συγκρίσεων, που σχηματίστηκαν, μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

### 12.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται από την όλη ανάλυση της παρούσας εργασίας, η αποτίμηση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων και η ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης είναι από τις πιο σημαντικές συνιστώσες της πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η επιτυχία-αξιοπιστία της αξιολόγησης αυτής έγκειται κυρίως στην επαρκή θεωρητική κάλυψη και πρακτική εφαρμογή των στοιχείων αυτών.

Εστιάζοντας στα συγκοινωνιακά έργα, τα κριτήρια αξιολόγησης (δηλαδή οι ανά κριτήριο επιδόσεις) των έργων αυτών εκφράζονται με διάφορους τρόπους (χρηματικούς ή μη, ποσοτικούς ή μη). Οι ποικίλες αυτές εκφράσεις και οι απαιτήσεις αφ' ενός μίας δευτερογενούς αποτίμησης αυτών σε αξίες χρησιμότητας, με την ευρύτερη έννοια του όρου, και αφ' ετέρου συγκερασμού μέσω της στάθμισης των κριτηρίων υπαγορεύουν την ανάγκη θεώρησης πολυκριτηριακών μεθόδων και τεχνικών που να είναι ισχυρές εννοιολογικά και πρακτικά.



Ως μία καλή μέθοδος αποδεικνύεται η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (ΑΗΡ). Η υπόψη μέθοδος προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όπως δυνατότητες εννοιολογικής αποσύνθεσης, άρα και ουσιαστικής εστίασης σε πολυκριτηριακά προβλήματα, όσο και σε πρακτικό επίπεδο, όπως ύπαρξη μηχανισμών ελέγχου, συμβατότητα με άλλες τεχνικές λήψης αποφάσεων, φυσική ροή λόγω της κατά ζεύγη σύγκρισης.

Είναι σαφές ότι η παραπάνω μέθοδος δεν προτείνεται ως “πανάκεια” (όπως και καμία άλλωστε), αλλά αναλύεται και κρίνεται με συγκεκριμένες απαιτήσεις και στόχους. Πρέπει να τονιστεί πως η παρούσα εργασία θεωρεί μεγάλης σημασίας τη δομημένη κριτική των μεθόδων αξιολόγησης πολλαπλών κριτηρίων, πριν από την επιλογή μίας εξ’ αυτών για εφαρμογή στα συγκοινωνιακά έργα, ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 13:

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT (MULTI ATTRIBUTE UTILITY THEORY) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

#### 13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος MAUT (Keeney - Raiffa, 1976), (Schaerlig, 1985), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999), είναι μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων οι οποίες χρησιμοποιούν τις ποσότητες χρησιμότητας (“utilities”), ήτοι μία συνάρτηση χρησιμότητας για κάθε κριτήριο, η οποία (συνάρτηση), ανάγει τις αρχικές (φυσικές) επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια σε χρησιμότητες (ωφελιμότητες). Για να το επιτύχει αυτό ενεργεί σε δύο επίπεδα: α) Ανάγει καταρχήν τις αρχικές (φυσικές) επιδόσεις σε τιμές (“values”), ήτοι σε τεχνητές επιδόσεις εντός κάθε κριτηρίου και β) Ανάγει τις ευρεθείσες από το (α) επίπεδο τεχνητές επιδόσεις (τιμές) σε χρησιμότητες μέσω του πολλαπλασιασμού τους με τα βάρη των κριτηρίων.

#### Συμβολισμοί

$A_i$ :	Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.
$C_j$ :	Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.
$w_j$ :	Βάρος του κριτηρίου $C_j$ .
$\Phi_{i,j}$ :	Αρχική Επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$\Phi^*j$ :	Μέγιστη (Βέλτιστη) θεωρούμενη Επίδοση στο κριτήριο $C_j$ .
$\Phi^{\circ}j$ :	Ελάχιστη (Χείριστη) θεωρούμενη Επίδοση στο κριτήριο $C_j$ .
$v_{i,j}$ :	Κανονικοποιημένη Επίδοση της εναλλακτικής $A_i$ στο κριτήριο $C_j$ .
$V_j$ :	Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Αξιακών Οντοτήτων (Value Function) για το κριτήριο $C_j$ .
$U_i$ :	Ολική Χρησιμότητα της εναλλακτικής $A_i$ .
$\sum_j [\dots]$ :	Άθροισμα ως προς το δείκτη $j$ αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.

#### 13.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται τα σχετικά βάρη των κριτηρίων  $C_j$ , ήτοι τα  $w_j$ . Για να ισχύει η κανονικότητα των βαρών πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\sum_j w_j = 1. \quad (13.1)$$

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Από τις αρχικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, ήτοι τις  $\Phi_{i,j}$ , ευρίσκονται οι κανονικοποιημένες επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια. Η έννοια «κανονικές» σημαίνει ότι οι επιδόσεις αυτές είναι ανηγμένες στο πεδίο τιμών  $[0, 1]$ .

Η κανονικοποίηση αρκετές φορές (για περιπτώσεις γραμμικής θεώρησης) γίνεται μέσω της σχέσεως:

$$v_{i,j} = \Phi_{i,j} / \Phi^*j \quad (13.2)$$

όπου:

$v_{i,j}$ : Κανονικοποιημένη Επίδοση της εναλλακτικής  $A_i$  στο κριτήριο  $C_j$ ,

$\Phi_{i,j}$ : Αρχική Επίδοση της εναλλακτικής  $A_i$  στο κριτήριο  $C_j$ ,

$\Phi^*j$ : Μέγιστη (Βέλτιστη) θεωρούμενη Επίδοση στο κριτήριο  $C_j$ .

Τονίζεται ότι η Μέγιστη (Βέλτιστη) Επίδοση στο κριτήριο  $C_j$  είναι συνήθως η μέγιστη μεταξύ των θεωρούμενων εναλλακτικών λύσεων. Σε άλλες όμως περιπτώσεις, η Μέγιστη (Βέλτιστη) Επίδοση στο κριτήριο  $C_j$  μπορεί να είναι μία επίδοση μεγαλύτερη (καλύτερη)

από αυτές των θεωρουμένων εναλλακτικών στο υπόψη κριτήριο. Η επίδοση αυτή μπορεί να έχει ευρεθεί/εκτιμηθεί μέσω γενικότερων παρατηρήσεων που αφορούν στο υπόψη κριτήριο.

*Βήμα 3<sup>ο</sup>* : Για κάθε εναλλακτική  $A_i$  υπολογίζεται η Ολική Χρησιμότητα από τη σχέση:  

$$U_i = \sum_j [w_j * v_{i,j}] \quad (13.3)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>* : Οι εναλλακτικές κατατάσσονται ανάλογα του μεγέθους των  $U_i$ , ήτοι όσο μεγαλύτερη είναι η  $U_i$ , τόσο καλύτερη είναι η αντίστοιχη εναλλακτική  $A_i$ .

### 13.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT

#### 13.3.1 Γενικά για τη δημιουργία των Συναρτήσεων Τιμών (“Value Functions”)

Ιδιαίτερης σημασίας είναι κατά την εφαρμογή της MAUT η δημιουργία των κανονικοποιημένων επιδόσεων  $v_{i,j}$  των εναλλακτικών  $A_i$  στα κριτήρια  $C_j$ . Οι κανονικοποιημένες αυτές επιδόσεις, μπορεί να θεωρηθούν και ως τιμές (“values”), οι οποίες εν δυνάμει καθορίζουν και αποτελούν συναρτήσεις τιμών (“value functions”).

Ήδη, αναφέρθηκε ο τρόπος δημιουργίας των τιμών αυτών μέσω της σχέσης:

$$v_{i,j} = \Phi_{i,j} / \Phi^*j \quad (13.4)$$

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι δημιουργίας αξιακών οντοτήτων, όπως:

$$v_{i,j} = (\Phi_{i,j} - \Phi^{\circ}j) / (\Phi^*j - \Phi^{\circ}j) \quad (13.5)$$

$$v_{i,j} = (\Phi^*j - \Phi_{i,j}) / (\Phi^*j - \Phi^{\circ}j) \quad (13.6)$$

όπου:

$\Phi^{\circ}j$  : Ελάχιστη (Χείριστη) θεωρούμενη Επίδοση στο κριτήριο  $C_j$

#### 13.3.2 Δημιουργία των Συναρτήσεων Τιμών (“Value Functions”) μέσω της ανταλλαγής προτιμήσεων

Σχετικά με τη δημιουργία των συναρτήσεων τιμών μπορεί να πραγματοποιηθεί και με εφαρμογή της ανταλλαγής προτιμήσεων, που αναφέρεται σε σημαντικούς ερευνητές, όπως ο Ph. Vincke (Vincke, 1980, 1985, 1989, 1992).

Κατά την τεχνική αυτή, ορίζονται καταρχήν τα ακραία σημεία του πεδίου ορισμού μίας συνάρτησης τιμών, ήτοι τα  $a$  και  $b$ . Έστω ότι  $v(a) = 0$  και  $v(b) = 1$ . Η μέση τιμή του πεδίου ορισμού είναι η  $(a+b)/2$ .

Ερωτώνται ειδήμονες τι από τις δύο ακόλουθες επιλογές θα προτιμούσαν:

Την επιλογή της βεβαιότητας ότι θα έχουμε την τιμή  $v[(a+b)/2]$  ή την επιλογή των πιθανοτήτων όπου με πιθανότητα  $p_1=50\%$  θα έχουμε την τιμή  $v(a) = 0$  και με πιθανότητα  $(1-p_1) = 50\%$  θα έχουμε την τιμή  $v(b) = 1$ .

Εάν προτιμηθεί η επιλογή της βεβαιότητας ότι θα έχουμε την τιμή  $v[(a+b)/2]$ , τότε ισχύει:

$$v[(a+b)/2] > v(a) * 50\% + v(b) * 50\% \quad (13.7)$$

Στην περίπτωση αυτή, συνεχίζουμε με αντίστοιχη ερώτηση, αλλά αντί για πιθανότητα  $p_1=50\%$  για να έχουμε την τιμή  $v(a) = 0$ , υποθέτουμε πιθανότητα  $p_2<50\%$  για να έχουμε την τιμή  $v(a) = 0$ . Έστω λοιπόν ότι υποθέτουμε ότι με πιθανότητα  $p_2=40\%$  θα έχουμε την τιμή  $v(a) = 0$  και άρα με πιθανότητα  $(1-p_2) = 60\%$  θα έχουμε την τιμή  $v(b) = 1$ .

Εάν και πάλι προτιμηθεί η επιλογή της βεβαιότητας ότι θα έχουμε την τιμή  $v[(a+b)/2]$ , τότε ισχύει:

$$v[(a+b)/2] > v(a) * 40\% + v(b) * 60\% \quad (13.8)$$

Εάν λοιπόν συνεχισθεί αυτή η διαδικασία, με όλο και μειούμενη πιθανότητα  $p_k$  [πιθανότητα να έχουμε την τιμή  $v(a) = 0$ ], άρα όλο και αυξανόμενη πιθανότητα  $(1-p_k)$  [πιθανότητα να έχουμε την τιμή  $v(b) = 1$ ], τότε θα υπάρξει μία πιθανότητα  $p_k$  όπου θα υπάρξει η ισορροπία, ήτοι δεν θα υπάρξει προτίμηση ούτε στη βεβαιότητα της τιμής  $v[(a+b)/2]$ , ούτε στην εκδοχή

πιθανοτήτων όπου με πιθανότητα  $p_k$  θα έχουμε την τιμή  $v(a) = 0$  και με πιθανότητα  $(1 - p_k)$  θα έχουμε την τιμή  $v(b) = 1$ . Οπότε, η ισορροπία αυτή θα εκφράζεται από την εξίσωση:

$$v[(a+b)/2] = v(a) * p_k + v(b) * (1 - p_k) \quad (13.9)$$

Εφόσον  $v(a) = 0$  και  $v(b) = 1$ , η προηγούμενη σχέση καταλήγει στην:

$$v[(a+b)/2] = (1 - p_k) \quad (13.10)$$

Κατόπιν του προσδιορισμού της τιμής  $v[(a+b)/2]$ , μπορεί να προσδιορισθούν με αντίστοιχο τρόπο και οι τιμές άλλων σημείων, ήτοι μεταξύ του  $a$  και του  $(a+b)/2$ , είτε μεταξύ του  $(a+b)/2$  και του  $b$ .

Σε κάθε περίπτωση, για δύο τυχόντα σημεία  $X$  και  $\Psi$  (με  $X < \Psi$ ) του πεδίου ορισμού, μπορεί να τίθεται το ερώτημα εάν είναι προτιμητέα η επιλογή της βεβαιότητας της τιμής  $v[(X+\Psi)/2]$  ή είναι προτιμητέα η επιλογή των πιθανοτήτων όπου με κάποια πιθανότητα θα έχουμε την τιμή  $v(X)$  και με τη συμπληρωματική πιθανότητα θα έχουμε την τιμή  $v(\Psi)$ .

### 13.3.3 Η μορφή των συναρτήσεων τιμών/χρησιμότητας

Συνήθως οι συναρτήσεις τιμών είναι γραμμικής μορφής. Αυτή είναι η απλούστερη μορφή τους. Εκτός όμως από τη γραμμική μορφή, υπάρχουν και άλλες μορφές. Για παράδειγμα, μία καμπύλη μορφή η οποία στρέφει τα κοίλα κάτω, είναι μία αρκετά συνηθισμένη μορφή.

Μία καμπύλη η οποία στρέφει τα κοίλα κάτω σημαίνει πρακτικά τα εξής:

Για δύο σημεία του πεδίου ορισμού, ήτοι τα  $X$  και  $\Psi$ , ισχύει για τις αντίστοιχες τιμές του πεδίου τιμών:

$$[v(X) + v(\Psi)] / 2 < v[(X+\Psi)/2] \quad (13.11)$$

Δηλαδή ο μέσος όρος του πεδίου τιμών της συνάρτησης είναι μικρότερος της τιμής της συνάρτησης που αντιστοιχεί στον μέσο όρο του πεδίου ορισμού.

Γενικά, οι συναρτήσεις τιμών μπορεί να έχουν μία από τις ακόλουθες μορφές:

- Ευθύγραμμη αύξουσα
- Ευθύγραμμη φθίνουσα
- Τεθλασμένη γραμμή συνεχώς αύξουσα
- Τεθλασμένη γραμμή συνεχώς φθίνουσα
- Τεθλασμένη γραμμή χωρίς ενιαία μονοτονία
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς αύξουσα με κοίλα στραμμένα άνω
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς αύξουσα με κοίλα στραμμένα κάτω
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς φθίνουσα με κοίλα στραμμένα άνω
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς φθίνουσα με κοίλα στραμμένα κάτω
- Σιμοειδής ή τύπου Gauss

## 13.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 13.4.1 Γενικά

Θεωρούνται τρεις εναλλακτικές λύσεις νέων κατασκευών/παρεμβάσεων σε Οδικό Άξονα και τρία κριτήρια. Τα κριτήρια και οι αντίστοιχοι δείκτες υποστασιοποίησής τους έχουν ως εξής:

C1: Μείωση του Λειτουργικού Κόστους των Οχημάτων (μετρούμενο ως % μείωση από την υφισταμένη κατάσταση).

C2: Μείωση της Ρύπανσης του Αέρα στον Οδικό Άξονα και πλησίον αυτού (μετρούμενο ως % μείωση από την υφισταμένη κατάσταση).

C3: Μείωση του Θορύβου στον Οδικό Άξονα και πλησίον αυτού (μετρούμενο ως % μείωση από την υφισταμένη κατάσταση).

Οι αρχικές (φυσικές) επιδόσεις των εναλλακτικών εμφανίζονται στον ακόλουθο Πίνακα:

Πίνακας 13.1: Αρχικές επιδόσεις  $\Phi_{i,j}$  των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης  
 Table 13.1: Initial performances  $\Phi_{i,j}$  of alternatives in evaluation criteria

	C1 (%)	C2 (%)	C3 (%)
A1	30	12	25
A2	25	20	35
A3	15	28	28

### 13.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου MAUT

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Τα σχετικά βάρη των κριτηρίων αποφασίζονται ως εξής:  $w_1 = 0,40$ ,  $w_2 = 0,30$ ,  $w_3 = 0,30$ .

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Από τις αρχικές επιδόσεις θα προσδιορισθούν οι κανονικές τεχνητές επιδόσεις, ήτοι οι τιμές (“values”). Για κάθε κριτήριο, ορίζεται η αντίστοιχη συνάρτηση τιμών (“value function”).

Έστω για το κριτήριο C1, επιλέγεται η συνάρτηση  $V_1(\Phi_{i,1}) = h_1 * (\Phi_{i,1})^{1/2}$

Από την οριακή συνθήκη ότι για  $\Phi_{i,1} = 100$  πρέπει  $V_1(\Phi_{i,1}) = 1$ , προκύπτει η εξίσωση:

$$h_1 * (100)^{1/2} = 1, \text{ από την επίλυση της οποίας προκύπτει:}$$

$$h_1 = 0,10.$$

$$\text{Επομένως } V_1(\Phi_{i,1}) = 0,10 * (\Phi_{i,1})^{1/2}$$

Έστω για το κριτήριο C2, επιλέγεται η συνάρτηση  $V_2(\Phi_{i,2}) = h_2 * (\Phi_{i,2})^{2/3}$

Από την οριακή συνθήκη ότι για  $\Phi_{i,2} = 100$  πρέπει  $V_2(\Phi_{i,2}) = 1$ , προκύπτει η εξίσωση:

$$h_2 * (100)^{2/3} = 1, \text{ από την επίλυση της οποίας προκύπτει:}$$

$$h_2 = 0,0464.$$

$$\text{Επομένως } V_2(\Phi_{i,2}) = 0,0464 * (\Phi_{i,2})^{2/3}$$

Έστω για το κριτήριο C3, επιλέγεται η συνάρτηση  $V_3(\Phi_{i,3}) = h_3 * (\Phi_{i,3})^{1/2}$

Από την οριακή συνθήκη ότι για  $\Phi_{i,3} = 100$  πρέπει  $V_3(\Phi_{i,3}) = 1$ , προκύπτει η εξίσωση:

$$h_3 * (100)^{1/2} = 1, \text{ από την επίλυση της οποίας προκύπτει:}$$

$$h_3 = 0,10.$$

$$\text{Επομένως } V_3(\Phi_{i,3}) = 0,10 * (\Phi_{i,3})^{1/2}$$

Άρα, ανά κριτήριο έχουμε:

Για το κριτήριο C1:

$$v_{1,1} = 0,10 * (\Phi_{1,1})^{1/2} = 0,10 * 30^{1/2} = 0,5477.$$

$$v_{2,1} = 0,10 * (\Phi_{2,1})^{1/2} = 0,10 * 25^{1/2} = 0,5000.$$

$$v_{3,1} = 0,10 * (\Phi_{3,1})^{1/2} = 0,10 * 15^{1/2} = 0,3872.$$

Για το κριτήριο C2:

$$v_{1,2} = 0,0464 * (\Phi_{1,2})^{2/3} = 0,0464 * 12^{2/3} = 0,2432.$$

$$v_{2,2} = 0,0464 * (\Phi_{2,2})^{2/3} = 0,0464 * 20^{2/3} = 0,3418.$$

$$v_{3,2} = 0,0464 * (\Phi_{3,2})^{2/3} = 0,0464 * 28^{2/3} = 0,4278.$$

Για το κριτήριο C3:

$$v_{1,3} = 0,10 * (\Phi_{1,3})^{1/2} = 0,10 * 25^{1/2} = 0,5000.$$

$$v_{2,3} = 0,10 * (\Phi_{2,3})^{1/2} = 0,10 * 35^{1/2} = 0,5916.$$

$$v_{3,3} = 0,10 * (\Phi_{3,3})^{1/2} = 0,10 * 28^{1/2} = 0,5291.$$

Οι τεχνητές κανονικοποιημένες επιδόσεις (τιμές) πινακοποιούνται ως κάτωθι:

Πίνακας 13.2: Τιμές (“values”)  $v_{i,j}$  των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης  
 Table 13.2: Values  $v_{i,j}$  of alternatives in evaluation criteria

	C1	C2	C3
A1	0,5477	0,2432	0,5000
A2	0,5000	0,3418	0,5916
A3	0,3872	0,4278	0,5291

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Για κάθε εναλλακτική  $A_i$  υπολογίζεται η Ολική Χρησιμότητα από τη σχέση:

$$U_i = \sum_j [w_j * v_{i,j}]$$

Οπότε έχουμε:

$$U_1 = \sum_j [w_j * v_{1,j}] = w_1 * v_{1,1} + w_2 * v_{1,2} + w_3 * v_{1,3} = 0,40*0,5477 + 0,30*0,2432 + 0,30*0,5000 = 0,44204.$$

$$U_2 = \sum_j [w_j * v_{2,j}] = w_1 * v_{2,1} + w_2 * v_{2,2} + w_3 * v_{2,3} = 0,40*0,5000 + 0,30*0,3418 + 0,30*0,5916 = 0,48002.$$

$$U_3 = \sum_j [w_j * v_{3,j}] = w_1 * v_{3,1} + w_2 * v_{3,2} + w_3 * v_{3,3} = 0,40*0,3872 + 0,30*0,4278 + 0,30*0,5291 = 0,44195.$$

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Οι εναλλακτικές κατατάσσονται (από την καλύτερη έως τη χειρότερη) ανάλογα του μεγέθους των  $U_i$ , ήτοι όσο μεγαλύτερη είναι μία  $U_i$ , τόσο καλύτερη είναι η αντίστοιχη εναλλακτική  $A_i$ .

Αφού λοιπόν:

$$U_2 > U_1 > U_3$$

Οι εναλλακτικές κατατάσσονται (από την καλύτερη έως τη χειρότερη) ως εξής:

A2 - A1 - A3.

## 13.5 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MAUT

### 13.5.1 Χαρακτηριστικά αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων διέπεται από ορισμένα χαρακτηριστικά (Nijkamp et al, 1993), (Roy, 1985), (Schaerlig, 1985), (Szidarovsky – Gershon - Duckstein, 1986), (Tsamboulas et al, 1999), όπως:

- το σημαντικό **πλήθος εναλλακτικών λύσεων**, αφού για τα περισσότερα συγκοινωνιακά έργα, είναι δυνατές πολλές εναλλακτικές λύσεις, τόσο λόγω των συγχρόνων μεγάλων τεχνικών δυνατοτήτων στις κατασκευές, όσο και λόγω του πολυσχιδούς των οικονομικών θεωρήσεων των υπόψη έργων,
- το σημαντικό **πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού οι επιρροές των συγκοινωνιακών έργων είναι πολυσχιδείς,
- το σημαντικό **πλήθος** και την εν δυνάμει σημαντική **ετερογένεια** των **αποφασιζόντων/αξιολογητών**, αφού, έχοντας μεγάλο πεδίο επιρροής, τα συγκοινωνιακά έργα εγείρουν το ενδιαφέρον πολλών εμπλεκόμενων σε αυτά για αξιολόγηση: χρηστών, περιοίκων, ενδιαφερομένων φορέων, κατασκευαστών, μελετητών, φορέων εκμετάλλευσής τους κ.ά.
- την **ετερογένεια** των **κριτηρίων αξιολόγησης**, αφού προέρχονται από διαφορετικούς μεταξύ τους χώρους: περιβάλλον, κοινωνία, οικονομία, τεχνικό πεδίο κ.ά., όπου η υπόψη ετερογένεια των κριτηρίων, οπότε για τη μέτρησή τους χρησιμοποιούνται διαφορετικοί μεταξύ τους δείκτες και κλίμακες (:φυσικές, αριθμητικές, λεξικογραφικές κ.ά.),
- τη **δυσκολία ποσοτικής απόδοσης** των **επιδόσεων** των λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, αφού πολλά από τα υπόψη κριτήρια είναι ποιοτικά εκ φύσεως (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, πολιτισμικά).

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, δεν μπορεί, παρά να αποτελούν και βασικούς άξονες θεώρησης και εκτίμησης των μεθόδων αξιολόγησης των υπόψη έργων, αφού, είναι προφανές, ότι μία μέθοδος αξιολόγησης ενός έργου ή ενός συνόλου έργων είναι απαραίτητο να θεωρεί τα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι και η αξιολόγηση άλλων τεχνικών έργων, που αναφέρονται στην ενέργεια ή στο περιβάλλον, παρουσιάζουν σε σημαντικό βαθμό τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των συγκοινωνιακών έργων. Έτσι, θα μπορούσε να εξετασθεί και εκεί η εφαρμογή της μεθόδου MAUT.

Στα επόμενα γίνεται κριτική θεώρηση της μεθόδου MAUT σύμφωνα με τα εν λόγω χαρακτηριστικά.

### **13.5.2 Αριθμός εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων**

Η μέθοδος MAUT δεν παρουσιάζει πρόβλημα με τον μεγάλο αριθμό των εναλλακτικών λύσεων, αφού λειτουργεί ως αθροιστική μέθοδος και εντάσσει με απλότητα και σαφήνεια κάθε εναλλακτική στη διαδικασία αποτίμησης/αξιολόγησης.

### **13.5.3 Αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου MAUT είναι η δημιουργία από μίας τεχνητής κλίμακας-συνάρτησης (“value function”) για κάθε κριτήριο αξιολόγησης. Επομένως, με την αύξηση του αριθμού των κριτηρίων, αυξάνεται και η πολλαπλότητα των χειρισμών και των υπολογισμών της μεθόδου. Ωστόσο, και στην περίπτωση πολλών κριτηρίων, δεν χάνεται η δυνατότητα της μεθόδου για εποπτεία.

### **13.5.4 Αριθμός και βαθμός ετερογένειας των αποφασιζόντων**

Στη μέθοδο MAUT δημιουργούνται οι συναρτήσεις αναγωγής των αρχικών επιδόσεων στις τιμές (“values”). Η σύνθεση διαφορετικών απόψεων αποφασιζόντων, μπορεί να λάβει χώρα ακριβώς πάνω στο σημείο αυτό, δηλαδή στην επιλογή της μορφής εκάστης συνάρτησης αναγωγής και στην τελική δημιουργία της (για κάθε κριτήριο η κατάλληλη συνάρτηση αναγωγής).

### **13.5.5 Βαθμός ετερογένειας κριτηρίων αξιολόγησης**

Η μέθοδος MAUT χειρίζεται πολύ καλά ετερογενή κριτήρια, αφού με τη δυνατότητα δημιουργίας ιδιαίτερης για κάθε κριτήριο συνάρτησης αναγωγής των αρχικών επιδόσεων στις τιμές, μπορεί να ανταποκριθεί με ευελιξία και αξιοπιστία στην ετερογένεια αυτή.

### **13.5.6 Ποσοτική απόδοση επιδόσεων εναλλακτικών λύσεων**

Η μέθοδος MAUT, μέσω της δυνατότητας δημιουργίας συναρτήσεων αναγωγής των αρχικών επιδόσεων στις τιμές, μπορεί να επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια στην ποσοτική απόδοση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων, αφού μπορεί να προσαρμόζεται ιδιαίτερα και μάλιστα συναρτησιακά σε κάθε κριτήριο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 14: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ SMART ΚΑΙ SMARTER ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### 14.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μέθοδοι SMART και SMARTER (Edwards – Barron, 1994), (Edwards, 1997), (Tsamboulas D. – Pearman A. – Watson S. – Yiotis G., 1997) είναι αθροιστικές μέθοδοι πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Χαρακτηρίζονται από απλότητα, ενώ τα τελευταία χρόνια υποστηρίζονται και από προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών. Είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν και σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων.

#### Συμβολισμοί

- $A_i$ : Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.  
 $C_j$ : Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.  
 $w_j$ : Βάρος του κριτηρίου  $C_j$ .  
 $r_{i,j}$ : Κανονικοποιημένη επίδοση της εναλλακτικής  $A_i$  στο κριτήριο  $C_j$ .  
 $U_i$ : Ολική Χρησιμότητα της εναλλακτικής  $A_i$ .  
 $\sum_j [\dots]$ : Άθροισμα ως προς το δείκτη  $j$  αυτών που ακολουθούν στη συνέχεια.

### 14.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ SMART ΚΑΙ SMARTER

#### 14.2.1 Μέθοδος SMART

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται τα σχετικά βάρη των κριτηρίων  $C_j$ , ήτοι τα  $w_j$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Ευρίσκονται οι ανά κριτήριο κανονικές επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, ήτοι οι  $r_{i,j}$ . Η έννοια «κανονικές» σημαίνει ότι οι επιδόσεις αυτές είναι ανηγμένες στο πεδίο τιμών [0, 1].

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Για κάθε εναλλακτική  $A_i$  υπολογίζεται η Ολική Χρησιμότητα από τη σχέση:

$$U_i = \sum_j [w_j * r_{i,j}] / \sum_j w_j \quad (14.1)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Οι εναλλακτικές κατατάσσονται ανάλογα του μεγέθους των  $U_i$ , ήτοι όσο μεγαλύτερη είναι η  $U_i$ , τόσο καλύτερη είναι η αντίστοιχη εναλλακτική  $A_i$ .

#### 14.2.2 Μέθοδος SMARTER

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Γίνεται μία ποιοτική ιεράρχηση των βαρών των κριτηρίων, ήτοι μία απλή διάταξη βαρών, χωρίς να δίδονται εξ' αρχής τιμές στα βάρη. Έστω μάλιστα ότι ο δείκτης  $j$  δεικνύει τη σειρά σπουδαιότητας του κριτηρίου  $w_j$ , ήτοι όσο μεγαλύτερος ο δείκτης  $j$ , τόσο ολιγότερο σπουδαίο είναι το αντίστοιχο κριτήριο.

Οι τιμές των βαρών των κριτηρίων δίδονται στη SMARTER από την ακόλουθη σχέση:

$$w_j = (1/n) * \sum_k [1/k] \quad (14.2)$$

όπου το  $k$  μεταβάλλεται (ως φυσικός αριθμός) από  $k=j$  έως  $k=n$ .

Με βάση την εξίσωση αυτή, η τιμή βάρους κάθε κριτηρίου τοποθετείται στο κεντροειδές.

*Βήματα 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup>, 4<sup>ο</sup>*: Όπως και η SMART.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 15:

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UTA (UTILITY ADDITIVE) ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

#### 15.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος UTA (Jacquet-Lagrece - Siskos, 1982), (Siskos – Grigoroudis - Matsatsinis, 2005), (Beuthe – Eeckhoudt - Scanella, 2000), (Beuthe – Scanella, 2001), (Zorounidis - Doumpos, 1999), είναι μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων οι οποίες χρησιμοποιούν τις συναρτήσεις χρησιμότητας (“utility functions”), ήτοι μία συνάρτηση χρησιμότητας για κάθε κριτήριο, η οποία (συνάρτηση) ανάγει τις αρχικές (φυσικές) επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια σε χρησιμότητες. Η μέθοδος UTA θεωρεί ότι κάθε συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να αποδοθεί με τεθλασμένη (“linear piecewise”) μορφή. Εισήχθη υπό των Jacquet-Lagrece και Σίσκου, στα 1982 και έκτοτε έχουν δημιουργηθεί αρκετές εκδοχές της, όπως η UTASTAR κ.ά.

Αυτό που χαρακτηρίζει σε μέγιστο βαθμό τη μέθοδο UTA από τις άλλες πολυκριτηριακές μεθόδους, είναι ότι καταρχήν θεωρεί μία διάταξη ιεράρχησης εναλλακτικών λύσεων ως δεδομένη και μέσω αυτής της διάταξης προσδιορίζει εν συνεχεία τις συναρτήσεις χρησιμότητας των κριτηρίων.

Επομένως πρακτικά, για να εφαρμοσθεί σε πρόβλημα όπου ζητείται η αξιολόγηση και ιεράρχηση ενός συνόλου εναλλακτικών λύσεων, λαμβάνεται μία δεδομένη διάταξη εναλλακτικών λύσεων σε αντίστοιχο πρόβλημα, ήτοι πρόβλημα ιδίων κριτηρίων αξιολόγησης, και εν συνεχεία, αφού προσδιορισθούν οι συναρτήσεις χρησιμότητας στα εν λόγω κριτήρια, λαμβάνει χώρα η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων του κυρίως προβλήματος (του αρχικού δηλαδή προβλήματος του οποίου ζητείτο η διάταξη των εναλλακτικών).

Δηλαδή, για να εφαρμοσθεί πρακτικά η μέθοδος UTA σε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής αξιολόγησης ενός συνόλου [A] εναλλακτικών, χρησιμοποιείται ένα άλλο σύνολο [A'] στο οποίο είναι δεδομένη η ιεραρχική διάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

#### Συμβολισμοί

A <sub>k</sub> :	Εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.
C <sub>i</sub> :	Κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.
$\sum_i^{j-1}[\dots]$ :	Σειρά των στοιχείων που ακολουθούν.
$u_i(g_i)$ :	Συνάρτηση χρησιμότητας για το κριτήριο C <sub>i</sub> .
j:	Σημείο του πεδίου ορισμού το οποίο αποτελεί κόμβο για τη συνάρτηση πεδίου τιμών (συνάρτηση χρησιμότητας), δηλαδή το σημείο αυτό έχει εκατέρωθεν δύο διαφορετικά τμήματα της συνάρτησης χρησιμότητας.
$w_{ij}$ :	Η διαφορά μεταξύ δύο τιμών διαδοχικών κόμβων του πεδίου τιμών (της συνάρτησης χρησιμότητας).
$u_i(g_i^*)$ :	Το ανώτερο σημείο της συνάρτησης χρησιμότητας του κριτηρίου C <sub>i</sub> .
$u_i(g_i^{\#})$ :	Το κατώτερο σημείο της συνάρτησης χρησιμότητας του κριτηρίου C <sub>i</sub> .
$\Delta(A_k, A_{k+1})$ :	Διαφορά προτίμησης προς την εναλλακτική A <sub>k</sub> έναντι αυτής προς την εναλλακτική A <sub>k+1</sub> .
δ:	Μικρή θετική ποσότητα εξασφάλισης υπεροχής εναλλακτικής λύσεως έναντι άλλης.
$\sigma(A_k)$ :	Σφάλμα κατά τον υπολογισμό της συνάρτησης της εναλλακτικής A <sub>k</sub> .

## 15.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UTA

*Βήμα 1<sup>ο</sup>:* Θεωρείται ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων [A], τα αποτελέσματα των οποίων ποσοτικοποιούνται/περιγράφονται με βάση ένα σύνολο κριτηρίων. Ζητείται η αξιολόγηση των εναλλακτικών αυτών λύσεων και η ένταξή τους σε μια ιεραρχική διάταξη.

*Βήμα 2<sup>ο</sup>:* Θεωρείται ένα άλλο σύνολο εναλλακτικών [A'], το οποίο έχει τα ίδια κριτήρια αξιολόγησης και στο οποίο η ιεραρχική διάταξη των εναλλακτικών είναι εκ των προτέρων δεδομένη (ως προτίμηση αξιολογητών/αποφασιζόντων).

Σχηματίζεται ο Πίνακας των επιδόσεων των εναλλακτικών αυτών λύσεων στα κριτήρια αξιολογήσεως. Η συνολική επίδοση-χρησιμότητα μίας εναλλακτικής λύσης, ισούται με το άθροισμα των κατά κριτήριο χρησιμοτήτων-επιδόσεων.

$$u(g) = \sum_i [u_i(g_i)] \quad (15.1)$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>:* Οι συναρτήσεις χρησιμότητας των κριτηρίων (μία για κάθε κριτήριο), θεωρούνται ως τεθλασμένες. Εκτιμώνται/ευρίσκονται τα κρίσιμα σημεία των συναρτήσεων χρησιμότητας, ήτοι τα σημεία που ορίζουν τις αλλαγές κατεύθυνσης των συναρτήσεων χρησιμότητας, δηλαδή οριοθετούν τα επιμέρους γραμμικά τμήματα των τεθλασμένων συναρτήσεων.

Το κάτω όριο εκάστης συνάρτησης  $u_i(g_i)$  ισούται με το μηδέν ("0"), ήτοι:

$$u_i(g_i^*) = 0. \quad (15.2)$$

Το άθροισμα των άνω ορίων ισούται με το 1, ήτοι:

$$\sum_i [u_i(g_i^*)] = 1. \quad (15.3)$$

Αφού κάθε συνάρτηση  $u_i(g_i)$  είναι τεθλασμένη, τότε:

$$u_i(g_i^*) = \sum_j [w_{i,j}] \quad (15.4)$$

όπου

$$w_{i,j} = u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \quad (15.5)$$

ήτοι το  $w_{i,j}$  είναι η διαφορά μεταξύ διαδοχικών τιμών του πεδίου τιμών της τεθλασμένης συνάρτησης  $u_i(g_i)$  και συγκεκριμένα μεταξύ των τιμών  $u_i(g_i^{j+1})$  και  $u_i(g_i^j)$ . Άρα:

$$u_i(g_i^j) = \sum_t^{j-1} (w_{i,t}) \quad (15.6)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>:* Αξιοποιείται η διάταξη των εναλλακτικών λύσεων και τίθεται το πρόβλημα της αξιολόγησης ως πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού.

Δηλαδή με δεδομένη τη διάταξη των εναλλακτικών λύσεων, εάν η τυχούσα εναλλακτική  $A_k$  ευρίσκεται υψηλότερα στη διάταξη από την εναλλακτική  $A_{k+1}$ , τότε η διαφορά προτίμησης της  $A_k$  έναντι της  $A_{k+1}$ , ήτοι η  $\Delta(A_k, A_{k+1})$  έχει ως εξής:

$$\Delta(A_k, A_{k+1}) = u[g(A_k)] - u[g(A_{k+1})] - \sigma(A_k) + \sigma(A_{k+1}),$$

όπου

$$\sigma(A_k) \text{ το σφάλμα υπολογισμού της συνάρτησης } u[g(A_k)].$$

Οπότε απαιτείται η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος σφαλμάτων, ήτοι:

$$\min \sum_k [\sigma(A_k)] \quad (15.7)$$

ενώ θεωρείται ότι

$$\Delta(A_k, A_{k+1}) \geq \delta,$$

όπου  $\delta$  μικρή θετική ποσότητα.

*Βήμα 5<sup>ο</sup>:* Από την επίλυση του ανωτέρω αναφερθέντος προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού προσδιορίζονται τα  $w_{i,j}$ , οπότε έχουμε πλέον την πλήρη εικόνα των συναρτήσεων  $u_i(g_i)$ .

## 15.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ UTA

### 15.3.1 Κατασκευή των συναρτήσεων $u_i(g_i)$

$$\text{Πρέπει } u_i[g_i(a)] = u_i(g_i^j) + \{[g_i(a) - g_i^j] / [g_i^{j+1} - g_i^j]\} * [u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j)] \quad (15.8)$$

Επίσης, κυρίως στην εκδοχή UTASTAR, κατά τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τιμών των συναρτήσεων  $u_i(g_i)$ , συχνότατα χρησιμοποιούνται σχέσεις από τη θεωρία σφαλμάτων, ήτοι:

$$\Delta(A_k, A_{k+1}) = u[g(A_k)] - \sigma^+(A_k) + \sigma^-(A_k) - u[g(A_{k+1})] + \sigma^+(A_{k+1}) - \sigma^-(A_{k+1}) \quad (15.9)$$

όπου:

$\sigma^+(A_k)$ : Σφάλμα υπερεκτίμησης τιμών για την  $A_k$ .

$\sigma^-(A_k)$ : Σφάλμα υποτίμησης τιμών για την  $A_k$ .

$\sigma^+(A_{k+1})$ : Σφάλμα υπερεκτίμησης τιμών για την  $A_{k+1}$ .

$\sigma^-(A_{k+1})$ : Σφάλμα υποτίμησης τιμών για την  $A_{k+1}$ .

### 15.3.2 Συναρτήσεις χρησιμότητας (“utility functions”) και συναρτήσεις τιμών (“value functions”)

Με βάση της σχέση  $\sum_i [u_i(g_i^*)] = 1$ , η οποία αναφέρθηκε προηγουμένως, γίνεται σαφές ότι από την UTA, προκύπτουν καταρχήν συναρτήσεις οι οποίες δεν έχουν η καθεμία μέγιστη τιμή το 1, αλλά το άθροισμα των μεγίστων τιμών τους ισούται με το 1. Επομένως, γενικά, για τη μέγιστη τιμή εκάστης συνάρτησης, ήτοι για το

$u_i(g_i^*)$ , ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$u_i(g_i^*) \leq 1 \quad (15.10)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι οι εξαχθείσες συναρτήσεις  $u_i(g_i)$  είναι συναρτήσεις χρησιμότητας, αφού ήδη εμπεριέχουν την έννοια της βαρύτητας εκάστου κριτηρίου, δεδομένου ότι  $u_i(g_i^*) \leq 1$  και γενικά μπορεί να είναι διαφορετικά μεταξύ τους δύο  $u_i(g_i^*)$  και  $u_j(g_j^*)$ , ήτοι εν δυνάμει  $u_i(g_i^*) \neq u_j(g_j^*)$ .

Επομένως, για κάθε κριτήριο  $C_i$ , η ευρεθείσα ανώτερη τιμή  $u_i(g_i^*)$  επέχει θέση σχετικού βάρους του κριτηρίου αυτού, αφού ουσιαστικά εκφράζει το γινόμενο της ανώτερης τιμής της κανονικοποιημένης συνάρτησης αξιακών οντοτήτων (τιμή «1»), με το σχετικό βάρος του κριτηρίου.

Επομένως, συνολικά οι τιμές της ευρεθείσας για κάθε κριτήριο συνάρτησης χρησιμότητας, ενέχουν τον πολλαπλασιασμό των αντιστοίχων αξιακών οντοτήτων με το σχετικό βάρος του κριτηρίου.

Άρα, αφού προσδιορισθεί για κάθε κριτήριο η συνάρτηση χρησιμότητας, για να προκύψει η αντίστοιχη (κανονικοποιημένη) συνάρτηση τιμών, πρέπει κάθε ευρεθείσα τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας να διαιρεθεί με το σχετικό βάρος του κριτηρίου, δηλαδή να διαιρεθεί με το  $u_i(g_i^*)$ .

### 15.3.3 Η χρήση Γραμμικού Προγραμματισμού στην UTA

Απαραίτητο βασικό εργαλείο της μεθόδου UTA είναι ο Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Goal Programming). Η μέθοδος Simplex μπορεί να αναφερθεί ως μία πολύ βασική μέθοδος Γραμμικού Προγραμματισμού η οποία προσιδιάζει τις συνθήκες της μεθόδου UTA. Η UTA κατά την πορεία χρησιμοποιεί Γραμμικό Προγραμματισμό, αφού απαιτεί την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος σφαλμάτων, ήτοι:

$$\min \sum_k [\sigma(A_k)]$$

υπό τις συνθήκες που προκύπτουν από την εκπεφρασθείσα αρχικώς διάταξη προτιμήσεως εναλλακτικών λύσεων και από την κανονικότητα των στοιχείων, ήτοι:

$$\begin{aligned}
& \sum_i \sum_j (w_{ij}) = 1 \\
& w_{ij} \geq 0 \\
& \sigma^+(A_k) \geq 0 \\
& \sigma^-(A_k) \geq 0 \\
& \Delta(A_k, A_{k+1}) \geq \delta \text{ [εφόσον η εναλλακτική } A_k \text{ είναι προτιμότερη της } A_{k+1}\text{],} \\
& \text{με } \delta \text{ μικρή ποσότητα.}
\end{aligned}
\tag{15.11}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 16: ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 16.1 Βελτιστοποίηση Πολυστοχικής Λήψης Αποφάσεων (Multi-Objective Optimization)

#### 16.1.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία του Multi-Objective Optimization (Geoffrion – Dyer - Feinberg, 1972), (Steuer, 1986), (Deb, 2001), (Coello-Coello et al, 2007), (Zionts - Wallenius, 1976), εφαρμόζεται σε διάφορα πεδία ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και εφαρμογών. Λειτουργεί κυρίως μέσω του Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Goal Programming).

Από τη φύση του, το Multi-Objective Optimization λαμβάνει υπόψη την ισχύ πολλών συνθηκών σε κάθε πρόβλημα, και με δεδομένες τις συνθήκες αυτές προσδιορίζει τις τιμές των μεταβλητών.

#### Συμβολισμοί

$g_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ : Αντικειμενική Συνάρτηση.

$c_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ : Συνάρτηση Συνθήκης.

$d_k$ : Όριο της  $c_k$  Συνάρτησης Συνθήκης.

$x_j$ : Ανεξάρτητη Μεταβλητή.

$a_{i,j}$ : Συντελεστής-Παράμετρος.

$b_{k,j}$ : Συντελεστής-Παράμετρος.

$\alpha_{i,j}$ : Τυχόν στοιχείο του Πίνακα Simplex.

$\alpha_{r,s}$ : Στοιχείο Pivot του Πίνακα Simplex.

$s_k$ : Βοηθητική μεταβλητή του Πίνακα Simplex.

#### 16.1.2 Παρουσίαση της μεθόδου γενικά

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Δομούνται οι συναρτήσεις επιδίωξης (“goal functions”) και οι συναρτήσεις συνθηκών/περιορισμών (“constraint functions”). Συνήθως επιδιώκεται η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης υπό την τήρηση συνθηκών που αφορούν σε άλλες συναρτήσεις.

Μία τυπική λοιπόν φόρμουλα του προβλήματος μπορεί να έχει ως εξής:

$$\text{maximization της } g_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (16.1)$$

υπό την τήρηση των συνθηκών:

$$\begin{aligned} c_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &\leq d_1 \\ c_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &\leq d_2 \\ &\dots\dots\dots \\ c_m(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &\leq d_m \end{aligned} \quad (16.2)$$

Όπου:

$$g_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = a_{1,1} * x_1 + a_{1,2} * x_2 + a_{1,3} * x_3 + \dots + a_{1,n} * x_n \quad (16.3)$$

και

$$c_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = b_{1,1} * x_1 + b_{1,2} * x_2 + b_{1,3} * x_3 + \dots + b_{1,n} * x_n$$

$$c_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = b_{2,1} * x_1 + b_{2,2} * x_2 + b_{2,3} * x_3 + \dots + b_{2,n} * x_n$$

$$c_m(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = b_{m,1} * x_1 + b_{m,2} * x_2 + b_{m,3} * x_3 + \dots + b_{m,n} * x_n \quad (16.4)$$

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Επιλύεται το όλο πρόβλημα διά Γραμμικού Προγραμματισμού και προσδιορίζονται οι τιμές των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Το σύνολο των τιμών των μεταβλητών προσδιορίζει και αποτελεί μία βέλτιστη λύση.

Με βάση λοιπόν τα προηγούμενα, προσδιορίζονται οι τιμές των:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Εξετάζεται εάν η προκύπτουσα ως βέλτιστη λύση είναι μία εκ των υφισταμένων εναλλακτικών. Εάν ναι, τότε η εναλλακτική αυτή είναι η καλύτερη μεταξύ των εναλλακτικών.

### 16.1.3 Παρουσίαση Λύσης με Γραμμικό Προγραμματισμό

#### i) Γενικά

Η διαδικασία της Πολυστοχικής Λήψης Αποφάσεων (Multi Objective Decision Making) χρησιμοποιεί τον Γραμμικό Προγραμματισμό για την επίλυση του προβλήματος. Μειονέκτημα της επίλυσης είναι ότι οι τιμές των μεταβλητών που προκύπτουν κατόπιν της επίλυσης του προβλήματος, αποτελούν μία θεωρητική ιδεατή λύση, η οποία συνήθως ευρίσκεται μακράν των υφισταμένων εναλλακτικών οι οποίες αξιολογούνται. Επομένως, εάν έχουμε ένα δεδομένο σύνολο εναλλακτικών υπό αξιολόγηση, η διαδικασία MODM θα προσδιορίσει μεν το σύνολο των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών περιγραφής των εναλλακτικών αυτών, γενικά όμως η λύση η οποία θα προκύψει μπορεί να μην είναι μία εκ των υφισταμένων (δεδομένων εξ' αρχής) εναλλακτικών.

#### ii) Μέθοδος Simplex

Η μέθοδος Simplex (Dantzig, 1947, 1949), αποτελεί την πιο διαδεδομένη και κλασική μέθοδο επίλυσης Γραμμικού Προγραμματισμού και ως εκ τούτου αποτελεί εν δυνάμει σημαντικό εργαλείο της βελτιστοποίησης της πολυστοχικής λήψης αποφάσεων.

Καταρχήν, για να έρθει ένα πρόβλημα Αντικειμενικής Συνάρτησης και Συνθηκών στην Κανονική του μορφή, γίνονται τα εξής:

- Κάθε ανισότητα της μορφής:

$$b_{k,1} * x_1 + b_{k,2} * x_2 + b_{k,3} * x_3 + \dots + b_{k,n} * x_n \leq d_k$$

μετατρέπεται σε ισότητα μέσω μίας βοηθητικής μεταβλητής  $s_k$ , ήτοι:

$$b_{k,1} * x_1 + b_{k,2} * x_2 + b_{k,3} * x_3 + \dots + b_{k,n} * x_n + s_k = d_k \quad (16.5)$$

- Για την Αντικειμενική Συνάρτηση έχουμε:

$$- a_{1,1} * x_1 - a_{1,2} * x_2 - a_{1,3} * x_3 - \dots - a_{1,n} * x_n + g_1 = 0 \quad (16.6)$$

Στη μέθοδο, αρχικά δημιουργείται ο Πίνακας των συντελεστών  $a_{i,j}$  και  $b_{k,j}$  (οι οποίοι αναφέρθηκαν πιο πριν στην Αντικειμενική Συνάρτηση και στις Συναρτήσεις Συνθηκών), των ορίων  $d_k$  (τα οποία επίσης αναφέρθηκαν στις Συναρτήσεις Συνθηκών), των μοναδιαίων συντελεστών («1») των βοηθητικών μεταβλητών  $s_k$ , του μοναδιαίου συντελεστή της  $g_1$  («1») και του μηδενικού στοιχείου («0») που υπάρχει στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης της (16.6).

Ο Πίνακας Simplex έχει την ακόλουθη μορφή:

$x_1$	$x_2$	...	$x_n$	$s_1$	$s_2$	...	$s_m$	$g_1$	
$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	...	$b_{1,n}$	1	0	...	0	0	$d_1$
$b_{2,1}$	$b_{2,2}$	...	$b_{2,n}$	0	1	...	0	0	$d_2$
....	....	...	...	...	...	...	...	...	...
$b_{m,1}$	$b_{m,2}$	...	$b_{m,n}$	0	0	...	1	0	$d_m$
$-a_{1,1}$	$-a_{1,2}$	...	$-a_{1,n}$	0	0	...	0	1	0

Οι τιμές του Πίνακα Simplex ευρίσκονται κάτω από τη γραμμή, ενώ πάνω από τη γραμμή ευρίσκεται απλώς η σήμανση στηλών. Η τελευταία στήλη δεν έχει κάποια σήμανση, αφού είναι η στήλη των ορίων και του μηδενικού στοιχείου στη συμβολή της με την τελευταία γραμμή, που είναι το μηδέν στο δεύτερο μέρος της (16.6).

Έστω ότι το τυχόν στοιχείο του Πίνακα Simplex συμβολίζεται με  $a_{i,j}$  (i-γραμμή και j-στήλη).

Καθορίζεται ένα στοιχείο αναφοράς από τον Πίνακα Simplex, το οποίο ονομάζεται στοιχείο Pivot και συμβολίζεται με  $a_{r,s}$  (r-γραμμή και s-στήλη).

Ο καθορισμός του στοιχείου Pivot προκύπτει ως η τομή της στήλης Pivot με τη γραμμή Pivot, όπου έχουμε:

- Στήλη Pivot είναι η στήλη με το πιο αρνητικό στοιχείο στην τελευταία γραμμή.
- Γραμμή Pivot είναι η γραμμή (εκτός της τελευταίας) για την οποία προκύπτει το μικρότερο πηλίκο από τη διαίρεση του στοιχείου της στην τελευταία στήλη με το στοιχείο της στη στήλη Pivot.

Τότε, οι μετασχηματισμοί Simplex έχουν ως εξής:

- Για τα στοιχεία της Γραμμής Pivot θα έχουμε:

$$a_{r,j} \rightarrow a_{r,j} / a_{r,s} \quad (16.7)$$

- Για τα στοιχεία της Στήλης Pivot θα έχουμε:

$$a_{r,s} \rightarrow 1 \text{ και } a_{i,s} \rightarrow 0 \text{ (για } i \neq r) \quad (16.8)$$

- Για τα Λοιπά Στοιχεία του Πίνακα Simplex θα έχουμε:

$$a_{i,j} \rightarrow a_{i,j} - [(a_{r,j} * a_{i,s}) / a_{r,s}] \quad (16.9)$$

Αφού ανασχηματισθεί ο Πίνακας Simplex, με βάση τις σχέσεις (16.7), (16.8), (16.9), εφόσον χρειάζεται (δηλαδή εφόσον δεν προσδιορίζονται ακόμη απολύτως όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές), η προηγούμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται, ήτοι καθορίζεται εκ νέου ένα στοιχείο Pivot και ακολουθούν οι μετασχηματισμοί των σχέσεων (16.7), (16.8), (16.9).

Η διαδικασία σταματά όταν προσδιορισθούν απολύτως όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές, οπότε κατόπιν προσδιορίζεται και η προκύπτουσα τιμή της Αντικειμενικής Συνάρτησης (οι τιμές των Αντικειμενικών Συναρτήσεων, εφόσον είναι περισσότερες από μία Συναρτήσεις).

#### 16.1.4 Εφαρμογή στην Αξιολόγηση Συγκοινωνιακών έργων

Η διαδικασία Βελτιστοποίησης Πολυστοχικής Λήψης Απόφασης μπορεί να εφαρμοσθεί στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων με βάση τα ακόλουθα:

Η αντικειμενική συνάρτηση ή οι αντικειμενικές συναρτήσεις που θα τεθούν για βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) πρέπει να αποδίδουν τους

στόχους που επιδιώκονται. Με γνώμονα αυτό, κάθε αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να μορφούται μέσω της σύζευξης περισσότερων του ενός κριτηρίων. Ήτοι ένας στόχος μπορεί να είναι σύνθεση περισσότερων του ενός κριτηρίων.

Ως παραδείγματα αντικειμενικών συναρτήσεων δίδονται:

- Μία αντικειμενική συνάρτηση να αποδίδει τους οικονομικούς στόχους, συνθέτοντας επιμέρους κριτήρια, όπως το κριτήριο των ελάχιστων αρχικώς διατιθέμενων κεφαλαίων, το κριτήριο της μέγιστης ανταποδοτικότητας της επένδυσης και πιθανώς και άλλα κριτήρια.
- Μία αντικειμενική συνάρτηση να αποδίδει κοινωνικούς στόχους, συνθέτοντας επιμέρους κριτήρια, όπως το κριτήριο της μέγιστης μείωσης της ανεργίας (ήτοι του μέγιστου αριθμού νέων θέσεων εργασίας), το κριτήριο της μέγιστης κοινωνικής συνοχής και πιθανώς και άλλα κριτήρια.
- Μία αντικειμενική συνάρτηση να αποδίδει ευρύτερους στρατηγικούς στόχους, συνθέτοντας το κριτήριο της μέγιστης υπηρετήσης της εθνικής ασφάλειας, το κριτήριο της μέγιστης συμβατότητας με τη διεθνή διαλειτουργικότητα των συγκοινωνιακών δικτύων και πιθανώς και άλλα κριτήρια.
- Μία αντικειμενική συνάρτηση να αποδίδει περιβαλλοντικούς στόχους, συνθέτοντας το κριτήριο της ελάχιστης ρύπανσης του αέρα, το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του θορύβου/δόνησης, το κριτήριο της ελάχιστης ρύπανσης των υδάτων, το κριτήριο της μέγιστης προστασίας της χλωρίδας/πανίδας και πιθανώς και άλλα κριτήρια.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που θα εμφανίζονται στη μαθηματική αποτύπωση του προβλήματος και των οποίων οι βέλτιστες τιμές θα εξάγονται από την επίλυση, πρέπει να είναι καθοριστικές για τις συναρτήσεις-στόχους. Ως παραδείγματα ανεξαρτήτων μεταβλητών για περιπτώσεις αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, μπορούν να θεωρηθούν οι κάτωθι:

- Ο όγκος της χρήσης του συγκοινωνιακού στοιχείου που αξιολογείται, όπως κυκλοφοριακός φόρτος, όγκος επιβατών κ.ά.
- Οι τιμές τιμολογιακής πολιτικής για τη λειτουργία του συγκοινωνιακού στοιχείου, όπως τιμές διοδίων, εισιτηρίων κ.ά.
- Οι ποσότητες αναλωσίμων κατά τη λειτουργία του συγκοινωνιακού στοιχείου, όπως ποσότητα καταναλωνομένων καυσίμων, ποσότητα καταναλωνομένων μηχανικών λαδιών κ.ά.
- Οι ποσότητες των εργαζομένων κατά την κατασκευή του συγκοινωνιακού στοιχείου, όπως ποσότητα τεχνικών, τεχνητών και λοιπών εργαζομένων.
- Οι ποσότητες των υλικών κατά την κατασκευή του συγκοινωνιακού στοιχείου, όπως ποσότητες αδρανών, κονιών, μετάλλων κ.ά.

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις όπως θα έχουν μορφοποιηθεί, πρέπει να αντανακλούν και να εκφράζουν όχι μόνον την τιμή (“value”) αλλά ολοκληρωμένα την χρησιμότητα (“utility”) των επιδόσεων σε κάθε παράγοντα/κριτήριο. Ήτοι, σε κάθε αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να συμπεριλαμβάνεται επαρκώς και η βαρυτική επιρροή κάθε κριτηρίου.



## 16.2 Ασαφή Σύνολα - Ασαφείς Συναρτήσεις (Fuzzy Sets - Fuzzy Functions) σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων

### 16.2.1 Εισαγωγή

Η θεωρία των Ασαφών Συνόλων [Fuzzy Sets] και των Ασαφών Συναρτήσεων [Fuzzy Functions] (Munda, 1995, 2008), (Zadeh, 1965), (Zimmermann, 1987), εισήχθη στα 1965 υπό του Zadeh. Έκτοτε έχει συντελεσθεί σημαντική εξέλιξη σε σχέση με τα Ασαφή Σύνολα και τις Ασαφείς Συναρτήσεις.

#### Συμβολισμοί

$x_k$ :	Εναλλακτική (λύση) υπό αξιολόγηση.
$X$ :	Το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων.
$C_i$ :	Κριτήριο αξιολόγησης.
$n$ :	Πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης.
$f_i(x)$ :	Αρχική κλίμακα τιμών του κριτηρίου $C_i$ .
$\mu_i[f_i(x)]$ :	Ασαφής συνάρτηση (τεχνητή κλίμακα) του κριτηρίου $C_i$ .
$\min\{\dots\}$ :	Ελάχιστο μεταξύ των στοιχείων που ακολουθούν.
$\max\{\dots\}$ :	Μέγιστο μεταξύ των στοιχείων που ακολουθούν.
$A \cap B$ :	Τομή των Συνόλων $A$ και $B$ .
$A \cup B$ :	Ένωση των Συνόλων $A$ και $B$ .
$\Pi\{\dots\}$ :	Γινόμενο ως προς το δείκτη $i$ των στοιχείων που ακολουθούν.
$\Sigma\{\dots\}$ :	Άθροισμα ως προς το δείκτη $i$ των στοιχείων που ακολουθούν.
$r_{g,h}$ :	Αριθμός Saaty σε σύγκριση εντός των διατεταγμένων οντοτήτων $g-h$ στη διαδικασία FAHP.
$R_g$ :	Άθροισμα των στοιχείων $r_{g,h}$ της σειράς $-g$ σε πίνακα της FAHP (Fuzzy AHP).

### 16.2.2 Παρουσίαση των ασαφών συνόλων και συναρτήσεων

#### i) Γενικά

Ορίζεται ότι μία Ασαφής Συνάρτηση  $\mu_i[f_i(x)]$ , αποδίδει το βαθμό πλήρωσης της ιδιότητας συμμετοχής (“membership function”) σε ιδιότητα, της αρχικά θεωρούμενης συνάρτησης  $f_i(x)$ . Δηλαδή για κάθε τιμή της συνάρτησης  $f_i(x)$ , ευρίσκεται η αντίστοιχη τιμή της  $\mu_i[f_i(x)]$ , η οποία εκφράζει το κατά πόσο η τιμή αυτή της  $f_i(x)$  ικανοποιεί μία ιδιότητα.

Κάθε συνάρτηση  $\mu_i[f_i(x)]$  λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ , όπου η τιμή 0 δίδεται στην περίπτωση μη πλήρωσης της ιδιότητας (μηδενική πλήρωση), ενώ η τιμή 1 δίδεται στην περίπτωση της απόλυτης πλήρωσης της ιδιότητας. Για κάθε άλλη περίπτωση (περίπτωση μερικής πλήρωσης της ιδιότητας) δίδεται αντίστοιχη τιμή μεταξύ του 0 και του 1.

Οι συναρτήσεις  $\mu_i[f_i(x)]$  μπορούν να θεωρηθούν κανονικές (“standardized” ή “normalized”), αφού το πεδίο τιμών τους είναι το  $[0,1]$ .

#### ii) Ασαφείς Τελεστές (“Fuzzy Operators”)

Ιδιαίτερα σημαντικοί είναι οι τελεστές Fuzzy (Zadeh, 1965), (Seo - Sakawa, 1988), οι οποίοι δημιουργούν μία βασική δομή στα Ασαφή Σύνολα. Οι κύριοι λοιπόν ασαφείς τελεστές έχουν ως εξής:

- Ως **τομή** των Συνόλων  $A$  και  $B$  ορίζεται το:  
$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (16.10)$$

- Ως **ένωση** των Συνόλων A και B ορίζεται το:
 
$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (16.11)$$

- Ως **συμπληρωματικότητα** των Συνόλων A και B ορίζεται το:
 
$$\mu_B(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (16.12)$$

- Ως **εγκιβωτισμός** του Συνόλου A στο Σύνολο B ορίζεται το:
 
$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (16.13)$$

### iii) Βήματα εφαρμογής των Ασαφών Συνόλων και Ασαφών Συναρτήσεων στην Αξιολόγηση Συγκοινωνιακών έργων

*Βήμα 1<sup>ο</sup>*: Ορίζονται οι εναλλακτικές υπό αξιολόγηση λύσεις  $x_k$  και τα κριτήρια αξιολόγησης  $C_i$ .

*Βήμα 2<sup>ο</sup>*: Για κάθε κριτήριο αξιολόγησης  $C_i$ , δημιουργείται η αντίστοιχη Ασαφής Συνάρτηση  $\mu_i[f_i(x)]$ . Η συνάρτηση αυτή αντιστοιχεί σε κάθε τιμή του πεδίου ορισμού της, δηλαδή της αρχικής (γενικά φυσικής) κλίμακας εκάστου κριτηρίου, ήτοι της  $f_i(x)$ , μία τιμή του πεδίου τιμών της, δηλαδή της τεχνητής ουσιαστικά κλίμακας, ήτοι της  $\mu_i[f_i(x)]$ .

*Βήμα 3<sup>ο</sup>*: Έχοντας βρει όλες τις τιμές των  $\mu_i[f_i(x)]$  για το πρόβλημά μας, ήτοι για κάθε εναλλακτική και κάθε κριτήριο την αντίστοιχη τιμή, μπορούμε να καθορίσουμε τον τελικό επιθυμητό στόχο, με γνώμονα τον οποίο θα γίνει και η κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Ο τελικός επιθυμητός στόχος καθορίζεται με βάση τη φύση, δομή και υφή των Ασαφών Συνόλων και των αντίστοιχων Ασαφών Συναρτήσεων.

Σε πολλές περιπτώσεις, ο τελικός επιθυμητός στόχος σχετίζεται άμεσα με τους ασαφείς τελεστές. Έτσι, π.χ. ο τελικός επιθυμητός στόχος μπορεί να είναι η μεγιστοποίηση της ελάχιστης τιμής των  $\mu_i[f_i(x)]$ . Επομένως, για κάθε εναλλακτική  $x_k$  εφαρμόζεται ο τελεστής της τομής, ήτοι:

$$\min \{ \mu_1(x_k), \mu_2(x_k), \dots, \mu_i(x_k), \dots, \mu_n(x_k) \}. \quad (16.14)$$

*Βήμα 4<sup>ο</sup>*: Έχοντας βρει για κάθε εναλλακτική  $x_k$  το  $\min \{ \mu_1(x_k), \mu_2(x_k), \dots, \mu_i(x_k), \dots, \mu_n(x_k) \}$ , η κατάταξη των εναλλακτικών μπορεί να γίνει (από την καλύτερη προς τη χειρότερη) αναλόγως του μεγέθους της ποσότητας αυτής, δηλαδή όσο μεγαλύτερο το  $\min \{ \mu_1(x_k), \mu_2(x_k), \dots, \mu_i(x_k), \dots, \mu_n(x_k) \}$ , τόσο καλύτερη η αντίστοιχη εναλλακτική  $x_k$ .

## 16.2.3 Παρατηρήσεις και περαιτέρω εφαρμογές

### i) Άλλοι τρόποι εφαρμογής των Ασαφών Συνόλων και Συναρτήσεων

Στην προηγηθείσα ανάλυση δόθηκε ένας τρόπος εν δυνάμει εφαρμογής των Ασαφών Συνόλων και Συναρτήσεων στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων. Υπάρχουν και άλλοι τρόποι εν δυνάμει εφαρμογής των Ασαφών Συνόλων και Συναρτήσεων στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων (Wang L.X. - Mendel, 1991), (Lee C.C., 1990), (Larkin L.I., 1985). Πιο αναλυτικά:

- Αφού εκτελεσθούν ως ανωτέρω τα Βήματα 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> του αλγορίθμου εφαρμογής, μπορεί κατά το Βήμα 3<sup>ο</sup>, αντί του επιθυμητού στόχου της μεγιστοποίησης της ελάχιστης τιμής των  $\mu_i[f_i(x)]$ , να τεθεί ως επιθυμητός ο στόχος της μεγιστοποίησης της μέγιστης τιμής των  $\mu_i[f_i(x)]$ . Επομένως, ο τελεστής που εφαρμόζεται για κάθε εναλλακτική  $x_k$  είναι ο τελεστής της ένωσης, ήτοι ο τελεστής:

$$\max \{ \mu_1(x_k), \mu_2(x_k), \dots, \mu_i(x_k), \dots, \mu_n(x_k) \}. \quad (16.15)$$

Εν συνεχεία, στο Βήμα 4<sup>ο</sup>, η κατάταξη των εναλλακτικών μπορεί να γίνει (από την καλύτερη προς τη χειρότερη) αναλόγως του μεγέθους της ποσότητας αυτής, δηλαδή όσο μεγαλύτερο το  $\max\{\mu_1(x_k), \mu_2(x_k), \dots, \mu_i(x_k), \dots, \mu_n(x_k)\}$ , τόσο καλύτερη η αντίστοιχη εναλλακτική  $x_k$ .

- Οι προηγούμενες εφαρμογές, έλαβαν χώρα στη βάση ενός επιθυμητού στόχου που υιοθετήθηκε κάθε φορά. Έτσι, κατά τον πρώτο τρόπο εφαρμογής υιοθετήθηκε ο στόχος της μεγιστοποίησης της ελάχιστης τιμής, οπότε χρησιμοποιήθηκε ο ασαφής τελεστής της τομής, ενώ κατά το δεύτερο τρόπο εφαρμογής υιοθετήθηκε ο στόχος της μεγιστοποίησης της μέγιστης τιμής, οπότε χρησιμοποιήθηκε ο ασαφής τελεστής της ένωσης. Και οι δύο λοιπόν τρόποι εφαρμογής στηρίζονται επί επιθυμητών στόχων, οπότε εμπίπτουν στην ευρύτερη κατηγορία της ασαφούς προτίμησης (fuzzy preference relation). Πέρα όμως από την ευρύτερη αυτή κατηγορία, υπάρχει και η ευρύτερη κατηγορία του defuzzification. Πρόκειται για την κατά ανάλυση η οποία δεν εστιάζει κυρίως σε κάποιο τιθέμενο στόχο, αλλά αξιοποιεί την ευρύτερη πληροφορία η οποία μας είναι διαθέσιμη. Έτσι, για παράδειγμα, μπορεί για κάθε εναλλακτική  $x_k$  να μορφωθεί το γινόμενο  $\Pi\{\mu_i[f_i(x_k)]\}$ , όπου:

$$\Pi\{\mu_i[f_i(x_k)]\} = \mu_1[f_1(x_k)] * \mu_2[f_2(x_k)] * \dots * \mu_i[f_i(x_k)] * \dots * \mu_n[f_n(x_k)] \quad (16.16)$$

Εν συνεχεία, η κατάταξη των εναλλακτικών μπορεί να γίνει (από την καλύτερη προς τη χειρότερη) αναλόγως του μεγέθους της ποσότητας αυτής, δηλαδή όσο μεγαλύτερο το  $\Pi\{\mu_i[f_i(x_k)]\}$ , τόσο καλύτερη η εναλλακτική  $x_k$ .

- Επίσης στην ευρύτερη κατηγορία του defuzzification, μπορεί για κάθε εναλλακτική  $x_k$  να μορφωθεί το άθροισμα  $\Sigma\{\mu_i[f_i(x_k)]\}$ , όπου:

$$\Sigma\{\mu_i[f_i(x_k)]\} = \mu_1[f_1(x_k)] + \mu_2[f_2(x_k)] + \dots + \mu_i[f_i(x_k)] + \dots + \mu_n[f_n(x_k)] \quad (16.17)$$

Εν συνεχεία, η κατάταξη των εναλλακτικών μπορεί να γίνει (από την καλύτερη προς τη χειρότερη) αναλόγως του μεγέθους της ποσότητας αυτής, δηλαδή όσο μεγαλύτερο το  $\Sigma\{\mu_i[f_i(x_k)]\}$ , τόσο καλύτερη η εναλλακτική  $x_k$ .

## ii) Αντιμετώπιση της Αβεβαιότητας με τα Ασαφή Σύνολα και Συναρτήσεις

Εκτός των άλλων, τα Ασαφή Σύνολα μπορούν να χειρισθούν περιπτώσεις όπου υπάρχει Αβεβαιότητα σε τιμές των επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, ήτοι δεν είναι απόλυτα καθορισμένες οι τιμές  $f_i(x_k)$ .

Εάν λοιπόν δεν είναι για κάθε εναλλακτική λύση  $x_k$  δεδομένη μία τιμή επίδοσης στο κριτήριο  $C_i$ , είτε δεν είναι μοναδική η τιμή  $f_i(x_k)$ , αλλά είναι πιθανές αρκετές τιμές  $f_i^j(x_k)$ , όπου το  $j$  δείκτης που μεταβάλλεται, τότε ο χειρισμός με τα Ασαφή Σύνολα είναι ο εξής:

α) Ευρίσκεται για κάθε  $f_i^j(x_k)$  η τιμή της αντίστοιχης Ασαφούς Συνάρτησης, ήτοι το  $\mu_i[f_i^j(x_k)]$ , το οποίο (με βάση όσα προηγουμένως αναπτύχθηκαν) ανήκει στο διάστημα  $[0,1]$ .

β) Σχηματίζεται η μέση σταθμισμένη κατά fuzzy τιμή επίδοσης της εναλλακτικής  $x_k$  στο κριτήριο  $C_i$ , με βάση την εξής σχέση:

$$f_{i,\text{centroid}}(x_k) = \sum_j \{ [f_i^j(x_k)] * \{\mu_i[f_i^j(x_k)]\} \} / \sum_j \{\mu_i[f_i^j(x_k)]\} \quad (16.18)$$

Η τιμή αυτή παρίσταται με  $f_{i,\text{centroid}}(x_k)$ , διότι είναι το κεντροειδές των τιμών  $f_i^j(x_k)$ , δηλαδή η μέση σταθμισμένη κατά fuzzy τιμή των  $f_i^j(x_k)$ .

γ) Αφού ευρεθεί για κάθε εναλλακτική και κάθε κριτήριο η  $f_{i,\text{centroid}}(x_k)$ , τότε λαμβάνεται αυτή ως  $f_i(x_k)$  και μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών με έναν από τους αναφερθέντες σε προηγούμενες παραγράφους τρόπους.

### iii) Μορφή των Ασαφών Συναρτήσεων

Οι Ασαφείς Συναρτήσεις γενικά έχουν ως πεδίο τιμών το διάστημα  $[0,1]$ . Η μορφή μίας Ασαφούς Συναρτήσεως εξαρτάται από τη φύση του κριτηρίου στο οποίο αναφέρεται. Οι πιο συνηθισμένες μορφές Ασαφών Συναρτήσεων είναι οι ακόλουθες:

- Ευθύγραμμη αύξουσα
- Ευθύγραμμη φθίνουσα
- Τεθλασμένη γραμμή συνεχώς αύξουσα
- Τεθλασμένη γραμμή συνεχώς φθίνουσα
- Τεθλασμένη γραμμή χωρίς ενιαία μονοτονία
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς αύξουσα με κοίλα άνω
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς αύξουσα με κοίλα κάτω
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς φθίνουσα με κοίλα άνω
- Καμπύλη γραμμή συνεχώς φθίνουσα με κοίλα κάτω
- Σιγμοειδής ή τύπου Gauss

Η μόρφωση των Ασαφών Συναρτήσεων μπορεί να γίνει με καταρχήν εύρεση χαρακτηριστικών σημείων και έπειτα με διαδικασία παρεμβολής-προσέγγισης (“interpolation-approximation”).

### iv) Αντιμετώπιση χρονικών μεταβολών των επιδόσεων με τα Ασαφή Σύνολα και Συναρτήσεις

Εκτός των άλλων, τα Ασαφή Σύνολα μπορούν να χειρισθούν περιπτώσεις όπου υπάρχει μεταβολή με το χρόνο σε τιμές των επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων στα κριτήρια αξιολόγησης, ήτοι δεν είναι σταθερές οι τιμές  $f_i(x_k)$ . Υπό αυτή την έννοια τα Ασαφή Σύνολα-Συναρτήσεις μπορούν να χειρισθούν προβλήματα Δυναμικής Αξιολόγησης.

Εάν λοιπόν δεν είναι για κάθε εναλλακτική λύση  $x_k$  σταθερή στο χρόνο μία τιμή επίδοσης στο κριτήριο  $C_i$ , είτε δεν είναι μοναδική η τιμή  $f_i(x_k)$ , αλλά παρατηρούνται αρκετές τιμές  $f_i^t(x_k)$ , όπου το  $t$  δείκτης που μεταβάλλεται με το χρόνο, τότε ο χειρισμός με τα Ασαφή Σύνολα μπορεί να έχει ως κάτωθι:

*1<sup>ος</sup> τρόπος:*

α) Ευρίσκεται για κάθε  $f_i^t(x_k)$  η τιμή της αντίστοιχης Ασαφούς Συνάρτησης, ήτοι το  $\mu_i[f_i^t(x_k)]$ , το οποίο (με βάση όσα προηγουμένως αναπτύχθηκαν) ανήκει στο διάστημα  $[0,1]$ .

β) Σχηματίζεται η μέση σταθμισμένη κατά fuzzy χρονικά τιμή επίδοσης της εναλλακτικής  $x_k$  στο κριτήριο  $C_i$ , με βάση την εξής σχέση:

$$f_i(x_k) = \sum_t \{ [f_i^t(x_k)] * \{\mu_i[f_i^t(x_k)]\} \} / \sum_t \{\mu_i[f_i^t(x_k)]\} \quad (16.19)$$

γ) Αφού ευρεθεί για κάθε εναλλακτική και κάθε κριτήριο η  $f_i(x_k)$ , τότε μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών με έναν από τους αναφερθέντες σε προηγούμενες παραγράφους τρόπους.

*2<sup>ος</sup> τρόπος:*

α) Ευρίσκεται για κάθε  $f_i^t(x_k)$  η τιμή της αντίστοιχης Ασαφούς Συνάρτησης, ήτοι το  $\mu_i[f_i^t(x_k)]$ , το οποίο (με βάση όσα προηγουμένως αναπτύχθηκαν) ανήκει στο διάστημα  $[0,1]$ .

β) Σχηματίζεται η μέση σταθμισμένη κατά fuzzy χρονικά τιμή επίδοσης της εναλλακτικής  $x_k$  στο κριτήριο  $C_i$ , με βάση την εξής σχέση:

$$f_i(x_k) = \sum_t \{ [f_i^t(x_k)] * \{\Pi_i\{\mu_i[f_i^t(x_k)]\}\} \} / \sum_t \{\Pi_i\{\mu_i[f_i^t(x_k)]\}\} \quad (16.20)$$

γ) Αφού ευρεθεί για κάθε εναλλακτική και κάθε κριτήριο η  $f_i(x_k)$ , τότε μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών με έναν από τους αναφερθέντες σε προηγούμενες παραγράφους τρόπους.

*Συμπερασματικά:* Οι δύο προαναφερθέντες τρόποι χειρισμού της με το χρόνο μεταβολής επιδόσεων, διαφοροποιούνται μεταξύ τους στο βήμα (β). Η διαφορά έγκειται στον τρόπο σταθμίσεως, ήτοι στον 1<sup>ο</sup> τρόπο η στάθμιση γίνεται απλά, ενώ στο 2<sup>ο</sup> τρόπο η στάθμιση γίνεται σύνθετα.

**ν) Δυνατότητες συνέργειας των Ασαφών Συνόλων-Συναρτήσεων με άλλες μεθόδους πολυκριτηριακής αξιολόγησης**

Υπάρχει η δυνατότητα της συνέργειας των Ασαφών Συνόλων-Συναρτήσεων με άλλες μεθόδους πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Για παράδειγμα, έχει αναπτυχθεί η FAHP [Fuzzy Analytical Hierarchy Process] (Ibrahim et al, 2011), όπου εφαρμόζονται τα Fuzzy μαζί με την μέθοδο AHP (δηλαδή μαζί με τη Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης). Κατά την εφαρμογή αυτή, αντί να υπάρχει ένας μόνον αριθμός για κάθε κατά ζεύγος διατεταγμένων οντοτήτων σύγκριση (είτε σύγκριση βαρών κριτηρίων είτε σύγκριση επιδόσεων εναλλακτικών ανά κριτήριο), υπάρχουν τρεις αριθμοί. Από αυτούς ο μικρότερος εκφράζει την ελάχιστη τιμή, ο μεγαλύτερος τη μέγιστη τιμή και ο μεσαίος τη μεσαία τιμή, της κατανομής δυνατών τιμών της χαρακτηριστικής ποσότητας σύγκρισης δύο διατεταγμένων οντοτήτων. Π.χ. συγκρίνοντας το διατεταγμένο ζεύγος των οντοτήτων g-h, εάν σε μία απλή διαδικασία θα είχαμε έναν χαρακτηριστικό κατά Saaty αριθμό  $r_{g,h}$  τώρα έχουμε τρεις αριθμούς, ήτοι  $r_{g,h,κάτω}$ ,  $r_{g,h,μέσος}$ ,  $r_{g,h,άνω}$ , όπου:

- $r_{g,h,κάτω}$ : ο μικρότερος από τους πιθανούς αριθμούς  $r_{g,h}$
- $r_{g,h,μέσος}$ : ο μέσος από τους πιθανούς αριθμούς  $r_{g,h}$
- $r_{g,h,άνω}$ : ο μεγαλύτερος από τους πιθανούς αριθμούς  $r_{g,h}$

Στην κλασσική AHP, κατά Saaty:  $r_{h,g} = 1 / r_{g,h}$ .

Στην περίπτωση της FAHP, λόγω της αντιστροφής, προκύπτει γενικά:

$$\bullet \quad r_{h,g,κάτω} = 1 / r_{g,h,άνω} \quad (16.21)$$

$$\bullet \quad r_{h,g,μέσος} = 1 / r_{g,h,μέσος} \quad (16.22)$$

$$\bullet \quad r_{h,g,άνω} = 1 / r_{g,h,κάτω} \quad (16.23)$$

Στην ειδική περίπτωση όπου γίνεται σύγκριση μίας οντότητας με τον εαυτό της, δηλαδή εάν πρόκειται για στοιχείο της κύριας διαγωνίου πίνακα Saaty (σύγκριση g-g), είναι προφανές ότι:

$$r_{g,g,κάτω} = r_{g,g,μέσος} = r_{g,g,άνω} = 1.$$

Σε κάθε περίπτωση, αφού καταρτισθεί ο κατά fuzzy πίνακας AHP, ήτοι σε κάθε θέση υπάρχουν τρεις αριθμοί, ήτοι σε κάθε θέση  $r_{g,h}$ , υπάρχουν οι αριθμοί  $r_{g,h,κάτω}$ ,  $r_{g,h,μέσος}$ ,  $r_{g,h,άνω}$ ,

ευρίσκονται για κάθε σειρά –g του Πίνακα οι ακόλουθες ποσότητες:

$$\bullet \quad R_{g,κάτω} = \sum_h (r_{g,h,κάτω}) / \sum_g \sum_h (r_{g,h,άνω}) \quad (16.24)$$

$$\bullet \quad R_{g,μέσος} = \sum_h (r_{g,h,μέσος}) / \sum_g \sum_h (r_{g,h,μέσος}) \quad (16.25)$$

$$\bullet \quad R_{g,άνω} = \sum_h (r_{g,h,άνω}) / \sum_g \sum_h (r_{g,h,κάτω}) \quad (16.26)$$

Η συνέχεια της διαδικασίας ιεράρχησης στηρίζεται στους αριθμούς αυτούς για κάθε γραμμή του Πίνακα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 17:**

### **ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥΣ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ**

#### **17.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η αξιολόγηση έχει καταστεί απαραίτητη για την λήψη απόφασης υλοποίησης συγκοινωνιακών έργων. Στην πρακτική της αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Οι μέθοδοι αυτές συνήθως κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: τις μονοκριτηριακές μεθόδους (χρηματική προσέγγιση) και τις μεθόδους πολλών κριτηρίων (όχι μόνον χρηματική προσέγγιση). Ενώ η πρώτη κατηγορία περιορίζει την απόδοση όλων των επιπτώσεων σε χρηματική αποτίμηση, η δεύτερη κατηγορία χρησιμοποιεί περισσότερα κριτήρια από ένα, όχι κατά ανάγκη ποσοτικά (Τσαμπούλας, 2004, Σημειώσεις Αξιολόγησης Συγκοινωνιακών Έργων).

Παραδοσιακά, για την αξιολόγηση συγκοινωνιακών συστημάτων χρησιμοποιείται μία χρηματική προσέγγιση. Αυτό μπορεί να επιτυγχάνεται με τη χρήση μία ανάλυσης Κόστους-Οφέλους για τον υπολογισμό των Άμεσων επιπτώσεων, αυτών δηλαδή που συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία του υπό θεώρηση συγκοινωνιακού συστήματος. Οι σχετικές με τη λειτουργία του συστήματος δαπάνες, εκφράζονται με όρους κόστους κεφαλαίου, κόστους λειτουργίας και συντήρησης. Πάντως, όταν τα ατυχήματα και το περιβάλλον θεωρούνται σημαντικά, δαπάνες σχετιζόμενες με τα ατυχήματα, τις επιπτώσεις περιβάλλοντος και την άνεση της μετακίνησης, επίσης περιλαμβάνονται στην ανάλυση.

Οι χρηματικές προσεγγίσεις έχουν εγείρει κριτικές. Τέτοιες κριτικές πηγάζουν κυρίως από το πώς μπορεί να μεταφερθεί στην πράξη η οικονομική θεωρία περί κοινωνικού οφέλους. Υπάρχουν συχνά δυσκολίες στην μέτρηση όλων των σχετικών επιπτώσεων από ένα έργο ή σχέδιο σε χρηματικούς όρους. Παρά το ότι πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για να παράγουν τιμές για ποιοτικά ή και ακραία αποτελέσματα (Pearce, 1978), είναι στην πράξη σχεδόν απίθανο να αποδοθούν με αξιοπιστία αυτά τα αποτελέσματα σε χρηματικές μονάδες.

Λόγω αυτών των ισχυρών περιορισμών, η χρηματική αξιολόγηση έχει συμπληρωθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες με μη χρηματικές μεθόδους, γνωστές ως πολυκριτηριακές μέθοδοι. Είναι αξιοσημείωτο ότι η συζήτηση περί της ανάλυσης κόστους-οφέλους και της πολυκριτηριακής ανάλυσης τείνει να θεωρεί τις δύο σχολές μεθόδων ως συμπληρωματικές μεταξύ τους παρά ως ανταγωνιστικές.

#### **17.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

##### **17.2.1 Γενικά**

Η αξιολόγηση των συγκοινωνιακών έργων είναι μία πολυδιάστατη ανάλυση, η οποία χαρακτηρίζεται από τιμές και παραμέτρους τεχνικές, κοινωνικοοικονομικές, περιβαλλοντικές, πολιτικές. Για αυτό και ο σχεδιασμός των συγκοινωνιακών έργων είναι πολύ δύσκολο να επιτύχει αναμφισβήτητες και μονοσήμαντες λύσεις. Αυτό συνεπάγεται ότι μία τόσο πολυσυσχετιζόμενη πορεία θα χαρακτηρίζεται από την ανάγκη μίας αντίστοιχης ανταποκρινόμενης συζυγούς μεθοδολογίας. Οι τεχνικές πολυκριτηριακής αξιολόγησης αποσκοπούν στην παροχή ενός τέτοιου συνόλου εργαλείων το οποίο να μπορεί να διαχειρισθεί ποιοτικά πολυδιάστατα αποτελέσματα των εναλλακτικών που αξιολογούνται. Αυτό πάντως δεν σημαίνει ότι η πολυκριτηριακή αξιολόγηση είναι «πανάκεια» και μπορεί να χρησιμοποιείται σε όλες τις συνθήκες χωρίς δυσκολίες, καθότι κάθε προσέγγιση έχει τις δικές της δυσκολίες.

Γενικά, οι κύριες αδυναμίες που σχετίζονται με τα πολυκριτηριακά πρότυπα πηγάζουν από τις ακόλουθες μεθοδολογικές παραδοχές:

1. Δεν υπάρχει λύση η οποία να βελτιστοποιεί όλα τα κριτήρια ταυτόχρονα και για αυτό ο αξιολογητής αναζητεί συμβιβαστικές λύσεις. Έτσι, όταν διαφορετικά αντιμαχόμενα κριτήρια αξιολόγησης τίθενται εντός του υπολογισμού, ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα είναι μαθηματικά όχι τέλεια δομημένο.
2. Η σχέση προτίμησης και αδιαφορίας μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων δεν είναι αρκετή στην προσέγγιση αυτή, αφού όταν μία ενέργεια είναι καλύτερη από κάποια άλλη σε κάποια κριτήρια, είναι συνήθως χειρότερη σε κάποια άλλα, έτσι πολλά ζεύγη λύσεων τελούν σε εσωτερική ασυγκριτότητα ως προς τις συνθήκες υπεροχής.

Ένας σημαντικός αριθμός πολυκριτηριακών μεθόδων έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί για αποτίμηση διαφορετικών αντικειμένων σε διαφορετικά πλαίσια (Bana e Costa, 1990). Παρά το ότι οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους έχουν σχεδιασθεί για να καλύπτουν μία ευρεία ποικιλία προβλημάτων, στην πράξη αυτές μπορούν να είναι εφαρμόσιμες και να παρέχουν αποτελεσματικές λύσεις μόνο σε συγκεκριμένες (ιδιαίτερες ανά μέθοδο) καταστάσεις. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν είναι όλες οι πολυκριτηριακές μέθοδοι ικανές να εφαρμοσθούν σε κάθε περίπτωση, ήτοι είναι μεγάλης σημασίας η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για κάθε είδος προβλημάτων.

### 17.2.2 Κατάταξη των μεθόδων

#### i) Γενικά

Προκειμένου να γίνει μία συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων, δημιουργήθηκε ένας πίνακας ο οποίος παρέχει μία συνοπτική αποτίμηση καταλληλότητας κάθε μεθόδου ως προς κάθε συνθήκη από το σύνολο των συνθηκών που τίθενται στα προβλήματα πολυκριτηριακής αξιολόγησης κοινωνικών έργων. Αυτό απαιτεί την επισκόπηση/ανάλυση πολυκριτηριακών μεθόδων οι οποίες έχουν καταγράψει σημαντικό πλήθος εφαρμογών και την εστίαση στην εξέταση δυνατοτήτων εφαρμογής τους, τις απαιτήσεις δεδομένων, την ευκολία χρήσης και τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των εξαγομένων τους σε διάφορες συνθήκες καταστάσεων. Οι καταστάσεις λήψης αποφάσεων διαφοροποιούνται ως προς το επίπεδο (στρατηγικό, τοπικό), τον τύπο του έργου, τη διαθεσιμότητα/ακρίβεια των δεδομένων κλπ. Βασιζόμενοι στην θεώρηση των μεθόδων επί πραγματικών προβλημάτων, επιλέγονται οι παρακάτω χαρακτηριστικές μέθοδοι, οι οποίες ανά μία ή περισσότερες εντάσσονται/εκπροσωπούν ένα πρότυπο:

- (1) REGIME,
- (2) ELECTRE (όλες που ανήκουν στην οικογένεια αυτή),
- (3) AHP,
- (4) Multiattribute utility approach,
- (5) ADAM.

Ο Πίνακας 17.2 παρουσιάζει πώς οι επιλεγμένες μέθοδοι κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το θεωρητικό τους τυπολόγιο και την φορμαλιστική τους προσέγγιση.

Προτού προβούμε στη λεπτομερή ανάλυση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε μεθόδου, καθώς και στην εξέταση της καταλληλότητας για εφαρμογή τους σε κοινωνικά έργα, οι μεθοδολογικές αρχές και τα θεωρητικά χαρακτηριστικά των μεθόδων θα αναφερθούν. Αυτό θα επιτρέψει σε κάθε εν δυνάμει αξιολογητή κοινωνικών έργων να έχει μία καθαρή κατανόηση των παραγόντων που προκύπτουν από τις θεωρητικές παραδοχές αλλά και των πρακτικών συγκεκριμενοποιήσεων.

ii) *Το Διανυσματικό πρότυπο*

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην παραδοχή ότι όλες οι εφικτές λύσεις ενός προβλήματος λήψης απόφασης μπορούν να παρουσιαστούν ως διανύσματα σε διανυσματικό χώρο διαστάσεων τόσων όσα τα κριτήρια αξιολόγησης. Χωρίζοντας τον συνολικό χώρο λύσεων σε υποχώρους (όπου οι εναλλακτικές λύσεις μπορούν να ιεραρχηθούν με βεβαιότητα) και συγκρίνοντας αυτές σύμφωνα με το σχετικό τους μέγεθος, οδηγούμαστε σε αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων (π.χ. των εναλλακτικών έργων). Αυτή η προσέγγιση μπορεί να αποδειχθεί πολύ βοηθητική όταν είναι διαθέσιμες μόνο ποιοτικές πληροφορίες ή να οδηγήσει σε αδυναμία πλήρους αξιοποίησης πληροφοριών όταν ποσοτικά δεδομένα επίσης υπάρχουν.

- Ένα παράδειγμα πολυκριτηριακής μεθόδου η οποία χρησιμοποιεί διανυσματικό πρότυπο είναι η REGIME (Hinloopen-Nijkamp-Rietveld, 1983)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί κατά ζεύγη συγκρίσεις και από τη σκοπιά αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μία μέθοδος υπεροχής (outranking). Πάντως βασίζεται σε ένα γραμμικό αθροιστικό πρότυπο και για αυτό μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι ανήκει και σε αυτόν τον τύπο. Η βάση της μεθόδου είναι ένας πίνακας αξιολόγησης με τακτικούς αριθμούς, καθώς και μία διάταξη της σπουδαιότητας (βαρών) των κριτηρίων σε τακτικούς αριθμούς.

Στην ανάλυση regime, η κύρια εστίαση είναι το πρόσημο των διαφορών μεταξύ των διαφορών των επιπτώσεων των εναλλακτικών. Υπολογίζοντας τα πρόσημα αυτά για κάθε ζεύγος εναλλακτικών (και για κάθε κριτήριο), δημιουργείται ο πίνακας regime R. Ο πίνακας αυτός είναι απλά ένας μετασχηματισμός του πίνακα επιπτώσεων. Το πρόσημο μπορεί να καθορισθεί με ασφάλεια για τα βέβαια regime. Για τα άλλα, δεν είναι δυνατό ένα τέτοιο αναμφίβολο αποτέλεσμα. Ένα τέτοιο regime (χωρίς απόλυτο αναμφίβολο αποτέλεσμα) καλείται κρίσιμο. Τα κρίσιμα regime περιβάλλονται με αβεβαιότητα, διότι δεν είναι βέβαιο το πρόσημο των διαφορών των επιπτώσεων των εναλλακτικών. Η κύρια ιδέα της ανάλυσης regime είναι να υπερκεράσουμε αυτή την αβεβαιότητα με το χωρισμό του συνόλου των εφικτών τιμών σε υποσύνολα, όπου σε κάθε υποσύνολο μία καθαρή λύση θα σχηματοποιείται ως προς το πρόσημο.

iii) *Το πρότυπο Γραφήματος Υπεροχής*

Η βάση των προτύπων γραφήματος υπεροχής είναι η ιδέα της μερικής ασυγκριτότητας. Αυτή η ιδέα πηγάζει από την κατανόηση ότι στα πολυκριτηριακά προβλήματα, η σχέση κυριαρχίας μπορεί να στηριχθεί μόνον εάν υπάρχει μία ομοφωνία των διαφορετικών απόψεων αναφορικά με τη συγκεκριμένη παρατήρηση. Έτσι, μία ενέργεια «a» μπορεί να ξεπερνά μία ενέργεια «b» μόνον εάν η «a» είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η «b» κατά τη θεώρηση όλων των κριτηρίων.

Τα «πρότυπα γραφήματος υπεροχής» καταγράφουν προτιμήσεις ως διατεταγμένες σχέσεις υπεροχής. Για να επιτύχουν αυτό χρησιμοποιούν διανύσματα. Κάθε διάνυσμα τοποθετείται από την καλλίτερη προς την χειρότερη εναλλακτική για κάθε ζεύγος εναλλακτικών, όταν βέβαιες υποθέσεις υπάρχουν (π.χ. όταν μία σχέση υπεροχής μπορεί να θεσπισθεί).

Η καινοτομία αυτής της προσέγγισης είναι ότι χρησιμοποιούνται οι έννοιες «συμφωνία» και «ασυμφωνία». Καθώς το πρώτο συνεπάγεται το βαθμό της κυριαρχίας μίας εναλλακτικής επί μίας άλλης, το δεύτερο συνεπάγεται το βαθμό της υστέρησης μίας εναλλακτικής προς μία άλλη.

Οι πλέον ευρέως αποδεκτές μέθοδοι στην κατηγορία αυτή είναι αυτές της οικογένειας ELECTRE (Roy, 1985, Schaeerlig, 1985, Szidarovsky et al, 1986).

Στην ELECTRE, ο αξιολογητής αρχικά καθορίζει τα όρια συμφωνίας και ασυμφωνίας. Έπειτα από το στάδιο αυτό, όλα τα ζεύγη εναλλακτικών ελέγχονται για πιθανές σχέσεις



υπεροχής και οι θετικές και αρνητικές ροές υπολογίζονται (έναν αξιωματικό χαρακτηρισμό μπορούμε να εύρουμε σε Bouyssou και Perny, 1990). Τελικώς οι διατάξεις καθορίζονται στη βάση των τομών αυτών των ροών (ELECTRE I).

Η ELECTRE II ακολουθεί κατά το μάλλον ή ήττον την ίδια πορεία, με μία μικρή διαφοροποίηση στον υπολογισμό του δείκτη συμφωνίας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σκεπτικό πίσω από τα πρότυπα γραφήματος υπερροχής είναι ότι η σχέση κυριαρχίας μπορεί να είναι εμπειριστατωμένη μόνον εάν πραγματιστική πληροφορία είναι διαθέσιμη. Έτσι, η σημαντική σε όγκο πληροφορία, ακόμη και εάν δεν μπορεί να δομήσει μία σχέση ισχυρής προτίμησης, μπορεί να αξιοποιηθεί για τη διαπίστωση σχέσεων «ασθενούς υπερροχής».

Από την οικογένεια ELECTRE, η μόνη μέθοδος η οποία συνάδει με την άσθενη σχέση υπερροχής είναι η ELECTRE III. Στη μέθοδο αυτή, ο όρος «ασθενής προτίμηση», αναφέρεται στην περίπτωση όπου η εναλλακτική  $i$  επικρατεί της εναλλακτικής  $i'$  (για ένα δεδομένο κριτήριο  $j$ ), αλλά όχι σε τέτοια έκταση που να μπορεί να αιτιολογηθεί μία καθαρή υπερροχή. Στην ELECTRE III, οι αποδεκτές σχέσεις υπερροχής πρέπει επίσης να ικανοποιούν τις συνθήκες του ορίου αρνησικυρίας (“veto”).

Στην ELECTRE IV, οι δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας δεν χρησιμοποιούνται. Αντί αυτών, απαιτείται ο καθορισμός κάποιων συναρτήσεων αναλογικότητας για να ισχύσουν οι σχέσεις υπερροχής μεταξύ των εναλλακτικών. Όπως και η πλειονότητα των μεθόδων, έτσι και η ELECTRE IV, εξετάζει την ένταση της προτιμήσεως μίας εναλλακτικής έναντι μίας άλλης. Έτσι, χρησιμοποιεί τους όρους «ισχυρή» και «ασθενής» υπερροχή, συνθήκες οι οποίες στηρίζονται και από τα όρια αρνησικυρίας.

#### iv) Το Αθροιστικό πρότυπο

Ο πρώτος στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η θέσπιση ενός «κανόνα (νόρμας) προτιμήσεως» στη βάση της οποίας θα γίνεται η σύγκριση όλων των εναλλακτικών. Οι νόρμες προτιμήσεως είναι συνήθως γραμμικές. Η κύρια υπόθεση πίσω από τον ορισμό τους είναι ότι οι προτιμήσεις του αξιολογητή είναι μία πλήρης προ-διάταξη, ήτοι όλες οι εναλλακτικές θεωρούνται συγκρίσιμες και ισχύει η μεταβατικότητα της προτιμήσεως και της αδιαφορίας μεταξύ εναλλακτικών.

Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί χρησιμοποιώντας ένα απλό αθροιστικό πρότυπο. Αυτά τα πρότυπα συνήθως διαφοροποιούνται ανάλογα το πώς εφαρμόζεται η αθροιστική συνάρτηση. Σύμφωνα με το Munda (1995), υπάρχουν τρεις διαφορετικές σχολές στην εν λόγω πρακτική: η Πολλών Κριτηρίων Χρησιμότητα [“multiple attribute utility”] (Beuthe - Scanella, 1996, Schaerlig, 1985), η Αναλυτική Διαδικασία Ιεράρχησης [“analytical hierarchy process”] (Saaty, 1980), η Προσέγγιση Ιδεατού Σημείου [“ideal point approach”] (Zeleny, 1982).

#### • (a) Multiple Attribute Utility Approach (Schaerlig, 1985)

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην ακόλουθη υπόθεση: Σε κάθε πρόβλημα αποφάσεως υπάρχει μία πραγματική συνάρτηση τιμών  $U$  οριζόμενη από το σύνολο  $A$  των εφικτών εναλλακτικών, τις οποίες ο αξιολογητής επιθυμεί να εξετάσει, συνειδητώς ή όχι. Η συνάρτηση αυτή αθροίζει τα διάφορα κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη ότι το πρόβλημα μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$\max U[g_j(\alpha)]: \alpha \in A$$

όπου  $U[g_j(\alpha)]$  είναι η αθροιστική συνάρτηση χρησιμότητας για τα  $n$  το πλήθος κριτήρια (επομένως ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα ανάγεται σε μονοκριτηριακό).

Ο ρόλος του αναλυτή είναι να καθορίσει αυτή τη συνάρτηση. Οι συνηθέστερες και πιο κοινές συναρτήσεις χρησιμότητας είναι γραμμικές. Υπάρχουν όμως και με καμπύλες

μορφές. Πάντως, σε κάποιες περιπτώσεις μία συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να είναι τεθλασμένη (Beuthe, 1996), με τα επιμέρους τμήματα να είναι ευθύγραμμα.

- (b) Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης [AHP] (Saaty, 1980)

Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης είναι πιθανώς η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την ιεράρχηση των εναλλακτικών, έχοντας μία ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Η μέθοδος ακολουθεί μία διαδικασία η οποία οργανώνει τη βασική λογική ενός προβλήματος αποφάσεως με την κατάταξη του σε μικρότερα τμήματα και απαιτώντας μόνον κατά ζεύγη συγκρίσεις για την ανάπτυξη προτεραιοτήτων σε κάθε ιεράρχηση.

Υπάρχουν τρεις αρχές τις οποίες η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης αναγνωρίζει σε μία κατάσταση αποφάσεως, ήτοι η αρχή της αποσυνθέσεως, η αρχή της συγκρισιμότητας και η αρχή της σύνθεσης προτεραιοτήτων.

Η αρχή της αποσυνθέσεως συνάδει με τη δόμηση της ιεραρχίας ώστε να λαμβάνει υπόψη της όλα τα επιμέρους βασικά στοιχεία του προβλήματος. Αυτό μπορεί να προκύπτει κατά την εφαρμογή της μεθόδου, καθώς και κατά τη θεώρηση των εναλλακτικών λύσεων και των αναλυτικών στοιχείων.

Η αρχή της συγκρισιμότητας απαιτεί την κατάρτιση ενός πίνακα [aij] που να συνοψίζει και να αποδίδει τις κατά ζεύγη συγκρίσεις των συγκρινόμενων οντοτήτων, είτε αυτές είναι τα κριτήρια αξιολόγησης (δεύτερο επίπεδο ανάλυσης) είτε είναι οι ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων (πρώτο επίπεδο ανάλυσης). Οι συγκρίσεις από τον αποφασίζοντα αξιολογητή γίνονται σε μία κλίμακα τιμών από 1 έως 9 (1 για την ισοδυναμία και 9 για την ακραία υπεροχή μίας οντότητας επί άλλης).

Τότε εφαρμόζεται η σύνθεση των προτεραιοτήτων.

Στη βιβλιογραφία της AHP, αναδεικνύεται ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι εφαρμογής για να εξαχθεί το διάλυμα των τοπικών προτεραιοτήτων. Όπως έχει αρχικώς προταθεί από τον Saaty, η πλέον συχνή τεχνική για να εξαχθεί το διάλυμα προτεραιοτήτων είναι η μέθοδος ιδιοδιάνυσματος. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί τη μέγιστη από τις βασικές ιδιοτιμές ( $\lambda_{max}$ ) του πίνακα [aij] για να υπολογισθεί το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα που αντιπροσωπεύει το διάλυμα επιμέρους προτεραιοτήτων.

- (c) Ιδεατού Σημείου προσέγγιση [μέθοδος ADAM] (Zeleny, 1982)

Οι προσεγγίσεις του Ιδεατού Σημείου χαρακτηρίζονται από το ακόλουθο αξίωμα επιλογής: Οι εναλλακτικές που ευρίσκονται εγγύτερα στο Ιδεατό Σημείο είναι προτιμητέες από αυτές που ευρίσκονται πιο μακριά από αυτό. Η εγγύτητα με το ιδεατό σημείο αποτελεί βασικό στοιχείο της ανθρώπινης λογικής.

Η κύρια ιδέα πίσω από την προσέγγιση αυτή είναι να καθορίσουμε το βέλτιστο επιθυμητό εξαγόμενο («ιδεατό σημείο»), στο χώρο των n-κριτηρίων με τα οποία αξιολογούνται οι εναλλακτικές.

Στη μέθοδο ADAM, μία απεικόνιση γίνεται από το πρόβλημα των n-κριτηρίων. Έτσι μία κανονικοποιημένη τιμή ευρίσκεται για κάθε κριτήριο j, στη βάση ποια από τις εναλλακτικές κατατάσσεται πρώτη, δεύτερη κλπ. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ της εναλλακτικής i και του ιδεατού σημείου I. Επομένως, όσο μικρότερη είναι η απόσταση τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική.

### 17.2.3 Η καταλληλότητα των μεθόδων στις απαιτήσεις των συγκοινωνιακών έργων

Σύμφωνα με τον Banister (1997) και τον Mintzberg (1979) και έχοντας πάντα κατά νου την πολυπλοκότητα και τα πολυδιάστατα χαρακτηριστικά του προβλήματος των συγκοινωνιακών έργων, μία μεθοδολογία αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

**διαφάνεια, απλότητα, ισχύ, λογικότητα.**

Η **διαφάνεια** ορίζεται ως το να είναι κατανοητή η διαδικασία αξιολόγησης και πόσο εύκολα είναι κατανοητή από τους λήπτες της τελικής απόφασης. Άλλως, υπάρχει ο κίνδυνος η διαδικασία απόφασης να είναι κατανοητή μόνον από μερικούς ειδικούς.

Η **απλότητα** είναι επίσης αρκετά σημαντική για μία μεθοδολογία αξιολόγησης. Η απλότητα δεν σημαίνει κατ'ανάγκη την επιπόλαια απόδοση της πραγματικότητας, αλλά σημαίνει κυρίως το να επισημαίνονται και να αποσαφηνίζονται τα βασικά σημεία του προβλήματος.

Η **ισχύς** είναι μία άλλη βασική ιδιότητα. Με όρους λειτουργικότητας, σημαίνει την δυνατότητα του να συμπεριληφθούν δεδομένα που αφορούν επιδόσεις των διαφόρων εναλλακτικών, καθώς και τη δυνατότητα δημιουργίας απλών εξαγομένων που να επιτρέπουν την αποτίμηση των άμεσων συνεπειών τόσο καλά όπως και των εμμέσων, ήτοι κοινωνικών και φυσικών περιβαλλοντικών. Επίσης, η έννοια της ισχύος μίας μεθόδου αναφέρεται σε μία σειρά κριτηρίων επάρκειας, όπως:

- Απαιτήσεις δεδομένων
- Χειρισμός οποιουδήποτε αριθμού εναλλακτικών/κριτηρίων
- Χειρισμός της αβεβαιότητας
- Ενθάρρυνση ομάδων ειδημόνων να συμμετάσχουν
- Ευαισθησία

Τελικά, οι λήπτες αποφάσεων πρέπει να αισθάνονται εμπιστοσύνη ότι οι αποφάσεις θα **λογίζονται** με ορθότητα το όλο πρόβλημα και τα δεδομένα του.

Όλα τα ανωτέρω συνιστούν το γενικό πλαίσιο στο οποίο θα αξιολογηθούν συγκριτικά οι μέθοδοι πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων.

## 17.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

### 17.3.1 Γενικά

Δίδεται παράδειγμα εφαρμογής από την Ελλάδα, όπου αξιολογούνται τρία έργα:

- Η επέκταση του Λιμένα Μυτιλήνης, στο νησί Λέσβος (Έργο Α1): Οι εργασίες της επέκτασης περιλαμβάνουν κατασκευές θαλάσσιες σε μήκος 220μ., σε έκταση 20.000μ<sup>2</sup>. Το συνολικό κόστος υπολογίζεται σε \$4.700.000, σε τιμές έτους 1993.
- Η κατασκευή του νέου Λιμένος Πάτρας (Έργο Α2): Οι εργασίες περιλαμβάνουν κατασκευές θαλάσσιες, καθώς και σύνδεση του λιμένος με το παλιό λιμάνι, καθώς και με το οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο. Το συνολικό κόστος του έργου εκτιμάται σε \$30.500.000, σε τιμές έτους 1993.
- Η κατασκευή της Γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου (Έργο Α3): Το μήκος της Γέφυρας ανέρχεται σε 2.920μ. Το συνολικό κόστος ανέρχεται σε \$765.000.000, σε τιμές έτους 1996. Είναι αξιοσημείωτο ότι το έργο αυτό είναι μερικώς χρηματοδοτούμενο από ιδιωτικούς χορηγούς (οι οποίοι θα έχουν διευκολύνσεις για 35 έτη).

Τα κριτήρια με βάση τα οποία λαμβάνει χώρα η αξιολόγηση των ανωτέρω έργων είναι τα:

- Μεγιστοποίηση του Εσωτερικού Δείκτη Ανταποδοτικότητας (IRR), ο οποίος απορρέει από μία τυπική ανάλυση Κόστους-Οφέλους (Κριτήριο C1).
- Μεγιστοποίηση της Ασφάλειας, μετρούμενης ως το επί τοις εκατό ποσοστό μείωσης των ατυχημάτων (Κριτήριο C2).
- Ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μετρούμενων σε μία κλίμακα 1-100, όπου λαμβάνονται υπόψη ο Θόρυβος, η Ρύπανση του Αέρα, η Αποκοπή/Διαχωρισμός περιοχών, η Ποιότητα του Τοπίου (Κριτήριο C3).

Οι επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 17.1: Επιδόσεις Εναλλακτικών Λύσεων στα Κριτήρια Αξιολόγησης  
 Table 17.1: Performances of Alternatives in Evaluation Criteria

Κριτήρια	Μονάδες Μέτρησης	Λιμένας Μυτιλήνης (A1)	Λιμένας Πάτρας (A2)	Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου (A3)
IRR	%	12	10	7
Ασφάλεια	%	5	8	9
Περιβάλλον	1-100	4	9	10

Με σκοπό να καθορισθούν τα σχετικά βάρη των κριτηρίων, μία ομάδα ειδημόνων έδωσε τα ακόλουθα βάρη: IRR 40%, Ασφάλεια 35%, Περιβάλλον 25%.

### 17.3.2 Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων

**REGIME:** Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ο συνολικός χώρος λύσεων  $S$  ο οποίος έχει ακραία σημεία τα

$[1, 0, 0]$ ,  $[1/2, 1/2, 0]$ ,  $[1/3, 1/3, 1/3]$ , διαιρέθηκε σε δύο υποχώρους, με όριο μεταξύ αυτών τα σημεία επαλήθευσης της κρίσιμης εξίσωσης  $w_1 = w_2 + w_3$  των βαρών  $w_1, w_2, w_3$  των κριτηρίων.

Εάν  $w_1 \geq w_2 + w_3$  έχουμε τον υπόχωρο  $S_1$ , ο οποίος έχει ακραία σημεία τα  $[1, 0, 0]$ ,  $[1/2, 1/2, 0]$ ,  $[1/2, 1/4, 1/4]$ .

Εάν  $w_1 \leq w_2 + w_3$  έχουμε τον υπόχωρο  $S_2$ , ο οποίος έχει ακραία σημεία τα  $[1/2, 1/2, 0]$ ,  $[1/2, 1/4, 1/4]$ ,  $[1/3, 1/3, 1/3]$ .

Το μέγεθος κάθε υπόχωρου υπολογίζεται ως η απόλυτη τιμή της ορίζουσας του πίνακα, ο οποίος έχει σειρές τις συντεταγμένες των ακραίων σημείων – κορυφών του υπόχωρου αυτού. Έτσι, η ορίζουσα του  $S_1$ , ήτοι η  $\det(S_1)$  ισούται με:

$$\det(S_1) = +1/8,$$

οπότε το μέγεθος  $t_1$  ισούται με την απόλυτη τιμή της, δηλαδή:

$$t_1 = |\det(S_1)| = 1/8 = 3/24.$$

Αντίστοιχα η ορίζουσα του  $S_2$ , ήτοι η  $\det(S_2)$  ισούται με:

$$\det(S_2) = -1/24,$$

οπότε το μέγεθος  $t_2 = |\det(S_2)| = 1/24$ .

Αντίστοιχα, το μέγεθος ολόκληρου του χώρου τιμών έχει ως εξής:  $t = |\det(S)| = |+1/6| = 1/6 = 4/24$ .

Επομένως, ο υπόχωρος  $S_1$  έχει τα  $3/4$  του ολικού χώρου και ο υπόχωρος  $S_2$  το υπόλοιπο  $1/4$ .

Οι συντεταγμένες των κεντροειδών προκύπτουν ανά υπόχωρο:

$$K(1) [0,67, 0,25, 0,08],$$

$$K(2) [0,44, 0,36, 0,20].$$

Οι συντεταγμένες των δύο κεντροειδών απέχουν μεταξύ τους σημαντικά. Στη βάση αυτή, η τελική διάταξη των έργων προκύπτει:  $A1 > A2 > A3$ . Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής εδόθη μεγάλη έμφαση στο κριτήριο  $C1$ , μέσω των συντεταγμένων του κεντροειδούς  $K(1)$  –κεντροειδούς του υποχώρου που είναι τα  $3/4$  του όλου χώρου λύσεων- και έχει συντεταγμένες  $[0,67, 0,25, 0,08]$ .

**ELECTRE οικογένεια:** Αρχικώς τα όρια συμφωνίας και ασυμφωνίας ( $\epsilon$  και  $\epsilon^*$  αντιστοίχως) ετέθησαν ανά μέθοδο ως εξής:

ELECTRE I και ELECTRE II:  $\epsilon = 0,80, \epsilon^* = 0,10$ ,

ELECTRE III:  $\epsilon = 0,80$ , το  $\epsilon^*$  δεν χρησιμοποιείται

ELECTRE IV: Αντί των  $\epsilon$  και  $\epsilon^*$ , χρησιμοποιείται το «έντονο όριο υπεροχής», το οποίο ετέθη  $p = 0,40$ .

Ακολουθως, οι ακόλουθες διατάξεις των έργων προέκυψαν με βάση τις ροές (θετική και αρνητική):

ELECTRE I: Στη μέθοδο αυτή μόνο η θετική ροή χρησιμοποιήθηκε, η οποία έδωσε  $\{A2, A3\} > A1$

ELECTRE II: Η επικρατούσα τελική διάταξη είναι η:  $A2 > A3 > A1$ , η οποία προέκυψε ως υπέρθεση της θετικής ροής:  $A2 > \{A1, A3\}$  και της αρνητικής ροής:  $\{A3, A2\} > A1$ .

ELECTRE III: Η επικρατούσα διάταξη:  $A3 > A2 > A1$ .

ELECTRE IV: Η επικρατούσα διάταξη:  $A3 > A2 > A1$ .

Παρατήρηση για την ELECTRE II: Διερευνητικά, μεταβάλλοντας το  $\varepsilon^*$  από 0,10 σε 0,30, προέκυψαν περισσότερες σχέσεις υπεροχής μεταξύ των εναλλακτικών, ήτοι οι  $A2 > A1$ ,  $A3 > A1$ ,  $A3 > A2$ .

Έτσι σε αυτή την περίπτωση η τελική διάταξη των εναλλακτικών είχε ως εξής:  $A3 > A2 > A1$ .

MAUT, AHP και ADAM τύπος: Για τη MAUT, δύο βασικές παραδοχές έγιναν: πρώτον ότι για λόγους απλότητας δεν συμπεριλαμβάνονται τα  $\sigma_{(i)}$  (τα οποία αντιπροσωπεύουν τα πιθανά σφάλματα εκτίμησης των συναρτήσεων χρησιμότητας) εντός της ανάλυσης και δεύτερον ότι οι συναρτήσεις μερικής χρησιμότητας  $U_i(\varphi_i)$  μπορεί να είναι τεθλασμένες, με χαρακτηριστικά σημεία ανά κριτήριο:

IRR: [(0, 0), (5, 0.20) (10, 0.30) (15, 0.40)].

Ασφάλεια: [(0, 0), (10, 0.20) (20, 0.35)].

Περιβάλλον: [(0, 0), (7.5, 0.15) (15, 0.25)].

Οι συντεταγμένες  $x$  των χαρακτηριστικών σημείων επελέγησαν από ομάδα ειδημόνων, για να καλύψουν το πεδίο τιμών των αρχικών επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια, ενώ οι συντεταγμένες  $y$ , επελέγησαν για να καλύψουν την ένταση/πυκνότητα της προτίμησης των αξιολογητών.

Όσον αφορά στην AHP, η τελική διάταξη των εναλλακτικών ήταν η  $A3 > A1 > A2$ . Σε σύγκριση με τη διάταξη που προέκυψε από το διανυσματικό πρότυπο ( $A1 > A2 > A3$ ) και με τη διάταξη που προέκυψε από την πλειονότητα των μεθόδων του γραφήματος υπεροχής ( $A3 > A2 > A1$ ), μπορεί κάποιος να θεωρήσει ότι η διάταξη της AHP είναι συμβιβαστική. Αυτό έγινε διότι η τεχνική του ιδιοδιανύσματος έδωσε ένα διάνυσμα βαρών  $\omega_j = (0.54, 0.30, 0.16)$ , το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας γεωμετρικός συμβιβασμός των διανυσμάτων  $(0.67, 0.25, 0.08)$  και  $(0.40, 0.35, 0.25)$ . Μία σύνοψη των κατατάξεων των εναλλακτικών (έργων) ανά μέθοδο, δίδεται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 17.2: Κατάταξη έργων (εναλλακτικών) ανά μέθοδο αξιολόγησης

Table 17.2: Summary of Rankings According to Applied MCA

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ
<b>Διανυσματικό Πρότυπο</b>	
REGIME	$A1 > A2 > A3$
<b>Πρότυπο Γραφήματος Υπεροχής</b>	
ELECTRE I	$\{A2, A3\} > A1$
ELECTRE II	$A2 > A3 > A1$
ELECTRE III	$A3 > A2 > A1$
ELECTRE IV	$A3 > A2 > A1$
<b>Αθροιστικό Πρότυπο</b>	
ADAM	$A3 > A2 > A1$
MAUT	$A3 > A2 > A1$
AHP	$A3 > A1 > A2$

## 17.4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Η παραπάνω εφαρμογή των μεθόδων λαμβάνει χώρα στη βάση της διερεύνησης των δυνατοτήτων των μεθόδων σε όρους **διαφάνειας, απλότητας, ισχύος, λογικής**. Αναλυτικά η σύγκριση έχει ως εξής:

- (i) Διαφάνεια

Επιμέρους κριτήρια που εντάσσονται στο ευρύτερο κριτήριο διαφάνεια είναι τα ακόλουθα:

Q1: Η καλύτερη δυνατή συμβατότητα/απόκριση σε πραγματικές συνθήκες.

Q2: Η εγγύτητα προς την ανθρώπινη λογική.

Q3: Η καλή δόμηση της μεθόδου και η ευκολία στο να ακολουθηθεί

Q4: Η χρήση ισχυρών μαθηματικών προσεγγίσεων για την αναπαράσταση της πραγματικότητας

Ειδικά για τη REGIME, μπορεί να αναπαριστά σχεδόν κάθε πραγματικό πρόβλημα αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων, συλλέγοντας τη διαισθητική άποψη του λήπτη απόφασης, με όρους τακτικής (σχετικής) πληροφορίας, τόσο ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης όσο και ως προς τις εναλλακτικές. Πάντως, η μέθοδος αυτή διαιρεί το χώρο των λύσεων, με σκοπό να ορίζει εφικτές λύσεις οι οποίες δεν είχαν γίνει αρχικώς αντιληπτές από τους ειδικούς. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η διαφάνεια. Ωστόσο, διαπιστώνεται απώλεια αρχικής πληροφορίας, αφού ακόμη και αν υπάρχουν ποσοτικά δεδομένα, οι χειρισμοί της μεθόδου είναι κατάλληλοι για ποιοτικά.

Η οικογένεια ELECTRE έχει βασικούς περιορισμούς, οι οποίοι επηρεάζουν τη διαφάνεια. Παραδείγματος χάριν, μία μικρή μεταβολή του ορίου ασυμφωνίας μπορεί να επιδράσει καταλυτικά στην τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

Τελικώς, το Αθροιστικό Πρότυπο προσεγγίζει καλύτερα τη διαφάνεια. Από τη σκοπιά της εφαρμογής, οι μέθοδοι αυτές φαίνονται να είναι σε θέση να συνάδουν με τα περισσότερα προβλήματα αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων. Η ιδέα των αλληλοσυμψηφισμών που οι μέθοδοι αυτού του προτύπου προτείνουν, είναι αποδεκτή από τους ειδήμονες. Η AHP και η MAUT αποδεικνύονται να είναι μαθηματικά πολύ πιο ισχυρές από ό,τι η ADAM, η οποία είναι πιο πολύπλοκη. Η τελική διάταξη των εναλλακτικών στις αθροιστικές μεθόδους, είναι γενικά ένα αποτέλεσμα μίας λογικής διαδικασίας.

- (ii) Απλότητα

Ένα από τα πιο επιθυμητά χαρακτηριστικά των μεθοδολογιών αξιολόγησης είναι η απλότητα. Η ικανότητα μίας μεθόδου να παρέχει μία ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού κόσμου, ήτοι μία καλή απόδοση των πραγματικών συνθηκών, μπορεί να θεωρηθεί ως ο ορισμός της απλότητας.

Οι αθροιστικές μέθοδοι αποδεικνύονται σχετικά απλές κατά την τελική φάση της αξιολόγησης. Πιο αναλυτικά, η AHP είναι η πλέον απλή από αυτές, διότι δεν απαιτεί την κατασκευή συναρτήσεων χρησιμότητας.

Οι μέθοδοι ELECTRE είναι λίγο πιο πολύπλοκες και απαιτούν περισσότερη προσοχή σε πολύπλοκες καταστάσεις (π.χ. εάν σχέσεις μη μεταβατικότητας προκύψουν).

Οι μέθοδοι διανυσματικού προτύπου, δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολες στην εφαρμογή, ακόμη και όταν κάποιες συνθήκες προξενήσουν δυσκολίες στην επόπτευση της REGIME. Όντως η δομή του διανυσματικού χώρου μπορεί να προξενήσει δυσκολίες, ιδιαίτερα όταν μία ενιαία επόπτευση του χώρου αυτού επιχειρηθεί.

- (iii) Ισχύς

Η ισχύς είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα, ιδιαίτερα στη στρατηγική αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, όπου οι περισσότερες αποφάσεις λαμβάνονται υπό συνθήκες αβεβαιότητας, χρησιμοποιώντας διάσπαρτες πληροφορίες. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ισχύς αναφέρεται στην λειτουργική ικανότητα μίας μεθόδου όπως παρουσιάζεται παρακάτω και αφορά τις απαιτήσεις δεδομένων, το χειρισμό πλήθους εναλλακτικών/κριτηρίων, το χειρισμό της αβεβαιότητας, τη συμμετοχή των ειδημόνων και την ευαισθησία.

*(α) Απαιτήσεις Δεδομένων*

Η μέθοδος REGIME είναι ικανή να αναλύσει τακτικά (σχετικά) και απόλυτα δεδομένα και επομένως εντός ενός πλαισίου πολλών στόχων μπορεί να διαχειρισθεί μία μεγάλη ποικιλία προβλημάτων αποτίμησης. Πάντως, πρέπει να επισημανθεί η απώλεια ποσοτικής πληροφορίας, όταν γίνεται ο μετασχηματισμός από απόλυτα σε σχετικά δεδομένα.

Τα πρότυπα γραφήματος υπεροχής είναι κυρίως ποσοτικές προσεγγίσεις, με δυνατότητες πάντως χειρισμού και ποιοτικών δεδομένων μέσω του καταρχήν μετασχηματισμού σε απόλυτες τιμές. Πάντως δεν μπορεί να γίνει κατευθείαν χρησιμοποίηση της ποιοτικής πληροφορίας.

Οι αθροιστικές μέθοδοι είναι επίσης ποσοτικές, ήτοι καμία πληροφορία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εάν πρώτα δεν μετασχηματισθεί σε απόλυτες τιμές. Χρησιμοποιώντας την τυπολογία της θεωρίας συναρτήσεων χρησιμότητας, αυτή η προσέγγιση καλείται έμμεση προσέγγιση.

*(β) Χειρισμός κάθε αριθμού Εναλλακτικών/Κριτηρίων*

Οι αθροιστικές μέθοδοι, λόγω των υποθέσεων της μέτρησης χρησιμότητας και του ιδεατού σημείου, μπορούν να θεωρούν οποιοδήποτε αριθμό εναλλακτικών λύσεων.

Οι μέθοδοι ELECTRE μπορούν να προκαλέσουν σύγχυση κατά τη λήψη αποφάσεων εάν ο αριθμός των εναλλακτικών αυξάνεται σημαντικά. Η σύγχυση αυτή υφίσταται λόγω των ποικίλων συμψηφιστικών παραμέτρων και μπορεί να αποφευχθεί εάν τα όρια συμφωνίας και ασυμφωνίας μετατοπισθούν προς πιο ανεκτικές τιμές. Πάντως, αυτό έχει αρνητικά επακόλουθα στην απλότητα επειδή απαιτεί συνεχή αναπροσαρμογή των εν λόγω ορίων.

Η μέθοδος REGIME μπορεί θεωρητικώς να χειρισθεί οποιοδήποτε αριθμό εναλλακτικών/κριτηρίων. Πάντως, όσο το πλήθος των εναλλακτικών αυξάνει, τόσο η πολυπλοκότητα στον υπολογισμό των ποσοτήτων τελικής αξιολόγησης αυξάνει και μάλιστα δυσανάλογα.

Επίσης η REGIME γίνεται δύσχρηστη με το μεγάλο πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης. Αυτό οφείλεται στο ότι με το μεγάλο πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης, ο χώρος λύσεων αποκτά μεγάλο πλήθος διαστάσεων, επομένως γίνεται δύσκολος στον καθορισμό των υποχώρων οι οποίοι θα έχουν το ίδιο πρόσημο διαφοράς μεταξύ των εναλλακτικών.

Σε αντίθεση, οι μέθοδοι ELECTRE συμπεριφέρονται πολύ καλά με το μεγάλο αριθμό κριτηρίων, δεδομένου μάλιστα ότι τα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης δίδονται από την αρχή.

Τέλος, οι αθροιστικές μέθοδοι αποδίδουν πολύ καλά με κάθε αριθμό κριτηρίων αξιολόγησης. Για τις μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν συναρτήσεις χρησιμότητας, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός των συναρτήσεων χρησιμότητας. Το ίδιο ισχύει και για τις μεθόδους του ιδεατού σημείου (όσο μεγαλύτερο το πλήθος των κριτηρίων, τόσο μεγαλύτερο το πλήθος των συντεταγμένων σημείων που πρέπει να υπολογισθούν).

Μία εξαίρεση εδώ είναι η AHP, όπου θεωρητικά μπορεί να χειρισθεί οποιοδήποτε αριθμό κριτηρίων, αλλά στην πράξη είναι πολύ δύσκολο για τον αξιολογητή να συγκρίνει κατά ζεύγη ένα μεγάλο πλήθος κριτηρίων. Εν δυνάμει προβλήματα μη μεταβατικότητας στις κατά ζεύγη συγκρίσεις μεγάλου πλήθους κριτηρίων μπορεί να υπερκεραστούν με τη χρήση του «δείκτη συμβατότητας» (προτεινομένου υπό του Saaty, 1980).

Κάτι που πρέπει εδώ να επισημανθεί για τη χρήση κατά ζευγών συγκρίσεων μεταξύ κριτηρίων, είναι ότι εάν δευτερογενώς εισαχθούν και άλλα κριτήρια στο σύστημα, μπορεί να ανατρέψουν σημαντικά τα αρχικά πορίσματα και να οδηγήσουν σε αντιστροφές προτιμήσεων, ιδιαίτερα μάλιστα εάν οι τιμές των δευτερογενώς εισαχθέντων κριτηρίων είναι ακραίες.

#### *(γ) Χειρισμός της Αβεβαιότητας*

Η μέθοδος REGIME ξεκινά με μία αυθαίρετη ποιοτική διάταξη των κριτηρίων αξιολόγησης. Με αυτό τον τρόπο πάντως η μέθοδος ενέχει τον κίνδυνο λανθασμένης επιλογής διάταξης.

Το ίδιο ισχύει και για τις μεθόδους της οικογένειας ELECTRE. Έτσι, αφού ο καθορισμός των βαρών των κριτηρίων γίνεται αυθαίρετα, ισχύουν οι ίδιες υποθέσεις κινδύνου.

Όσον αφορά στα πρότυπα άθροισης, η MAUT χειρίζεται την αβεβαιότητα μέσω των μετασχηματισμών των αρχικών επιδόσεων σε συναρτήσεις χρησιμότητας, με βάση τις θεωρήσεις των Keeney/Raiffa (Raiffa, 1970).

Η AHP και η ADAM χρησιμοποιούν την αυθαίρετη ποιοτική διάταξη των κριτηρίων αξιολόγησης, όπως γίνεται επίσης στις διανυσματικές μεθόδους.

#### *(δ) Ενθάρρυνση των ειδημόνων να συμμετάσχουν*

Η μέθοδος REGIME δεν απαιτεί καμία τεχνική που να στηρίζεται σε ομάδα ειδημόνων. Πράγματι, η μέθοδος δεν μπορεί να συνδυάσει αρχικές εκτιμήσεις βαρών. Οπότε σε περίπτωση διαφορετικών απόψεων, πρέπει η μέθοδος να εφαρμοσθεί περισσότερες από μία φορές.

Οι ELECTRE I, II, III, επίσης μπορούν να θεωρηθούν αντιστοίχως με τη REGIME ως προς την ενθάρρυνση ομάδων ειδημόνων. Πάντως η ELECTRE IV, αποφεύγει τη χρήση βαρών των κριτηρίων, στηριζόμενη επί της υπόθεσης ότι μία λύση με μονοσήμαντη έκφραση των βαρών των κριτηρίων τείνει να οδηγήσει σε νεκρό σημείο την διαδικασία αξιολόγησης αφού θέτει απόλυτους περιορισμούς, μακριά από κάθε διαλλακτική και συμβιβαστική λογική. Μία αδυναμία πάντως της λογικής αυτής είναι ότι η έλλειψη βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης, μπορεί να οδηγήσει στην υιοθέτηση πάρα πολλών κριτηρίων, οπότε ο χειρισμός τους θα είναι δυσχερής.

Μεταξύ των αθροιστικών μεθόδων, η AHP είναι η πλέον προχωρημένη, αφού αθροίζει τις επιμέρους σειρές προτιμήσεως σε μία συγκεραστική διάταξη.

#### *(ε) Ευαισθησία*

Η Ευαισθησία αναφέρεται στην ικανότητα κάθε μεθόδου να διακρίνει διαφορές επιδόσεων εναλλακτικών ή βαρών κριτηρίων, όταν οι διαφορές αυτές είναι πολύ μικρές. Αυτό το πρόβλημα έχει δύο πτυχές και σχετίζεται (1) με την ποιότητα των μετασχηματισμών από φυσική σε τεχνητή κλίμακα μέτρησης και (2) στην ελάχιστη «αποφασιστικότητα» κάθε μεθόδου όπως αυτή θεωρείται.

Οι αθροιστικές μέθοδοι επιδεικνύουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά στην ευαισθησία. Η ικανότητα να χρησιμοποιούνται συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions) ή τιμών (value functions) – οι οποίες μπορούν να είναι γραμμικές ή μη, άμεσες ή έμμεσες- παρέχει



μία σειρά πλεονεκτημάτων στις αθροιστικές μεθόδους τα οποία δεν μπορούν να ευρεθούν στις άλλες μεθόδους.

Από την άλλη πλευρά, τα πρότυπα γραφήματος υπεροχής χρησιμοποιούν μία εντελώς διαφορετική προσέγγιση. Οι μέθοδοι ELECTRE για παράδειγμα, μπορούν να είναι γραμμικές και πολύ περιγραφικές όσον αφορά τα βάρη των κριτηρίων, ενώ όσον αφορά τις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων η ευαισθησία τους εξαντλείται στα κατώφλια αρνησικυρίας. Η αρνησικυρία, η οποία ορίζεται εδώ ως η ελάχιστη αποδεκτή διαφορά μεταξύ δύο εναλλακτικών ώστε να ισχύει κάποια μεταξύ τους σχέση, μπορεί να θεωρηθεί ως μία βαλβίδα ασφαλείας.

Η μέθοδος REGIME χρησιμοποιεί τακτική (ποιοτική) πληροφορία να δομήσει ένα πρόβλημα αξιολόγησης. Αυτό καθιστά σχεδόν αδύνατο το να αξιοποιηθεί η ένταση των προτιμήσεων και να δημιουργηθούν ομαλές μεταβάσεις όσον αφορά στα βάρη των κριτηρίων αλλά και στις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων.

Μία προσπάθεια να υπερκερασθεί αυτό το πρόβλημα έγινε από το Hinloopen (1983), ο οποίος πρότεινε τη χρήση ενδιάμεσων τιμών (π.χ.  $+1/2$  ή  $-1/2$ ), ώστε να ορισθούν τα στοιχεία regime κατά έναν πιο ευέλικτο τρόπο.

- (iv) Λογική

Μία λογική πολυκριτηριακή ανάλυση, παράλληλα με το να μπορεί να ιχνηλατήσει μία απόφαση, είναι σχετιζόμενη με το βαθμό των αλληλοσυμψηφισμών μεταξύ των εναλλακτικών. Αυτό μπορεί να γίνει καλύτερα αντιληπτό μέσω της έννοιας της ασυγκριτότητας. Στην ανάλυση λήψης αποφάσεων, οι σχέσεις ασυγκριτότητας συχνά κάνουν την διαδικασία αξιολόγησης πιο ρεαλιστική και ενδυναμώνουν τη λογική των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά, αυτές οι σχέσεις μπορούν να τυποποιηθούν μόνον όταν δεν επιτρέπεται πλήρης συμψηφιστικότητα (π.χ. όταν οι επιδόσεις στα κριτήρια δεν αλληλοαναιρούνται πλήρως). Επομένως, μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η λογική αξιολόγηση και ο αλληλοσυμψηφισμός είναι έννοιες αντίθετες.

Σε αυτό τον τομέα, τα πρότυπα γραφήματος υπεροχής μπορούν να θεωρηθούν ως οι πιο λογικές μέθοδοι, επειδή μπορούν να ελέγχουν το βαθμό του αλληλοσυμψηφισμού, μέσω των κατωφλίων αρνησικυρίας.

Τα αθροιστικά πρότυπα, από την άλλη πλευρά, επιτρέπουν πλήρη συμψηφισμό. Η σύγκυση ότι αυτό προκαλείται σε μερικές περιπτώσεις από φυσική λογική διαδικασία, μπορεί να εμποδίσει τον αξιολογητή να ιχνηλατήσει μία απόφαση.

Οι ίδιες θεωρήσεις μπορεί να γίνουν για τις διανυσματικές μεθόδους. Η REGIME αθροίζει στη βάση των γραμμικών αθροιστικών προτύπων, χρησιμοποιώντας όμως μόνον ποιοτικά στοιχεία. Αυτό κάνει την ιχνηλάτηση των αποφάσεων ακόμη πιο δύσκολη από ό,τι στα αθροιστικά πρότυπα.

Μία συνοπτική παρουσίαση της αξιολόγησης των μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης γίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 17.3.

Πίνακας 17.3: Συνοπτικός πίνακας επιδόσεων διαφόρων πολυκριτηριακών μεθόδων σε κριτήρια αξιολόγησής τους

Table 17.3: Summary of Performances of Five Multicriteria Methods

[Πηγή: Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K.: “Use of Multicriteria Methods for Assessment of Transport Projects”, ASCE, Transport. Engineer., Vol. 125, No 5, Sep.-Oct. 1999]

Κριτήρια	REGIME	ELECTRE	MAUT	AHP	ADAM
<b>Q<sub>1</sub></b> : Δυνατή συμβατότητα/απόκριση σε πραγματικές συνθήκες	***	**	**	***	**
<b>Q<sub>2</sub></b> : Εγγύτητα προς την ανθρώπινη λογική	*	**	***	***	***
<b>Q<sub>3</sub></b> : Δόμηση της μεθόδου – ευκολία στο να ακολουθηθεί	*	**	**	***	**
<b>Q<sub>4</sub></b> : Χρήση μαθηματικών προσεγγίσεων αναπαράστασης της πραγματικότητας	*	**	***	***	*
<b>S</b> : Απλότητα	**	*	**	***	**
<b>P</b> : Χειρισμός κάθε αριθμού εναλλακτικών	**	**	***	***	***
<b>C</b> : Χειρισμός κάθε αριθμού κριτηρίων	*	***	***	***	***
<b>U</b> : Χειρισμός αβεβαιότητας	*	*	***	**	**
<b>D</b> : Ενθάρρυνση των συνόλων ειδημόνων να συμμετάσχουν	**	*	*	***	*
<b>V</b> : Ευαισθησία	*	**	***	***	***
<b>A</b> : Λογική	*	***	**	**	**

Όπου: \*\*\* Πολύ Καλά, \*\* Καλά, \* Όχι Καλά

## 17.5 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Μία συγκριτική ανάλυση των ανωτέρω πολυκριτηριακών μεθόδων έχει παρουσιασθεί προηγουμένως, εστιαζόμενη στις συνθήκες της αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων. Βάσει των παραπάνω προκύπτουν τα παρακάτω σημεία τα οποία οι μέθοδοι δεν τα αντιμετωπίζουν και για τα οποία χρειάζεται περαιτέρω έρευνα:

- 1. Η ενδεχόμενη εξάρτηση μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης των εναλλακτικών.** Βάσει της ανωτέρω ανάλυσης επί υφισταμένων μεθόδων, προκύπτει ότι τα οποιαδήποτε κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών λύσεων, αντιμετωπίζονται ως απολύτως ανεξάρτητα μεταξύ τους [βλ. (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Mikroudis G., 2007)]. Αυτό ενέχει τον κίνδυνο πιθανών πολλαπλών υπολογισμών ιδίων μεγεθών (multiple counting) κατά την αξιολόγηση των εναλλακτικών.
- 2. Η μεταβολή των επιδόσεων αξιολογουμένων εναλλακτικών συναρτήσει του χρόνου.** Σε αρκετές αξιολογήσεις οι επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια μεταβάλλονται με το χρόνο (π.χ. συγκοινωνιακά έργα). Αυτό δεν λαμβάνεται υπόψιν στις υφιστάμενες μεθόδους, τουλάχιστον άμεσα. Το γεγονός αυτό ενέχει τον κίνδυνο μη θεώρησης, άρα και μη αντιμετώπισης, ακραίων αρνητικής φύσεως επιδόσεων κατά τη ροή του χρόνου.
- 3. Ενοποίηση, βαρύτητα και ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης των εναλλακτικών.** Στην συντριπτική πλειονότητα των μεθόδων πολυκριτηριακής

αξιολόγησης, δεν γίνεται συστηματική ενοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης σε υπερ-κριτήρια. Επίσης, σε πολλές μεθόδους, δεν λαμβάνει χώρα διαδικασία βαρυτικής στάθμισης και ιεράρχησης των κριτηρίων αξιολόγησης με βάση το σύνολο των δεδομένων κάθε προβλήματος, ήτοι δεν λαμβάνονται υπόψη ουσιαστικά κατά τη στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης οι επιδόσεις των εναλλακτικών σε αυτά (ούτε ως τιμές αυτές καθαυτές ούτε ως διασπορά αυτών).

- 4. Οι κλίμακες αναγωγής των φυσικών επιδόσεων των εναλλακτικών σε τιμές.** Στις περισσότερες μεθόδους πολυκριτηριακής αξιολόγησης, θεωρούνται είτε ποιοτικές διατάξεις των επιδόσεων ανά κριτήριο είτε απλές αριθμητικές κλίμακες αναγωγής των αρχικών επιδόσεων. Μάλιστα, συνήθως η αναγωγή αυτή γίνεται σχεδόν εμπειρικά, χωρίς να αντιμετωπίζονται φαινόμενα αβεβαιότητας, ήτοι χωρίς να δημιουργείται με συστηματικό τρόπο συνάρτηση αναγωγής των αρχικών επιδόσεων σε τεχνητές επιδόσεις/τιμές ανά κριτήριο. Και σε μεθόδους όμως όπου δημιουργούνται κλίμακες-συναρτήσεις αναγωγής από τις αρχικές επιδόσεις στις τεχνητές επιδόσεις/τιμές, υφίστανται ζητήματα του βαθμού αξιοπιστίας του τρόπου αναγωγής.

Τα ανωτέρω σημεία αποτελούν τους βασικούς θεωρητικούς άξονες –και όχι μόνο- της προτεινόμενης παρούσας νέας μεθόδου.

## ΕΝΟΤΗΤΑ Γ: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι προαναφερθείσες επισημάνσεις για τις πολυκριτηριακές μεθόδους αξιολόγησης οδήγησαν στην προσπάθεια συμπλήρωσης των μειονεκτημάτων που επισημάνθηκαν, πράγμα που επιχειρείται στα παρακάτω. Ειδικότερα:

- Επιχειρείται η εκ των προτέρων διάγνωση της ορθογωνικότητας των κριτηρίων και η στην περίπτωση μη ορθογωνικότητας αντιμετώπιση/χειρισμός.
- Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η διαφοροποίηση συναρτήσεως του χρόνου των ανά κριτήριο επιδόσεων κάθε εναλλακτικής, εισάγονται κατάλληλοι τελεστές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται επί των επιδόσεων των εναλλακτικών ανά κριτήριο.
- Επιχειρείται η ενοποίηση των κριτηρίων, έτσι που τελικά προκύπτουν ευρύτερα κριτήρια – κριτήρια, με προσανατολισμό πάντα στις περιπτώσεις αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων (χωρίς όμως να αποκλείεται η εφαρμογή και σε περιπτώσεις μη συγκοινωνιακών έργων). Τα επιλεγόμενα ως ευρύτερα κριτήρια είναι γενικά ορθογώνια μεταξύ τους, ανιχνεύεται δε εν συνεχεία η εξάρτηση των απλών κριτηρίων (υποκριτηρίων), δηλαδή η γωνία των σχετικών διανυσμάτων. Εναλλακτικά, προ της ομαδοποίησεως διερευνώνται και απεικονίζονται σε πίνακα όλες οι γωνίες μεταξύ των κριτηρίων ανά ζεύγος και συγκεκριμένα τα συνημίτονα αυτών (των διανυσμάτων των κριτηρίων ανά ζεύγος). Η οπτική και λογική θεώρηση της καταγραφής δίδει τη δυνατότητα παραγωγής επιμέρους πινάκων που κάθε ένας από αυτούς αντιστοιχεί προς ένα ευρύτερο κριτήριο. Εφόσον είναι δυνατή η πλήρης κατάρτιση ολοκλήρου του πίνακα των συνημιτόνων, υπολογίζονται τα κατά σειρά αθροίσματα των στοιχείων του. Το άθροισμα κάθε σειράς συνιστά δείκτη του βαθμού εξάρτησης του κριτηρίου που αντιστοιχεί στη σειρά αυτή, με τα λοιπά κριτήρια. Η τελική ιεράρχηση των κριτηρίων γίνεται αντιστρόφως ανάλογα του μεγέθους των αθροισμάτων των σειρών, ήτοι όσο μικρότερος είναι ο βαθμός εξάρτησης ενός κριτηρίου προς το σύνολο των λοιπών κριτηρίων τόσο σημαντικότερο κρίνεται το κριτήριο αυτό ως προς την επιτυχία της αξιολόγησης.
- Οι κλίμακες είναι ουσιώδες στοιχείο στην πολυκριτηριακή ανάλυση. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος γενικά θα πρέπει να επιδιώκεται η επιλογή της κατάλληλης κατά περίπτωση κλίμακας. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μεθοδολογία και αλγόριθμος που διευρύνει το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου, όπως παρατίθεται. Αναφορικά με την αναγωγή των ανά κριτήριο αρχικών/φυσικών επιδόσεων των εναλλακτικών σε τιμές, επιχειρείται η ανά κριτήριο και περίπτωση αξιολόγησης προσαρμογή και εξειδίκευση του τρόπου αναγωγής. Αναλυτικότερα επιχειρείται ο καθορισμός της μορφής της ανά κριτήριο συναρτήσεως αναγωγής για τις περιπτώσεις όπου υπάρχουν αρκετά στοιχεία. Για τον καθορισμό της μορφής της ανά κριτήριο συναρτήσεως λαμβάνεται υπόψη η φύση του κριτηρίου αλλά και η στρατηγική του φορέα αξιολόγησης. Με αυτό τον γνώμονα ευρίσκονται κρίσιμα σημεία για την ανά κριτήριο συναρτησιακή αναγωγή των αρχικών επιδόσεων των εναλλακτικών σε αξιακές οντότητες.

## Συμβολισμοί

$E_i$ :	Εναλλακτική (Λύση/Εργο).
$m$ :	Πλήθος Εναλλακτικών.
$K_j$ :	Κριτήριο Αξιολόγησης.
$n$ :	Πλήθος των αρχικώς θεωρουμένων κριτηρίων.
$K_j$ :	Μοναδιαίο διάνυσμα αντιστοιχούν στο διάνυσμα $K_j$ .
$\langle K_j, K_j' \rangle$ :	Εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων $K_j, K_j'$ .
$x_{i,j,k}$ :	Χρονικός Παράγοντας για την εναλλακτική $E_i$ στο υπο-κριτήριο $k$ του ευρύτερου κριτηρίου $j$ .
$\phi_{i,j,k'}$ :	Φυσική επίδοση της εναλλακτικής $i$ στο υπο-κριτήριο $k'$ του ευρύτερου κριτηρίου $j$ .
$g(i,j,k)$ initial:	Τεχνητή επίδοση, προ της ενσωμάτωσης του χρονικού παράγοντα, της εναλλακτικής $i$ στο υπο-κριτήριο $k$ του ευρύτερου κριτηρίου $j$ .
$g_{i,j,k}$ :	Τεχνητή επίδοση, κατόπιν της ενσωμάτωσης του χρονικού παράγοντα, της εναλλακτικής $i$ στο υπο-κριτήριο $k$ του ευρύτερου κριτηρίου $j$ .
$t\xi$ :	Διακριτά χρονικά σημεία.
$g_{i,j}$ :	Επίδοση της Εναλλακτικής $i$ στο Κριτήριο $j$ .
$G_{i,j}$ :	Ποσότητα που χρησιμοποιείται για να ευρεθεί η Ολική Επίδοση για την Εναλλακτική $i$ και το Ευρύτερο Κριτήριο $j$ .
$W_{i,j}$ :	Σταθμισμένη Επίδοση για την Εναλλακτική $E_i$ και το Ευρύτερο Κριτήριο $K_j$ .
$NE_{i,j}$ :	Τελική Επίδοση για την Εναλλακτική $E_i$ και το Ευρύτερο Κριτήριο $K_j$ .
$NE_i$ :	Γενική Τελική Επίδοση για την Εναλλακτική $E_i$ .
$w_1, w_2$ :	Χαρακτηριστικές ποσότητες που χρησιμοποιούνται στη Στάθμιση Κριτηρίων.
$F_m(E_r)$ :	Συναρτησιακή έκφραση επίδοσης της Εναλλακτικής $E_r$ στο Κριτήριο $K_m$ .
$F_i \perp_j(E_r)$ :	Συνιστώσα της επίδοσης της Εναλλακτικής $E_r$ στο Κριτήριο $K_i$ η οποία είναι ανεξάρτητη από το Κριτήριο $K_j$ .
$F_i \perp(1,2,3, \dots, j)(E_r)$ :	Συνιστώσα της επίδοσης της Εναλλακτικής $E_r$ στο Κριτήριο $K_i$ η οποία είναι ανεξάρτητη από το χώρο ( $K_1, K_2, K_3, \dots, K_j$ ).
$\Delta F_m$ :	Μεταβολή της Επίδοσης $F_m$ .
$\max_r$ :	Μέγιστο από τα ακόλουθα στοιχεία, αναφορικά με το δείκτη $r$ .
$\rho$ :	Πλήθος των τελικώς θεωρουμένων κριτηρίων τα οποία είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο.
$\Sigma_i \dots$	Άθροισμα των ακολουθούντων στοιχείων αναφορικά με το δείκτη $i$ .
$\Pi_i \dots$	Γινόμενο των ακολουθούντων στοιχείων αναφορικά με το δείκτη $i$ .
$\det(K_1, K_2, \dots, K_m)$ :	Ορίζουσα με τις συντεταγμένες των διανυσμάτων $K_1, K_2, \dots, K_m$ .
$\omega_j, \omega_j'$ :	Γωνία μεταξύ του Κριτηρίου $K_j$ και του Κριτηρίου $K_j'$ .
$\omega_m, (1, 2, 3, \dots, j)$ :	Γωνία μεταξύ του Κριτηρίου $K_m$ και του Χώρου ( $K_1, K_2, K_3, \dots, K_j$ ) ο οποίος ορίζεται από τα Κριτήρια $K_1, K_2, K_3, \dots, K_j$ .
$b$ :	Εκθέτης σε νόρμα ενός Χώρου Hilbert.
$z_o$ :	Τιμή μερικής παραγώγου.
$u_r, j$ :	Χρησιμότητα της Εναλλακτικής $E_r$ στο Κριτήριο $K_j$ .
$v_r, j$ :	Τιμή της Εναλλακτικής $E_r$ στο Κριτήριο $K_j$ .
$w_j$ :	Σχετικό βάρος του Κριτηρίου $K_j$ .
$d\psi/dx$ :	Ολική Παράγωγος.
$\theta\psi/\theta x$ :	Μερική Παράγωγος.
$[K]$ :	Πίνακας Αλληλεπιδράσεων.
$R_j$ :	Αριθμός Εξαρτήσεων του Κριτηρίου $K_j$ .

$\cos \omega(j,j')$ :	Συνημίτονο της γωνίας $\omega(j,j')$ .
$\sin \omega(j,j')$ :	Ημίτονο της γωνίας $\omega(j,j')$ .
X, Ψ, Z, Ω, Φ, T:	Συντεταγμένες σε χώρο Hilbert.
$\zeta_{ij}$ :	Κατά ζεύγος διατεταγμένη σύγκριση της οντότητας $i$ με την οντότητα $j$ .
$\mu$ :	Ακέραιοι αριθμοί που τιθέμενοι σε συνάρτηση εκθετική ή μονωνυμική μπορούν να δημιουργήσουν τους αριθμούς αντίστοιχα της κλίμακας Saaty ή REMBRANDT.
$r_{ij}$ :	Αριθμός κλίμακας REMBRANDT κατά ζεύγος διατεταγμένης σύγκρισης της οντότητας $i$ με την οντότητα $j$ .
$S_{ij}$ :	Αριθμός κλίμακας Saaty κατά ζεύγος διατεταγμένης σύγκρισης της οντότητας $i$ με την οντότητα $j$ .
$\alpha, \beta$ :	Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη σύνθετη πολυωνυμική-εκθετική συνάρτηση αναγωγής από την κλίμακα REMBRANDT στην κλίμακα Saaty.
$n_{ij}$ :	Αριθμός της προτεινόμενης κλίμακας κατά ζεύγος διατεταγμένης σύγκρισης της οντότητας $i$ με την οντότητα $j$ .
$w_{ij}$ :	Αριθμός της κατά ζεύγος διατεταγμένης σύγκρισης σπουδαιότητας του (με δείκτη) $i$ κριτηρίου αξιολόγησης με το (με δείκτη) $j$ κριτήριο αξιολόγησης.
$\chi$ :	Τιμή ισοδυναμίας σπουδαιότητας της οντότητας $i$ με την οντότητα $j$ , σε κατά ζεύγος σύγκριση, κατά την προτεινόμενη κλίμακα.
$\lambda_1, \lambda_2$ :	Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη σύνθετη πολυωνυμική-εκθετική συνάρτηση αναγωγής από την προτεινόμενη κλίμακα στην κλίμακα Saaty.
$N_i$ :	Τελικός σταθερότυπος αποτίμησης της οντότητας $i$ μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης κλίμακας.
$v$ :	Πλήθος Κριτηρίων Αξιολόγησης.
C.I.:	Δείκτης Συμβατότητας κατά Saaty.
$\sigma$ :	Παράμετρος που λαμβάνει τιμές στους φυσικούς αριθμούς, και χρησιμοποιείται για την περιγραφή των συνιστωσών του ιδεατού διανύσματος κατά την αξιολόγηση $v$ το πλήθος οντοτήτων.
$u$ :	Η μέγιστη τιμή της παραμέτρου $\sigma$ , για την οποία ( $u$ ) πληρούται αυστηρά η θετικότητα της διαφοράς: [(συνιστώσα ιδεατού διανύσματος) – (συνιστώσα πραγματικού διανύσματος)].
Π.Δ.Σ.:	Προτεινόμενος δείκτης συμβατότητας για την προτεινόμενη μέθοδο.
$t_{max}$ :	Μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα κατά ζεύγη συγκρίσεων οντοτήτων στη Μέθοδο Ιδιοτιμών.
$W_i$ :	Προκύπτουσα μη κανονικοποιημένη σχετική βαρύτητα του κριτηρίου αξιολόγησης $K_i$ .
$\mathbf{W}_i$ :	Προκύπτουσα κανονικοποιημένη σχετική βαρύτητα του κριτηρίου αξιολόγησης $K_i$ .
$pl, l', i$ :	Αριθμός της κατά ζεύγος διατεταγμένης σύγκρισης της επίδοσης της (με δείκτη) $l$ εναλλακτικής λύσης στο (με δείκτη) $i$ κριτήριο αξιολόγησης με την επίδοση της (με δείκτη) $l'$ εναλλακτικής λύσης στο ίδιο κριτήριο αξιολόγησης.
$Pl, i$ :	Επίδοση της εναλλακτικής $E_l$ στο κριτήριο αξιολόγησης $K_i$ , προκύπτουσα από κατά ζεύγη συγκρίσεις / διαδικασία χειρισμού αβεβαιότητας.

Pol:	Ολική Επίδοση της εναλλακτικής $E_i$ , προκύπτουσα από κατά ζεύγη συγκρίσεις / διαδικασία χειρισμού αβεβαιότητας.
$P_{j,max}$ :	Η μέγιστη επίδοση στο κριτήριο $K_j$ μεταξύ των επιδόσεων $P_{i,j}$ .
$P_{j,min}$ :	Η ελάχιστη επίδοση στο κριτήριο $K_j$ μεταξύ των επιδόσεων $P_{i,j}$ .
$U_i$ :	Ολική Ωφελιμότητα/Χρησιμότητα της εναλλακτικής $E_i$ .
e:	Βήμα στην κλίμακα βαρών των κριτηρίων, ήτοι η διαφορά των βαρών $w_j - w_{j+1}$ .
d:	Η μικρότερη (μηδενική ή μη μηδενική) τιμή βάρους κριτηρίου σε ακολουθία βαρών κριτηρίων.
a:	Φυσικός αριθμός που παίρνει τιμές από 0 έως και $(m-1)$ .
z:	Ο αριθμός $[1/(m-1)]$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 18: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ**

### **18.1 1<sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

#### **18.1.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους**

Η εκτίμηση των σχετικών βαρών των κριτηρίων για τα κριτήρια αξιολόγησης λαμβάνει χώρα σε αρκετές πολυκριτηριακές μεθόδους. Αυτή η σχέση (μεταξύ κριτηρίων) είναι ποσοτική σε κάποιες μεθόδους (Electre I, II, III) ή ποιοτική σε άλλες (Regime, Qualiflex, Oreste). Η μέθοδος Electre IV (Roy, 1985), εφαρμόζει μία θεώρηση ισοδυναμίας σχετικά με τα βάρη των κριτηρίων. Η αναφερθείσα στάθμιση είναι σχετική με τις οντότητες και τη φύση των κριτηρίων αξιολόγησης, έτσι μπορεί να ονομασθεί στάθμιση οντοτήτων.

Παράλληλα με αυτή τη στάθμιση, μία άλλη στάθμιση, καλούμενη στάθμιση χρηστικότητας, μπορεί να θεωρηθεί. Αυτή εφαρμόζεται δευτερογενώς και εξαρτάται από τις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια. Η μέθοδος Εντροπίας (Schaerlig, 1985), προτείνει αυτή τη στάθμιση, όπου το βάρος κάθε κριτηρίου επηρεάζεται άμεσα από την διασπορά των επιδόσεων των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο. Η μέθοδος Multiple Attributes (Zeleny, 1982) δεν συνάδει με το σκεπτικό μίας σφαιρικής θεώρησης όλων των εναλλακτικών λύσεων και κάνει μία ανεξάρτητη θεώρηση για κάθε εναλλακτική.

#### **18.1.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο**

Μία βασική ιδέα της παρούσας μεθόδου που παρουσιάζεται πιο κάτω είναι ότι η ισοτιμία μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης ισχύει. Υπάρχουν δύο βασικά επιχειρήματα για να υποστηρίξουν αυτό:

α) Εάν μία σωστή και αντιπροσωπευτική επιλογή των κριτηρίων έχει λάβει χώρα, τότε κάθε κριτήριο πληροί μία διαφορετική (ισοδύναμη με τις άλλες) όψη της αξιολόγησης. Αυτό είναι συγκείμενο με το σκεπτικό της Electre IV. Ειδικά για την αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, η παρούσα μέθοδος προτείνει τα ακόλουθα κριτήρια-στόχους: i) Ανθρώπινος παράγοντας, ii) Κοινωνικός-Πολιτιστικός παράγοντας, iii) Περιβάλλον, iv) Οικονομία, v) Χρηστικός παράγοντας.

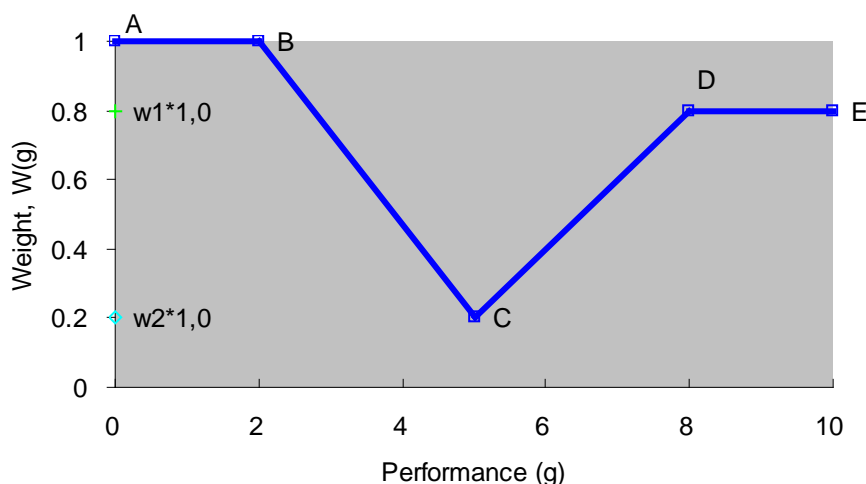
β) Στην περίπτωση όπου ένα κριτήριο φαίνεται να έχει μεγάλη σπουδαιότητα (π.χ. λόγω ειδικών γεωγραφικών συνθηκών), τότε η παρούσα μέθοδος έχει τη δυνατότητα να θεωρεί την εν λόγω σπουδαιότητα συμπεριλαμβάνοντάς την σε περισσότερα του ενός κριτήρια. Παραδείγματος χάρη, εάν το κόστος λειτουργίας έχει μεγάλη σπουδαιότητα, τότε αυτό μπορεί να συμπεριληφθεί σε ένα σύνολο κριτηρίων, όπως Οικονομία, Χρηστικός παράγοντας.

Αναφορικά με τη βαρύτητα χρησιμότητας, η παρούσα μέθοδος θεωρεί για κάθε εναλλακτική, η επίδοσή της σε ένα κριτήριο πρέπει να επηρεάζεται σχετικά με την θέση της επίδοσης αυτής ως προς τη γενική επίδοση της εναλλακτικής.

Το επιχειρήμα για αυτό είναι ότι μέτριες επιδόσεις δεν είναι τόσο σημαντικές όσο ακραίες (αρνητικές ή θετικές). Με άλλα λόγια, θεωρούμε ότι οι ακραίες επιδόσεις μπορεί να συμπεριλαμβάνονται στην πορεία αξιολόγησης με έναν αποδεκτό τρόπο.



Σχήμα 18.1: Στάθμιση των Κριτηρίων  
Figure 18.1: Weighting of Criteria



Η εδώ θεωρούμενη και ευρισκόμενη βαρύτητα μπορεί να χαρακτηριστεί ως «χρηστική», λόγω της επιρροής πραγματικών συνθηκών (επιδόσεων εναλλακτικών) στην εύρεσή της.

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρουσιάζεται πώς η χρηστική βαρύτητα ποικίλλει σύμφωνα με τη θέση της επίδοσης σε μία κλίμακα 0-10. Για παράδειγμα, η επίδοση μεταξύ των βαθμίδων «4» και «5» είναι ολιγότερο σημαντική από την επίδοση μεταξύ «2» και «3» ή από την επίδοση μεταξύ «8» και «9». Έτσι η αρχική επίδοση ανά εναλλακτική και κριτήριο μεταβάλλεται σε μία τελική επίδοση. Αυτή η τελική επίδοση ποσοτικοποιείται βασιζόμενη σε μία συνάρτηση κυμαινόμενη από «0» (χαμηλότερο όριο) έως το ανώτερο όριο.

Ευρίσκονται οι σταθμισμένες επιδόσεις, ήτοι:

$$W_{i,j} = \int W(g) dg \quad (18.1)$$

με το «0» ως κάτω όριο ολοκλήρωσης και το  $g_{i,j}$  ως άνω όριο ολοκλήρωσης.

Η συνάρτηση  $W(g)$  παρουσιάζεται στο ανωτέρω διάγραμμα.

Οι ποσότητες  $w_1$  και  $w_2$  (που εμφανίζονται στο ανωτέρω διάγραμμα) καθορίζονται από τον Αποφασίζοντα.

Για τα εμφανιζόμενα σημεία A, B, C, D, E του διαγράμματος της συνάρτησης  $W(g)$ , ισχύουν τα κάτωθι:

- A: είναι το αρχικό σημείο της  $W(g)$ , το οποίο αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (0, 1).
- B: είναι το σημείο του διαγράμματος που αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (2, 1). Επομένως, το τμήμα A-B αντιστοιχεί στις «κακές» τιμές επιδόσεων των  $g_{i,j}$ , ήτοι στις επιδόσεις που δεν ξεπερνούν το βαθμό «2» σε μία δεκαβάθμια κλίμακα 0-10. Παρατηρείται ότι η συνάρτηση  $W(g)$  είναι σταθερή στο τμήμα A-B.
- C: είναι το σημείο του διαγράμματος που αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (5,  $w_2$ ). Επομένως, πρόκειται για το σημείο των μεσοσταθμικών μετρίων τιμών επιδόσεων των  $g_{i,j}$ . Παρατηρείται ότι η συνάρτηση  $W(g)$  βαίνει φθίνουσα στο τμήμα B-C.
- D: είναι το σημείο του διαγράμματος που αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (8,  $w_1$ ). Επομένως, πρόκειται για το σημείο από το οποίο αρχίζουν οι πολύ καλές επιδόσεις (οι οποίες συνεχίζονται στο τμήμα D-E). Παρατηρείται ότι η συνάρτηση  $W(g)$  βαίνει αύξουσα στο τμήμα C-D.

- E: είναι το σημείο διαγράμματος που αντιστοιχεί στο ζεύγος τιμών (10, w1). Επομένως, πρόκειται για το σημείο του διαγράμματος που αντιστοιχεί στην άριστη επίδοση. Παρατηρείται ότι η συνάρτηση W(g) είναι σταθερή στο τμήμα D-E.

## **18.2 2<sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ**

### **18.2.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους**

Στις περισσότερες πολυκριτηριακές μεθόδους, κάθε κριτήριο αξιολόγησης θεωρείται απολύτως ανεξάρτητο από τα άλλα. Η Nested Regime (Nijkamp - Blaas, 1993), θεωρεί το ζήτημα της ενοποίησης κριτηρίων. Στην μέθοδο αυτή τα κριτήρια αξιολόγησης ενοποιούνται σε ευρύτερα κριτήρια. Η ενοποίηση των κριτηρίων είναι αναγκαία εξαιτίας των ακολούθων λόγων:

- α) Ως πρακτική απαίτηση, αφού η ενοποίηση των κριτηρίων οδηγεί σε ευρύτερα κριτήρια, έτσι είναι ευκολότερο να γίνει χειρισμός αυτών.
- β) Ως θεωρητική απαίτηση, η οποία εγείρεται εκ του γεγονότος ότι πολλά θεωρούμενα κριτήρια ενδέχεται να μην είναι όλα απολύτως ανεξάρτητα μεταξύ τους.

### **18.2.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο**

Η παρούσα μέθοδος δέχεται ότι απλά κριτήρια μπορούν να καταταχθούν εντός ενός ευρύτερου κριτηρίου, στη βάση των επιδόσεών τους εντός του εν λόγω ευρύτερου κριτηρίου. Έτσι, για την i εναλλακτική και το j κριτήριο, μία ομάδα από επιδόσεις σε απλά κριτήρια (υπο-κριτήρια) καθορίζονται ονομαστικά ως gi,j,k.

Ο δείκτης “k” καθορίζεται κάθε φορά ώστε να αποδίδει τη σειρά των gi,j,k επιδόσεων, έτσι ώστε:

$$g_{i,j,1} \geq g_{i,j,2} \geq g_{i,j,3} \geq \dots \geq g_{i,j,k} \geq \dots \geq g_{i,j,l} \quad (18.2)$$

όπου “l” ο αριθμός των υπο-κριτηρίων του ευρύτερου κριτηρίου “j”.

Ακολούθως, μία απεικόνιση μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης και του διανυσματικού χώρου E1 επιχειρείται για κάθε ευρύτερο κριτήριο “j”. Το διάνυσμα gi,j,1 τοποθετείται στον θεωρούμενο άξονα 1 του E1.

Σε μία ακραία περίπτωση, το διάνυσμα gi,j,2 είναι παράλληλο του διανύσματος gi,j,1. Στην αντίθετη περίπτωση το gi,j,2 είναι κάθετο του gi,j,1. Στην πρώτη εκ των δύο περιπτώσεων το ημίτονο της γωνίας μεταξύ των δύο διανυσμάτων είναι 0. Στην δεύτερη περίπτωση το ημίτονο της γωνίας μεταξύ των δύο διανυσμάτων είναι 1. Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί στην απόλυτη σύμπτωση των δύο κριτηρίων, ενώ η δεύτερη αντιστοιχεί στην απόλυτη ανεξαρτησία μεταξύ αυτών.

Μεταξύ των δύο αυτών ακραίων περιπτώσεων υπάρχουν άπειρες περιπτώσεις. Στην μεσαία περίπτωση το ημίτονο της γωνίας μεταξύ των δύο κριτηρίων είναι ίσο με 1/2. Σε αυτή την περίπτωση, η συνιστώσα του gi,j,2 που είναι ανεξάρτητη του gi,j,1 ισούται με (1/2) \* gi,j,2.

Σχετικά με το gi,j,3, σημειώνεται ότι υπάρχουν τρεις ακραίες περιπτώσεις σχετικά με τη σχετική του θέση ως προς τα άλλα δύο προαναφερθέντα διανύσματα. Στην πρώτη ακραία περίπτωση το gi,j,3 είναι παράλληλο του gi,j,1. Στην δεύτερη ακραία περίπτωση το gi,j,3 είναι παράλληλο του gi,j,2. Στην τρίτη ακραία περίπτωση το gi,j,3 είναι κάθετο στο επίπεδο των gi,j,1 και gi,j,2.

Σε κάθε μία εκ των δύο πρώτων ακραίων περιπτώσεων, το ημίτονο της γωνίας μεταξύ του gi,j,3 και του επιπέδου των άλλων δύο διανυσμάτων είναι ίσο με «0». Στην τρίτη περίπτωση το ημίτονο της γωνίας μεταξύ του gi,j,3 και του επιπέδου των άλλων δύο διανυσμάτων είναι ίσο με «1». Στην ενδιάμεση από αυτές τις τρεις περιπτώσεις, το ημίτονο της γωνίας μεταξύ

του  $g_{i,j,3}$  και του επιπέδου είναι ίσο με « $1/3$ ». Έτσι, η συνιστώσα του  $g_{i,j,3}$  που είναι ανεξάρτητη από το χώρο των προαναφερθέντων διανυσμάτων, είναι ίση με  $(1/3) * g_{i,j,3}$ . Επαγωγικά, μπορεί να αποδειχθεί ότι η ανεξάρτητη συνιστώσα του  $g_{i,j,k}$  από το χώρο των προηγούμενων διανυσμάτων, ισούται με  $(1/k) * g_{i,j,k}$ .

### **18.3 3<sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ**

#### **18.3.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους**

Σε μεθόδους Κόστους-Ωφέλειας και ιδιαίτερα στην αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, ο χρόνος χρησιμοποιείται όχι ως μία μεταβλητή με την πλήρη υπόστασή της, αλλά μόνον έμμεσα μέσω άλλων μεταβλητών (π.χ. στο επιτόκιο αναγωγής), ανηγμένος στην περίοδο αξιολόγησης. Για τις περισσότερες πολυκριτηριακές μεθόδους, τα με το χρόνο αποτελέσματα δεν μεταβάλλονται κατά την περίοδο αξιολόγησης και συνεπώς, μία επίδοση εναλλακτικής ανά κριτήριο, ορίζεται ως μία μέση επίδοση, δυνατή να εφαρμοσθεί για όλη την περίοδο αξιολόγησης. Αυτό είναι μία κοινή θέση μεταξύ των ποιοτικών και ποσοτικών πολυκριτηριακών μεθόδων. Αυτή η θεώρηση δεν δύναται να αποδώσει εν δυνάμει μεταβολές των επιδόσεων κατά την περίοδο αξιολόγησης. Είναι πιθανό πάντως, αυτές οι σημαντικές μεταβολές που σχετίζονται με το χρόνο, να αλλοιώσουν τη σημασία της συμπυκνωμένης παραμέτρου, η οποία είναι η μέση τιμή της επίδοσης στο θεωρούμενο κριτήριο.

#### **18.3.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο**

Χρήστες, εργαζόμενοι, παροικούντες και γενικά, όλοι οι επηρεαζόμενοι από ένα συγκοινωνιακό έργο είναι ανθρώπινες οντότητες. Αυτές οι οντότητες έχουν ποικίλη σύνθεση και διαφορετικά χαρακτηριστικά, αναλόγως της ανάπτυξης της περιοχής στην οποία το αξιολογούμενο συγκοινωνιακό έργο λαμβάνει χώρα. Συνεπώς, είναι πιθανό ότι η καλύτερη προσβασιμότητα και κινητικότητα στην περιοχή μπορεί να προσελκύσει (σε συνδυασμό με δευτερογενή οικονομική-αστική ανάπτυξη), νέους χρήστες, εργαζομένους και κατοίκους. Αυτή είναι μία δυναμική με το χρόνο εξέλιξη, όπου η θεωρούμενη εναλλακτική (έργο), οι επηρεαζόμενοι άνθρωποι και η περιοχή, αποτελούν ένα σύστημα διάδρασης. Εξάγεται ως συμπέρασμα ότι μεταβολές στα θετικά και αρνητικά αποτελέσματα κατά τη χρονική περίοδο πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την πορεία αξιολόγησης. Αυτό δεν έχει μόνο θεωρητική βάση. Τα συγκοινωνιακά έργα, από τα χαρακτηριστικά τους, δίνουν τη δυνατότητα συνδυασμών-μεταβολών κατά την περίοδο αξιολόγησης. Με άλλα λόγια, η κατασκευή με τη διάρκειά της, η συντήρηση με τις επαναλήψεις της, η διοίκηση ενός έργου με την εφαρμογή της, είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά που κάνουν ένα συγκοινωνιακό έργο να μεταβάλλεται δυναμικά με το χρόνο.

Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα των συγκοινωνιακών έργων έχουν διαφορετικό χρονικό ορίζοντα. Μερικά αποτελέσματα λαμβάνουν χώρα άμεσα με την έναρξη της λειτουργίας του έργου, όπως η μείωση του χρόνου ταξιδιού. Άλλα αποτελέσματα λαμβάνουν χώρα σε μακρύ ορίζοντα, όπως μεταβολές στην επιλεξιμότητα της περιοχής ως κατοικία. Τα μακροχρόνια αποτελέσματα συμβαίνουν ως συνέπεια των μεταβολών στα κόστη (οι οποίες είναι βραχυχρόνια αποτελέσματα). Επομένως, μία θεώρηση των βέλτιστων επιθυμητών επιδόσεων ανά εναλλακτική και κριτήριο, είναι απαραίτητη. Αυτές οι μεταβολές πρέπει να ορίζονται επί μίας εναλλακτικής από έναν Αποφασίζοντα. Πάντως, μία συνεχώς αυξανόμενη κοινωνική ευαισθησία επιτρέπει μία κοινωνική έκφραση και εν δυνάμει συμμετοχή σε μία τέτοια διαδικασία του αποφασίζεин.

Στην πρακτική πλευρά της παρούσας μεθόδου, ένας τελεστής  $x_{j,k}$  προτείνεται για κάθε υπο-κριτήριο “j,k” (που σημαίνει “k” υπο-κριτήριο του “j” ευρύτερου κριτηρίου). Έτσι, ο χρονικός παράγοντας  $x_{i,j,k}$ , πολλαπλασιάζει την αντίστοιχη αρχική επίδοση. Επομένως:

$$x_{i,j,k} * g(i,j,k) \text{ initial} = g_{i,j,k} \quad (18.3)$$

όπου, οι δείκτες ανταποκρίνονται στα ακόλουθα:

“i” αντιστοιχεί στην εναλλακτική,

“j” αντιστοιχεί στο ευρύτερο κριτήριο και

“k” αντιστοιχεί στο υπο-κριτήριο του “j” ευρύτερου κριτηρίου.

Ο χρονικός τελεστής  $x_{i,j,k}$  αποδίδει την απόκλιση μεταξύ των  $\phi_{i,j,k}(t)$  και  $\phi_{j,k}(\text{best})$ , όπου,  $\phi_{i,j,k}(t)$  η προβλεπόμενη μεταβολή για την εναλλακτική “i”, το υπο-κριτήριο “k” του “j” ευρύτερου κριτηρίου (αποδοθέν με τη φυσική κλίμακα «φ»).

Εγείρεται το ζήτημα: «πώς μία απόκλιση μεταξύ των δύο ανωτέρω συναρτήσεων μπορεί να μετρηθεί?» Απαντώντας σε αυτό σημειώνεται ότι μία τέτοια απόκλιση μπορεί να καθορισθεί ως εξής:

$$\sum \xi [\phi_{j,k}(\text{best})(t_\xi) - (\phi_{i,j,k})(t_\xi)] \quad (18.4)$$

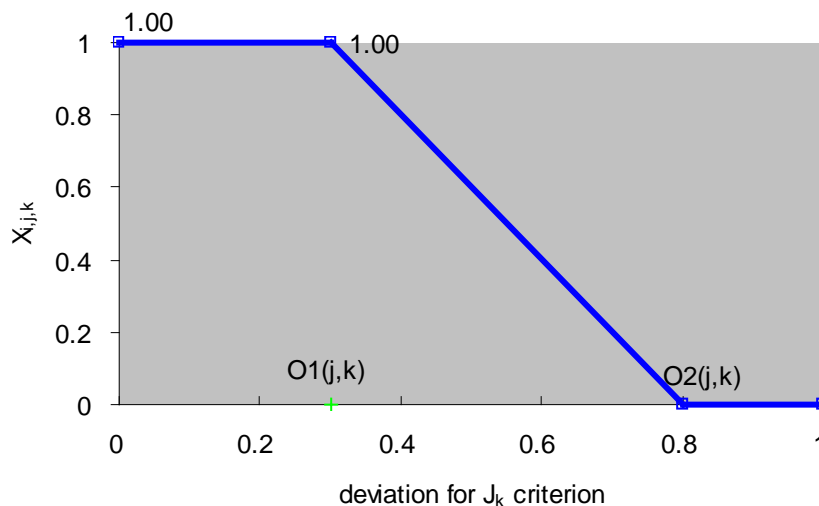
Όπου

“ $t_\xi$ ”: διακριτά χρονικά σημεία.

Εάν θεωρηθούν τα “ $t_\xi$ ” ως συνεχή σημεία στο χρόνο, τότε το ανωτέρω άθροισμα γίνεται ένα ολοκλήρωμα, σχετικά με τη χρονική μεταβλητή. Ο τελεστής  $x_{i,j,k}$  κυμαίνεται από «0» έως «1». Ο τελεστής αυτός γίνεται μικρότερος όσο το ανωτέρω άθροισμα γίνεται μεγαλύτερο, ήτοι όσο η ανωτέρω αναφερθείσα απόκλιση γίνεται μεγαλύτερη.

Σχήμα 18.2: Διακύμανση του Χρονικού Τελεστή

Figure 18.2: Variation of Time factor



## 18.4 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

### 18.4.1 Θεώρηση από άλλες μεθόδους

Ένας δείκτης μπορεί να αποδώσει κάθε κριτήριο-παράγοντα ενός συγκοινωνιακού έργου. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτή η απόδοση είναι επιτυχής, αλλά σε κάποιες άλλες όχι. Για παράδειγμα, το κριτήριο Οικονομία μπορεί να αποδοθεί με το δείκτη I.R.R. ή με το δείκτη N.P.V. ή με άλλο τρόπο. Η κλίμακα μέτρησης του επιλεγμένου δείκτη μπορεί να θεωρηθεί ως μία κλίμακα κριτηρίου. Μία τέτοια κλίμακα καλείται φυσική, επειδή οι μονάδες της

ανταποκρίνονται άμεσα σε φυσικές τιμές. Σε αντίθεση, μία κλίμακα χωρίς τέτοια μεγέθη (μόνον με αριθμητικά μεγέθη) μπορεί να καλείται τεχνητή.

Υπάρχουν δύο κυρίως λόγοι για τη χρήση τεχνητών κλιμάκων. Ο πρώτος είναι ότι κάποια κριτήρια είναι ποιοτικά, ήτοι αυτά τα κριτήρια δεν αποδίδονται επιτυχώς από κάποιο φυσικό δείκτη. Στα συγκοινωνιακά έργα υπάρχουν αρκετά ποιοτικά κριτήρια αξιολόγησης. Για παράδειγμα, αναφέρεται η αισθητική ενός δρόμου ή ενός σιδηροδρόμου. Ο δεύτερος λόγος χρήσης τεχνητών κλιμάκων, είναι η ανάγκη ομογενοποίησης των κριτηρίων αξιολόγησης, με στόχο να επιτευχθούν καλοί πρακτικώς υπολογιστικοί χειρισμοί. Έτσι, φυσικές επιδόσεις εναλλακτικών (έργων) αποδίδονται σε τεχνητές επιδόσεις, ήτοι σε κοινή τεχνητή κλίμακα ή σε περισσότερες από μία τεχνητές κλίμακες, εφαρμόζοντας αναλογικές σχέσεις μεταξύ αυτών.

Ο πρώτος εκ των δύο ανωτέρω λόγων είναι γενικά αποδεκτός. Αλλά σχετικά με το δεύτερο λόγο, πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιες πολυκριτηριακές μέθοδοι αποφεύγουν αυτές τις τεχνητές κλίμακες και δημιουργούν μόνον μία διάταξη των επιδόσεων των εναλλακτικών ανά κριτήριο Regime (Nijkamp - Blaas, 1993), (Hinloopen - Nijkamp - Rietveld, 1983), Qualiflex (Paelinck, 1978), Oreste (Schaerlig, 1985).

#### **18.4.2 Θεώρηση από την παρούσα μέθοδο**

Η παρούσα μέθοδος υποστηρίζει τη θέση ότι η χρήση τεχνητών κλιμάκων είναι σημαντική όχι μόνο για την απόδοση ποιοτικών κριτηρίων, αλλά επίσης και για την ομογενοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης. Έτσι, μία έλλειψη ευαισθησίας στην απόδοση διαφορών μεταξύ των επιδόσεων των εναλλακτικών μπορεί να παρατηρηθεί σε μεθόδους όπως οι Regime, Qualiflex, Oreste, δηλαδή σε μεθόδους οι οποίες δεν χρησιμοποιούν τεχνητές κλίμακες για την ομογενοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης.

Μία άλλη πτυχή της παρούσας έρευνας είναι ο τρόπος της απόδοσης από τις φυσικές στις τεχνητές κλίμακες. Σήμερα είναι αποδεκτό ότι μία βαθμιδωτή απόδοση από φυσική σε τεχνητή κλίμακα, δεν είναι ο καλύτερος τρόπος, λόγω της έλλειψης συνέχειας μεταξύ των βαθμίδων. Συνεχείς συναρτήσεις μπορεί να θεωρηθούν ως αναγκαίες για την απόδοση φυσικών σε τεχνητές κλίμακες. Μία τέτοια σημαντική προσπάθεια έχει λάβει χώρα με την εφαρμογή των Ασαφών Συναρτήσεων [Fuzzy Functions (Seo - Sakawa, 1988)]. Στην παρούσα μέθοδο κάθε κριτήριο αξιολόγησης δύναται να έχει τη δική του ιδιαίτερη αναγωγή από μία φυσική σε μία τεχνητή κλίμακα αξιολόγησης. Αυτή η συνάρτηση αναγωγής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κριτηρίου. Στη μέθοδο UTA (Jacquet-Lagrece - Siskos, 1982), τέτοιες συναρτήσεις, χαρακτηρίζονται ως συναρτήσεις μερικής χρησιμότητας (partial utility functions).

Η συσχέτιση μεταξύ φυσικών και τεχνητών κλιμάκων είναι ένα βασικό στάδιο της πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η μορφή της συνάρτησης αναγωγής για κάθε κριτήριο εξαρτάται από το ίδιο το κριτήριο. Έτσι, στην παρούσα μέθοδο, για κάθε κριτήριο αξιολόγησης, τα κρίσιμα σημεία της φυσικής κλίμακας πρέπει να ανταποκρίνονται στην τεχνητή κλίμακα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Χρηματοοικονομικού κριτηρίου και του δείκτη του I.R.R., ένα κρίσιμο σημείο είναι το "i" (ευκαιριακό κόστος κεφαλαίου). Ένα άλλο παράδειγμα είναι το κριτήριο του Θορύβου, όπου για το δείκτη Ένταση, το σημείο «Όριο Πόνου» είναι ένα κρίσιμο σημείο στη φυσική κλίμακα.

Με τέτοια σημεία καθοριζόμενα, μπορεί να ευρεθεί μία αποδεκτή μορφή για συναρτήσεις που ανάγουν φυσικές σε τεχνητές κλίμακες. Ένας τρόπος για την εύρεση αυτών είναι με την εφαρμογή της θεωρίας μοντέλων παλινδρόμησης. Άλλος τρόπος είναι η χρήση αριθμητικής παρεμβολής.

## **18.5 4<sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ/ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ**

### **18.5.1 Παραδείγματα**

Η αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων τείνει να συμπεριλάβει ένα μεγάλο πλήθος παραγόντων/κριτηρίων, ώστε να μπορεί να θεωρεί ένα μεγάλο πλήθος από επιπτώσεις των έργων αυτών. Σχετικά με τα συγκοινωνιακά έργα, τα ακόλουθα Ευρύτερα Κριτήρια μπορούν να θεωρηθούν ως κατάλληλα για εφαρμογή (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Mikroudis G., 2007): Περιβάλλον, Ανθρώπινος Παράγοντας, Κοινωνικοπολιτισμικός Παράγοντας, Χρηστικότητα, Οικονομικός Παράγοντας.

Τα ευρύτερα κριτήρια μπορούν να διαιρεθούν σε Υποκριτήρια. Για παράδειγμα, το Περιβάλλον μπορεί να διαιρεθεί σε Χλωρίδα, Πανίδα, Ηχητικές Συνθήκες, Ατμοσφαιρικές Συνθήκες, Οπτικές Συνθήκες και πιθανώς άλλες συνιστώσες. Εν συνεχεία, οι Ατμοσφαιρικές Συνθήκες μπορούν να διαιρεθούν σε Χημικούς Παράγοντες: CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>.

Από την ανωτέρω ανάλυση, εξάγεται ότι τα κριτήρια αξιολόγησης μπορούν να διαιρεθούν σε μικρότερα κριτήρια. Επομένως, πιθανώς κοινοί μεταξύ τους παράγοντες μπορεί να εγερθούν κατά τη διαίρεση αυτή. Μερικά κριτήρια αξιολόγησης μπορεί να συσχετισθούν το ένα με το άλλο, περισσότερο ή λιγότερο ποσοτικά. Είναι προφανές ότι η εξάρτηση μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης είναι ισχυρή σε περιπτώσεις συναφών κριτηρίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, κάποιες συνιστώσες/παράγοντες συμπεριλαμβάνονται σε περισσότερα από ένα κριτήρια, έτσι εν δυνάμει αυτοί υπολογίζονται περισσότερες της μίας φορές και προκύπτει το φαινόμενο του πολλαπλού υπολογισμού. Παραδείγματα εξάρτησης μεταξύ κριτηρίων μπορούν να δωθούν, ως ακολούθως:

*i) Εξάρτηση μεταξύ Οικονομικής Επιτυχίας και Δημιουργίας Νέων Θέσεων Εργασίας:*  
Η Οικονομική Επιτυχία μίας Εναλλακτικής μπορεί να συσχετισθεί κατά τη χρονική παρέλευση με τη Δημιουργία Νέων Θέσεων Εργασίας, θεωρώντας τα χρηματικά ποσά που διατίθενται για τη δημιουργία των θέσεων αυτών. Επομένως, ένα μέρος της Οικονομικής Επιτυχίας μετατρέπεται σε Νέες Θέσεις Εργασίας. Είναι λοιπόν δυνατόν κάποιοι κοινοί παράγοντες να εντάσσονται τόσο στην Οικονομική Επιτυχία όσο και στη Δημιουργία Νέων Θέσεων Εργασίας.

*ii) Εξάρτηση μεταξύ Οικονομικής Επιτυχίας και Ασφάλειας:*  
Σε πολλές περιπτώσεις η Ασφάλεια μπορεί να αποτιμηθεί έμμεσα και μέχρι ενός σημείου, σε χρηματικές τιμές. Επίσης, κεφάλαια μπορεί να δαπανηθούν για τη βελτίωση των συνθηκών Ασφάλειας. Η αξία της ανθρώπινης ζωής δεν μπορεί να αποδοθεί άμεσα σε χρήματα, αλλά υπάρχουν νομικές προσεγγίσεις για έμμεση αποτίμηση.

*iii) Εξάρτηση μεταξύ Οικονομικής Επιτυχίας και Περιβαλλοντικής Ρύπανσης:*  
Στην περίπτωση αυτών των παραγόντων, θεωρείται ότι η Οικονομική Επιτυχία μπορεί έως ενός σημείου να επιδράσει επί των Περιβαλλοντικών Συνθηκών. Επίσης, ένας άλλος τρόπος εξάρτησης μεταξύ Οικονομικής Επιτυχίας και Περιβαλλοντικής Ρύπανσης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η επιρροή των περιβαλλοντικών συνθηκών στις τιμές της πέριξ γης.

*iv) Εξάρτηση μεταξύ της Μεταφορικής Επάρκειας και της Οικονομικής Επιτυχίας:*  
Η Μεταφορική Επάρκεια (άμεσο συγκοινωνιακό κριτήριο) εν δυνάμει αντανακλά επί της Οικονομικής Επιτυχίας, μέσω κρίσιμων παραγόντων, όπως ο Χρόνος Διαδρομής, τα Καύσιμα που δαπανώνται, τα μηχανικά Έλαια που δαπανώνται, η Απαξίωση των Οχημάτων.

Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να εκτιμηθούν και να αποτιμηθούν σε χρηματικές αξίες. Επομένως, ένα μέρος της Μεταφορικής Επάρκειας μετατρέπεται άμεσα σε Οικονομική Επιτυχία.

ν) *Εξάρτηση μεταξύ Μεταφορικής Επάρκειας και Περιβαλλοντικών Παραγόντων:*

Η Μεταφορική Επάρκεια όπως ποσοτικοποιείται σε κυκλοφοριακό φόρτο, επίπεδο μεταφορικής εξυπηρέτησης και άλλους δείκτες, αντανακλά στους παράγοντες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (NOx, SOx, COx). Επίσης, η Μεταφορική Επάρκεια επιδρά στο Θόρυβο, τη Δόνηση και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Σε αρκετές περιπτώσεις ο Δείκτης Στάθμη Εξυπηρέτησης (ως πραγματική αλλά και αντιληπτή οντότητα) ποσοτικοποιεί όχι μόνο το βαθμό της Μεταφορικής Επάρκειας, αλλά επίσης ευρύτερες συνθήκες, όπως περιβαλλοντικές συνθήκες.

vi) *Εξάρτηση μεταξύ Μεταφορικής Επάρκειας και Ασφάλειας:*

Η Μεταφορική Επάρκεια επιδρά στην Ασφάλεια, μέσω κυκλοφοριακών παραμέτρων, όπως η ταχύτητα, η επιτάχυνση, πιθανή συμφόρηση και άλλες. Αποτιμώντας μία Εναλλακτική, κοινοί παράγοντες συμπεριλαμβάνονται τόσο στην Ασφάλεια, όσο και στη Μεταφορική Επάρκεια.

## 18.5.2 Μεθοδολογικά στοιχεία της προτεινόμενης μεθόδου

### 1) Εξάρτηση μεταξύ δύο κριτηρίων αξιολόγησης

Σε μία γεωμετρική θεώρηση, κάθε κριτήριο αποτελεί έναν διανυσματικό άξονα σε ένα διανυσματικό χώρο, ως αυτό θεωρείται σε αρκετές μεθόδους: Regime (Hinloopen – Nijkamp – Rietveld, 1983), Nested Regime (Nijkamp – Blaas, 1993), Qualiflex (Paelinck, 1978), GAIA (Mareschal - Brans, 1988), ADAM (Zeleny, 1982). Θεωρώντας τη δόμηση διανυσματικών χώρων, το ζήτημα της εξάρτησης/ανεξαρτησίας των κριτηρίων αξιολόγησης τίθεται.

Σε μαθηματικούς όρους, εάν η ακόλουθη διανυσματική σχέση ισχύει (γράφεται εδώ με παχιά γράμματα ως διανυσματική σχέση):

$$\mathbf{F_i(E_r)} = z_0 * \mathbf{F_j(E_r)} + \mathbf{F_i \perp j(E_r)} \quad (18.5)$$

Μεταξύ των επιδόσεων  $F_i$  και  $F_j$ , των κριτηρίων  $K_i$  και  $K_j$  αντιστοίχως, όπου:

$z_0$ : αριθμός,

$\mathbf{F_i \perp j(E_r)}$ : η ανεξάρτητη προς την  $F_j(E_r)$  συνιστώσα της  $F_i(E_r)$ ,

Τότε, η μερική παράγωγος  $\partial F_i(E_r) / \partial F_j(E_r)$  είναι ίση με  $z_0$ , ήτοι:

$$\partial F_i(E_r) / \partial F_j(E_r) = z_0 \quad (18.6)$$

Δύο κριτήρια μπορούν να καθορισθούν ως απολύτως εξαρτημένα μεταξύ τους, εάν η επίδοση μίας εναλλακτικής σε ένα εξ' αυτών των κριτηρίων, καθορίζει απολύτως την επίδοση της εναλλακτικής αυτής στο άλλο κριτήριο. Με μαθηματικούς όρους αυτό έχει ως εξής:

$$F_i(E_r) = z_0 * F_j(E_r), \text{ για κάθε } E_r \quad (18.7a)$$

Γενικεύοντας για περισσότερα κριτήρια, αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως μεταξύ τους σχετικά, εάν η ακόλουθη εξίσωση ισχύει:

$$z_01F_1(E_r) + z_02F_2(E_r) + z_03F_3(E_r) + \dots + z_0nF_n(E_r) = 0, \text{ για κάθε } E_r \quad (18.7b)$$

Για παράδειγμα, η εξίσωση αυτή δεικνύει ότι τουλάχιστον ένα από τα θεωρούμενα κριτήρια θα μπορούσε να αγνοηθεί χωρίς ζήτημα αξιοπιστίας/ακρίβειας στην πορεία αξιολόγησης.

Εάν καταρχήν «n» το πλήθος κριτήρια θεωρούνται και κατά την πορεία ανάλυσης/ελέγχων προκύπτουν «ξ» το πλήθος εξισώσεις της μορφής (18.7b), τότε, τα πραγματικώς όχι

εξαρτημένα κριτήρια φθάνουν τον αριθμό «n-ξ». Έτσι, «ξ» το πλήθος κριτήρια μπορούν να διαγραφούν από το αρχικό σύνολο κριτηρίων. Σφαιρικά, θεωρώντας όλες τις δυνατές περιπτώσεις εξάρτησης μεταξύ των κριτηρίων, μπορούν τελικώς κάποια από τα κριτήρια αυτά να περιχαρακωθούν σε ένα σύνολο ανεξαρτήτων μεταξύ τους κριτηρίων.

Το επόμενο βήμα ελέγχου αφορά την ιδιότητα της καθετότητας μεταξύ μη σχετιζομένων (δηλαδή ανεξαρτήτων) κριτηρίων. Δύο κριτήρια μπορεί να ορισθούν ως κάθετα μεταξύ τους, εάν οποιαδήποτε ανάλυση αυτών σε συνιστώσα υπο-κριτήρια δεν καταλήγει σε κανένα κοινό υπο-κριτήριο.

Με συναρτησιακούς όρους, για δύο τυχαία κριτήρια  $K_i$  και  $K_j$ , μπορεί να θεωρηθεί η ακόλουθη σχέση:

$$\partial F_i(E_r)/\partial F_j(E_r) = 0, \text{ για κάθε } E_r \quad (18.8)$$

όπου  $\partial$  είναι το σύμβολο της μερικής παραγωγού.

Για την μαθηματική ισχύ της προηγούμενης σχέσης, η ύπαρξη και συνέχεια των συναρτήσεων  $F_i(E_r)$  και  $F_j(E_r)$  είναι απαραίτητες.

Θεωρώντας εν δυνάμει εξάρτηση μεταξύ των κριτηρίων, εγείρονται τρεις επιμέρους περιπτώσεις:

- Η πλήρης ανεξαρτησία,
- Η πλήρης εξάρτηση,
- Η μερική ανεξαρτησία (μερική εξάρτηση).

Χρησιμοποιώντας τους γεωμετρικούς κατασκευαστικούς κανόνες, οι περιπτώσεις αυτές για δύο κριτήρια αντιστοιχίζονται στις επόμενες γεωμετρικές αναπαραστάσεις:

- Καθετότητα μεταξύ των δύο κριτηρίων, ήτοι η μεταξύ τους γωνία είναι 90 μοίρες.
- Παραλληλία μεταξύ των δύο κριτηρίων, ήτοι η μεταξύ τους γωνία είναι 0 μοίρες.
- Μία τυχαία γωνία, ούτε 0 μοιρών, ούτε 90 μοιρών, καθορίζεται μεταξύ των κριτηρίων.

Ο καθορισμός της γωνίας μπορεί να λάβει χώρα προσδιορίζοντας καταρχήν το συνημίτονο αυτής.

Εάν δύο κριτήρια έχουν μία μεταξύ τους εξάρτηση, τότε μία μεταβολή σε επίδοση του ενός προκαλεί μία μεταβολή σε επίδοση του άλλου. Για τον καθορισμό των συνημιτόνων μεταξύ των κριτηρίων, χρησιμοποιούνται οι σχετικές μεταβολές ( $\Delta F_i/F_i$ ) των επιδόσεων, και όχι οι απόλυτες μεταβολές, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα των εσωτερικών κλιμάκων των κριτηρίων, ήτοι να μην επιδρά η ίδια η εσωτερική κλίμακα κάθε κριτηρίου στον υπολογισμό της γωνίας μεταξύ δύο κριτηρίων. Έτσι, μία σχετική μεταβολή ( $\Delta F_j/F_j$ ) θεωρείται για το κριτήριο  $K_j$  και η προκύπτουσα σχετική μεταβολή ( $\Delta F_i/F_i$ ) του κριτηρίου  $K_i$  εκτιμάται/υπολογίζεται. Εν συνεχεία, η αντίστροφη πορεία λαμβάνει χώρα, ήτοι θεωρείται μία σχετική μεταβολή ( $\Delta F_i/F_i$ ) στο κριτήριο  $K_i$  και υπολογίζεται/εκτιμάται η προκύπτουσα σχετική μεταβολή ( $\Delta F_j/F_j$ ) στο κριτήριο  $K_j$ .

Από τις σχετικές μεταβολές ( $\Delta F_i/F_i$ ) και ( $\Delta F_j/F_j$ ) προκύπτουν δύο πηλίκα, ήτοι το πηλίκο  $[(\Delta F_i/F_i) / (\Delta F_j/F_j)]$  και το πηλίκο  $[(\Delta F_j/F_j) / (\Delta F_i/F_i)]$ . Εκ των δύο αυτών πηλίκων, όποιο ανήκει στην περιοχή τιμών  $[-1,+1]$  δίδει το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ των δύο κριτηρίων.

Έτσι, με μαθηματικό φορμαλισμό:

$$\cos \omega (i,j) = (\Delta F_j/F_j) / (\Delta F_i/F_i) \quad (18.9)$$

και/ή

$$\cos \omega (i,j) = (\Delta F_i/F_i) / (\Delta F_j/F_j) \quad (18.10)$$

Για την ισχύ εκάστης εκ των δύο ανωτέρω εξισώσεων είναι κρίσιμη η ακόλουθη βασική σχέση από την τριγωνομετρία:

$$-1 \leq \cos \omega (i,j) \leq 1 \quad (18.11)$$



Έχοντας το συνημίτονο, η αντιστοιχούσα γωνία εξάγεται ως το τόξο του συνημιτόνου. Έπειτα, ευρίσκοντας όλες τις κατά ζεύγη γωνίες των «n» (το πλήθος) θεωρουμένων κριτηρίων, ένας πίνακας nXn διαστάσεων προκύπτει, ως ακολούθως:

Πίνακας 18.1: Συνημίτονα μεταξύ των κριτηρίων σε κατά ζεύγη θεώρηση  
Table 18.1: Cosines between criteria in pairwise consideration

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	...	<b>Kn</b>
<b>K1</b>	1	cos(1,2)	cos(1,3)	cos(1,4)	cos(1,...)	cos(1,n)
<b>K2</b>	cos(2,1)	1	cos(2,3)	cos(2,4)	cos(2,...)	cos(2,n)
<b>K3</b>	cos(3,1)	cos(3,2)	1	cos(3,4)	cos(3,...)	cos(3,n)
<b>K4</b>	cos(4,1)	cos(4,2)	cos(4,3)	1	cos(4,...)	cos(4,n)
...	cos(...,1)	cos(...,2)	cos(...,3)	cos(...,4)	1	cos(...,n)
<b>Kn</b>	cos(n,1)	cos(n,2)	cos(n,3)	cos(n,4)	cos(n,...)	1

Στον ανωτέρω πίνακα, το cos(i,j) παριστά το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ των κριτηρίων Ki και Kj. Είναι προφανές ότι cos(i,j) = cos(j,i). Στην κύρια διαγώνιο, κάθε στοιχείο ισούται με 1,00, επειδή cos(Ki, Ki) = 1,00, ήτοι το συνημίτονο της μηδενικής γωνίας είναι 1,00.

Στη βάση αυτή, η επίδοση κάθε εναλλακτικής ανά κριτήριο μπορεί να παρασταθεί γεωμετρικά. Το συνημίτονο μπορεί να θεωρηθεί ως η προβολή μοναδιαίου στοιχείου ενός κριτηρίου επί άλλου κριτηρίου, σε κατά ζεύγη συγκρίσεις. Έτσι, το συνημίτονο δίδει το βαθμό εξάρτησης μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος κριτηρίων.

Η γωνία ω<sub>i,j</sub> μεταξύ των κριτηρίων Ki και Kj μπορεί να καθορισθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\omega_{i,j} = \arccos\{ [z_0 * F_j(Er)] / \{ [z_0 * F_j(Er)]^2 + [F_i \perp j(Er)]^2 \}^{1/2} \} \quad (18.12)$$

εάν η φυσική ευκλείδια νόρμα θεωρείται ως η κατάλληλη.

Επίσης, εάν η μερική παράγωγος  $\partial F_i(Er) / \partial F_j(Er) = z_0$ , ορίζεται, τότε:

Για  $z_0=0$ ,  $\omega_{i,j} = 90$  μοιρών γωνία, ήτοι τα κριτήρια Ki, Kj είναι απολύτως ανεξάρτητα μεταξύ τους (κάθετα μεταξύ τους).

Με έναν όμοιο με αυτό των συνημιτόνων τρόπο, τα ημίτονα των γωνιών των κριτηρίων αξιολόγησης μπορούν να καθορισθούν. Βασιζόμενοι στην προηγούμενη ανάλυση και με την παραδοχή ισχύος της φυσικής ευκλείδιας νόρμας, η ακόλουθη σχέση εξάγεται:

$$\omega_{i,j} = \arcsin\{ [F_i \perp j(Er)] / \{ [z_0 * F_j(Er)]^2 + [F_i \perp j(Er)]^2 \}^{1/2} \} \quad (18.13)$$

Έτσι, ο Πίνακας Ημιτόνων έχει ως εξής:

Πίνακας 18.2: Ημίτονα μεταξύ κριτηρίων σε κατά ζεύγη θεώρηση  
Table 18.2: Sines between criteria in pairwise consideration

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	...	<b>Kn</b>
<b>K1</b>	0	sin(1,2)	sin(1,3)	sin(1,4)	sin(1,...)	sin(1,n)
<b>K2</b>	sin(2,1)	0	sin(2,3)	sin(2,4)	sin(2,...)	sin(2,n)
<b>K3</b>	sin(3,1)	sin(3,2)	0	sin(3,4)	sin(3,...)	sin(3,n)
<b>K4</b>	sin(4,1)	sin(4,2)	sin(4,3)	0	sin(4,...)	sin(4,n)
...	sin(...,1)	sin(...,2)	sin(...,3)	sin(...,4)	0	sin(...,n)
<b>Kn</b>	sin(n,1)	sin(n,2)	sin(n,3)	sin(n,4)	sin(n,...)	0

Στην κύρια διαγώνιο κάθε στοιχείο είναι ίσο με 0, επειδή  $\sin\omega(K_i, K_i) = 0$ , ήτοι το ημίτονο της γωνίας των 0 μοιρών είναι 0.

## 2) Εξάρτηση μεταξύ ενός κριτηρίου και ενός συνόλου άλλων κριτηρίων

### i) Γενικά

Οι κατά ζεύγη κριτηρίων σχέσεις μπορούν να υπερτεθούν σε σχέσεις μεταξύ περισσότερων (από δύο) κριτηρίων. Μερικές πολυκριτηριακές μέθοδοι εστιάζουν σε κατά ζεύγη σχέσεις που αφορούν κριτήρια αξιολόγησης, όπως η A.H.P. (Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία) (Saaty, 1980, 1990), Electre (Roy, 1985, Szidarovsky – Gershon – Duckstein, 1986).

### ii) Προσεγγιστική Μέθοδος

Θεωρώντας τα κριτήρια αξιολόγησης κατά ζεύγη, κάθε ζεύγος αυτών καθορίζει μία γωνία. Το ημίτονο της γωνίας αντανακλά το βαθμό ανεξαρτησίας μεταξύ των δύο κριτηρίων. Έτσι, πολλαπλασιάζοντας με το ημίτονο μία επίδοση εναλλακτικής σε κριτήριο, η ανεξάρτητη συνιστώσα ως προς το άλλο κριτήριο συνιστώσα της επίδοσης αυτής προκύπτει.

Για την απόδειξη, μία επίδοση  $F_m$  του κριτηρίου  $K_m$  θεωρείται. Θεωρώντας το κριτήριο  $K_1$ , αυτή μπορεί να αναλυθεί ως εξής (με παχιά γράμματα γραμμένη η σχέση ως διανυσματική):

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_m \cdot \cos\omega(1,m) + \mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m) \quad (18.14)$$

όπου  $\omega(1,m)$  είναι η γωνία μεταξύ του κριτηρίου  $K_1$  και του κριτηρίου  $K_m$ .

Θεωρώντας τις δύο συνιστώσες, η  $\mathbf{F}_m \cdot \cos\omega(1,m)$  συμπίπτει με τον άξονα του κριτηρίου  $K_1$  και μόνο η  $\mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m)$  είναι ανεξάρτητη από το κριτήριο  $K_1$ .

Εν συνεχεία, το διάνυσμα  $\mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m)$  μπορεί να αναλυθεί ως προς το κριτήριο  $K_2$ , στις εξής συνιστώσες του:

$$\mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m) = \mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m) \cdot \cos\omega(2,m) + \mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m) \cdot \sin\omega(2,m) \quad (18.15)$$

όπου  $\omega(2,m)$  είναι η γωνία μεταξύ του κριτηρίου  $K_2$  και του κριτηρίου  $K_m$ .

Θεωρώντας τις δύο αυτές συνιστώσες, μόνον η  $\mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m) \cdot \sin\omega(2,m)$  είναι ανεξάρτητη από το χώρο κριτηρίων ( $K_1, K_2$ ).

Επαγωγικά, θεωρώντας το χώρο κριτηρίων ( $K_1, K_2, \dots, K_{m-1}$ ), μόνον το διάνυσμα  $\mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m) \cdot \sin\omega(2,m) \cdot \dots \cdot \sin\omega(m-1,m)$  είναι ανεξάρτητο από το χώρο αυτό.

Επομένως,

$$\mathbf{F}_m \perp (1,2,3, \dots, m-1) (E_r) = \mathbf{F}_m (E_r) \cdot \sin\omega(m,1) \cdot \sin\omega(m,2) \cdot \dots \cdot \sin\omega(m,m-1) \quad (18.16)$$

Είναι σαφές, ότι το  $\sin\omega m, (1, 2, 3, \dots, j)$ , μεταξύ του κριτηρίου  $K_m$  και του χώρου κριτηρίων ( $K_1, K_2, K_3, \dots, K_j$ ), είναι ίσο με το γινόμενο:  $\sin\omega(m,1) \cdot \sin\omega(m,2) \cdot \sin\omega(m,3) \cdot \dots \cdot \sin\omega(m,j)$ , όπου κάθε μία από τις επιμέρους γωνίες σχηματίζεται από το κριτήριο  $K_m$  και ένα από των κριτηρίων  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_j$ , στις κατά ζεύγη θεωρήσεις. Με μαθηματικό φορμαλισμό:

$$\sin\omega m, (1, 2, 3, \dots, m-1) = \prod_i \{ \sin\omega[m,i] \} \quad (18.17)$$

όπου ο  $i$  κυμαίνεται από  $i=1$  έως  $m-1$ .

Εφόσον  $0 \leq \sin\omega[m,i] \leq 1$ , σε κάθε περίπτωση:

$$0 \leq \prod_i \{ \sin\omega[m,i] \} \leq 1 \quad (18.18)$$

### iii) Ακριβής μέθοδος δομών Χώρων Hilbert

#### a) Ζητήματα ακρίβειας

Η προηγούμενη μέθοδος χαρακτηρίζεται ως προσεγγιστική, γιατί ναι μεν έχει γεωμετρική δομή, αλλά η ακρίβειά της δεν είναι απόλυτη. Πράγματι, στον τύπο (18.15), η γωνία (2,m), ναι μεν είναι η ακριβής γωνία μεταξύ του διανύσματος  $\mathbf{F}_m$  και του κριτηρίου  $K_2$ , αλλά δεν είναι η ακριβής γωνία μεταξύ του διανύσματος  $\mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m)$  και του κριτηρίου  $K_2$ , αφού το διάνυσμα  $\mathbf{F}_m \cdot \sin\omega(1,m)$ , έχει περιστραφεί έναντι του αρχικού  $\mathbf{F}_m$ . Επομένως, κατά την επαγωγική δόμηση της σχέσεως (18.16) υπεισέρχονται κάποια σφάλματα υπολογισμών.

Για το σκοπό λοιπόν της απόλυτης ακρίβειας, αναπτύσσεται εδώ μέθοδος εκφραζόμενη απόλυτα με δομές Χώρων Hilbert.

b) Δόμηση Χώρου Hilbert

Για τα κριτήρια  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m, \dots, K_n$  τα οποία δίδονται, θεωρούνται τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα, τα οποία παρίστανται με κεκλιμένους παχείς χαρακτήρες:  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m, \dots, K_n$ .

Έστω ότι έχουμε και τα εξής διανύσματα:  $K_1', K_2', K_3', \dots, K_m', \dots, K_n'$ , όπου:

$$K_1' = (1, 0, 0, \dots, 0)$$

$$K_2' = (0, 1, 0, \dots, 0)$$

$$K_3' = (0, 0, 1, \dots, 0)$$

$$\dots$$

$$K_n' = (0, 0, 0, \dots, 1) \tag{18.19}$$

Τα μοναδιαία αυτά διανύσματα αποτελούν μία ορθοκανονική βάση για το χώρο Hilbert  $n$ -διαστάσεων.

Επιχειρούμε εν συνεχεία συσχετισμό των μοναδιαίων διανυσμάτων  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m, \dots, K_n$ , με τα μοναδιαία διανύσματα  $K_1', K_2', K_3', \dots, K_m', \dots, K_n'$ .

Το διάνυσμα  $K_1$ , μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπίπτει με το διάνυσμα  $K_1'$ , αφού μπορούμε να το ορίσουμε ως πρώτο στη σειρά τοποθετώντας το σε θέση που θα επιλέξουμε (με βάση τη θεώρηση Gram-Schmidt).

Επομένως, εάν

$$K_1 = (X_1, 0, 0, \dots, 0) \tag{18.20}$$

τότε

$$X_1 = 1, \text{ επομένως}$$

$$K_1 = (1, 0, 0, \dots, 0) \tag{18.21}$$

Σε όλα τα επόμενα διανύσματα-κριτήρια, ήτοι στα  $K_2, K_3, \dots, K_m, \dots, K_n$ , ισχύουν περιορισμοί.

Ήτοι, για κάθε ένα εξ' αυτών ισχύουν οι περιορισμοί με όλα τα προηγούμενα στη σειρά διανύσματα-κριτήρια.

Καταρχήν, μπορεί να θεωρηθεί ότι για το διάνυσμα-κριτήριο  $K_m$ , όλες οι μετά την  $m$ -οστή συντεταγμένη είναι μηδενικές, αφού ο χώρος δομείται βήμα-βήμα και άρα για την τήρηση κάθε δεδομένης σχέσεως μεταξύ δύο διανυσμάτων-κριτηρίων, μπορεί να προσαρμοσθεί από τα δύο μόνον αυτό που έπεται στη διάταξη των κριτηρίων.

Για το τυχόν διάνυσμα-κριτήριο  $K_m$  για να προσδιορίσουμε τις  $m$  το πλήθος (μη κατ' ανάγκη μηδενικές) συντεταγμένες του, χρειαζόμαστε αντίστοιχου πλήθους εξισώσεις. Για το λόγο αυτό, λαμβάνουμε καταρχήν  $m-1$  εξισώσεις από τα εσωτερικά γινόμενα του  $K_m$  με τα υπόλοιπα μοναδιαία  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_{m-1}$  διανύσματα. Οι εξισώσεις αυτές είναι της μορφής:

$$\langle K_j, K_m \rangle = \cos(j, m) \tag{18.22}$$

όπου το  $j$  μεταβάλλεται από 1 έως και  $m-1$ , επομένως πρόκειται για  $m-1$  το πλήθος εξισώσεις.

Το δεύτερο μέλος των εξισώσεων αυτών είναι γνωστό, αφού είναι γνωστή η γωνία κάθε ζεύγους κριτηρίων, οπότε προσδιορίζεται το πρώτο μέλος της εξίσωσης. Εφόσον γραφεί σε αναλυτική μορφή συντεταγμένων το εσωτερικό γινόμενο  $\langle K_j, K_m \rangle$ , λαμβάνονται γραμμικές αλγεβρικές σχέσεις ως προς τις συντεταγμένες του  $K_m$ .

Εν συνεχεία, λαμβάνουμε τη  $m$ -οστή εξίσωση, από το εσωτερικό γινόμενο του  $K_m$  με τον εαυτό του. Η εξίσωση αυτή έχει τη μορφή:

$$\langle K_m, K_m \rangle = 1 \tag{18.23}$$

Επομένως, από την επίλυση του συστήματος των  $m$  εξισώσεων, προσδιορίζονται οι  $m$  το πλήθος (μη κατ' ανάγκη μηδενικές) συντεταγμένες του  $K_m$ .

γ) Προσδιορισμός Γωνιών μεταξύ Κριτηρίων και Ορθογωνίου Συστήματος χώρου Hilbert

Επίσης, μπορεί να προσδιορισθεί η γωνία του  $Km$  με έκαστο των  $Kj'$ , όπου το σύνολο των  $Kj'$  αποτελεί μία ορθογώνια βάση διανυσματικού χώρου, ήτοι δύο  $Kj'$  είναι κάθετα μεταξύ τους. Οι εξισώσεις που διατίθενται και αξιοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι της μορφής:

$$\langle Kj', Km \rangle = \cos(j', m) \quad (18.24)$$

όπου το  $j'$  μεταβάλλεται από 2 έως και  $m-1$ , αφού για  $j' = 1$ , έχουμε  $K1 = K1'$ .

Επομένως το πλήθος των ανωτέρω αναφερομένων εξισώσεων είναι  $m-2$ .

Τώρα (αντιστρόφως με πριν) είναι γνωστό το πρώτο σκέλος εκάστης εξίσωσης και αναζητείται το δεύτερο, ήτοι αναζητείται το  $\cos(j', m)$ . Από το σύνολο των εξισώσεων προσδιορίζονται οι τιμές των  $m-2$  το πλήθος αγνώστων, ήτοι προσδιορίζονται τα  $\cos(j', m)$ . Αφού ευρεθούν τα  $\cos(j', m)$  είναι πλέον γνωστές οι αντίστοιχες γωνίες, ήτοι οι γωνίες  $(j', m)$ .

δ) Δυναμικό Συνόλου Διανυσμάτων

Εάν ληφθεί η ορίζουσα για το σύνολο των  $K1', K2', K3', \dots, Km', \dots, Kn'$  διανυσμάτων-κριτηρίων, ήτοι η  $\det(K1', K2', K3', \dots, Km', \dots, Kn')$ , επειδή έχει μη μηδενικά στοιχεία μόνο στην κύρια διαγώνιο, ισούται με το γινόμενο των στοιχείων της κυρίας διαγωνίου. Κάθε στοιχείο στην κύρια διαγώνιο της όμως είναι ίσο με τη μονάδα, επομένως:

$$\det(K1', K2', K3', \dots, Km', \dots, Kn') = 1 \quad (18.25)$$

Κάθε ορίζουσα μπορεί να οριστεί ως το Δυναμικό του Συνόλου των Διανυσμάτων στα οποία αναφέρεται.

Εάν τώρα αναζητηθεί το Δυναμικό του Συνόλου  $(K1, K2, K3, \dots, Km, \dots, Kn)$ , υπολογίζουμε την αντίστοιχη ορίζουσα, ήτοι την  $\det(K1, K2, K3, \dots, Km, \dots, Kn)$ .

Η μέγιστη δυνατή τιμή της  $\det(K1, K2, K3, \dots, Km, \dots, Kn)$  είναι η μονάδα, η οποία προκύπτει στην περίπτωση της πλήρους καθετότητας όλων των ζευγών κριτηρίων του συνόλου  $(K1, K2, K3, \dots, Km, \dots, Kn)$ . Όσο μικρότερη είναι από την μονάδα η τιμή της  $\det(K1, K2, K3, \dots, Km, \dots, Kn)$ , τόσο πιο εξαρτημένα είναι μεταξύ τους τα κριτήρια του συνόλου  $(K1, K2, K3, \dots, Km, \dots, Kn)$ .

ε) Συνιστώσα Κριτηρίου Ανεξάρτητη από το Χώρο των σπουδαιότερων αυτού Κριτηρίων

Για να ευρεθεί η συνιστώσα κριτηρίου που είναι ανεξάρτητη από το Χώρο των σπουδαιότερων αυτού κριτηρίων, ήτοι για να ευρεθεί για το κριτήριο  $Km$  η  $Km^\perp(1,2,3, \dots, m-1)$ , λαμβάνεται το πηλίκο των ακολούθων Δυναμικών:

[Δυναμικό Συνόλου  $(K1, K2, K3, \dots, Km-1, Km)$ ] / [Δυναμικό Συνόλου  $(K1, K2, K3, \dots, Km-1)$ ]

ήτοι:

$$Km^\perp(1,2,3, \dots, m-1) = [\det(K1, K2, K3, \dots, Km-1, Km)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, Km-1)] \quad (18.26)$$

Επομένως, αναφορικά με τις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης, έχουμε:

$$Fm^\perp(1,2,3, \dots, m-1) (Er) = Fm (Er) * \{[\det(K1, K2, K3, \dots, Km-1, Km)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, Km-1)]\} \quad (18.27)$$

### 3)Ιεράρχηση των Κριτηρίων

#### i) Γενικά

Όπως ανεπτύχθη στα προηγούμενα, αναφορικά με την επίδοση της εναλλακτικής Εγ ανά κριτήριο  $K_m$ , η συνιστώσα της που είναι ανεξάρτητη από τα κριτήρια μεγαλύτερης σπουδαιότητας υπολογίζεται και συμμετέχει τελικώς στην αποτίμηση/αξιολόγηση. Άρα, η ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης (έστω η ποιοτική, δηλαδή η υπό μορφή απλής διατάξεως) είναι αναγκαία στην υπόψη μέθοδο.

#### ii) Ιεράρχηση των Κριτηρίων βάσει μίας Πολιτικής

Η Ιεράρχηση των Κριτηρίων μπορεί να δομηθεί σχετικά με την επικρατούσα Πολιτική. Για παράδειγμα, μία Περιβαλλοντική Πολιτική αντανακλάται δίδοντας σημαντική βαρύτητα στο κριτήριο Περιβάλλον.

Στην μέθοδο GAIA (Mareschal - Brans, 1988) θεωρείται ότι η Πολιτική είναι ο κύριος άξονας ενός Διανυσματικού Χώρου όπου οι συνταταγμένες είναι τα σχετικά βάρη των κριτηρίων.

Η ποιοτική ιεραρχία των κριτηρίων (η οποία είναι μία απλή διάταξη σπουδαιότητας) συνιστάται από αρκετές μεθόδους, όπως οι: Regime (Hinloopen E. – Nijkamp P. – Rietveld P, 1983), Qualiflex (Paelinck, 1978), Oreste (Schaerlig, 1985).

Η ιεραρχία των κριτηρίων τείνει να μετατρέπει μία αξιακή οντότητα  $vr_j$  (η οποία είναι εσωτερικά σε κάθε κριτήριο) σε μία χρησιμότητα  $ur_j$  (η οποία είναι μία τελική ποσότητα αξιολόγησης διακριτηριακά), όπως μπορεί να εξαχθεί από αναφορές πολυκριτηριακής αξιολόγησης, όπως UTA (Jacquet Lagreze - Siskos, 1982), MAUT (Schaerlig, 1985) και εν δυνάμει το γεγονός αυτό αποδίδεται με την κάτωθι σχέση:

$$ur_j = w_j * vr_j \quad (18.28)$$

όπου  $w_j$  είναι το σχετικό βάρος του κριτηρίου  $K_j$ .

Στην προτεινόμενη μέθοδο, η ιεράρχηση των κριτηρίων δημιουργείται στη βάση μίας πολιτικής και είναι ποιοτική, αφού εμπεριέχει μία απλή διάταξη κριτηρίων και όχι το πόσο σπουδαιότερο είναι ένα κριτήριο από κάποιο άλλο.

Έστω για μία αξιολόγηση, η ιεραρχία των κριτηρίων έχει ως εξής, όπου όσο ο δείκτης ενός κριτηρίου γίνεται μεγαλύτερος, τόσο το κριτήριο είναι μικρότερης σπουδαιότητας:

$K_1$  πιο σπουδαίο από το  $K_2$  πιο σπουδαίο από  $K_3$  πιο σπουδαίο από ..... πιο σπουδαίο από  $K_m$  πιο σπουδαίο από ..... πιο σπουδαίο από  $K_n$ . (18.29)

#### iii) Ιεράρχηση Κριτηρίων άνευ Πολιτικής – Πίνακας Αλληλεπιδράσεων

Σε περιπτώσεις όπου δεν κυριαρχεί κάποια πολιτική, μπορούν να γίνουν θεωρήσεις Ιεράρχησης Κριτηρίων στη βάση της διασποράς των επιδόσεων ανά κριτήριο, όπως στη μέθοδο Εντροπίας (Zeleny, 1982).

Σε περιπτώσεις μη κυριαρχίας κάποιας πολιτικής, η παρούσα προτεινόμενη μέθοδος εισηγείται ότι η Ιεραρχία των Κριτηρίων μπορεί να δομηθεί αναφορικά με την μεταξύ τους εξάρτηση. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός ο προαναφερθείς Πίνακας Συνημιτόνων μπορεί να θεωρηθεί ως ένας Πίνακας Αλληλεπιδράσεων, όπου η τιμή κάθε στοιχείου  $K_{i,j}$  αντανακλά πόσο η επίδοση του κριτηρίου  $K_i$  μπορεί να επηρεαστεί από μία μεταβολή επίδοσης του κριτηρίου  $K_j$ . Έτσι, κάθε στήλη  $-j$  αντανακλά πόσο η επίδοση εκάστου των κριτηρίων επηρεάζεται από μία μεταβολή σε επίδοση του κριτηρίου  $K_j$ .

Θεωρούμενος ως Πίνακας Αλληλεπιδράσεων, ο Πίνακας  $[K]$  έχει ως εξής:

Πίνακας 18.3: Πίνακας Αλληλεπιδράσεων

Table 18.3: Matrix of Interaction

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	...	<b>Kn</b>
<b>K1</b>	K1,1	K1,2	K1,3	K1,4	K1,...	K1,n
<b>K2</b>	K2,1	K2,2	K2,3	K2,4	K2,...	K2,n
<b>K3</b>	K3,1	K3,2	K3,3	K3,4	K3,...	K3,n
<b>K4</b>	K4,1	K4,2	K4,3	K4,4	K4,...	K4,n
...	K...,1	K...,2	K...,3	K...,4	K...,...	K...,n
<b>Kn</b>	Kn,1	Kn,2	Kn,3	Kn,4	Kn,...	Kn,n

Κάθε στοιχείο της κυρίας διαγωνίου είναι ίσο με 1, ήτοι  $K_{i,i} = 1$ . Γενικώς θεωρείται ότι  $K_{i,j} = K_{j,i}$ . Εάν όλα τα κριτήρια είναι κάθετα το ένα στο άλλο, τότε  $K_{i,j} = 0$  εάν  $i \neq j$ .

Για κάθε κριτήριο  $K_i$ , ένας Αριθμός Εξάρτησης  $R_i$  καθορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_i = \sum_j [K_{i,j}] \quad (18.30)$$

Ένας Αριθμός Εξάρτησης ισούται με το άθροισμα των στοιχείων μίας γραμμής του Πίνακα Αλληλεπιδράσεων. Σε περιπτώσεις όπου δεν υφίσταται κάποια κυρίαρχη πολιτική, η σπουδαιότητα των κριτηρίων καθορίζεται από τους Αριθμούς Εξάρτησης, όπου όσο έκαστος εξ' αυτών είναι μικρότερος, τόσο το αντίστοιχο κριτήριο είναι σπουδαιότερο. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη η εξάρτηση τόσο σημαντικότερο το κριτήριο.

Για παράδειγμα, εάν ο ακόλουθος Πίνακας είναι ένας Πίνακας Αλληλεπιδράσεων:

Πίνακας 18.4: Παράδειγμα Πίνακα Αλληλεπιδράσεων

Table 18.4: Example of Matrix of Interaction

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>
<b>K1</b>	1,00	0,50	0,33
<b>K2</b>	0,50	1,00	0,67
<b>K3</b>	0,33	0,67	1,00

Τότε:

$$R_1 = 1,00 + 0,50 + 0,33 = 1,83.$$

$$R_2 = 0,50 + 1,00 + 0,67 = 2,17.$$

$$R_3 = 0,33 + 0,67 + 1,00 = 2,00.$$

Επομένως, η σειρά σπουδαιότητας των κριτηρίων είναι η ακόλουθη (από το πιο σπουδαίο στο ολιγότερο σπουδαίο κριτήριο):

K1 – K3 – K2.

#### 4) Η νόρμα της Τελικής Αποτίμησης των εναλλακτικών

Σε μία ευρεία θεώρηση ενός Χώρου Hilbert η ακόλουθη νόρμα μπορεί να δημιουργηθεί:

$$N(Er) = \{ \sum_m [Fm^{\perp}(1,2,3, \dots, i, \dots, m-1)(Er)]^b \}^{1/b} \quad (18.31)$$

όπου ο  $m$  κυμαίνεται από  $m=1$  έως  $m$ .

(Για  $b=1$ , εγείρεται η νόρμα γραμμικής άθροισης.)

Με βάση την προτέρα ανάλυση και με την παραδοχή της ισχύος της ευκλείδειας φυσικής νόρμας (ήτοι  $b=2$ ), η ολική επίδοση για κάθε εναλλακτική  $Er$  έχει ως ακολούθως:

$$N(Er) = \{ \sum_m [Fm^{\perp}(1,2,3, \dots, i, \dots, m-1)(Er)]^2 \}^{1/2} \quad (18.32a)$$

όπου ο  $m$  κυμαίνεται από  $m=1$  έως  $m$ .

Πιο αναλυτικά η σχέση (18.31) καταλήγει στην:

$$N(Er) = \{ [F1(Er)]^b + \sum_m [Fm^{\perp}(1,2,3, \dots, i, \dots, m-1)(Er)]^b \}^{1/b} \quad (18.32b)$$

όπου ο m κυμαίνεται από m=2 έως m.

Αυτή η σχέση, με την παραδοχή της φυσικής ευκλείδειας νόρμας, καταλήγει στην:

$$N(Er) = \{ [F1(Er)]^2 + \sum_m [Fm^{\perp}(1,2,3, \dots, i, \dots, m-1)(Er)]^2 \}^{1/2} \quad (18.33)$$

όπου ο m κυμαίνεται από m=2 έως m.

Και πιο αναλυτικά στην επόμενη σχέση για προσεγγιστική μέθοδο θεώρησης εξάρτησης κριτηρίων:

$$N(Er) = \{ [F1(Er)]^b + \sum_m [Fm(Er) * \sin \omega_m (1, 2, 3, \dots, i, \dots, m-1)]^b \}^{1/b} \quad (18.34)$$

όπου ο m κυμαίνεται από m=2 έως m.

Ή, στην επόμενη σχέση για ακριβή μέθοδο θεώρησης εξάρτησης κριτηρίων:

$$N(Er) = \{ [F1(Er)]^b + \sum_m \{ Fm(Er) * \{ [\det(K1, K2, K3, \dots, Km-1, Km)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, Km-1)] \} \}^b \}^{1/b} \quad (18.35)$$

όπου ο m κυμαίνεται από m=2 έως m.

### 18.5.3 Αλγόριθμος της προτεινόμενης μεθόδου ως προς την εξάρτηση/ιεράρχηση

Κατόπιν της προηγηθείσας ανάλυσης ο αλγόριθμος πρακτικής εφαρμογής παρουσιάζεται βήμα προς βήμα, με τα σύμβολα ομογενοποιημένα προς τα σύμβολα που εφαρμόζονται γενικότερα στην προτεινόμενη μέθοδο:

#### **Βήμα-1ο: Θεώρηση των κριτηρίων αξιολόγησης και των δεικτών τους.**

Τα εν δυνάμει κριτήρια αξιολόγησης θεωρούνται. Δείκτες ποσοτικοποίησης των κριτηρίων παρουσιάζονται και επίσης, η έκφραση των κριτηρίων μέσω αυτών (των δεικτών) λαμβάνει χώρα. Οι αρχικές (φυσικές) επιδόσεις των εναλλακτικών ανά κριτήριο μπορούν να συμβολίζονται με  $\phi_{i,j}$  (της εναλλακτικής  $E_i$  στο κριτήριο  $K_j$ ).

#### **Βήμα-2ο: Ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης.**

Εάν υπάρχει μία κυριαρχούσα πολιτική, τότε τα η ιεράρχηση των κριτηρίων καθορίζεται από την πολιτική αυτή ως μία διάταξη των κριτηρίων. Εάν δεν κυριαρχεί κάποια πολιτική, τότε ο Πίνακας Αλληλεπίδρασης και οι Αριθμοί Αλληλεξάρτησης χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της ιεραρχίας των κριτηρίων. Σε κάθε περίπτωση η ιεραρχία των κριτηρίων εξάγεται. Η Ιεραρχία των Κριτηρίων δίδεται ως μία διάταξη αυτών:

$$K1 \text{ σπουδαιότερο του } K2 \text{ σπουδαιότερο του } K3 \text{ σπουδαιότερο του } \dots \text{ σπουδαιότερο του } Km \text{ σπουδαιότερο του } \dots \text{ σπουδαιότερο του } Kn. \quad (18.36)$$

#### **Βήμα-3ο: Αναγωγή σε τεχνητές επιδόσεις.**

Στο παρόν βήμα γίνεται μετάβαση από τις φυσικές σε τεχνητές κλίμακες.

Οι τεχνητές επιδόσεις παρίστανται με  $g_{i,j,initial}$  (της εναλλακτικής  $E_i$  στο κριτήριο  $K_j$ ).

Η πιο απλή περίπτωση αναγωγής των επιδόσεων σε τεχνητές κλίμακες είναι η κανονικοποίηση, στην οποία οι τεχνητές επιδόσεις δίδονται από την φόρμουλα:

$$g_{i,j,initial} = (\phi_{i,j}) / [\max_i (\phi_{i,j})] \quad (18.37)$$

Ο προτεινόμενος εδώ τρόπος κανονικοποίησης οδηγεί σε μία γραμμική συνάρτηση αξιακών οντοτήτων (Schaerlig, 1985), (Zeleny, 1982), η οποία είναι η απλούστερη συνάρτηση

αναγωγής σε εσωτερική κλίμακα κριτηρίου. Κανονικοποιημένες φόρμες προτείνονται σε αρκετές θεωρήσεις, όπως στις Ασαφείς Συναρτήσεις (Seo F. – Sakawa M., 1988) και στη μέθοδο ADAM: Attitude Dynamic Attribute Model (Zeleny, 1982), (Schaerlig, 1985).

Στην περίπτωση όπου υπεισέλθει και ο συντελεστής χρονικής διακύμανσης  $x_{i,j}$  (της επίδοσης της εναλλακτικής  $E_i$  στο κριτήριο  $K_j$ ), τότε οδηγούμαστε στις ακόλουθες τεχνητές επιδόσεις (μετά της επιρροής της χρονικής διακύμανσης):

$$g_{i,j} = g_{i,j_{initial}} * x_{i,j} \quad (18.38)$$

**Βήμα-4ο: Καθορίζοντας τη γωνία μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος αυτών (των κριτηρίων). Ευρίσκοντας το αντίστοιχο συνημίτονο και ημίτονο για κάθε γωνία.**

Στο παρόν βήμα, διερευνάται ο βαθμός εξάρτησης μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος αυτών. Αναφορικά με κάθε ζεύγος κριτηρίων, για μία σχετική μεταβολή σε επίδοση του ενός κριτηρίου, υπολογίζεται η προκαλούμενη μεταβολή σε επίδοση του άλλου. Επομένως, το συνημίτονο κάθε γωνίας μεταξύ των δύο κριτηρίων καθορίζεται:

$$\cos\omega (i,j) = (\Delta F_j / F_j) / (\Delta F_i / F_i) \quad (18.39)$$

και/ή

$$\cos\omega (i,j) = (\Delta F_i / F_i) / (\Delta F_j / F_j) \quad (18.40)$$

Επειδή η συναρτησιακή μορφή απόδοσης εκάστου κριτηρίου αναφέρεται στο παρόν βήμα στη φυσική του κλίμακα, οι ανωτέρω σχέσεις μπορεί να γραφούν και ως εξής:

$$\cos\omega (i,j) = (\Delta f_j / f_j) / (\Delta f_i / f_i) \quad (18.41)$$

και/ή

$$\cos\omega (i,j) = (\Delta f_i / f_i) / (\Delta f_j / f_j) \quad (18.42)$$

Η ισχύς εκάστης εκ των δύο αυτών σχέσεων εξαρτάται από το εάν συνάδει με την ακόλουθη σχέση της τριγωνομετρίας:

$$-1 \leq \cos\omega (i,j) \leq 1 \quad (18.43)$$

Κατόπιν του καθορισμού των συνημιτόνων, οι αντίστοιχες γωνίες και τα ημίτονα αυτών ευρίσκονται.

**Βήμα-5ο: Για κάθε εναλλακτική και ανά κριτήριο, ευρίσκεται η συνιστώσα που είναι ανεξάρτητη από τα σπουδαιότερα κριτήρια.**

Εδώ προτείνονται δύο τρόποι: ο απλός προσεγγιστικός και ο ακριβής σύνθετος.

*I) Απλός Προσεγγιστικός τρόπος:*

Για κάθε κριτήριο  $K_j$ , το εφαρμοζόμενο ημίτονο της γωνίας μεταξύ αυτού και του χώρου των σπουδαιότερων κριτηρίων εξάγεται, από την σχέση:

$$\sin\omega_{j,(1,2,3,\dots,i,\dots,j-1)} = \sin\omega_{(j,1)} * \sin\omega_{(j,2)} * \dots * \sin\omega_{(j,j-1)} \quad (18.44)$$

Ακολούθως, αναφορικά με το κριτήριο αυτό ( $K_j$ ) και για κάθε εναλλακτική ( $E_i$ ), ευρίσκεται η συνιστώσα της επίδοσης που είναι ανεξάρτητη από τα σπουδαιότερα αυτού κριτήρια, από την ακόλουθη σχέση:

$$g_{i,j}^{\perp (1,2,3,\dots,i,\dots,j-1)} = g_{i,j} * \sin\omega_{j,(1,2,3,\dots,j-1)} \quad (18.45)$$

*II) Ακριβής Σύνθετος τρόπος:*

Θεωρούνται τα μοναδιαία διανύσματα-κριτήρια  $K1, K2, K3, \dots, K_j, \dots, Kn$ .

Εν συνεχεία, με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, ευρίσκονται οι συνεταγμένες εκάστου εκ των  $K1, K2, K3, \dots, K_j, \dots, Kn$ .

Ακολούθως, αναφορικά με έκαστο κριτήριο ( $K_j$ ) και για κάθε εναλλακτική ( $E_i$ ), ευρίσκεται η συνιστώσα της επίδοσης που είναι ανεξάρτητη από τα σπουδαιότερα αυτού κριτήρια, από την ακόλουθη σχέση:



$$g_{i,j} \perp (1,2,3, \dots, j-1) = g_{i,j} * \{ [\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \mathbf{K3}, \dots, \mathbf{Kj-1}, \mathbf{Kj})] / [\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \mathbf{K3}, \dots, \mathbf{Kj-1})] \} \quad (18.46)$$

**Βήμα-6ο: Εξάγοντας τη νόρμα της Ολικής Αποτίμησης για τις εναλλακτικές.**

Ακολουθώντας, η ολική επίδοση κάθε εναλλακτικής δίδεται από την ακόλουθη σχέση:  

$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^b + \sum_j [g_{i,j} \perp (1,2,3, \dots, j-1)]^b \}^{1/b} \quad (18.47)$$
 όπου ο  $j$  κυμαίνεται από  $j=2$  έως  $j$ .

Εδώ, πρέπει να γίνει ο καθορισμός του εκθέτη της νόρμας, ήτοι του  $b$ . Σημειώνεται ότι εάν γίνει δεκτή η φυσική ευκλείδεια νόρμα, τότε  $b=2$ .

Δηλαδή, ανάλογα με το ποιον τρόπο ήδη έχουμε επιλέξει:

*I) Απλός Προσεγγιστικός τρόπος:*

$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^b + \sum_j [g_{i,j} * \sin \omega_j, (1, 2, 3, \dots, j-1)]^b \}^{1/b} \quad (18.48)$$

όπου ο  $j$  κυμαίνεται από  $j=2$  έως  $j$ .

*II) Ακριβής Σύνθετος τρόπος:*

$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^b + \sum_j \{ g_{i,j} * \{ [\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \mathbf{K3}, \dots, \mathbf{Kj-1}, \mathbf{Kj})] / [\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \mathbf{K3}, \dots, \mathbf{Kj-1})] \} \}^b \}^{1/b} \quad (18.49)$$

όπου ο  $j$  κυμαίνεται από  $j=2$  έως  $j$ .

**Βήμα-7ο: Η τελική αξιολόγηση των εναλλακτικών.**

Η τελική διάταξη των εναλλακτικών λαμβάνει χώρα στη βάση των  $N(E_i)$ . Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η  $N(E_i)$ , τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική  $E_i$ .

## **18.6 5<sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΑΝΑΓΩΓΗΣ**

### **18.6.1 Κλίμακες Αναγωγής**

#### **i) Η ανάγκη δημιουργίας κλιμάκων αναγωγής**

Όπως προαναφέρθηκε, σημαντικές παράμετροι αποτίμησης και αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων αποτελούν τα κριτήρια αξιολόγησης με τα σχετικά τους βάρη, καθώς και οι ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων.

Για την ποσοτική έκφραση και ει δυνατόν μέτρηση τόσο των σχετικών βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης, όσο και των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων, απαιτούνται κλίμακες αναγωγής και ο τρόπος ποσοτικής τους έκφρασης.

Πράγματι, αρχικά οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων ανά κριτήριο παρουσιάζουν μεταξύ τους ετερογένεια, οφειλόμενη στη διαφορετική φύση των κριτηρίων, άρα και των αντιστοίχων μονάδων μέτρησης (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ., 2006), (Tsamboulas et al, 1999). Επίσης, η σχετική σπουδαιότητα των κριτηρίων αξιολόγησης, σε πολλές περιπτώσεις δεν έχει αρχικά ποσοτική έκφραση. Επομένως, τόσο οι ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, όσο και τα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης, συχνά χρειάζονται μετατροπή σε τεχνητή κλίμακα ποσοτικής έκφρασής τους.

#### **ii) Κατά ζεύγη συγκρίσεις παραμέτρων**

Όπως ήδη αναπτύχθηκε, οι βαρύτερες των κριτηρίων αξιολόγησης και οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης αποτελούν σημαντικές παραμέτρους πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Αποβαίνει συχνά χρήσιμο κατά τη δόμηση της πορείας αποτίμησης-αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων/συγκοινωνιακών έργων να θεωρούνται δύο επίπεδα ανάλυσης παραμέτρων και εν συνεχεία προσδιορισμού τιμών τους (Tsamboulas et al, 1998), (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Panou K., 1999):

1) Το επίπεδο των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων/έργων, και,

2) Το επίπεδο των σχετικών βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης.

Για τη σύγκριση παραμέτρων αποτίμησης, όπως και γενικά οντοτήτων, είναι αρκετά προσιδιάζον στην ανθρώπινη λογική να γίνονται κατά ζεύγη συγκρίσεις.

I) Αποδίδεται στην κατά ζεύγη σύγκριση (Roy, 1985), (Saaty, 1980), (Szidarovsky et al, 1986) το πλεονέκτημα της μέγιστης δυνατής εστίασης.

II) Ως πλεονέκτημα αναγνωρίζεται και η δυνατότητα θεώρησης «αντικατάστασης» της μιας οντότητας από την άλλη στην εντός κάθε ζεύγους σύγκριση (Tsamboulas D. – Pearman A. – Watson S. – Yiotis G., 1997), (Tsamboulas et al, 1998).

Έτσι, η κατά ζεύγη σύγκριση είναι δυνατό να εφαρμοσθεί τόσο στο επίπεδο των ανά κριτήριο εναλλακτικών λύσεων, όσο και στο επίπεδο των σχετικών βαρών κριτηρίων αξιολόγησης (Saaty, 1980), (Tsamboulas, 1998, 1999).

### iii) Είδη κλιμάκων απόδοσης συγκρίσεων κατά ζεύγη

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες κλίμακες για απόδοση συγκρίσεων κατά ζεύγη.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη τέτοιων κλιμάκων:

A) Οι κλίμακες τα στοιχεία των οποίων απαντούν στην ερώτηση «πόσες φορές πιο σπουδαία είναι μία οντότητα από μία άλλη», π.χ. η οντότητα  $i$  από την οντότητα  $j$  (Saaty, 1980), (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ., 2006), (Tsamboulas et al, 1998).

B) Οι κλίμακες που απαντούν στην ερώτηση «πόση είναι η περίσσεια σπουδαιότητας μίας οντότητας από μία άλλη», π.χ. της οντότητας  $i$  από την οντότητα  $j$  (Saaty, 1980), (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ., 2006), (Tsamboulas et al, 1998).

Στο είδος (A), αποδίδεται η πολλαπλότητα μεταξύ της σπουδαιότητας δύο οντοτήτων, ενώ στο είδος (B) αποδίδεται η διαφορά της σπουδαιότητας δύο οντοτήτων. Δηλαδή, το είδος (A) στηρίζεται στην πολλαπλασιαστική λογική, ενώ το είδος (B) στηρίζεται στην προσθαιρητική λογική.

Σε κάθε είδος, υπάρχει μία τιμή η οποία εκφράζει ισοδυναμία μεταξύ των συγκρινομένων οντοτήτων.

Τις περισσότερες φορές στην πολλαπλασιαστική λογική τίθεται η τιμή αυτή ίση με το ουδέτερο στοιχείο του πολλαπλασιασμού, δηλαδή το 1.

Τις περισσότερες φορές στην προσθαιρητική λογική τίθεται η τιμή αυτή ίση με το ουδέτερο στοιχείο της πρόσθεσης-αφαίρεσης, δηλαδή το 0.

Στις ανωτέρω περιπτώσεις, ισχύει μεταξύ των στοιχείων  $\zeta_{ij}$  και  $\zeta_{ji}$  του Πίνακα των Κατά Ζεύγη Συγκρίσεων:

- (α) Στην περίπτωση της πολλαπλασιαστικής δομής και με ουδέτερο στοιχείο το 1:  
 $\zeta_{ji} = 1/\zeta_{ij}$ , οπότε:  $\zeta_{ji} * \zeta_{ij} = 1$ . (18.50)

- (β) Στην περίπτωση της προσθαιρητικής δομής και με ουδέτερο το στοιχείο 0:  
 $\zeta_{ji} = -\zeta_{ij}$ , οπότε:  $\zeta_{ji} + \zeta_{ij} = 0$ . (18.51)

### iv) Κλίμακες πολλαπλασιαστικής δομής

Μία βασική κλίμακα πολλαπλασιαστικής δομής είναι αυτή του Saaty (Saaty, 1980), (Tsamboulas D. – Pearman A. – Watson S. – Yiotis G., 1997), (Tsamboulas et al, 1998). Η υπόψη κλίμακα έχει ουδέτερο στοιχείο (στοιχείο ισοδυναμίας) το 1, ενώ οι άλλες τιμές είναι οι ακέραιοι:

3,5,7,9, καθώς και οι αντίστροφοι αυτών: 1/3,1/5,1/7,1/9.

Έχουν αναπτυχθεί και άλλες παραλλαγές της κλίμακας Saaty, όπως η πιο πυκνή της προηγούμενης, δηλαδή αυτή με στοιχείο ισότητας το 1 και με τιμές:

2,3,4,5,6,7,8,9, καθώς και τους αντιστρόφους:  $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$ .

Μία άλλη κλίμακα, χρησιμοποιούμενη αρκετά συχνά προκύπτει από δυνάμεις του 2, δηλαδή έχει στοιχείο ισοδυναμίας το 1, και λοιπά στοιχεία τα:

2,4,8,16, καθώς και τα αντίστροφα αυτών:  $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}$ .

Επομένως, τα στοιχεία αυτού του είδους της κλίμακας Saaty έχουν τη δομή:  $2^m$ .

#### v) Κλίμακες προσθαφαιρετικής δομής

Βασική κλίμακα προσθαφαιρετικής δομής είναι η REMBRANDT (Tsamboulas D. – Pearman A. – Watson S. – Yiotis G., 1997), (Tsamboulas et al, 1998). Στην υπόψη κλίμακα στοιχείο ισότητας είναι το 0 (μηδέν), ενώ περιλαμβάνονται επίσης τα στοιχεία:

+2, +4, +6, +8, καθώς και οι αντίθετοι αυτών: -2, -4, -6, -8. Επομένως, τα στοιχεία της κλίμακας REMBRANDT έχουν τη δομή:  $\mu * 2$ , όπου  $\mu$  ακέραιος αριθμός.

#### vi) Αναγωγή από την κλίμακα REMBRANDT στην κλίμακα Saaty

Για να γίνει αναγωγή από την κλίμακα REMBRANDT στην κλίμακα Saaty χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος, προταθείς από τον Lootsma:

$$S_{ij} = \exp(0,347 * r_{ij}), \quad (18.52)$$

όπου:

$S_{ij}$  : τυχόν στοιχείο της κλίμακας Saaty,

$r_{ij}$ : τυχόν στοιχείο της κλίμακας REMBRANDT.

Επαληθεύοντας τις οριακές συνθήκες του τύπου του Lootsma χρησιμοποιούνται οι δομές των κλιμάκων REMBRANDT και Saaty, και εξετάζονται οι οριακές συνθήκες:

Για  $\mu=1$ , η μεν REMBRANDT δίδει  $1 * 2 = +2$ , η δε Saaty δίδει  $2^1 = 2$ .

Επομένως, εδείχθη η αντιστοίχιση της τιμής 2 της κλίμακας REMBRANDT με την τιμή 2 της κλίμακας Saaty.

Ακόμη, για  $\mu=0$ , η μεν REMBRANDT δίδει  $0 * 2 = 0$ , η δε Saaty δίδει  $2^0 = 1$ .

Επομένως, εδείχθη η αντιστοίχιση της τιμής 0 της κλίμακας REMBRANDT με την τιμή 1 της κλίμακας Saaty.

Με δεδομένες τις δομές των δύο κλιμάκων, μία σχέση που μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη για τη μετάβαση από τη μία στην άλλη (εάν υπετίθετο η ύπαρξη σταθερού όρου  $\beta$ ) είναι η:

$$S_{ij} = \exp(\alpha * r_{ij} + \beta), \quad (18.53)$$

όπου  $\alpha, \beta$ : παράμετροι.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $\alpha$  και  $\beta$ , αξιοποιούνται οι προαναφερθείσες αντιστοιχίσεις.

Με την αντιστοίχιση  $S_{ij} = 1$  για  $r_{ij} = 0$ , προκύπτει:

$$1 = \exp(\alpha * 0 + \beta), \text{ οπότε: } \ln 1 = 0 = \alpha * 0 + \beta, \text{ άρα } \beta = 0. \quad (18.54)$$

Με την αντιστοίχιση  $S_{ij} = 2$  για  $r_{ij} = 2$ , προκύπτει:

$$2 = \exp(\alpha * 2 + \beta), \text{ ήτοι: } 2 = \exp(\alpha * 2), \text{ αφού } \beta = 0, \text{ οπότε: } \ln 2 = 0,693 = \alpha * 2, \text{ δηλαδή } \alpha = 0,347. \quad (18.55)$$

Η επαλήθευση του τύπου του Lootsma στις οριακές συνθήκες (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ., 2006) παρατίθεται για να φανεί η μαθηματική του δομή, όπως και η εν γένει δομή μετάβασης μεταξύ κλιμάκων. Η αντιστοίχιση μεταξύ των δύο κλιμάκων παρουσιάζεται στον αμέσως επόμενο πίνακα:

Πίνακας 18.5: Αντιστοίχιση Κλίμακας REMBRANDT με κλίμακα Saaty.

Table 18.5: Correspondence REMBRANDT scale and Saaty scale.

$r_{ij}$	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+8
$S_{ij}$	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16

## 18.6.2 Προτεινόμενη Κλίμακα αποτίμησης και αναγωγής

### 1) Κλίμακα κατά ζεύγη συγκρίσεων

Οι προαναφερθείσες κλίμακες (Saaty, REMBRANDT), καταλήγουν σε αξιόλογα εξαγόμενα, αλλά έχουν το πρόβλημα της δύσκολης αρχικά εποπτείας, δηλαδή της αρχικής πολυπλοκότητας κατά τη συμπλήρωση του Κατά Ζεύγη Συγκρίσεων Πίνακα. Για το λόγο αυτό είναι δυνατό να εισαχθεί μία νέα, απλή και εύληπτη κλίμακα, στην αρχική κατά ζεύγη σύγκριση.

Έτσι, προτείνεται (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ., 2006) μία νέα κλίμακα, όπου το τυχόν στοιχείο  $n_{ij}$  του Κατά Ζεύγη Συγκρίσεων Πίνακα θα παίρνει τις εξής τιμές:

$n_{ij} = 1,00$ , εάν η οντότητα  $i$  κρίνεται σπουδαιότερη της οντότητας  $j$ ,

$n_{ij} = 0$ , εάν η οντότητα  $i$  κρίνεται κατώτερη της οντότητας  $j$ ,

$n_{ij} = \chi$ , εάν η οντότητα  $i$  κρίνεται ισοδύναμη της οντότητας  $j$ . (18.56)

Το  $\chi$  θα προσδιορισθεί ακολούθως.

Γίνεται αντιληπτό ότι στην κύρια διαγώνιο του Πίνακα των  $n_{ij}$  τίθεται το στοιχείο  $\chi$ .

Βασιζόμενοι στη σχέση (18.52) αναγωγής της REMBRANDT στη Saaty, μπορεί και εδώ να υποθεθεί ότι μεταξύ ενός στοιχείου  $S_{ij}$  της κλίμακας Saaty και ενός στοιχείου  $n_{ij}$  της νέας κλίμακας υφίσταται η ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$S_{ij} = \exp[\lambda_1 \cdot (n_{ij} + \lambda_2)]. \quad (18.57)$$

Επιλέγεται η εκθετική μορφή αναγωγής, λαμβάνοντας υπόψη ότι και η αναγωγή από την προσθαφαιρετική κλίμακα REMBRANDT στην πολλαπλασιαστική κλίμακα Saaty λαμβάνει χώρα με μία εξίσωση εκθετικής μορφής. Έτσι για την αναγωγή και της νέας προτεινομένης κλίμακας (η οποία χαρακτηρίζεται από προσθαφαιρετική δομή) στην πολλαπλασιαστική κλίμακα Saaty θεωρείται ως κατάλληλη κλίμακα η οποία θα είναι εκθετικής μορφής εξίσωση.

Επειδή το ουδέτερο στοιχείο της νέας προτεινομένης κλίμακας είναι το  $\chi$ , αντί της μορφής  $S_{ij} = \exp(\lambda_1 \cdot n_{ij})$ , η οποία πραγματοποιούσε την αναγωγή από τη REMBRANDT στη Saaty, λαμβάνεται η πιο σύνθετη μορφή:

$$S_{ij} = \exp[\lambda_1 \cdot (n_{ij} + \lambda_2)].$$

Ως οριακές συνθήκες ισχύος θεωρούνται οι:

$$1,00 = \exp[\lambda_1 \cdot (\chi + \lambda_2)], \text{ ήτοι για } n_{ij} = \chi$$

$$\text{πρέπει } S_{ij} = 1,00, \quad (18.58)$$

$$2,00 = \exp[\lambda_1 \cdot (1,00 + \lambda_2)], \text{ ήτοι για } n_{ij} = 1,00 \text{ πρέπει } S_{ij} = 2,00, \quad (18.59)$$

$$0,50 = \exp[\lambda_1 \cdot (0 + \lambda_2)], \text{ ήτοι για } n_{ij} = 0 \text{ πρέπει } S_{ij} = 0,50. \quad (18.60)$$

Από την επίλυση της (18.59) προκύπτει:

$$\ln 2,00 = \lambda_1 \cdot (1,00 + \lambda_2), \text{ ήτοι:}$$

$$0,693 = \lambda_1 \cdot (1,00 + \lambda_2), \text{ οπότε}$$

$$\lambda_1 + \lambda_1 \cdot \lambda_2 = 0,693. \quad (18.61)$$

Από την επίλυση της (18.60) προκύπτει:

$$\ln 0,50 = \lambda_1 \cdot (0 + \lambda_2), \text{ άρα}$$

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 = -0,693. \quad (18.62)$$

Ο συνδυασμός: (18.61) – (18.62), δίδει:

$$\lambda_1 = 1,386. \quad (18.63)$$

Η (18.62) συνεπεία της (18.63) δίδει:

$$1,386 \cdot \lambda_2 = -0,693, \text{ οπότε:}$$

$$\lambda_2 = -0,693/1,386, \text{ δηλαδή}$$

$$\lambda_2 = -0,50. \quad (18.64)$$

Αντικαθιστώντας τα  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  στην (18.58) προκύπτει:

$$1,00 = \exp[1,386*(\chi - 0,50)], \text{ ήτοι:}$$

$$[1,386*(\chi - 0,50)] = \ln 1,00, \text{ οπότε}$$

$$1,386*\chi - 0,693 = 0, \text{ άρα:}$$

$$\chi = 0,693/1,386, \text{ δηλαδή}$$

$$\chi = 0,50. \quad (18.65)$$

Άρα, αποδείχθη ότι το ουδέτερο στοιχείο  $\chi$  της νέας κλίμακας ισούται με το 0,50.

Μετά την εύρεση των παραμέτρων  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$ , η αρχική σχέση παίρνει την εξής μορφή:

$$S_{ij} = \exp[1,386*(n_{ij} - 0,50)]. \quad (18.66)$$

Κατόπιν αυτού, ακολουθώντας παρουσιάζεται η αντιστοίχιση βασικού τμήματος της κλίμακας Saaty με την προτεινόμενη κλίμακα (των  $n_{ij}$ ).

*Πίνακας 18.6: Αντιστοίχιση Νέας Προτεινόμενης Κλίμακας με κλίμακα Saaty.*

*Table 18.6: Correspondence New Proposed Scale and Saaty scale.*

$n_{ij}$	0	0,5	1
$S_{ij}$	1/2	1	2

Τονίζεται ότι άλλες τιμές της κλίμακας Saaty, όπως οι 4, 8, 16 και οι αντίστροφοι αυτών: 1/4, 1/8, 1/16, μπορεί με ορισμό να αντιστοιχισθούν σε τιμές της προτεινόμενης κλίμακας. Δηλαδή, οι 4, 8, 16 στο 1 και οι 1/4, 1/8, 1/16 στο 0.

Το ζήτημα των αντιστοιχίσεων περισσότερων τιμών σε ολιγότερες, δημιουργεί πάντως ένα ζήτημα απόδοσης διαφορών, άρα και ακρίβειας της προτεινόμενης μεθόδου. Ωστόσο, η πρακτική απλότητα και το θεωρητικά «εύληπτον» της παρούσας προτεινόμενης μεθόδου, αποτελούν ιδιότητες που της δίδουν σημαντική χρησιμότητα.

Αυτό αποδεικνύεται και από σύγκριση εφαρμογών της προτεινόμενης μεθόδου και της κλίμακας Saaty, όπως θα φανεί και στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

## 2) Εφαρμογή στην κατάταξη και βαθμονόμηση

Για την τελική ιεράρχηση-κατάταξη των αξιολογούμενων παραμέτρων, πρέπει να λάβει χώρα η ποιοτική επαλληλία των κατά ζεύγη συγκρίσεων.

Η κατάταξη των παραμέτρων γίνεται βάσει μίας ολικής ποσότητας-σταθερότυπου αποτίμησης κάθε οντότητας. Έτσι, για την οντότητα (π.χ. κριτήριο) “i”, ορίζεται ο ολικός σταθερότυπος αποτίμησης:

$$N_i = \sum_j (n_{ij}), \quad (18.67)$$

(όπου στο άθροισμα η άθροιση γίνεται ως προς j).

Με βάση τους ολικούς σταθερότυπους  $N_i$ , κατατάσσονται οι υπό αξιολόγηση οντότητες i.

Δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο σταθερότυπος  $N_i$ , τόσο σπουδαιότερη θεωρείται η οντότητα i.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για πλήθος  $v$  υπό αξιολόγηση συγκρινομένων οντοτήτων (π.χ. κριτηρίων), ισχύει:

$$\text{Πλήθος ζευγών} = v + (v-3)*v/2. \quad (18.68)$$

### 18.6.3 Έλεγχοι αξιοπιστίας κατά την εφαρμογή της μεθόδου

Στις κατά ζεύγη συγκρίσεις οντοτήτων, υφίσταται μία τελική φάση επαλληλίας των ανά ζεύγη αποτελεσμάτων. Είναι σημαντικό να ελεγχθεί η αξιοπιστία μίας τεχνικής, υπό την έννοια του βαθμού συνάφειας μεταξύ των αρχικών κατά ζεύγη συγκρίσεων και των τελικών συμπερασμάτων. Ο εν λόγω βαθμός συνάφειας δείχνει τη συνοχή/συμβατότητα μίας μεθόδου/τεχνικής (Consistency) (Saaty, 1980), (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999).

Για παράδειγμα σε μία τεχνική, όπου στην αρχική κατά ζεύγη σύγκριση τριών εναλλακτικών υπό σύγκριση οντοτήτων E1, E2, E3, διαφαίνονται τα εξής:

E1 καλύτερη της E2,

E2 καλύτερη της E3,

E1 χειρότερη της E3,

τότε, υπάρχει μία σχέση μη μεταβατικότητας. Όσο περισσότερες σχέσεις μη μεταβατικότητας υφίστανται σε αρχικές ανά ζεύγη συγκρίσεις οντοτήτων, τόσο περισσότερο τίθεται το ζήτημα περί μη επαρκούς συνοχής της. Δηλαδή ο βαθμός της μη συμβατότητας δεδομένων κατά την εφαρμογή μίας τεχνικής, δείχνει το βαθμό αλληλοαναιρέσεως των αρχικών στοιχείων-δεδομένων, άρα αποτελεί και μέτρο εν δυνάμει αμφισβήτησης της αξιοπιστίας της τεχνικής για την εφαρμογή στα υπόψη δεδομένα.

Σε κλασικές πλέον μεθόδους/τεχνικές κατά ζεύγη συγκρίσεων, έχουν εισαχθεί και εφαρμοσθεί δείκτες έκφρασης της συμβατότητας.

Για παράδειγμα, στη «Μέθοδο Ιδιοτιμών» (“Eigenvalue Method”) έχει εισαχθεί (Τσαμπούλας, 1998, 1999),

ο δείκτης “C.I.” (: “Consistency Index”: «Δείκτης Συμβατότητας»), όπου:

$$C.I. = (\tau_{\max} - v) / (v-1), \quad (18.69)$$

όπου:

v: πλήθος συγκρινόμενων οντοτήτων, π.χ. κριτηρίων,

$\tau_{\max}$ : μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα κατά ζεύγη συγκρίσεων των εν λόγω οντοτήτων.

Στην περίπτωση αυτή όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη (C.I.), τόσο μικρότερος είναι ο βαθμός συνάφειας, δηλαδή αυξάνεται η ασυμβατότητα της τεχνικής.

Έχει εισαχθεί (Saaty, 1980), (Tsamboulas, 1998), (Τσαμπούλας et al, 1999), η τιμή 0,10, ως κρίσιμο φράγμα ασυμβατότητας:

$$C.I. \leq 0,10, \quad (18.70)$$

ώστε για τιμές μικρότερες του ορίου αυτού να θεωρούνται αξιόπιστα τα αποτελέσματα της τεχνικής Ιδιοτιμών.

Τίθεται το ερώτημα αν και στην προτεινομένη από το άρθρο αυτό μέθοδο μπορεί να εισαχθεί ένας δείκτης ελέγχου αξιοπιστίας. Κατά συνέπεια, πριν από την ποσοτική έκφραση ενός τέτοιου δείκτη, μπορεί να προσεγγισθεί ποιοτικά ο δείκτης αυτός. Πράγματι, ο δείκτης αυτός εξαρτάται από την κατανομή των τιμών μεταξύ των σταθεροτύπων  $N_i$ .

Πιο συγκεκριμένα, στη μέγιστη δυνατή συμβατότητα (ιδεατή συμβατότητα), το τελικό εξαγόμενο του συνόλου των εν λόγω σταθεροτύπων θα έχει την εξής κατανομή τιμών στα στοιχεία του (από το μέγιστο έως το ελάχιστο):

v-0 -0,5

v-1- 0,5,

v-2- 0,5,

v-3 -0,5,

.....

Δηλαδή, με συνοπτική έκφραση:

$$v-\sigma-0,5, \quad (18.71)$$

όπου  $\sigma$ : παράμετρος, η οποία λαμβάνει τιμές στους φυσικούς αριθμούς, και συγκεκριμένα, από 0 (μηδέν) το ελάχιστο έως και (v-1) το μέγιστο.

Τα στοιχεία αυτά μπορεί να θεωρηθούν ως συνιστώσες διάνυσματος. Το διάνυσμα που προκύπτει αποτελεί ένα «ιδεατό» διάνυσμα, ήτοι το διάνυσμα της μέγιστης συμβατότητας ή μέγιστης συνοχής ή του «απολύτως συγκείμενου». Το διάνυσμα αυτό αντιστοιχεί στην περίπτωση που τα v το πλήθος συγκρινόμενα στοιχεία, δίδονται ουσιαστικά από την αρχή σε μία πλήρη ιεράρχηση, δηλαδή, κανένα ζεύγος δεν αντιβαίνει στην ιεράρχηση.

Όσο μεγαλύτερη απομάκρυνση υπάρχει από τη Συμβατότητα, τόσο περισσότερη διαφορά υπάρχει στην αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία των τιμών του προηγούμενου συνόλου και των

σταθεροτύπων των υπό αξιολόγηση οντοτήτων. Ως προς την ποσοτικοποίηση του δείκτη Ασυμβατότητας για την προτεινόμενη μέθοδο μπορεί να εφαρμοσθούν τα ακόλουθα:

Παρατίθενται κατά φθίνουσα τάξη τα στοιχεία-σταθερότυποι που προέκυψαν από εφαρμογή της μεθόδου και αντιστοιχίζονται με τα παραπάνω αναφερθέντα θεωρητικά της πλήρους (ιδεατής) συμβατότητας. Κατ' αυτό τον τρόπο, προκύπτει ένα «πραγματικό διάνυσμα», το οποίο έχει ως συνιστώσες τα τελικά προκύψαντα στοιχεία.

Ακολουθώντας, για κάθε ένα πραγματικό στοιχείο-σταθερότυπος, ευρίσκεται η απόλυτη τιμή της διαφοράς του («απόσταση») από το αντίστοιχο θεωρητικό στοιχείο, δηλαδή ευρίσκονται όλες οι απόλυτες τιμές των διαφορών των ιδεατών από τις πραγματικές συνιστώσες. Έτσι, δημιουργείται ένα διάνυσμα- «απόσταση» του πραγματικού από το ιδεατό σύνολο τιμών. Το μέτρο του εν λόγω διανύσματος αποτελεί το μέτρο αυτής της απόστασης.

Το μέτρο αυτού του διανύσματος ευρίσκεται λαμβάνοντας το σταθερότυπο αθροιστικής δομής γραμμικών όρων. Ήτοι, το άθροισμα των προαναφερομένων απολύτων τιμών των διαφορών (δηλαδή το άθροισμα των «επί μέρους αποστάσεων») αποτελεί μία ποσοτική έκφραση της ολικής «απόστασης». Επομένως αποτελεί και ποσοτική έκφραση του δείκτη συμβατότητας της προτεινόμενης μεθόδου. Ο προτεινόμενος δείκτης συμβατότητας παρίσταται εδώ με Π.Δ.Σ. (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ., 2006).

Είναι προφανές ότι όσο μικρότερη είναι η ολική απόσταση, δηλαδή ο δείκτης συμβατότητας, τόσο καλύτερη είναι η συμβατότητα ή συνοχή της κλίμακας και της αναγωγής σε αυτή.

Κατά συνέπεια, όπως και στον προαναφερθέντα δείκτη C.I. της μεθόδου Ιδιοτιμών, έτσι και εδώ, όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης συμβατότητας, τόσο μικρότερη είναι η συμβατότητα (συνοχή) της μεθόδου. Η μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει ο δείκτης συμβατότητας είναι μηδέν (0), για την περίπτωση της απόλυτης συμβατότητας. Για να διερευνηθεί η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο υπόψη δείκτης ακολουθεί η εξής ανάλυση:

Με άθροιση των συνιστωσών της σχέσης (18.71), προκύπτει άθροισμα:

$$v^2/2. \quad (18.72)$$

Για την ακραία περίπτωση της ετυμηγορίας της απόλυτης τελικής ισοδυναμίας όλων των συγκρινόμενων  $v$  το πλήθος οντοτήτων-στοιχείων, ήτοι της ελάχιστης συμβατότητας, η τιμή εκάστου από αυτά προκύπτει, με βάση την (18.72):

$$v^2/2 / v = v/2. \quad (18.73)$$

Αφαιρώντας από κάθε στοιχείο της σχέσης (18.71) το  $v/2$ , το οποίο ευρέθη στην (18.73), προκύπτουν στοιχεία της μορφής:

$$(v-\sigma-0,5) - (v/2), \quad (18.74)$$

όπου η παράμετρος  $\sigma$  κυμαίνεται στο σύνολο των φυσικών αριθμών, και συγκεκριμένα, από το 0 έως και το  $(v-1)$ .

Οι απόλυτες τιμές των όρων της (18.74) εκφράζουν τις «μερικές αποστάσεις» των συνιστωσών του ιδεατού διανύσματος από τις αντίστοιχες συνιστώσες του «χείριστου» διανύσματος.

Προκειμένου να ευρεθεί το άθροισμα των «μερικών αποστάσεων», δηλαδή το άθροισμα των απολύτων αυτών τιμών, υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του  $\sigma$  για την οποία η εξίσωση (18.74) δίδει τιμή αυστηρά θετική, δηλαδή ούτε αρνητική, ούτε μηδέν. Έστω  $v$  η εν λόγω τιμή της παραμέτρου  $\sigma$ .

Τότε, βάσει των προηγούμενων:

$v =$  ο μέγιστος των φυσικών αριθμών, οι οποίοι πληρούν τη σχέση:

$$(v-v-0,5) - (v/2) > 0. \quad (18.75)$$

Κάνοντας πράξεις στην (18.75), προκύπτει ότι:

$v =$  ο μέγιστος των φυσικών αριθμών, οι οποίοι πληρούν τη σχέση:

$$v < (v/2) - 0,5. \quad (18.76)$$

Από την (18.76) μπορεί για κάθε  $v$  να προσδιορισθεί ο αντίστοιχος φυσικός αριθμός  $v$ , ως συνάρτηση του  $v$ , οπότε, μπορεί να γραφεί:  $v = v(v)$ .

Αφού ευρέθη ο αριθμός  $v$  (για κάθε  $v$ ), μπορεί να ευρεθεί το ημίαθροισμα των όρων της (18.74), ήτοι το άθροισμα των όρων της που το  $\sigma$  είναι το πολύ ίσο με το  $v$ .

$\Sigma \sigma [(v-\sigma-0,5) - (v/2)]$ , για  $\sigma$  από 0 έως και  $v$ , και όπου ο δείκτης  $\sigma$  στο  $\Sigma \sigma$  δηλώνει ότι η άθροιση γίνεται ως προς  $\sigma$ .

Το παραπάνω άθροισμα ισούται με:

$$[(v+1)*(v/2)] - [(v+1)*0,5] - [(v/2)*(v+1)]. \quad (18.77)$$

Όπως ήδη αναφέρθηκε, αυτό αποτελεί το ημίαθροισμα των «μερικών αποστάσεων» του ιδεατού από το χειρίστο διάνυσμα κατάταξης οντοτήτων, επομένως, ολόκληρο το άθροισμα, το οποίο αποτελεί τη μέγιστη τιμή του δείκτη συμβατότητας, είναι ίσο με το διπλάσιο.

Άρα:

$$\max (\text{Π.Δ.Σ.}) = 2 * [(v+1)*(v/2)] - [(v+1)*0,5] - [(v/2)*(v+1)],$$

Ήτοι:

$$\max (\text{Π.Δ.Σ.}) = (v+1) * (v-1-v), \quad (18.78)$$

Όπου:

Π.Δ.Σ. : ο προτεινόμενος δείκτης συμβατότητας (για την προτεινόμενη μέθοδο), όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Όπως φαίνεται από τη σχέση (18.78) η τιμή  $\max (\text{Π.Δ.Σ.})$  είναι συνάρτηση του  $v$  και του  $v$ , αλλά επειδή το  $v$  είναι συνάρτηση του  $v$  (βάσει της προηγούμενης ανάλυσης), η  $\max (\text{Π.Δ.Σ.})$  είναι συνάρτηση του  $v$  μόνο.

Με παράλληλη εφαρμογή των σχέσεων (18.76) και (18.78), μπορεί να ευρεθούν οι μέγιστες τιμές του Π.Δ.Σ., ήτοι οι  $\max (\text{Π.Δ.Σ.})$ , για διάφορες τιμές του πλήθους  $v$  των συγκρινόμενων οντοτήτων:

$$\text{Για } v=2 \max (\text{Π.Δ.Σ.}) = 1,00,$$

$$\text{Για } v=3 \max (\text{Π.Δ.Σ.}) = 2,00,$$

$$\text{Για } v=4 \max (\text{Π.Δ.Σ.}) = 4,00,$$

$$\text{Για } v=5 \max (\text{Π.Δ.Σ.}) = 6,00.$$

Και αντιστοίχως για περισσότερα στοιχεία.

Έχοντας τις μέγιστες ανά  $v$  τιμές του Π.Δ.Σ., μπορούν, συγκρινόμενες με αυτές, να κριθούν οι τιμές του Π.Δ.Σ. που προκύπτουν σε διάφορες πραγματικές εφαρμογές.

#### 18.6.4 Πλαίσιο εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου

##### 1) Γενικά

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, βασικές παράμετροι πολυκριτηριακής αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων είναι τα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης και οι ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών υπό αξιολόγηση λύσεων. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί για την εκτίμηση τιμών και των δύο προαναφερομένων συνόλων παραμέτρων αξιολόγησης.

##### 2) Τιμές Βαρύτητας κριτηρίων αξιολόγησης

Θεωρείται ένα σύνολο με  $v$  το πλήθος κριτήρια αξιολόγησης. Είναι επιθυμητό να προσδιορισθούν τα σχετικά βάρη  $W_i$  των κριτηρίων αξιολόγησης.

Το πλήθος των δυνατών εννοουμένων ζευγών ισούται με:  $v + (v-3)*v/2$ , όπως προηγουμένως εδείχθη.

Για όλα αυτά τα ζεύγη, δίδονται τιμές  $w_{ij}$ , για την έκφραση της (διατεταγμένης) σχέσης μεταξύ των βαρών των κριτηρίων  $i$  και  $j$ .

Πιο συγκεκριμένα, δίδονται οι εξής τιμές:

$$w_{ij} = 1,00, \text{ εάν το κριτήριο } i \text{ κρίνεται σπουδαιότερο του κριτηρίου } j,$$

$$w_{ij} = 0, \text{ εάν το κριτήριο } i \text{ κρίνεται ολιγότερο σπουδαίο του κριτηρίου } j,$$

$$w_{ij} = 0,50, \text{ εάν το κριτήριο } i \text{ κρίνεται ισοδύναμο του κριτηρίου } j. \quad (18.79)$$



Με βάση αυτά, σχηματίζεται ένα μητρώο  $n \times n$ . Στην κύρια διαγώνιο του μητρώου όλα τα στοιχεία έχουν τιμή 0,50, ενώ το στοιχείο  $w_{ji}$  είναι συμπληρωματικό ως προς τη μονάδα του  $w_{ij}$ , ήτοι  $w_{ij} + w_{ji} = 1,00$ . (18.80)

Αφού μορφωθεί το εν λόγω μητρώο, η σχετική βαρύτητα  $W_i$  κάθε κριτηρίου  $i$  ευρίσκεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$W_i = \sum_j (w_{ij}). \quad (18.81)$$

Προκειμένου να είναι κανονικά τα βάρη που εξάγονται μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο ακόλουθος τύπος:

$$W_i = [\sum_j (w_{ij})] / \{\sum_i [\sum_j (w_{ij})]\}. \quad (18.82)$$

Ήτοι:

$$W_i = W_i / [\sum_i (W_i)]. \quad (18.83)$$

### 3) Επιδόσεις εναλλακτικών λύσεων ανά κριτήριο

Θεωρείται ένα σύνολο με  $m$  το πλήθος εναλλακτικές λύσεις. Ισχύει ότι:

$$\text{Πλήθος των δυνατών ζευγών εναλλακτικών λύσεων} = m + (m-3)*m/2, \quad (18.84)$$

κατά όμοιο τρόπο με την αντίστοιχη σχέση του πλήθους ζευγών κριτηρίων (18.68), όπου αντί για  $m$  υπήρχε το  $n$ .

Είναι επιθυμητό να προσδιορισθούν για κάθε κριτήριο  $i$  οι τελικές επιδόσεις  $Pl_i$  για κάθε εναλλακτική λύση  $l$  σε έναστο των κριτηρίων αξιολόγησης  $i$ .

Τότε, για κάθε κριτήριο  $i$  δίδονται τιμές σύγκρισης για κάθε διατεταγμένο ζεύγος εναλλακτικών  $l, l'$ , δηλαδή δίδονται οι  $pl, l', i$ .

Πιο συγκεκριμένα, βάσει της σχέσης (18.56), δίδονται οι εξής τιμές:

$pl, l', i = 1,00$ , εάν στο κριτήριο  $i$  η επίδοση της εναλλακτικής  $l$  κρίνεται σπουδαιότερη της επίδοσης της εναλλακτικής  $l'$ ,

$pl, l', i = 0$ , εάν στο κριτήριο  $i$  η επίδοση της εναλλακτικής  $l$  κρίνεται ολιγότερο σπουδαία της επίδοσης της εναλλακτικής  $l'$ ,

$pl, l', i = 0,50$ , εάν στο κριτήριο  $i$  η επίδοση της εναλλακτικής  $l$  κρίνεται ισοδύναμη της επίδοσης της εναλλακτικής  $l'$ . (18.85)

Με βάση αυτά, σχηματίζεται ένα μητρώο  $m \times m$ . Στην κύρια διαγώνιο του μητρώου όλα τα στοιχεία έχουν τιμή 0,50, ενώ το στοιχείο  $pl, l', i$  είναι συμπληρωματικό ως προς τη μονάδα του  $pl', l, i$ , ήτοι:

$$pl, l', i + pl', l, i = 1,00. \quad (18.86)$$

Αφού μορφωθεί το εν λόγω μητρώο, η επίδοση  $Pl_i$  κάθε εναλλακτικής λύσης  $l$  στο κριτήριο  $i$  ευρίσκεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Pl_i = \sum_l (pl, l', i), \quad (18.87)$$

Όπου, όπως φαίνεται και στον τύπο, η άθροιση γίνεται ως προς  $l'$ .

Η εφαρμογή που μόλις παρατέθηκε, λαμβάνει χώρα για κάθε ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης, επομένως για την εύρεση των ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων σε όλα τα κριτήρια  $n$ , γίνεται  $n$  φορές.

### 4) Αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων

Προηγουμένως αναπτύχθηκε η εφαρμογή της προτεινομένης τεχνητής κλίμακας μία φορά για την εξαγωγή των σχετικών βαρών των κριτηρίων και άλλες  $n$  φορές (όπου  $n$  το πλήθος των κριτηρίων) για την εξαγωγή των τελικών ανά κριτήριο επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων. Συνολικά δηλαδή η εφαρμογή έλαβε χώρα  $n+1$  φορές.

Με δεδομένα μετά την  $n+1$  φορές εφαρμογή της υπόψη μεθόδου, έχουν ευρεθεί τα σχετικά βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης, ήτοι τα  $W_i$ , καθώς και οι ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, ήτοι οι  $Pl_i$ .

Έχοντας τα στοιχεία αυτά είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η ολική επίδοση κάθε εναλλακτικής λύσης, στη βάση ενός δομημένου σταθεροτύπου. Ένας τέτοιος σταθερότυπος ο οποίος μπορεί να εφαρμοσθεί είναι ο:

$$PoI = \sum_i (W_i * P_{I,i}), \text{ όπου το } \sum_i \text{ δηλώνει ότι η άθροιση γίνεται ως προς το δείκτη } i, \quad (18.88)$$

όπου:

$PoI$ : Ολική επίδοση ( $Po$ ) της εναλλακτικής λύσης  $I$ ,

$W_i$ : Κανονικοποιημένη σχετική βαρύτητα του κριτηρίου αξιολόγησης  $i$ ,

$P_{I,i}$ : Τελική επίδοση της εναλλακτικής λύσης  $I$  στο κριτήριο αξιολόγησης  $i$ .

Γίνεται σαφές ότι οι αξιολογούμενες εναλλακτικές λύσεις  $EI$  κατατάσσονται ευθέως ανάλογα με τα μεγέθη  $PoI$  (όσο μεγαλύτερη μία  $PoI$  τόσο καλύτερη η αντίστοιχη  $EI$ ).

## **18.7 6<sup>ο</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ: Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

### **18.7.1 Η Αβεβαιότητα στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων**

Η Αβεβαιότητα μπορεί να διακριθεί σε πρωτογενής και δευτερογενής, ανάλογα με το πού αναφέρεται και πώς προκύπτει.

Πρωτογενής είναι η Αβεβαιότητα που οφείλεται στην αστάθεια των εκτιμήσεων αναφορικά με τις τιμές των αρχικών/φυσικών επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης.

Δευτερογενής είναι η Αβεβαιότητα που οφείλεται στην αστάθεια των εκτιμήσεων αναφορικά με τη δόμηση της νόρμας αποτίμησης/αξιολόγησης κάθε εναλλακτικής.

Εστιάζοντας στη Δευτερογενή Αβεβαιότητα, αυτή παρουσιάζεται γενικά στα ακόλουθα βήματα:

- Στάθμιση των κριτηρίων αξιολόγησης (“weighting”).
- Αναγωγή των επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια από φυσικές κλίμακες σε τεχνητές, ήτοι δημιουργία τιμών (“values”).
- Δημιουργία της τελικής νόρμας αποτίμησης/αξιολόγησης για κάθε εναλλακτική. Πρόκειται δηλαδή για την εξαγωγή της ολικής χρησιμότητας (“total utility”) κάθε εναλλακτικής.

### **18.7.2 Μετατροπή ποιοτικών σχέσεων κριτηρίων σε ποσοτικές**

Στην περίπτωση όπου υπάρχει μία ποιοτική σχέση μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης, ήτοι:

$$w_1 \geq w_2 \geq w_3 \geq \dots \geq w_j \geq \dots \geq w_n \quad (18.89)$$

Αναφορικά με την ισχύ της σχέσεως αυτής, εάν  $d$  είναι η μικρότερη τιμή της βαρύτητας  $w_n$ , και  $e$  είναι το θεωρούμενο σταθερό βήμα,

τότε:

$$w_n = d,$$

$$w_{n-1} = d + e,$$

$$w_{n-2} = d + 2e,$$

.....

Για τρία κριτήρια

$$w_3 = d,$$

$$w_2 = d + e,$$

$$w_1 = d + 2e,$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = d + (d+e) + (d+2e) = 3d + 3e.$$

Απαιτώντας την ισχύ της κανονικότητας των βαρών:

$$3d + 3e = 1.$$

Γενικά για n κριτήρια, το άθροισμα είναι:  
 $n*d + n*(n-1)*(1/2)*e = 1$  (18.90)

Υπολογίζοντας το d ως τη μέση τιμή μεταξύ n περιπτώσεων:  
 $d = [(1/n) + 0 + 0 + \dots + 0 ]/n = 1/n^2$  (18.91)

όπου σε n-1 περιπτώσεις d = 0 και μόνο σε μία περίπτωση d = 1/n  
 Η (18.90) δυνάμει της (18.91) δίδει:  
 $e = 2/n^2$  (18.92)

Οπότε για n κριτήρια, το μέσο σχετικό βάρος του K<sub>j</sub> κριτηρίου (j στη σειρά σπουδαιότητας), ισούται με:  
 $w_j = d + (n-j)*e$  (18.93)

### 18.7.3 Δημιουργία τιμών ανά κριτήριο

Εάν υπάρχουν ποσοτικές εκφράσεις των επιδόσεων ανά κριτήριο K<sub>j</sub>, ήτοι:

$P_{1,j}, P_{2,j}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{m,j}$   
 Και εάν όσο μεγαλύτερη είναι μία επίδοση τόσο καλύτερη είναι, τότε:  
 $P_{j, \max} = \max \{P_{1,j}, P_{2,j}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{m,j}\}$  (18.94)

και  
 $P_{j, \min} = \min \{P_{1,j}, P_{2,j}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{m,j}\}$  (18.95)

Επομένως, μπορούμε να μετατρέψουμε επιδόσεις σε αξιακές οντότητες, με τους ακόλουθους τρόπους:

Πρώτος τρόπος:  
 $v_{i,j} = (P_{i,j} - P_{j, \min}) / (P_{j, \max} - P_{j, \min})$  (18.96)

Δεύτερος τρόπος:  
 $v_{i,j} = (P_{j, \max} - P_{i,j}) / (P_{j, \max} - P_{j, \min})$  (18.97)

Μεταξύ των ανωτέρω δύο τρόπων, ο πρώτος πρέπει να προτιμάται όταν η τιμή P<sub>i,j</sub> είναι εγγύτερα στην P<sub>j,max</sub> από ό,τι στην P<sub>j, min</sub>. Αντιστοίχως, ο δεύτερος τρόπος πρέπει να προτιμάται όταν η τιμή P<sub>i,j</sub> είναι εγγύτερα στην P<sub>j, min</sub> από ό,τι στην P<sub>j,max</sub>. Επομένως, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται στον αριθμητή από τις ποσότητες P<sub>j,max</sub>, P<sub>j, min</sub> εκείνη από την οποία η τιμή P<sub>i,j</sub> ευρίσκεται μακρύτερα. Αυτό, διότι όταν η τιμή P<sub>i,j</sub> ευρίσκεται πλησίον κάποιας τιμής (είτε της P<sub>j,max</sub>, είτε της P<sub>j, min</sub>), η διαφορά αυτής της τιμής από την P<sub>i,j</sub> επηρεάζεται από τοπικές συνθήκες της συνάρτησης και δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτική και αξιόπιστη. Όταν σε κάποιο πραγματικό πρόβλημα, έχουμε διασπορά τιμών τέτοια ώστε αρκετές τιμές εκ των P<sub>i,j</sub> να ευρίσκονται πλησίον της P<sub>j,max</sub> και αρκετές τιμές εκ των P<sub>i,j</sub> να ευρίσκονται πλησίον της P<sub>j,min</sub>, τότε μπορούμε για το σύνολο των τιμών να χρησιμοποιήσουμε και τους δύο τύπους ή να επιλέξουμε από τους δύο κάποιον, με κριτήριο το σε πιο άκρο ευρίσκονται πλησιέστερα περισσότερες εκ των τιμών P<sub>i,j</sub>.

Τρίτος τρόπος:  
 $v_{i,j} = P_{i,j} / P_{j, \max}$  (18.98)

Εάν υπάρχει μόνον ποιοτική σχέση μεταξύ των επιδόσεων στο κριτήριο K<sub>j</sub>, ως ακολούθως:  
 $P_{1,j} \geq P_{2,j} \geq \dots \geq P_{i,j} \geq \dots \geq P_{m,j}$  (18.99)

Τότε:  
 $\max\{v_{i,j}\} = 1,$  (18.100)

$\min\{v_{i,j}\} = 0,$  (18.101)

και οι υπόλοιπες v<sub>i,j</sub> εξάγονται από τη σχέση:

a \* z

όπου

a: φυσικοί αριθμοί: 0, 1, 2, ..., m-1.

$z = 1 / (m-1)$  (18.102)

Είναι σαφές ότι το (m-1) είναι το πλήθος των βημάτων μεταξύ των m το πλήθος εναλλακτικών λύσεων.

Για  $a = 0$ ,  $v_{i,j} = 0$ .

Για  $a = m-1$ ,  $v_{i,j} = 1$ .

Εάν

$$P_{1,j} - P_{2,j} = P_{2,j} - P_{3,j} = \dots = P_{m-1,j} - P_{m,j} \quad (18.103)$$

τότε:

$$v_{i,j} = (m-i) / (m-1) = (m-i) * z \quad (18.104)$$

Έτσι, παραδείγματος χάρη για  $m = 4$ :

$$v_{1,j} = (4-1)/3 = 1,00,$$

$$v_{2,j} = (4-2)/3 = 0,67,$$

$$v_{3,j} = (4-3)/3 = 0,33,$$

$$v_{4,j} = (4-4)/3 = 0,00.$$

#### 18.7.4 Εξαγωγή χρησιμότητων

Οι μερικές χρησιμότητες  $u_{i,j}$  μπορούν να θεωρηθούν ως συναρτήσεις των βαρών  $w_j$  και των τιμών  $v_{i,j}$ . Σε μία γενική φόρμα, κάθε χρησιμότητα μπορεί να εκφρασθεί ως ακολούθως:

$$u_{i,j} = u_{i,j}(w_j, v_{i,j}) \quad (18.105)$$

Στον απλούστερο και πιο κοινό τύπο, οι μερικές χρησιμότητες υπολογίζονται ως:

$$u_{i,j} = w_j * v_{i,j} \quad (18.106)$$

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η ολική χρησιμότητα  $U_i$ . Συνήθως χρησιμοποιείται η σχέση:

$$U_i = \sum_j (u_{i,j}) \quad (18.107)$$

Η σχέση αυτή ενέχει την παραδοχή της πλήρους ανεξαρτησίας μεταξύ όλων των κριτηρίων αξιολόγησης. Όντως, πολλές φορές αυτή η παραδοχή ισχύει. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, κατά τις οποίες δεν μπορούν να θεωρηθούν όλα τα κριτήρια ανεξάρτητα μεταξύ τους (Tsamboulas D. – Yiotis G. – Mikroudis G., 2007). Π.χ. εάν έχουμε –μεταξύ άλλων- τα κριτήρια της Καθαρής Παρούσας Αξίας και των Νέων Θέσεων Εργασίας, για την αποτίμηση/αξιολόγηση Εναλλακτικών Λύσεων και εφόσον ένα τμήμα από τα οφέλη έχει εκ των προτέρων οριστεί ότι θα δαπανηθεί για Νέες Θέσεις Εργασίας, είναι πιθανό η ίδια μερική χρησιμότητα να έχει προσμετρηθεί δύο φορές, μία φορά ως τμήμα της Καθαρής Παρούσας Αξίας και άλλη μία φορά ως υποσύνολο των Νέων Θέσεων Εργασίας. Στην περίπτωση αυτή η απλή αθροιστική σχέση της μορφής (18.107) επιφέρει διπλό υπολογισμό (double counting).

Επομένως, έχοντας προσδιορίσει τα βάρη των κριτηρίων και τις αξιακές οντότητες, δεν έχουμε προσδιορίσει μονοσήμαντα και τις Ολικές Χρησιμότητες των εναλλακτικών, καθότι, (αν μη τι άλλο), δεν ισχύει πάντοτε ο απλός αθροιστικός τύπος (18.107).

Στις περιπτώσεις όπου δεν ισχύει ο τύπος (18.107), πρέπει να αναζητηθεί σχέση ικανοποιητικής έκφρασης της όποιας εξάρτησης μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης.

Εάν για παράδειγμα έχουμε συνολικά δύο κριτήρια  $K_j$  και  $K_{j'}$ , μεταξύ τους εξαρτημένα και εάν έχει ιεραρχηθεί το  $K_j$  ως σπουδαιότερο του  $K_{j'}$ , τότε για κάθε εναλλακτική  $E_i$ , η ολική χρησιμότητα  $U_i$  δεν θα αποδίδεται από τη σχέση:

$$U_i = u_{i,j} + u_{i,j'} \quad (18.108)$$

αλλά θα αποδίδεται από τη σχέση:

$$U_i = u_{i,j} + u_{i,j'} * \sin(\omega_{j,j'}) \quad (18.109)$$

όπου

$\sin(\omega_{j,j'})$ : το ημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ των κριτηρίων  $K_j$  και  $K_{j'}$ .

Η σχέση (18.109) έχει γενική ισχύ, αφού στην περίπτωση των ανεξάρτητων κριτηρίων καταλήγει στην:

$$U_i = u_{i,j} + u_{i,j'} * \sin(90 \text{ μοιρών}) = u_{i,j} + u_{i,j'} * 1 = u_{i,j} + u_{i,j'} \quad (18.110)$$

ενώ στην περίπτωση των πλήρως εξαρτημένων (συγγραμμικών κριτηρίων) καταλήγει στην:

$$U_i = u_{i,j} + u_{i,j'} * \sin(0 \text{ μοιρών}) = u_{i,j} + u_{i,j'} * 0 = u_{i,j} \quad (18.111)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 19: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζεται σε βήματα αλληλουχίας, τα οποία ανταποκρίνονται στη φυσική της πορεία και το θεωρητικό της πλαίσιο.

### **Βήμα 1ο: Κριτήρια αξιολόγησης: Καθορισμός-Συνάφεια-Ενοποίηση-Ιεράρχηση.**

#### **Επιμέρους Βήμα 1.Α. Καθορισμός κριτηρίων αξιολόγησης.**

Ένας ή περισσότεροι Αποφασίζοντες καθορίζουν τα κριτήρια αξιολόγησης.

#### **Επιμέρους Βήμα 1.Β. Καθορίζοντας τη γωνία μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος αυτών (των κριτηρίων). Εννοιολογική και πρακτική συνάφεια κριτηρίων.**

Στο παρόν βήμα, διερευνάται ο βαθμός συνάφειας μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος αυτών. Αναφορικά με κάθε ζεύγος κριτηρίων, για μία σχετική μεταβολή σε επίδοση του ενός κριτηρίου, υπολογίζεται η προκαλούμενη μεταβολή σε επίδοση του άλλου. Επομένως, το συνημίτονο κάθε γωνίας μεταξύ των δύο κριτηρίων καθορίζεται:

$$\cos\omega (j,j') = (\Delta\phi_{j'}/\phi_{j'}) / (\Delta\phi_j/\phi_j)$$

και/ή

$$\cos\omega (j',j) = (\Delta\phi_j/\phi_j) / (\Delta\phi_{j'}/\phi_{j'}) \quad (19.1)$$

Η ισχύς εκάστης εκ των δύο αυτών σχέσεων εξαρτάται από το εάν συνάδει με την ακόλουθη σχέση της τριγωνομετρίας:

$$-1 \leq \cos\omega (i,j) \leq 1 \quad (19.2)$$

Κατόπιν του καθορισμού των συνημιτόνων, οι αντίστοιχες γωνίες και τα ημίτονα αυτών ευρίσκονται.

Έτσι, επιχειρείται η μόρφωση του Πίνακα Ημιτόνων των γωνιών μεταξύ των κριτηρίων ανά δύο.

Από τη μορφή ολόκληρου του Πίνακα Ημιτόνων εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό η δυνατότητα ενοποίησης κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια.

Διακρίνονται δύο κύριες περιπτώσεις:

(I) Η μόρφωση του Πίνακα Ημιτόνων είναι ασθενής, αφού κάποιες τιμές ημιτόνων ζευγών κριτηρίων δεν μπορεί να προσδιορισθούν με αξιοπιστία. Τότε, μπορεί με βάση την εννοιολογική συνάφεια να επιχειρηθεί ενοποίηση μεταξύ κριτηρίων.

(II) Η μόρφωση του Πίνακα Ημιτόνων είναι ισχυρή και ολική, αλλά δεν προκύπτουν συγκεκριμένες ομάδες κριτηρίων. Αυτό είναι στοιχείο που δεν ενθαρρύνει αλλά αποτρέπει σε μεγάλο βαθμό την ενοποίηση των κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια.

**Επιμέρους Βήμα 1.Γ. Ενδεχόμενη ενοποίηση κριτηρίων αξιολόγησης.** Με βάση το βήμα 1.Β. αποφασίζεται η ενοποίηση ή μη των κριτηρίων αξιολόγησης (καλούμενα υπο-κριτήρια) σε ευρύτερα κριτήρια. Τέτοια ευρύτερα κριτήρια, έχουν ήδη προταθεί. Όπως προκύπτει, η εν δυνάμει ενοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης πρέπει να εξετάζεται ως προς την εννοιολογική συνάφεια των κριτηρίων, αλλά και ως προς την οριζόμενη γωνία μεταξύ αυτών ανά δύο. Στην περίπτωση (I) γενικά μπορεί να γίνει ενοποίηση κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια. Στην περίπτωση (II) όμως, η συνάφεια μεταξύ κριτηρίων αποδεικνύεται ιδιαίτερα ασθενής, άρα γενικά δεν συνιστάται η ενοποίησή τους σε ευρύτερα κριτήρια.

### **Επιμέρους Βήμα 1.Δ. Δυνατότητες ιεράρχησης των κριτηρίων αξιολόγησης.**

Αναλόγως των ανωτέρω αναφερομένων περιπτώσεων του Πίνακα Ημιτόνων (γωνιών των κριτηρίων ανά ζεύγος), έχουμε:

(I) Έχουν ήδη σχηματισθεί ευρύτερα κριτήρια (βήμα 1.Γ.). Με δεδομένη την σημαντική έλλειψη στοιχείων (από το βήμα 1.Γ.), δεν είναι δυνατή η αξιόπιστη μόρφωση και εφαρμογή Πίνακα Αλληλεπίδρασης. Δεν λαμβάνει χώρα ιεράρχηση των ευρύτερων κριτηρίων αξιολόγησης.

(II) Με βάση τα αναφερθέντα στο βήμα 1.Γ., δεν γίνεται ενοποίηση των κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια. Λαμβάνει χώρα στο παρόν βήμα (1.Δ.) μία ολική ιεράρχηση των κριτηρίων, είτε με βάση μία βασική ισχύουσα πολιτική, εάν αυτή υφίσταται, είτε (αλλιώς) με βάση τον Πίνακα Αλληλεπίδρασης.

Παρατήρηση 1<sup>η</sup>: Σε οποιαδήποτε από τις επιμέρους περιπτώσεις [(I), (II)], μπορεί, εάν δεν υφίσταται άλλη δυνατότητα ιεράρχησης κριτηρίων (ευρύτερων κριτηρίων ή υπο-κριτηρίων) μεταξύ τους να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της κατά ζεύγη κριτηρίων σύγκρισης, όπου

$$\begin{aligned} w_{ij} &= 1,00, \text{ εάν το κριτήριο } i \text{ κρίνεται σπουδαιότερο του κριτηρίου } j, \\ w_{ij} &= 0, \text{ εάν το κριτήριο } i \text{ κρίνεται ολιγότερο σπουδαίο του κριτηρίου } j, \\ w_{ij} &= 0,50, \text{ εάν το κριτήριο } i \text{ κρίνεται ισοδύναμο του κριτηρίου } j, \end{aligned} \quad (19.3)$$

και εν συνεχεία να γίνει ένας προσδιορισμός της στάθμισης/ιεράρχησης των κριτηρίων βάσει της σχέσης

$$W_i = [\sum_j (w_{ij})] / \{\sum_i [\sum_j (w_{ij})]\}. \quad (19.4)$$

Παρατήρηση 2<sup>η</sup>: Επίσης, μπορεί να γίνει χρήση της προτεινομένης τεχνικής χειρισμού της αβεβαιότητας.

Οπότε για  $n$  κριτήρια, το μέσο σχετικό βάρος του  $K_j$  κριτηρίου ( $j$  στη σειρά σπουδαιότητας), ισούται με:

$$w_j = d + (n-j)*e \quad (19.5)$$

### **Βήμα 2ο: Επιδόσεις των Εναλλακτικών στα Κριτήρια: Αναγωγή σε τιμές / τεχνητές επιδόσεις.**

Σε οποιαδήποτε από τις περιπτώσεις (I), (II), έχουμε τα ακόλουθα:

Οι Αποφασίζοντες καθορίζουν τις συναρτήσεις αναγωγής από τις αρχικές φυσικές σε τεχνητές επιδόσεις. Τέτοιες συναρτήσεις ανάγουν φυσικές επιδόσεις  $\varphi_{j,k}$  σε τεχνητές, οι οποίες συμβολίζονται με  $g(i,j,k'$ initial) [περίπτωση (I)] ή  $g(i,j$  initial) [περίπτωση (II)].

Ο δείκτης “  $k'$  ” είναι δείκτης υποκριτηρίου απολύτως εντός του ευρύτερου κριτηρίου [περίπτωση (I)], ενώ ο δείκτης “  $k$  ” (ο οποίος συναντήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο) αναφέρεται στη σχετική σειρά των επιδόσεων [επίσης περίπτωση (I)].

Παρατήρηση 1<sup>η</sup>: Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η με συναρτησιακή δομή αναγωγή σε τεχνητή κλίμακα, μπορεί να εφαρμοσθεί η κανονικοποίηση επιδόσεων (ως οiwονεί κλίμακα), από τη σχέση:

$$g_{i,j} \text{ initial} = (\varphi_{i,j}) / [\max_i (\varphi_{i,j})] \quad (19.6)$$

Παρατήρηση 2<sup>η</sup>: Ακόμη, είναι δυνατή η αξιοποίηση συγκρίσεων κατά ζεύγη επιδόσεων ανά κριτήριο, με βάση την τεχνική που αναπτύχθηκε, προς δημιουργία οiwονεί κλίμακας, όπου η επίδοση  $Pl,i$  κάθε εναλλακτικής λύσης  $l$  στο κριτήριο  $i$  ευρίσκεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Pl,i = \sum l' (pl,l',i) \quad (19.7)$$

Παρατήρηση 3<sup>η</sup>: Επίσης, κυρίως σε ποιοτικά κριτήρια, μπορεί να γίνει χρήση της προτεινομένης τεχνικής χειρισμού της αβεβαιότητας:

$$v_{i,j} = (m-i) / (m-1) = (m-i) * z \quad (19.8)$$

### **Βήμα 3ο: Η επιρροή του Χρόνου / Δυναμική με το Χρόνο αξιολόγησης.**

Επισημαίνεται, ότι ασχέτως του τρόπου με τον οποίο έχει γίνει η αναγωγή από τις φυσικές στις τεχνητές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια, είναι δυνατόν να γίνει θεώρηση και εφαρμογή της επιρροής του χρόνου στη διαδικασία αξιολόγησης. Αυτό συμβαίνει διότι για την ποσοτικοποίηση της όποιας χρονικής επιρροής, χρησιμοποιούνται οι φυσικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια. Επομένως, ακόμη και εάν έχει ακολουθηθεί μία απλή μέθοδος/τεχνική για την εξαγωγή τεχνητών επιδόσεων, όπως π.χ. η μέθοδος της κανονικοποίησης των επιδόσεων, είναι και πάλι δυνατή η θεώρηση και εφαρμογή της χρονικής επιρροής στη διαδικασία αξιολόγησης.

Αναφορικά με τις περιπτώσεις (I), (II), σε οποιαδήποτε εξ' αυτών έχουμε τα ακόλουθα:

#### **Επιμέρους Βήμα 3.Α.: Καθορίζεται η επιθυμητή βέλτιστη με το χρόνο συνάρτηση επίδοσης κάθε κριτηρίου**

Οι Αποφασίζοντες δίδουν την επιθυμητή μορφή των  $f_{j,k}(\text{best})$  [περίπτωση (I)] ή  $f_j(\text{best})$  [περίπτωση (II)].

#### **Επιμέρους Βήμα 3.Β.: Για κάθε κριτήριο και εναλλακτική, ευρίσκεται η απόκλιση (εφόσον είναι εφικτό) μεταξύ της επιθυμητής βέλτιστης και της προβλεπόμενης πραγματικής συνάρτησης επίδοσης με το χρόνο**

Οι αποκλίσεις μεταξύ  $f_{j,k}(\text{best})$  και  $f_{i,j,k'}(t)$  [περίπτωση (I)], ή μεταξύ  $f_j(\text{best})$  και  $f_{i,j}(t)$  [περίπτωση (II)] υπολογίζονται.

Επίσης, τα όρια  $O1$  [υποκριτήριο:  $j,k'$  για περίπτωση (I) ή κριτήριο  $j$  για περίπτωση (II)] και  $O2$  [υποκριτήριο:  $j,k'$  για περίπτωση (I) ή κριτήριο  $j$  για περίπτωση (II)] καθορίζονται. Έτσι οι χρονικοί τελεστές  $x_{i,j,k'}$  [για περίπτωση (I)] ή  $x_{i,j}$  [για περίπτωση (II)] προκύπτουν.

#### **Επιμέρους Βήμα 3.Γ.: Ευρίσκεται για κάθε κριτήριο η επίδοση σε κάθε εναλλακτική αφού ληφθεί υπόψη η αντίστοιχη επιρροή της με το χρόνο συνάρτησής της**

Για την περίπτωση (I): μπορούν να ευρεθούν τα  $g_{i,j,k'}$  από την εξίσωση:

$$g_{i,j,k'} = g_{i,j,k'}^{\text{initial}} * x_{i,j,k'} \quad (19.9.a)$$

Αντιστοίχως για την περίπτωση (II): μπορούν να ευρεθούν τα  $g_{i,j}$  από την εξίσωση:

$$g_{i,j} = g_{i,j}^{\text{initial}} * x_{i,j} \quad (19.9.b)$$

### **Βήμα 4ο: Μόρφωση της Ολικής Επίδοσης κάθε Εναλλακτικής.**

#### **Επιμέρους Βήμα 4.Α.:Επιρροή ενδεχόμενης συνάφειας/εξάρτησης κριτηρίων στην υπόσταση των επιδόσεών τους**

Αναλόγως των ανωτέρω αναφερομένων περιπτώσεων (I), (II), έχουμε:

- Στην περίπτωση (I), εντός κάθε ευρύτερου κριτηρίου “j” και για την εναλλακτική “i”, οι επιδόσεις  $g_{i,j,k'}$  διατάσσονται, αναλόγως με τα σχετικά τους μεγέθη. Έτσι, ο δείκτης “k” ενεργοποιείται και εντός κάθε ευρύτερου κριτηρίου ισχύει η ακόλουθη διάταξη:

$$g_{i,j,1} \geq g_{i,j,2} \geq \dots \geq g_{i,j,k} \geq \dots \geq g_{i,j,1} \quad (19.10)$$

Εν συνεχεία, μία συνολική επίδοση για κάθε εναλλακτική “i” και κάθε κριτήριο “j” υπολογίζεται:

Ευρίσκονται οι ποσότητες  $G_{i,j}$  από την εξίσωση:

$$G_{i,j} = \sum_k [(1/k) * (g_{i,j,k})] \quad (19.11)$$

Ευρίσκονται οι ποσότητες  $g_{i,j}$  από την εξίσωση:

$$g_{i,j} = G_{i,j} / [\sum_k (1/k)] \quad (19.12)$$

- Στην περίπτωση (II), αναφορικά με κάθε κριτήριο ( $K_j$ ) και για κάθε εναλλακτική ( $E_i$ ), ευρίσκεται η συνιστώσα της επίδοσης που είναι ανεξάρτητη από τα σπουδαιότερα αυτού κριτήρια, από την ακόλουθη σχέση:

$$g_{i,j}^{\perp(1,2,3, \dots, j-1)} = g_{i,j} * \sin \omega_{j,(1, 2, 3, \dots, j-1)} \quad (19.13)$$

(προσεγγιστικός τρόπος)

- είτε από την ακόλουθη σχέση:
- $$g_{i,j}^{\perp(1,2,3, \dots, j-1)} = g_{i,j} * \{[\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \mathbf{K3}, \dots, \mathbf{Kj-1}, \mathbf{Kj})] / [\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \mathbf{K3}, \dots, \mathbf{Kj-1})]\} \quad (19.14)$$
- (ακριβής τρόπος)

#### **Επιμέρους Βήμα 4.B.: Η επιρροή των τιμών των τεχνητών επιδόσεων – Χρηστική βαρύτητα**

Αναλόγως των ανωτέρω αναφερομένων περιπτώσεων (I), (II), έχουμε:

- Στην περίπτωση (I), εάν για μία εναλλακτική “i” μία σφαιρική επίδοση  $g_{i,j}$  είναι μικρότερη ή ίση με το «2» (στην τεχνητή κλίμακα), ήτοι ισχύει η σχέση  $g_{i,j} \leq 2$ , τότε για την υπόψη εναλλακτική όλες οι συνολικές επιδόσεις  $g_{i,j}$  θεωρούνται ίσες με την  $g_{i,j}$ . Εάν για μία εναλλακτική, περισσότερες της μίας συνολικές επιδόσεις είναι ίσες ή μικρότερες του «2», τότε η μικρότερη από αυτές θεωρείται ως η κρίσιμη συνολική επίδοση  $g_{i,j}$ .

Ακολουθως, οι ποσότητες  $w_1$  και  $w_2$  (ως παρουσιάστηκαν στο διάγραμμα βαρών προηγούμενης παραγράφου) καθορίζονται από τον Αποφασίζοντα.

Ευρίσκονται οι σταθμισμένες επιδόσεις, ήτοι:

$$W_{i,j} = \int W(g) dg \quad (19.15)$$

με το «0» ως κάτω όριο ολοκλήρωσης και το  $g_{i,j}$  ως άνω όριο ολοκλήρωσης. Η συνάρτηση  $W(g)$  παρουσιάζεται στο διάγραμμα προηγούμενης παραγράφου.

- Στην περίπτωση (II) δεν ενεργοποιείται το παρόν επιμέρους βήμα.

#### **Επιμέρους Βήμα 4.Γ.: Υπολογισμός της Ολικής Επίδοσης κάθε Εναλλακτικής.**

Αναλόγως των ανωτέρω αναφερομένων περιπτώσεων (I), (II), έχουμε:

- Στην περίπτωση (I), μία τελική επίδοση  $NE_{i,j}$  ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική “i” και ανά ευρύτερο κριτήριο “j”, από την ακόλουθη σχέση:

$$NE_{i,j} = [\sum_k (1/k)] * W_{i,j} \quad (19.16)$$

Και εν συνεχεία:

Μία γενική τελική επίδοση  $NE_i$  ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική “i”:

$$NE_i = \sum_j NE_{i,j} \quad (19.17)$$

- Στην περίπτωση (II), η ολική επίδοση κάθε εναλλακτικής δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NE_i = \{[g_{i,1}]^b + \sum_j [g_{i,j} * \sin \omega_{j,(1, 2, 3, \dots, j-1)}]^b\}^{1/b} \quad (19.18)$$

όπου ο j κυμαίνεται από j=2 έως j, κατά τον προσεγγιστικό τρόπο και από τη σχέση:



$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^b + \sum_{j=2}^n \{ g_{i,j} \cdot \left\{ \frac{[\det(K_1, K_2, \dots, K_{j-1}, K_j)]}{[\det(K_1, K_2, \dots, K_{j-1})]} \right\}^b \} \}^{1/b} \quad (19.19)$$

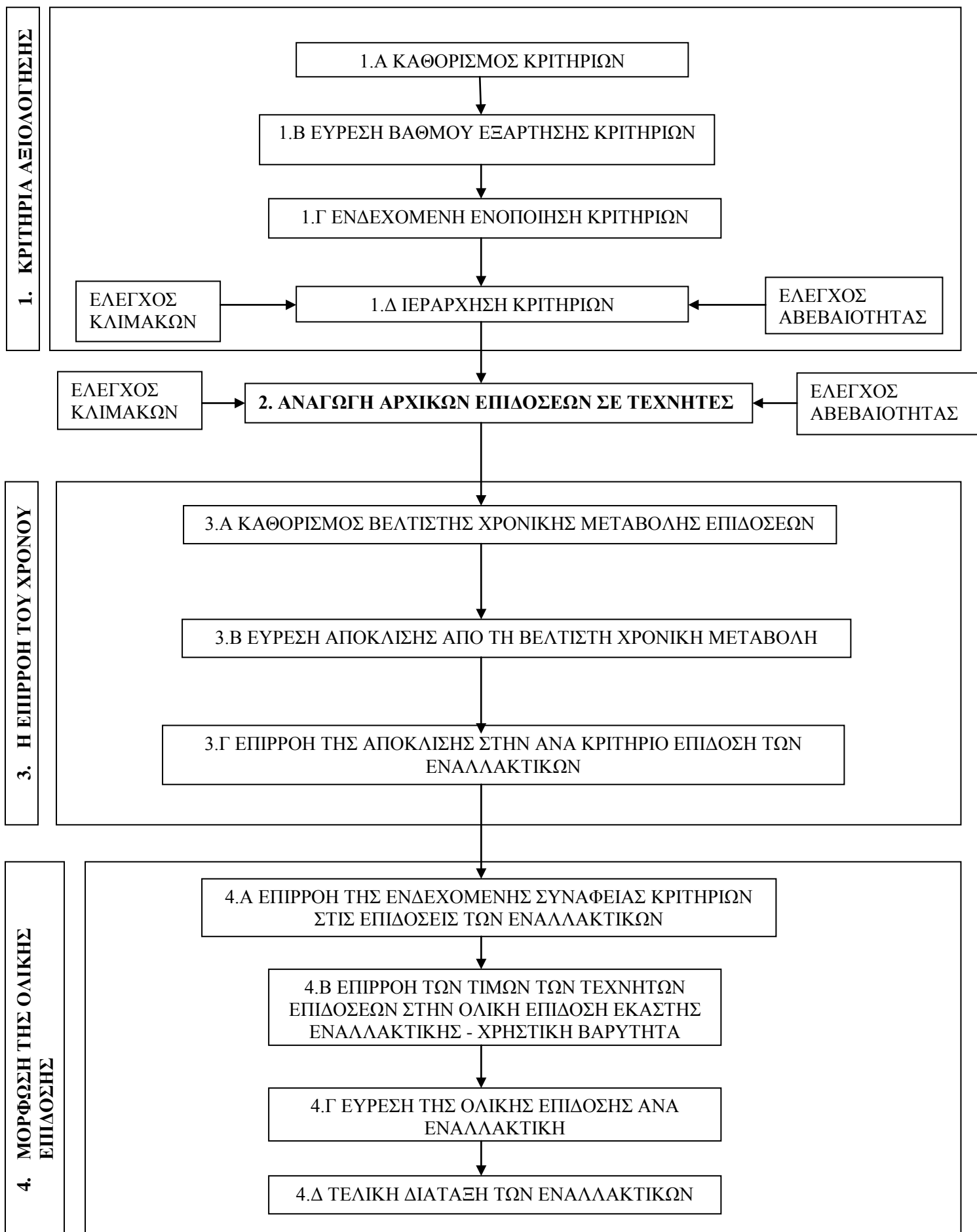
όπου ο  $j$  κυμαίνεται από  $j=2$  έως  $j$ , κατά τον ακριβή τρόπο.

Στους ανωτέρω τύπους οι επικρατέστερες τιμές του εκθέτη  $b$  είναι η 1 και η 2.

**Επιμέρους Βήμα 4.Δ.: Τελική Διάταξη των Εναλλακτικών.**

Οι εναλλακτικές διατάσσονται συμφώνως με τις γενικές τελικές τους επιδόσεις, ήτοι η μεγαλύτερη  $NE_i$ , η καλύτερη εναλλακτική  $E_i$ .

# ΛΟΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ



## ΕΝΟΤΗΤΑ Δ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 20: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

#### 20.1 Εισαγωγικά στις Εφαρμογές της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Με βάση όσα ανεπτύχθησαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 19, ανάλογα με τα στοιχεία τα οποία διατίθενται σε κάθε πρόβλημα αξιολόγησης, ο αλγόριθμος της μεθόδου εξειδικεύεται, διακρίνοντας δύο κυρίως περιπτώσεις:

- *Περίπτωση (I)*, όπου δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία ώστε να προκύψουν με αξιοπιστία οι μεταξύ των κριτηρίων βαθμοί εξάρτησης ως συνημίτονα γωνιών μεταξύ των αντιστοιχούντων σε αυτά διανυσμάτων κατά γεωμετρική-διανυσματική προσομοίωση.
- *Περίπτωση (II)*, όπου υπάρχουν επαρκή στοιχεία ώστε να προκύψουν με αξιοπιστία οι μεταξύ των κριτηρίων βαθμοί εξάρτησης ως συνημίτονα γωνιών μεταξύ των αντιστοιχούντων σε αυτά διανυσμάτων κατά γεωμετρική-διανυσματική προσομοίωση.

#### 20.2 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας: 1ο Παράδειγμα (Γενική Εφαρμογή)

Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει ένα παράδειγμα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Η εφαρμογή παρουσιάζεται σε αλληλουχία βήματα, όπως έχει περιγραφεί στην προτεινόμενη μεθοδολογία. Η συγκεκριμένη εφαρμογή (ως αναλύεται στη συνέχεια), εμπίπτει στην περίπτωση (I), οπότε εφαρμόζεται και η αντίστοιχη μαθηματική εξειδίκευση.

#### **Βήμα 1ο: Κριτήρια αξιολόγησης: Καθορισμός-Συνάφεια-Ενοποίηση-Ιεράρχηση.**

##### **Επιμέρους Βήμα 1.Α. Καθορισμός κριτηρίων αξιολόγησης.**

Τρεις Εναλλακτικές, ήτοι οι E1, E2, E3, αξιολογούνται με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης.

Οι Αποφασίζοντες αποφασίζουν ότι τα κριτήρια αξιολόγησης είναι τα ακόλουθα:

- Ρύπανση Περιβάλλοντος
- Επιπτώσεις στη Χλωρίδα
- Επιπτώσεις στην Πανίδα
- Ασφάλεια Χρηστών
- Αστική Ανάπτυξη Περιοχών
- Εθνική Στρατηγική
- Οικονομικό Κόστος Χρηστών
- Χρονικό Κόστος Χρηστών
- I.R.R. (Internal Rate of Return)
- Δημιουργία Νέων Θέσεων Εργασίας

Οι δείκτες που υποστασιοποιούν τα κριτήρια αυτά παρουσιάζονται εν συνεχεία (στο Βήμα 2<sup>ο</sup>).

Οι φυσικές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια παρουσιάζονται εν συνεχεία (Πίνακας 20.3).

### **Επιμέρους Βήμα 1.Β. Καθορίζοντας τη γωνία μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος αυτών (των κριτηρίων). Εννοιολογική και πρακτική συνάφεια κριτηρίων.**

Εμπίπτουμε στην περίπτωση (I), καθότι θεωρείται ότι δεν υφίστανται σημαντικά στοιχεία που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εύρεση των γωνιών μεταξύ των κριτηρίων. Οπότε, μπορεί με βάση μόνο την εννοιολογική συνάφεια μεταξύ κριτηρίων, να ενοποιηθούν αυτά σε ευρύτερα κριτήρια.

### **Επιμέρους Βήμα 1.Γ. Ενδεχόμενη ενοποίηση κριτηρίων αξιολόγησης.**

Οι Αποφασίζοντες ενοποιούν τα κριτήρια (δηλαδή τα καλούμενα υπο-κριτήρια) σε ευρύτερα κριτήρια, με βάση την εννοιολογική συνάφεια. Έτσι, τα ευρύτερα κριτήρια έχουν ως ακολούθως:

- 1) Περιβάλλον
- 2) Ανθρώπινος Παράγοντας
- 3) Κοινωνικο-πολιτιστικός Παράγοντας
- 4) Χρηστικός Παράγοντας
- 5) Οικονομικός Παράγοντας

Ακολούθως, τα κριτήρια αξιολόγησης ενοποιούνται σε προαναφερθέντα ευρύτερα κριτήρια ως εξής:

*Κριτήριο 1: Περιβάλλον. Υποκριτήρια:*

- 1.1': Περιβαλλοντική Ρύπανση
- 1.2': Επιπτώσεις στη Χλωρίδα
- 1.3': Επιπτώσεις στην Πανίδα

*Κριτήριο 2: Ανθρώπινος Παράγοντας. Υποκριτήρια:*

- 2.1': Ασφάλεια Χρηστών

*Κριτήριο 3: Κοινωνικο-πολιτιστικός Παράγοντας. Υποκριτήρια:*

- 3.1': Αστική Ανάπτυξη Περιοχών
- 3.2': Εθνική Στρατηγική

*Κριτήριο 4: Χρηστικός Παράγοντας. Υποκριτήρια:*

- 4.1': Οικονομικό Κόστος Χρηστών
- 4.2': Χρονικό Κόστος Χρηστών

*Κριτήριο 5: Οικονομικός Παράγοντας. Υποκριτήρια:*

- 5.1': I.R.R.
- 5.2': Νέες Θέσεις Εργασίας

Στους ανωτέρω διπλούς δείκτες των υποκριτηρίων, δηλαδή στους “j,k”, ο δείκτης “j” δηλώνει το ευρύτερο κριτήριο στο οποίο ανήκει το υποκριτήριο, ενώ ο δείκτης “k” δηλώνει το ίδιο το υποκριτήριο εντός του ευρύτερου κριτηρίου. Για παράδειγμα, η Περιβαλλοντική Ρύπανση, οι Επιρροές στη Χλωρίδα και οι Επιρροές στην Πανίδα, εμπεριέχονται στο ευρύτερο κριτήριο Περιβάλλον.

### **Επιμέρους Βήμα 1.Δ. Δυνατότητες ιεράρχησης των κριτηρίων αξιολόγησης.**

Επειδή εμπίπτουμε στην περίπτωση (I), δεν λαμβάνει χώρα ιεράρχηση των κριτηρίων αξιολόγησης (τουλάχιστον με την τυπική έννοια του όρου «ιεράρχηση»).

## **Βήμα 2ο: Επιδόσεις των Εναλλακτικών στα Κριτήρια: Αναγωγή σε τιμές / τεχνητές επιδόσεις.**

Οι Αποφασίζοντες καθορίζουν τις συναρτήσεις  $g_j, k'$  ( $f_j, k'$ ). Τέτοιες συναρτήσεις ανάγουν φυσικές επιδόσεις  $f_j, k'$  σε τεχνητές  $g_j, k'$ . Ο δείκτης “k'” είναι απολύτως για κάθε κριτήριο,

ενώ ο δείκτης “ k ” (ο οποίος συναντήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο) αναφέρεται στη σχετική σειρά των επιδόσεων.

*Υποκριτήριο 1.1' Περιβαλλοντική Ρύπανση:* Η αύξηση της εκπομπής NOx μπορεί να θεωρηθεί ως ένας δείκτης. Έστω ότι η προτεινόμενη συνάρτηση είναι η:

$$g_{1,1'} = 10 - \eta_{1,1'} (\varphi_{1,1'})^2$$

Εάν οι Αποφασίζοντες καθορίζουν ότι για  $\varphi_{1,1'} = 150(\%)$ , η αντίστοιχη τιμή είναι  $g_{1,1'} = 0$ , τότε  $\eta_{1,1'} = 0,000444$ . Επομένως  $g_{1,1'} = 10 - 0,000444 * (\varphi_{1,1'})^2$ .

*Υποκριτήριο 1.2' Επιπτώσεις στη Χλωρίδα:* Έστω η επηρεαζόμενη γεωργική-δασική έκταση (ποσοστό της θεωρούμενης γενικά επιφάνειας) αποτελεί ένα δείκτη για το κριτήριο. Εάν:

$$g_{1,2'} = 10 - \eta_{1,2'} * (\varphi_{1,2'})^{2/3}$$

και ότι γίνεται αποδεκτό ότι για  $\varphi_{1,2'} = 100(\%)$ ,  $g_{1,2'} = 0$ , τότε  $\eta_{1,2'} = 0,4643$ .

Επομένως:

$$g_{1,2'} = 10 - 0,4643 * (\varphi_{1,2'})^{2/3}$$

*Υποκριτήριο 1.3' Επιπτώσεις στην Πανίδα:* Έστω η επηρεαζόμενη έκταση πανίδας (ποσοστό της θεωρούμενης γενικά επιφάνειας) αποτελεί ένα δείκτη για το κριτήριο. Εάν:

$$g_{1,3'} = 10 - \eta_{1,3'} * (\varphi_{1,3'})^{2/3}$$

και ότι καθορίζεται ότι για  $\varphi_{1,3'} = 100(\%)$ ,  $g_{1,3'} = 0$ , τότε  $\eta_{1,3'} = 0,4643$ . Επομένως:

$$g_{1,3'} = 10 - 0,4643 * (\varphi_{1,3'})^{2/3}$$

*Υποκριτήριο 2.1' Ασφάλεια Χρηστών:* Οι τιμές για το εν υπόψη κριτήριο δίδονται κατευθείαν σε μία τεχνητή 10-βάθμια κλίμακα. Το κριτήριο αυτό θεωρείται ποιοτικό κριτήριο. Σε προηγούμενη παράγραφο έγινε αναφορά σε τέτοια κριτήρια.

*Υποκριτήριο 3.1' Αστική Ανάπτυξη Περιοχών:* Εάν:

$$g_{3,1'} = \eta_{3,1'} * (\varphi_{3,1'})^{1/2}$$

και γίνεται αποδεκτό ότι για  $\varphi_{3,1'} = 300(\%)$ ,  $g_{3,1'} = 10$ , τότε  $\eta_{3,1'} = 0,5774$ . Επομένως,

$$g_{3,1'} = 0,5774 * (\varphi_{3,1'})^{1/2}$$

*Υποκριτήριο 3.2' Εθνική Στρατηγική:* Το υπόψη κριτήριο θεωρείται ως ποιοτικό. Επομένως μπορεί να αναχθεί απευθείας σε τεχνητή κλίμακα.

*Υποκριτήριο 4.1' Οικονομικό Κόστος Χρηστών:* Ένας δείκτης για το υπόψη κριτήριο είναι η ελάττωση (ποσοστιαίως) του οικονομικού κόστους των χρηστών. Εάν:

$$g_{4,1'} = \eta_{4,1'} * (\varphi_{4,1'})^{1/2}$$

και γίνεται αποδεκτό ότι για  $\varphi_{4,1'} = 100(\%)$ ,  $g_{4,1'} = 10$ , τότε  $\eta_{4,1'} = 1$ . Επομένως:

$$g_{4,1'} = 1 * (\varphi_{4,1'})^{1/2}$$

*Υποκριτήριο 4.2' Χρονικό Κόστος Χρηστών:* Ένας δείκτης για το υπόψη κριτήριο είναι η ελάττωση (ποσοστιαίως) του χρόνου των χρηστών. Εάν:

$$g_{4,2'} = \eta_{4,2'} * (\varphi_{4,2'})^{1/3}$$

και για  $\varphi_{4,2'} = 100(\%)$ ,  $g_{4,2'} = 10$ , τότε  $\eta_{4,2'} = 2,1552$ . Επομένως,

$$g_{4,2'} = 2,1552 * (\varphi_{4,2'})^{1/3}$$

*Υποκριτήριο 5.1' I.R.R.:* Δείκτης και κριτήριο είναι η ίδια οντότητα στην περίπτωση αυτή.

Έστω ότι ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$g_{5,1'} = \eta_{5,1'} * \varphi_{5,1'}, \quad \text{για } IRR \leq 6\%$$

έως της επίδοσης  $g_{5,1}' = \langle 2 \rangle$ , η οποία αντιστοιχεί στο  $IRR = 6\%$ . Τότε, καθορίζεται  $\eta_{5,1}' = 0,3333$ . Έπειτα, για επίδοση  $IRR > 6\%$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία άλλη σχέση για  $g_{5,1}'$ . Έστω ότι αυτή η σχέση είναι η:

$$g_{5,1}' = \eta_{5,1}' * \varphi_{5,1}' + \eta_{5,1}' \text{ για } IRR > 6\%$$

Εάν είναι αποδεκτό ότι για  $\varphi_{5,1}' = 20\%$  αντιστοιχεί η επίδοση  $g_{5,1}' = 10$ , τότε  $\eta_{5,1}' = 0,5714$  και  $\eta_{5,1}' = -1,4284$ . Επομένως:

$$g_{5,1}' = 0,5714 * \varphi_{5,1}' - 1,4284, \quad \text{για } \varphi_{5,1}' \geq 6\%$$

και

$$g_{5,1}' = 0,3333 * \varphi_{5,1}', \quad \text{για } 6\% \geq \varphi_{5,1}' \geq 0\%$$

*Υποκριτήριο 5.2' Νέες Θέσεις Εργασίας:* Δείκτης και κριτήριο είναι η ίδια οντότητα στην περίπτωση αυτή. Έστω  $g_{5,2}' = 0$  για  $\varphi_{5,2}' = 0$  και  $g_{5,2}' = 10$  για  $\varphi_{5,2}' = 100$  (για 100 νέες θέσεις εργασίας). Εάν

$$g_{5,2}' = \eta_{5,2}' * \varphi_{5,2}'$$

τότε  $\eta_{5,2}' = 0,100$  και ακολούθως:

$$g_{5,2}' = 0,100 * \varphi_{5,2}'.$$

Ο επόμενος πίνακας (Πίνακας 20.1) παρουσιάζει συνοπτικά τις συναρτήσεις αναγωγής (από τις φυσικές στις τεχνητές κλίμακες κριτηρίων):

*Πίνακας 20.1: Συναρτήσεις Αναγωγής*

*Table 20.1: Rendering Functions*

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΓΩΓΗΣ
1.1'	$g = 10 - 0,000444 * \varphi^2$
1.2'	$g = 10 - 0,4643 * \varphi^{2/3}$
1.3'	$g = 10 - 0,4643 * \varphi^{2/3}$
2.1'	$g = \varphi$
3.1'	$g = 0,5774 * \varphi^{1/2}$
3.2'	Ποιοτικό Κριτήριο
4.1'	$g = \varphi^{1/2}$
4.2'	$g = 2,1552 * \varphi^{1/3}$
5.1'	$g = 0,5714 * \varphi - 1,4284$ (για $\varphi \geq 6\%$ ) & $g = 0,33 * \varphi$ (για $6\% \geq \varphi \geq 0\%$ )
5.2'	$g = 0,100 * \varphi$

### **Βήμα 3ο: Η επιρροή του Χρόνου / Δυναμική με το Χρόνο αξιολόγηση.**

#### **Επιμέρους Βήμα 3.Α.: Καθορίζεται η επιθυμητή βέλτιστη με το χρόνο συνάρτηση επίδοσης κάθε κριτηρίου**

Οι Αποφασίζοντες δίδουν την επιθυμητή μορφή των  $\varphi_{j,k}(\text{best})$ . Για την απλότητα του παραδείγματος δεν θεωρούνται μεταβολές για όλα τα κριτήρια. Έτσι, για τα κριτήρια 1.2', 1.3', 3.2', 5.1' παραλείπεται η θεώρηση μίας χρονικής μεταβολής. Ο ακόλουθος Πίνακας (Πίνακας 20.2) παρουσιάζει την επιθυμητή για κάθε κριτήριο μεταβολή.

Πίνακας 20.2: Επιθυμητή χρονική μεταβολή για κάθε κριτήριο

Table 20.2: Desirable Time Variations for each Criterion

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ (ΒΕΛΤΙΣΤΗ) ΜΕΤΑΒΟΛΗ
1.1'	$\varphi = \theta$ (σταθερή)
2.1'	$\varphi = \theta$
3.1'	$\varphi = \theta * t^{3/2}$
4.1'	$\varphi = \theta$
4.2'	$\varphi = \theta$
5.2'	$\varphi = \theta * t^{1/2}$

**Επιμέρους Βήμα 3.Β.:** Για κάθε κριτήριο και εναλλακτική, ευρίσκεται η απόκλιση (εφόσον είναι εφικτό) μεταξύ της επιθυμητής βέλτιστης και της προβλεπόμενης πραγματικής συνάρτησης επίδοσης στο χρόνο.

Οι αποκλίσεις μεταξύ  $\varphi_{j,k}$  (best) και  $\varphi_{i,j,k}'(t)$  υπολογίζονται.

Η περίοδος αξιολόγησης για τις εναλλακτικές του παραδείγματος επελέγη να είναι 30 (τριάντα) έτη. Ο ακόλουθος Πίνακας (Πίνακας 20.3) παρουσιάζει τις φυσικές επιδόσεις των εναλλακτικών (δηλαδή των  $E_1, E_2, E_3$ ) στα κριτήρια, ήτοι τις  $\varphi_{i,j,k}'$ .

Πίνακας 20.3: Φυσικές επιδόσεις ανά εναλλακτική

Table 20.3: Physical Performances per Project

ΕΝΝΑΛ./ΚΡΙΤΗΡ.	1.1'	1.2'	1.3'	2.1'	3.1'	3.2'	4.1'	4.2'	5.1'	5.2'
$E_1$	60%	35%	30%	9	60%	9	15%	18%	17%	50
$E_2$	50%	28%	25%	8	80%	7	25%	18%	12%	80
$E_3$	35%	15%	20%	7	45%	7	15%	30%	10%	45

Μπορούμε τώρα να προβλέψουμε την πραγματική με το χρόνο μεταβολή των επιδόσεων των εναλλακτικών. Έστω για παράδειγμα μία προβλεπόμενη επίδοση  $\varphi = \theta' * t$ , σχετικά με την εναλλακτική  $E_3$  και για το κριτήριο 5.2 (δηλαδή χρησιμοποιώντας δείκτες:  $\varphi_{3,5,2}' = \theta_{3,5,2}' * t$ ). Έπειτα, ευρίσκουμε το  $\theta$  το οποίο ανταποκρίνεται στο Βήμα-3Α (δηλαδή το  $\theta_{i,j,k}'$  best) επιλύοντας την εξίσωση:

$$\int (\theta_{i,j,k}') * f(t) dt = [\text{Περίοδος Αξιολόγησης}] * \varphi_{i,j,k}'$$

όπου, το κάτω όριο της ολοκλήρωσης είναι το «0» και το άνω όριο της ολοκλήρωσης είναι η Περίοδος Αξιολόγησης (30 χρόνια στην υπό θεώρηση περίπτωση).

Έτσι, για την Εναλλακτική  $E_3$  και το Κριτήριο 5.2, έχουμε:

$$\int \theta_{3,5,2}' * t^{1/2} dt = 30 * 45. \text{ Έτσι, ευρίσκουμε ότι } \theta_{3,5,2}' = 12,3238.$$

Ακολούθως, καθορίζουμε  $\theta'$  (το οποίο είναι το  $\theta$  για προβλεπόμενη μεταβολή στο χρόνο). Για να επιτύχουμε το στόχο αυτό, η αντίστοιχη εξίσωση επιλύεται Έτσι, για την εναλλακτική  $E_3$  και το κριτήριο 5.2, έχουμε:

$$\int \theta'_{3,5,2}' * t dt = 30 * 45. \text{ Έτσι ευρίσκουμε } \theta'_{3,5,2}' = 3,0000.$$

Τελικώς, οι αποκλίσεις μεταξύ επιθυμητής και προβλεπόμενης εξέλιξης με το χρόνο, καθορίζονται. Έτσι (ως ένα παράδειγμα) για την εναλλακτική «3» και σχετικά με το κριτήριο 5.2', μπορούμε να εύρουμε την προαναφερθείσα απόκλιση μέσω της σχέσης:

$$\int | [\theta_{3,5,2}' * t^{1/2} - \theta'_{3,5,2}' * t] | dt$$

λαμβάνοντας υπό ολοκλήρωση την απόλυτη τιμή της συνάρτησης [ $\theta_{3,5,2} * t^{1/2} - \theta'_{3,5,2} * t$ ] (και τηρώντας τα προαναφερθέντα όρια ολοκλήρωσης).

Έτσι, αυτή η απόκλιση είναι ίση με 284,766. Χάριν απαιτήσεως κανονικοποίησης, διαιρούμε με το [ $\varphi_{3,5,2} * (\text{Περίοδος Αξιολόγησης})$ ] =  $45 * 30 = 1350$ , στην προκειμένη περίπτωση.

Έτσι, η απόκλιση ευρίσκεται ίση με :

$$284,766 / 1350 = 0,210938.$$

Ο ακόλουθος Πίνακας (Πίνακας 20.4) παρουσιάζει τις αποκλίσεις για κάθε εναλλακτική και ανά κριτήριο:

Πίνακας 20.4: Χρονικές αποκλίσεις ανά κριτήριο για κάθε εναλλακτική

Table 20.4: Time Deviations per Criterion for each Project

ΕΝΑΛΛΑΚ./ΚΡΙΤΗΡ.	1.1'	2.1'	3.1'	4.1'	4.2'	5.2'
P1	0,5000	0,0278	0,1638	0,3333	0,0000	0,2106
P2	0,5000	0,0938	0,3718	0,3333	0,0000	0,2112
P3	0,5000	0,2325	0,0000	0,3750	0,0000	0,2109

**Επιμέρους Βήμα 3.Γ.:** Ευρίσκεται για κάθε κριτήριο η επίδοση σε κάθε εναλλακτική αφού ληφθεί υπόψη η αντίστοιχη επιρροή της στο χρόνο.

Ακολουθώντας, καθορίζουμε τις τιμές των Ορίων Χρονικής Απόκλισης ανά Υποκριτήριο, ήτοι τα  $O_1(j,k')$  και  $O_2(j,k')$ . Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 20.5).

Πίνακας 20.5: Τιμές Ορίων Χρονικής Απόκλισης ανά Υποκριτήριο

Table 20.5: The resulted Time Deviations Limits

ΟΡΙΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ	1.1'	2.1'	3.1'	4.1'	4.2'	5.2'
$O_1(j,k')$	0,3572	0,2054	0,3205	0,2996	0,2000	0,2500
$O_2(j,k')$	0,8572	0,7054	0,8205	0,8056	1,0000	1,0000

Έτσι, οι χρονικοί συντελεστές  $x_{i,j,k'}$  προκύπτουν, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 20.6.

Στα υπόλοιπα κριτήρια, οι  $x_{i,j,k'}$  θεωρούνται ίση με το 1,00.

Πίνακας 20.6: Χρονικοί Συντελεστές

Table 20.6: Conversion Time Factors

ΣΥΝΤΕΛ/ΚΡΙΤΗΡ	1.1'	2.1'	3.1'	4.1'	4.2'	5.2'
$x_{1,j,k'}$	0,7143	1,0000	1,0000	0,9333	1,0000	1,0000
$x_{2,j,k'}$	0,7143	1,0000	0,8974	0,9333	1,0000	1,0000
$x_{3,j,k'}$	0,7143	0,9458	1,0000	0,8500	1,0000	1,0000

Από τον Πίνακα των φυσικών επιδόσεων  $\varphi_{i,j,k'}$ , ευρίσκουμε τις τεχνητές επιδόσεις  $g_{i,j,k'}$ , όπως αναφέρθηκε στο Βήμα 2°. Ο ακόλουθος Πίνακας (Πίνακας 20.7) παρουσιάζει τα  $g_{i,j,k'}$  (καλούμενα  $g_{i,j,k'}$  initial) τις συναρτήσεις αρχικών επιδόσεων.



Πίνακας 20.7: Συναρτήσεις Αρχικών Τεχνητών Επιδόσεων

Table 20.7: Initial Artificial Performance Functions

ΕΝΑΛΛΑΚ. / ΚΡΙΤΗΡ.	1.1'	1.2'	1.3'	2.1'	3.1'	3.2'	4.1'	4.2'	5.1'	5.2'
P <sub>1</sub>	8,40	5,03	5,52	9	4,48	9	3,87	5,65	8,29	5,00
P <sub>2</sub>	8,89	5,72	6,03	8	5,16	7	5,00	5,65	5,43	8,00
P <sub>3</sub>	9,46	7,18	6,58	7	3,87	7	3,87	6,70	4,29	4,50

Έπειτα από τα  $(g_{i,j,k'})$  initial, μπορούμε να εύρουμε τα  $g_{i,j,k'}$  ως ακολούθως:

$$g_{i,j,k'} = (g_{i,j,k'}) \text{ initial} * x_{i,j,k'}$$

Ο ακόλουθος Πίνακας (Πίνακας 20.8) παρουσιάζει τα  $g_{i,j,k'}$ :

Πίνακας 20.8: Συναρτήσεις Τεχνητών Επιδόσεων με Χρονική επιρροή

Table 20.8: The Artificial Performance Functions including Time influence

ΕΝΑΛΛΑΚ. / ΚΡΙΤΗΡ.	1.1'	1.2'	1.3'	2.1'	3.1'	3.2'	4.1'	4.2'	5.1'	5.2'
P <sub>1</sub>	6,00	5,03	5,52	9,00	4,48	9,00	3,61	5,65	8,29	5,00
P <sub>2</sub>	6,35	5,72	6,03	8,00	4,63	7,00	4,67	5,65	5,43	8,00
P <sub>3</sub>	6,76	7,18	6,58	6,62	3,87	7,00	3,29	6,70	4,29	4,50

## **Βήμα 4ο: Μόρφωση της Ολικής Επίδοσης κάθε Εναλλακτικής.**

### **Επιμέρους Βήμα 4.Α.: Επιρροή ενδεχόμενης συνάφειας κριτηρίων στην επίδοσή τους**

Αφού ευρισκόμαστε στην περίπτωση (I), εντός κάθε ευρύτερου κριτηρίου “j” και για την εναλλακτική “i”, οι επιδόσεις  $g_{i,j,k'}$  διατάσσονται, αναλόγως με τα σχετικά τους μεγέθη. Έτσι, ο δείκτης “k” ενεργοποιείται και εντός κάθε ευρύτερου κριτηρίου ισχύει η ακόλουθη διάταξη:

$$g_{i,j,1} \geq g_{i,j,2} \geq \dots \geq g_{i,j,k} \geq \dots \geq g_{i,j,l}$$

Εν συνεχεία, μία συνολική επίδοση για κάθε εναλλακτική “i” και κάθε κριτήριο “j” υπολογίζεται:

Ευρίσκονται οι ποσότητες  $G_{i,j}$  από την εξίσωση:

$$G_{i,j} = \sum_k [(1/k) * (g_{i,j,k})]$$

Ευρίσκονται οι ποσότητες  $g_{i,j}$  από την εξίσωση:

$$g_{i,j} = G_{i,j} / [\sum_k (1/k)]$$

Έτσι, προκύπτει καταρχήν ο ακόλουθος Πίνακας (Πίνακας 20.9), ο οποίος παρουσιάζει την αντιστοίχιση μεταξύ των διπλών δεικτών «j,k'» και «j,k'» ανά Εναλλακτική “i”.

Πίνακας 20.9: Αντιστοίχιση μεταξύ των δεικτών ανά εναλλακτική

Table 20.9: Corresponding Indicators per Project

ΕΝΑΛΛ. / ΚΡΙΤΗΡ.	1.1'	1.2'	1.3'	2.1'	3.1'	3.2'	4.1'	4.2'	5.1'	5.2'
E <sub>1</sub>	1.1	1.3	1.2	2.1	3.2	3.1	4.2	4.1	5.1	5.2
E <sub>2</sub>	1.1	1.3	1.2	2.1	3.2	3.1	4.2	4.1	5.2	5.1
E <sub>3</sub>	1.2	1.1	1.3	2.1	3.2	3.1	4.2	4.1	5.2	5.1

Έπειτα, ευρίσκονται οι Ποσότητες για τις Ολικές Επιδόσεις  $G_{i,j}$ , από τη σχέση:

$$G_{i,j} = \sum_k [(1/k) * g_{i,j,k}].$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 20.10:

Πίνακας 20.10: Ποσότητες για ολικές επιδόσεις ανά εναλλακτική

Table 20.10: Quantities for Global Performances per Project

ΕΝΑΛΛΑΚ. / ΕΥΡΥΤ. ΚΡΙΤΗΡΙΟ	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
E <sub>1</sub>	10,4367	9,0000	11,2400	7,4550	10,7900
E <sub>2</sub>	11,2717	8,0000	9,3150	7,9850	10,7150
E <sub>3</sub>	12,7533	6,6200	8,9350	8,3450	6,6450

Υστερα, υπολογίζονται οι Ολικές Επιδόσεις ανά Εναλλακτική και Ευρύτερο Κριτήριο, ήτοι οι  $g_{i,j}$ , από την σχέση:  
 $g_{i,j} = G_{i,j} / [\sum_k [(1/\kappa)]$ .

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 20.11.

Πίνακας 20.11: Ολικές επιδόσεις ανά εναλλακτική

Table 20.11: Global Performances per Project

ΕΝΑΛΛΑΚ. / ΕΥΡΥΤ. ΚΡΙΤΗΡΙΟ	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
E <sub>1</sub>	5,6927	9,0000	7,4933	4,9700	7,1933
E <sub>2</sub>	6,1482	8,0000	6,2100	5,3233	7,1433
E <sub>3</sub>	6,9563	6,6200	5,9567	5,5633	4,4300

#### **Επιμέρους Βήμα 4.B.: Η επιρροή των τιμών των τεχνητών επιδόσεων – Χρηστική βαρύτητα**

Εμπίπτουμε στην περίπτωση (I), οπότε εάν για μία εναλλακτική “i” μία σφαιρική επίδοση  $g_{i,j}$  είναι μικρότερη ή ίση με το «2» (στην τεχνητή κλίμακα), ήτοι ισχύει η σχέση  $g_{i,j} \leq 2$ , τότε για την υπόψη εναλλακτική όλες οι συνολικές επιδόσεις  $g_{i,j}$  θεωρούνται ίσες με την  $g_{i,j}$ .

Εδώ καμία σφαιρική επίδοση  $g_{i,j}$  δεν είναι ίση ή μικρότερη του 2.

Ακολουθως, οι ποσότητες **w1** και **w2** (ως παρουσιάστηκαν στο διάγραμμα βαρών προηγούμενης παραγράφου) καθορίζονται από τον Αποφασίζοντα.

Έστω ότι ο Αποφασίζων καθορίζει ότι **w1** = 0,90 και **w2** = 0,70.

Έπειτα, ευρίσκονται οι σταθμισμένες επιδόσεις, ήτοι:

$$W_{i,j} = \int W(g) dg$$

με το «0» ως κάτω όριο ολοκλήρωσης και το  $g_{i,j}$  ως άνω όριο ολοκλήρωσης. Η συνάρτηση  $W(g)$  παρουσιάζεται στο διάγραμμα προηγούμενης παραγράφου.

Υπολογίζονται οι βαρυτικές επιδόσεις  $W_{i,j} = \int W(g) dg$ , με κάτω όριο ολοκλήρωσης το «0» και άνω όριο ολοκλήρωσης το  $g_{i,j}$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 20.12.

Πίνακας 20.12: Σταθμισμένες επιδόσεις

Table 20.12: Weighted Performances

ΕΝΑΛΛΑΚ. / ΕΥΡΥΤ. ΚΡΙΤΗΡΙΟ	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
E <sub>1</sub>	5,0510	7,8500	6,5029	4,5290	6,2460
E <sub>2</sub>	5,3978	6,9500	5,4459	4,7798	6,2038
E <sub>3</sub>	6,0473	5,7717	5,2503	4,9550	4,1348

**Επιμέρους Βήμα 4.Γ.: Υπολογισμός της Ολικής Επίδοσης κάθε Εναλλακτικής.**

Εμπίπτουμε στην περίπτωση (I), άρα μία τελική επίδοση NE<sub>i,j</sub> ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική “i” και ανά ευρύτερο κριτήριο “j”, από την ακόλουθη σχέση:

$$NE_{i,j} = [\sum_k (1/\kappa)] * W_{i,j}$$

Όπου ο “κ” αντιστοιχεί σε Υποκριτήρια κάθε Ευρύτερου Κριτηρίου. Για παράδειγμα,

$$NE_{1,1} = [1 + (1/2) + (1/3)] * W_{1,1} = [1 + (1/2) + (1/3)] * 5,0510 = 9,2601.$$

Ο ακόλουθος Πίνακας (Πίνακας 20.13) παρουσιάζει τις Τελικές Επιδόσεις NE<sub>i,j</sub>.

Πίνακας 20.13: Τελικές επιδόσεις ανά εναλλακτική

Table 20.13: Final Performance per Project

ΕΝΑΛΛΑΚ. / ΕΥΡΥΤ. ΚΡΙΤΗΡΙΟ	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
E <sub>1</sub>	9,2601	7,8500	9,7544	6,7935	9,3690
E <sub>2</sub>	9,8958	6,9500	8,1689	7,1697	9,3057
E <sub>3</sub>	11,0865	5,7717	7,8755	7,4325	6,2022

Και εν συνεχεία:

Μία γενική τελική επίδοση NE<sub>i</sub> ευρίσκεται για κάθε εναλλακτική “i”:

$$NE_i = \sum_j NE_{i,j}$$

Έτσι, ευρίσκονται:

$$NE_1 = 43,0270,$$

$$NE_2 = 41,4901,$$

$$NE_3 = 38,3684.$$

**Επιμέρους Βήμα 4.Δ.: Τελική Διάταξη των Εναλλακτικών.**

Οι εναλλακτικές διατάσσονται συμφώνως με τις γενικές τελικές τους επιδόσεις, ήτοι η μεγαλύτερη NE<sub>i</sub>, η καλύτερη εναλλακτική E<sub>i</sub>.

Η τελική διάταξη των Ολικών Τελικών Επιδόσεων έχει ως εξής:

$$NE_1 > NE_2 > NE_3$$

Αυτή η διάταξη οδηγεί στην ακόλουθη διάταξη των Εναλλακτικών (από τη βέλτιστη έως τη χειρίστη):

$$E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_3$$

## 20.3 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας: 2ο Παράδειγμα (Γενική Εφαρμογή)

Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει ένα παράδειγμα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Η εφαρμογή παρουσιάζεται σε αλληλούχα βήματα, όπως έχει περιγραφεί στην προτεινόμενη μεθοδολογία. Η συγκεκριμένη εφαρμογή (ως αναλύεται στη συνέχεια), εμπίπτει στην περίπτωση (II), οπότε εφαρμόζεται και η αντίστοιχη μαθηματική εξειδίκευση.

### **Βήμα 1ο: Κριτήρια αξιολόγησης: Καθορισμός-Συνάφεια-Ενοποίηση-Ιεράρχηση.**

#### **Επιμέρους Βήμα 1.Α. Καθορισμός κριτηρίων αξιολόγησης.**

Ένας ή περισσότεροι Αποφασίζοντες καθορίζουν τα κριτήρια αξιολόγησης.

Κάποια κριτήρια αξιολόγησης και οι δείκτες τους θεωρούνται ακολούθως αναφορικά με τις εναλλακτικές  $E_i$  ( $E_1, E_2, E_3$ ) για ένα δρόμο:

- **Μεταφορική Επάρκεια**, η οποία δίδεται με το Μέγιστο Κυκλοφοριακό Όγκο (για παράδειγμα: Οχήματα ανά Ώρα) για μία δεδομένη Στάθμη Εξυπηρέτησης.
- **Οικονομική Ανάπτυξη**, η οποία δίδεται με τον Δείκτη Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR).
- **Ρύπανση της Ατμόσφαιρας**, η οποία δίδεται σε micrograms (ppm) της μέσης τιμής των συνιστωσών ρύπανσης ( $NO_x$  ή  $CO_x$  ή  $SO_x$ ) της ατμόσφαιρας, αναφορικά με μία περιοχή, εντός μίας απόστασης από την εφαρμογή των εναλλακτικών. Με σκοπό να αποφεύγονται αρνητικές τιμές, η διαφορά από μία τιμή υψηλής ρύπανσης μπορεί να ληφθεί ως δείκτης.
- **Καταπολέμηση της Ανεργίας**, σε αριθμό Νέων Θέσεων Εργασίας οι οποίες δημιουργούνται άμεσα από έκαστη εναλλακτική.
- **Επιπτώσεις στη Χλωρίδα και την Πανίδα**, σε μία τεχνητή κλίμακα ελάττωσης των βλαβερών επιπτώσεων (π.χ. σε κλίμακα 0-100). Με σκοπό να αποφεύγονται αρνητικές κλίμακες, η διαφορά από μία επικίνδυνη τιμή επιπτώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας δείκτης.
- **Μέσος Χρόνος Διαδρομής** (για παράδειγμα σε ώρες). Με σκοπό να αποφευχθεί μία αρνητική κλίμακα, η μείωση από μία τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας δείκτης.

#### **Επιμέρους Βήμα 1.Β. Καθορίζοντας τη γωνία μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος αυτών (των κριτηρίων). Εννοιολογική και πρακτική συνάφεια κριτηρίων.**

Μία ομάδα ειδημόνων εξάγει το βαθμό της εξάρτησης μεταξύ των κριτηρίων μετά από μία αναλυτική εκτίμηση, βασισμένη στα στοιχεία κάθε περίπτωσης και με πρακτικό εργαλείο τις σχετικές μεταβολές των κριτηρίων (για μία σχετική μεταβολή μίας επίδοσης σε ένα κριτήριο τι σχετική μεταβολή προκύπτει σε ένα άλλο κριτήριο).

Για κάθε ζεύγος κριτηρίων  $K_j$  και  $K_{j'}$ , μία σχετική μεταβολή  $\Delta\phi_j/\phi_{j'}$  θεωρείται στην επίδοση  $\phi_j$  του κριτηρίου  $K_j$ . Έπειτα, λόγω της αλληλεπίδρασης των κριτηρίων, η εγειρόμενη σχετική μεταβολή  $\Delta\phi_{j'}/\phi_{j'}$  στην επίδοση  $\phi_{j'}$  του κριτηρίου  $K_{j'}$  υπολογίζεται/εκτιμάται.

Ακολούθως, η αντίστροφη πορεία λαμβάνει χώρα. Έτσι, μία σχετική μεταβολή  $\Delta\phi_{j'}/\phi_{j'}$  θεωρείται στην επίδοση  $\phi_{j'}$  του κριτηρίου  $K_{j'}$ . Έπειτα, λόγω της αλληλεπίδρασης των κριτηρίων, η εγειρόμενη σχετική μεταβολή  $\Delta\phi_j/\phi_j$  στην επίδοση  $\phi_j$  του κριτηρίου  $K_j$  υπολογίζεται/εκτιμάται.

Τα σύνθετα πηλίκια  $[(\Delta\phi_j/\phi_j) / (\Delta\phi_{j'}/\phi_{j'})]$  και  $[(\Delta\phi_{j'}/\phi_{j'}) / (\Delta\phi_j/\phi_j)]$  υπολογίζονται. Το  $\cos\omega(j,j')$  καθορίζεται ως συμβατό με τη σχέση  $-1 \leq \cos\omega(j,j') \leq 1$ . Στον Πίνακα

συνημιτόνων, στοιχείο  $K_{j,j'}$  = στοιχείο  $K_{j',j}$ , επειδή αμφότερα εκφράζουν το συνημίτονο της γωνίας ( $K_j, K_{j'}$ ).

Για παράδειγμα, θεωρώντας τα κριτήρια K2 (Οικονομική ανάπτυξη) και K4 (Καταπολέμηση της Ανεργίας), εάν μία οικονομική ανάπτυξη λάβει χώρα, τότε εν δυνάμει ένα μέρος των πόρων θα χρησιμοποιηθεί για δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Μπορεί να θεωρηθεί για το κριτήριο K2 μία σχετική αύξηση στο IRR από 10% (η τιμή αυτή είναι του IRR στην εναλλακτική E1) σε 20%. Έτσι,  $\Delta\phi_2/\phi_2 = (20\% - 10\%) / 10\% = 1,00$ . Έπειτα, η προκύπτουσα σχετική αύξηση για το κριτήριο K4 εκτιμάται. Εάν ο αριθμός των θέσεων εργασίας της εναλλακτικής αυξάνει από 30 (που είναι οι θέσεις εργασίας στη εναλλακτική E1) σε 45, τότε  $\Delta\phi_4/\phi_4 = (45-30) / 30 = 0,50$ . Επομένως, υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των δύο αυτών κριτηρίων: K2, K4, αφού μία μεταβολή επίδοσης του κριτηρίου K2 προκαλεί μία μεταβολή στην επίδοση του κριτηρίου K4. Για αυτά τα κριτήρια:  $[(\Delta\phi_4/\phi_4) / (\Delta\phi_2/\phi_2)] = [0,50 / 1,00] = 0,50$ . Τότε, στον πίνακα συνημιτόνων το K4,2 στοιχείο ισούται με 0,50. Το στοιχείο K2,4 θεωρείται ίσο με το στοιχείο K4,2.

Παρομοίως, θεωρώντας το ζεύγος των κριτηρίων K1, K2: Μία σχετική αύξηση  $\Delta\phi_1/\phi_1$  στην επίδοση του κριτηρίου K1 (Μεταφορική Επάρκεια), θα μπορούσε να αντανakλάσει επί του κριτηρίου K2 (Οικονομική Ανάπτυξη), προκαλώντας μία σχετική αύξηση  $\Delta\phi_2/\phi_2$  στην επίδοση, καθότι καλύτερες μεταφορικές συνθήκες προκαλούν μείωση του μεταφορικού κόστους (μείωση κατανάλωσης καυσίμων, ελαίων κλπ). Αρχικώς θεωρείται ότι  $\Delta\phi_1/\phi_1 = 1,00$ , έπειτα υπολογίζεται  $\Delta\phi_2/\phi_2$ . Εάν  $\Delta\phi_2/\phi_2 = 0,50$ , τότε  $[(\Delta\phi_2/\phi_2) / (\Delta\phi_1/\phi_1)] = [0,50 / 1,00] = 0,50$ , επομένως το στοιχείο K2,1 = 0,50. Το στοιχείο K1,2 θεωρείται ίσο με το στοιχείο K2,1.

Με έναν όμοιο τρόπο, κάθε στοιχείο  $K_{j,j'}$  του πίνακα υπολογίζεται.

Έστω ότι ισχύουν οι ακόλουθες τιμές συνημιτόνων για τις ανά ζεύγη κριτηρίων γωνίες:

*Πίνακας 20.14: Συνημίτονο της γωνίας μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε θεωρούμενο ζεύγος κριτηρίων*

*Table 20.14: Cosine of angle between the two criteria in each considered criteria pair*

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1,00	0,50	0,50	0,00	0,33	0,67
K2	0,50	1,00	0,00	0,50	0,00	0,00
K3	0,50	0,00	1,00	0,00	0,70	0,70
K4	0,00	0,50	0,00	1,00	0,00	0,00
K5	0,33	0,00	0,70	0,00	1,00	0,80
K6	0,67	0,00	0,70	0,00	0,80	1,00

Ο Πίνακας των γωνιών μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε ζεύγος κριτηρίων, ακολουθεί. Κάθε γωνία υπολογίζεται από το αντίστοιχο συνημίτονο, στη βάση της σχέσης:

$$\omega_{j,j'} = \arccos(\omega_{j,j'})$$

*Πίνακας 20.15: Γωνία (σε μοίρες) μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε θεωρούμενο ζεύγος κριτηρίων*

*Table 20.15: Angle (in degrees) between the two criteria in each considered criteria pair*

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	0	60	60	90	71	48
K2	60	0	90	60	90	90
K3	60	90	0	90	46	46
K4	90	60	90	0	90	90
K5	71	90	46	90	0	37
K6	48	90	46	90	37	0

Ακολουθώς, ο Πίνακας των ημιτόνων των γωνιών συμπληρώνεται. Για κάθε γωνία  $\omega_{j,j'}$ , το αντίστοιχο ημίτονο υπολογίζεται ως η συνάρτηση  $\sin(\omega_{j,j'})$ .

*Πίνακας 20.16: Ημίτονο της γωνίας μεταξύ των δύο κριτηρίων σε κάθε θεωρούμενο ζεύγος κριτηρίων*

*Table 20.16: Sine of angle between the two criteria in each considered criteria pair*

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	0,00	0,87	0,87	1,00	0,95	0,74
K2	0,87	0,00	1,00	0,87	1,00	1,00
K3	0,87	1,00	0,00	1,00	0,72	0,60
K4	1,00	0,87	1,00	0,00	1,00	1,00
K5	0,95	1,00	0,72	1,00	0,00	0,60
K6	0,74	1,00	0,60	1,00	0,60	0,00

Επομένως, εμπίπτουμε στην περίπτωση (II), αφού η μόρφωση του Πίνακα Ημιτόνων είναι ολική, αλλά δεν προκύπτουν συγκεκριμένες ομάδες κριτηρίων. Αυτό είναι στοιχείο που δεν ενθαρρύνει αλλά αποτρέπει σε μεγάλο βαθμό την ενοποίηση των κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια.

#### **Επιμέρους Βήμα 1.Γ. Ενδεχόμενη ενοποίηση κριτηρίων αξιολόγησης.**

Εμπίπτουμε στην περίπτωση (II), οπότε δεν συνιστάται η ενοποίηση των κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια.

#### **Επιμέρους Βήμα 1.Δ. Δυνατότητες ιεράρχησης των κριτηρίων αξιολόγησης.**

Ευρισκόμαστε στην περίπτωση (II), οπότε (με βάση τα αναφερθέντα στο βήμα 1.Γ), δεν γίνεται ενοποίηση των κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια. Μπορεί να λάβει χώρα στο παρόν βήμα (1.Δ.) μία ολική ιεράρχηση των κριτηρίων, είτε με βάση μία βασική ισχύουσα πολιτική, εάν αυτή υφίσταται, είτε (αλλιώς) με βάση τον Πίνακα Αλληλεπίδρασης.

Έστω λοιπόν ότι η ιεραρχία των κριτηρίων δίδεται από μία πολιτική και αποσαφηνίζεται μέσω του δείκτη  $j$  στο σύμβολο  $K_j$  (: όσο μικρότερος ο  $j$ , τόσο σπουδαιότερο το κριτήριο  $K_j$ ):

- **Μεταφορική Επάρκεια (K1),**
- **Οικονομική Ανάπτυξη (K2),**
- **Ρύπανση της Ατμόσφαιρας (K3),**
- **Καταπολέμηση της Ανεργίας (K4),**
- **Επιπτώσεις στη Χλωρίδα και την Πανίδα (K5),**
- **Μέσος Χρόνος Διαδρομής (K6),**

#### **Βήμα 2ο: Επιδόσεις των Εναλλακτικών στα Κριτήρια: Αναγωγή σε τιμές / τεχνητές επιδόσεις.**

Οι προαναφερθείσες εναλλακτικές έχουν ανά κριτήριο τις ακόλουθες επιδόσεις:

*Πίνακας 20.17: Επιδόσεις εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης, ήτοι  $\varphi_{i,j}$*

*Table 20.17: Performances of Alternatives in Evaluation Criteria, that is  $\varphi_{i,j}$*

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
E1	4.000	10%	100	30	20	0,50
E2	3.500	12%	80	70	30	0,60
E3	3.000	14%	50	45	45	0,35

Στην εδώ εφαρμογή, θεωρώντας ότι είναι δυσχερής η με συναρτησιακή δομή αναγωγή σε τεχνητή κλίμακα, μπορεί να εφαρμοσθεί οιασδήποτε κλίμακας η κανονικοποίηση επιδόσεων, υπό του τύπου:

$$g_{i,j}^{initial} = (\varphi_{i,j}) / [\max_i(\varphi_{i,j})]$$

Δηλαδή, μία κανονικοποίηση των επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια λαμβάνει χώρα, όπου κάθε

$\varphi_{i,j}$  διαιρείται με την καλύτερη των επιδόσεων εντός του κριτηρίου αυτού, δίδοντας την κανονικοποιημένη επίδοση  $g_{i,j}^{initial}$ .

Πίνακας 20.18: Τεχνητές επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια αξιολόγησης, ήτοι  $g_{i,j}^{initial}$   
Table 20.18: Artificial Performances of Alternatives in Evaluation Criteria, that is  $g_{i,j}^{initial}$

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
E1	1,00	0,71	1,00	0,43	0,44	0,83
E2	0,88	0,86	0,80	1,00	0,67	1,00
E3	0,75	1,00	0,50	0,64	1,00	0,58

### **Βήμα 3ο: Η επιρροή του Χρόνου / Δυναμική με το Χρόνο αξιολόγησης.**

**Επιμέρους Βήμα 3.Α.: Καθορίζεται η επιθυμητή βέλτιστη με το χρόνο συνάρτηση επίδοσης κάθε κριτηρίου**

Οι Αποφασίζοντες δίδουν την επιθυμητή μορφή των  $\varphi_j(\text{best})$ .

Η περίοδος αξιολόγησης θεωρείται ίση με 30 έτη. Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει την επιθυμητή στην περίοδο αξιολόγησης κατανομή συνεπειών (τιμών) ανά κριτήριο:

Πίνακας 20.19: Επιθυμητή χρονική μεταβολή για κάθε κριτήριο  
Table 20.19: Desirable Time Variation for each Criterion

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ (ΒΕΛΤΙΣΤΗ) ΜΕΤΑΒΟΛΗ
K1	$\varphi_{i,1} = \theta_{i,1}$
K2	$\varphi_{i,2} = \theta_{i,2}$
K3	$\varphi_{i,3} = \theta_{i,3}$
K4	$\varphi_{i,4} = \theta_{i,4} * t^{1/2}$
K5	$\varphi_{i,5} = \theta_{i,5}$
K6	$\varphi_{i,6} = \theta_{i,6}$

**Επιμέρους Βήμα 3.Β.: Για κάθε κριτήριο και εναλλακτική, ευρίσκεται η απόκλιση (εφόσον είναι εφικτό) μεταξύ της επιθυμητής βέλτιστης και της προβλεπόμενης πραγματικής συνάρτησης επίδοσης με το χρόνο**

Οι αποκλίσεις μεταξύ  $\varphi_j(\text{best})$  και  $\varphi_{i,j}(t)$  υπολογίζονται.

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζεται για κάθε εναλλακτική και κάθε κριτήριο αξιολόγησης η προβλεπόμενη κατανομή συνεπειών (τιμών) στο χρόνο. Έχουμε:

Πίνακας 20.20: Προβλεπόμενη χρονική μεταβολή για κάθε εναλλακτική και κριτήριο  
Table 20.20: Estimated Time Variation for each Alternative per Criterion

ΕΝΑΛΛΑΚΤ./ΚΡΙΤΗΡΙΑ	K1	K2	K3	K4	K5	K6
E1	$\varphi_{1,1} = \theta'_{1,1}$	$\varphi_{1,2} = \theta'_{1,2}$	$\varphi_{1,3} = \theta'_{1,3}$	$\varphi_{1,4} = \theta'_{1,4}$	$\varphi_{1,5} = \theta'_{1,5}$	$\varphi_{1,6} = \theta'_{1,6}$
E2	$\varphi_{2,1} = \theta'_{2,1}$	$\varphi_{2,2} = \theta'_{2,2}$	$\varphi_{2,3} = \theta'_{2,3}$	$\varphi_{2,4} = \theta'_{2,4}$	$\varphi_{2,5} = \theta'_{2,5}$	$\varphi_{2,6} = \theta'_{2,6}$
E3	$\varphi_{3,1} = \theta'_{3,1}$	$\varphi_{3,2} = \theta'_{3,2}$	$\varphi_{3,3} = \theta'_{3,3}$	$\varphi_{3,4} = \theta'_{3,4}$	$\varphi_{3,5} = \theta'_{3,5}$	$\varphi_{3,6} = \theta'_{3,6}$

Στην εδώ εφαρμογή λοιπόν, θεωρείται ότι είναι σταθερή εντός της περιόδου αξιολόγησης η προβλεπόμενη κατανομή των συνεπειών ανά εναλλακτική και κριτήριο.

Είναι σαφές από τη συγκριτική μελέτη των πινάκων 20.19 και 20.20, ότι μόνον στο κριτήριο K4 (Καταπολέμηση της Ανεργίας), υπάρχει διαφορά μεταξύ της επιθυμητής χρονικής κατανομής και των προβλεπομένων χρονικών κατανομών.

Για κάθε εναλλακτική και κριτήριο ισχύει:

$$\int (\theta_{i,j}) * f(t) dt = [\text{Περίοδος Αξιολόγησης}] * \varphi_{i,j}$$

- Άρα, για την εναλλακτική «1» και το κριτήριο «4»:

Επειδή η φυσική της επίδοση είναι 30 θέσεις εργασίας και η περίοδος αξιολόγησης είναι 30 έτη, ισχύει:

$$\int (\theta_{i,j}) * f(t) dt = [\text{Περίοδος Αξιολόγησης}] * \varphi_{i,j} = 30 * 30 = 900.$$

Οπότε για την επιθυμητή μεταβολή:

$$\int \theta_{1,4} * t^{1/2} dt = 900, \text{ με κάτω άκρο ολοκλήρωσης το } 0 \text{ και άνω το } 30 \text{ (περίοδος αξιολόγησης).}$$

Από αυτό προκύπτει  $\theta_{1,4} = 8,22$ .

Και για την προβλεπόμενη μεταβολή:

$$\int \theta'_{1,4} dt = 900, \text{ με κάτω άκρο ολοκλήρωσης το } 0 \text{ και άνω το } 30 \text{ (περίοδος αξιολόγησης).}$$

Από αυτό προκύπτει  $\theta'_{1,4} = 30$ .

Η απόκλιση ισούται με:

$$\int | [\theta_{1,4} * t^{1/2} - \theta'_{1,4}] | dt = 266,38 \text{ (με άκρα ολοκλήρωσης } 0 \text{ και } 30).$$

Υπολογίζεται εν συνεχεία η ανηγμένη απόκλιση:

$$266,38 / (30 * 30) = 0,2960.$$

- Για την εναλλακτική «2» και το κριτήριο «4»:

Επειδή η φυσική της επίδοση είναι 70 θέσεις εργασίας και η περίοδος αξιολόγησης είναι 30 έτη, ισχύει:

$$\int (\theta_{i,j}) * f(t) dt = [\text{Περίοδος Αξιολόγησης}] * \varphi_{i,j} = 30 * 70 = 2.100.$$

Οπότε για την επιθυμητή μεταβολή:

$$\int \theta_{2,4} * t^{1/2} dt = 2.100, \text{ με κάτω άκρο ολοκλήρωσης το } 0 \text{ και άνω το } 30 \text{ (περίοδος αξιολόγησης).}$$

Από αυτό προκύπτει  $\theta_{2,4} = 19,17$ .

Και για την προβλεπόμενη μεταβολή:

$$\int \theta'_{2,4} dt = 2.100, \text{ με κάτω άκρο ολοκλήρωσης το } 0 \text{ και άνω το } 30 \text{ (περίοδος αξιολόγησης).}$$

Από αυτό προκύπτει  $\theta'_{2,4} = 70$ .

Η απόκλιση ισούται με:

$$\int | [\theta_{2,4} * t^{1/2} - \theta'_{2,4}] | dt = 622,20 \text{ (με άκρα ολοκλήρωσης } 0 \text{ και } 30).$$

Υπολογίζεται εν συνεχεία η ανηγμένη απόκλιση:

$$622,20 / (30 * 70) = 0,2960.$$

- Για την εναλλακτική «3» και το κριτήριο «4»:

Επειδή η φυσική της επίδοση είναι 45 θέσεις εργασίας και η περίοδος αξιολόγησης είναι 30 έτη, ισχύει:

$$\int (\theta_{i,j}) * f(t) dt = [\text{Περίοδος Αξιολόγησης}] * \varphi_{i,j} = 30 * 45 = 1.350.$$

Οπότε για την επιθυμητή μεταβολή:

$$\int \theta_{3,4} * t^{1/2} dt = 1.350, \text{ με κάτω άκρο ολοκλήρωσης το } 0 \text{ και άνω το } 30 \text{ (περίοδος αξιολόγησης).}$$

Από αυτό προκύπτει  $\theta_{3,4} = 12,32$ .

Και για την προβλεπόμενη μεταβολή:

$$\int \theta'_{3,4} dt = 1.350, \text{ με κάτω άκρο ολοκλήρωσης το } 0 \text{ και άνω το } 30 \text{ (περίοδος αξιολόγησης).}$$



Από αυτό προκύπτει  $\theta'_{3,4} = 45$ .

Η απόκλιση ισούται με:

$$\int \left| \theta_{3,4} * t^{1/2} - \theta'_{3,4} \right| dt = 399,88 \text{ (με άκρα ολοκλήρωσης 0 και 30).}$$

Υπολογίζεται εν συνεχεία η ανηγμένη απόκλιση:

$$399,88 / (30 * 45) = 0,2960.$$

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ των επιθυμητών και προβλεπομένων χρονικών κατανομών επιδόσεων ανά εναλλακτική και κριτήριο:

*Πίνακας 20.21: Χρονικές αποκλίσεις ανά κριτήριο για κάθε εναλλακτική*

*Table 20.21: Time Deviations per Criterion for each Project*

ΕΝΑΛΛΑΚΤ./ΚΡΙΤΗΡΙΑ	K1	K2	K3	K4	K5	K6
E1	0,0000	0,0000	0,0000	0,2960	0,0000	0,0000
E2	0,0000	0,0000	0,0000	0,2960	0,0000	0,0000
E3	0,0000	0,0000	0,0000	0,2960	0,0000	0,0000

**Επιμέρους Βήμα 3.Γ.: Ευρίσκεται για κάθε κριτήριο η επίδοση σε κάθε εναλλακτική αφού ληφθεί υπόψη η αντίστοιχη επιρροή της με το χρόνο συνάρτησής της**

Ακολουθώντας, καθορίζουμε τις τιμές των Ορίων Χρονικής Απόκλισης ανά Κριτήριο, ήτοι τα  $O_1(j)$  και  $O_2(j)$ . Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 20.22).

*Πίνακας 20.22: Τιμές Ορίων Χρονικής Απόκλισης ανά Κριτήριο*

*Table 20.22: The resulted Time Deviations Limits*

ΟΡΙΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ	K1	K2	K3	K4	K5	K6
$O_1(j)$	0,2000	0,2000	0,3000	0,3000	0,2500	0,3000
$O_2(j)$	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8500

Επισημαίνεται ότι στο μόνο κριτήριο που έχουμε αποκλίσεις (το K4), η απόκλιση εκάστης εναλλακτικής είναι μικρότερη του Ορίου  $O_1(4)$ , άρα και στο κριτήριο αυτό ο χρονικός τελεστής θα ισούται για κάθε εναλλακτική με 1.

Έτσι οι χρονικοί τελεστές  $x_{i,j}$  προκύπτουν, όπως παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

*Πίνακας 20.23: Χρονικοί Συντελεστές  $x_{i,j}$*

*Table 20.23: Conversion Time Factors  $x_{i,j}$*

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤ. / ΚΡΙΤΗΡΙΟ	K1	K2	K3	K4	K5	K6
$x_{1,j}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$x_{2,j}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$x_{3,j}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Τώρα, ευρίσκονται τα  $g_{i,j}$  από τη σχέση:

$$g_{i,j} = g(i,j \text{ initial}) * x_{i,j}$$

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τα  $g_{i,j}$ .

Πίνακας 20.24: Τεχνητές Επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια, κατόπιν Χρονικής επιρροής, ήτοι  $g_{i,j}$   
 Table 20.24: Artificial Performances of Alternatives in Evaluation Criteria including Time influence, that is  $g_{i,j}$

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
E1	1,00	0,71	1,00	0,43	0,44	0,83
E2	0,88	0,86	0,80	1,00	0,67	1,00
E3	0,75	1,00	0,50	0,64	1,00	0,58

## **Βήμα 4ο: Μόρφωση της Ολικής Επίδοσης κάθε Εναλλακτικής.**

### **Επιμέρους Βήμα 4.Α.:Επιρροή ενδεχόμενης συνάφειας/εξάρτησης κριτηρίων στην υπόσταση των επιδόσεών τους**

Στην περίπτωση (II), όπου και εμπίπτουμε, αναφορικά με κάθε κριτήριο ( $K_j$ ) και για κάθε εναλλακτική ( $E_i$ ), ευρίσκεται η συνιστώσα της επίδοσης που είναι ανεξάρτητη από τα σπουδαιότερα αυτού κριτήρια, από την ακόλουθη σχέση:

$$g_{i,j}^{\perp(1,2,3, \dots, j-1)} = g_{i,j} * \sin \omega_{j,(1, 2, 3, \dots, j-1)}$$

(προσεγγιστικός τρόπος)

είτε από την ακόλουθη σχέση:

$$g_{i,j}^{\perp(1,2,3, \dots, j-1)} = g_{i,j} * \{[\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \dots, \mathbf{Kj-1}, \mathbf{Kj})] / [\det(\mathbf{K1}, \mathbf{K2}, \dots, \mathbf{Kj-1})]\}$$

(ακριβής τρόπος)

Οπότε:

#### *1) Απλός Προσεγγιστικός τρόπος:*

Το ημίτονο  $\sin[\omega_{j,(1, 2, 3, \dots, j-1)}]$  ευρίσκεται για κάθε κριτήριο  $K_j$  από τον προαναφερθέντα τύπο:

$$\sin \omega_{j,(1, 2, 3, \dots, j-1)} = \sin \omega_{(j,1)} * \sin \omega_{(j,2)} * \dots * \sin \omega_{(j,j-1)}$$

Επομένως:

- $\sin \omega_{2,1} = 0,87.$
- $\sin \omega_{3,(2,1)} = \sin(\omega_{3,1}) * \sin(\omega_{3,2}) = 0,87 * 1,00 = 0,87.$
- $\sin \omega_{4,(3,2,1)} = \sin(\omega_{4,1}) * \sin(\omega_{4,2}) * \sin(\omega_{4,3}) = 1,00 * 0,87 * 1,00 = 0,87.$
- $\sin \omega_{5,(4,3,2,1)} = \sin(\omega_{5,1}) * \sin(\omega_{5,2}) * \sin(\omega_{5,3}) * \sin(\omega_{5,4}) = 0,95 * 1,00 * 0,72 * 1,00 = 0,68.$
- $\sin \omega_{6,(5,4,3,2,1)} = \sin(\omega_{6,1}) * \sin(\omega_{6,2}) * \sin(\omega_{6,3}) * \sin(\omega_{6,4}) * \sin(\omega_{6,5}) = 0,74 * 1,00 * 0,60 * 1,00 * 0,60 = 0,27.$

Εν συνεχεία, για κάθε επίδοση κριτηρίου, υπολογίζεται η συνιστώσα αυτής που είναι ανεξάρτητη από τα σπουδαιότερα του κριτηρίου αυτού κριτήρια, με την ακόλουθη σχέση:

$$g_{i,j}^{\perp(1,2,3, \dots, j-1)} = g_{i,j} * \sin \omega_{j,(1, 2, 3, \dots, j-1)}$$

Επομένως:

$$g_{1,2}^{\perp K1} = g_{1,2} * \sin \omega_{2,1} = 0,71 * 0,87 = 0,62.$$

$$g_{1,3}^{\perp (K2,K1)} = g_{1,3} * \sin \omega_{3(2,1)} = 1,00 * 0,87 = 0,87.$$

$$g_{1,4}^{\perp (K3,K2,K1)} = g_{1,4} * \sin \omega_{4(3,2,1)} = 0,43 * 0,87 = 0,37.$$

$$g_{1,5}^{\perp (K4,K3,K2,K1)} = g_{1,5} * \sin \omega_{5(4,3,2,1)} = 0,44 * 0,68 = 0,30.$$

$$g_{1,6}^{\perp (K5,K4,K3,K2,K1)} = g_{1,6} * \sin \omega_{6(5,4,3,2,1)} = 0,83 * 0,27 = 0,22.$$

$$g_{2,2}^\perp K_1 = g_{2,2} * \sin \omega_{2,1} = 0,86 * 0,87 = 0,75.$$

$$g_{2,3}^\perp (K_2, K_1) = g_{2,3} * \sin \omega_{3(2,1)} = 0,80 * 0,87 = 0,70.$$

$$g_{2,4}^\perp (K_3, K_2, K_1) = g_{2,4} * \sin \omega_{4(3,2,1)} = 1,00 * 0,87 = 0,87.$$

$$g_{2,5}^\perp (K_4, K_3, K_2, K_1) = g_{2,5} * \sin \omega_{5(4,3,2,1)} = 0,67 * 0,68 = 0,46.$$

$$g_{2,6}^\perp (K_5, K_4, K_3, K_2, K_1) = g_{2,6} * \sin \omega_{6(5,4,3,2,1)} = 1,00 * 0,27 = 0,27.$$

$$g_{3,2}^\perp K_1 = g_{3,2} * \sin \omega_{2,1} = 1,00 * 0,87 = 0,87.$$

$$g_{3,3}^\perp (K_2, K_1) = g_{3,3} * \sin \omega_{3(2,1)} = 0,50 * 0,87 = 0,44.$$

$$g_{3,4}^\perp (K_3, K_2, K_1) = g_{3,4} * \sin \omega_{4(3,2,1)} = 0,64 * 0,87 = 0,56.$$

$$g_{3,5}^\perp (K_4, K_3, K_2, K_1) = g_{3,5} * \sin \omega_{5(4,3,2,1)} = 1,00 * 0,68 = 0,68.$$

$$g_{3,6}^\perp (K_5, K_4, K_3, K_2, K_1) = g_{3,6} * \sin \omega_{6(5,4,3,2,1)} = 0,58 * 0,27 = 0,16.$$

II) Ακριβής Σύνθετος τρόπος:

### Δόμηση Χώρου Hilbert

Για τα κριτήρια  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  τα οποία δίδονται, θεωρούνται τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα, τα οποία παρίστανται με κεκλιμένους παχείς χαρακτήρες:  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ .

Έστω ότι έχουμε και τα εξής διανύσματα:  $K_1', K_2', K_3', K_4', K_5', K_6'$ , όπου:

$$K_1' = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$K_2' = (0, 1, 0, 0, 0, 0)$$

$$K_3' = (0, 0, 1, 0, 0, 0)$$

$$K_4' = (0, 0, 0, 1, 0, 0)$$

$$K_5' = (0, 0, 0, 0, 1, 0)$$

$$K_6' = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$$

Τα μοναδιαία αυτά διανύσματα αποτελούν μία ορθοκανονική βάση για το χώρο Hilbert  $n$ -διαστάσεων.

Επιχειρούμε εν συνεχεία συσχετισμό των μοναδιαίων διανυσμάτων  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ , με τα μοναδιαία διανύσματα  $K_1', K_2', K_3', K_4', K_5', K_6'$ .

Το διάνυσμα  $K_1$ , μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπίπτει με το διάνυσμα  $K_1'$ , αφού μπορούμε να το ορίσουμε ως πρώτο στη σειρά τοποθετώντας το σε θέση που θα επιλέξουμε (με βάση τη θεώρηση Gram-Schmidt).

Επομένως, εάν

$$K_1 = (X_1, 0, 0, 0, 0, 0)$$

τότε

$$X_1 = 1, \text{ επομένως}$$

$$K_1 = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$$

Για όλα τα επόμενα διανύσματα-κριτήρια, ήτοι για τα  $K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ , ισχύουν περιορισμοί.

Ήτοι, για κάθε ένα εξ' αυτών ισχύουν οι περιορισμοί με όλα τα προηγούμενα στη σειρά διανύσματα-κριτήρια.

Από τις εξισώσεις της μορφής:

$$\langle K_j, K_m \rangle = \cos(j, m)$$

και τις εξισώσεις της μορφής

$$\langle K_m, K_m \rangle = 1$$

προσδιορίζονται οι συντεταγμένες εκάστου  $K_m$  διανύσματος.

Στο εδώ παράδειγμα ευρίσκουμε:

$$\begin{aligned}
K1 &= (X1, 0, 0, 0, 0, 0) = (1, 0, 0, 0, 0, 0) \\
K2 &= (X2, \Psi2, 0, 0, 0, 0) = (0,50, 0,87, 0, 0, 0, 0) \\
K3 &= (X3, \Psi3, Z3, 0, 0, 0) = (0,50, -0,29, 0,82, 0, 0, 0) \\
K4 &= (X4, \Psi4, Z4, \Omega4, 0, 0) = (0, 0,57, 0,20, 0,80, 0, 0) \\
K5 &= (X5, \Psi5, Z5, \Omega5, \Phi5, 0) = (0,33, -0,19, 0,59, -0,01, 0,72, 0) \\
K6 &= (X6, \Psi6, Z6, \Omega6, \Phi6, T6) = (0,67, -0,38, 0,31, 0,20, 0,46, 0,24)
\end{aligned}$$

Αναλυτικά:

Για το  $K2$ :

Από τις εξισώσεις:

- $\langle K1, K2 \rangle = \cos(1,2)$
- $\langle K2, K2 \rangle = 1$

Προέκυψαν τα  $X2, \Psi2$ .

Για το  $K3$ :

Από τις εξισώσεις:

- $\langle K1, K3 \rangle = \cos(1,3)$
- $\langle K2, K3 \rangle = \cos(2,3)$
- $\langle K3, K3 \rangle = 1$

Προέκυψαν τα  $X3, \Psi3, Z3$ .

Για το  $K4$ :

Από τις εξισώσεις:

- $\langle K1, K4 \rangle = \cos(1,4)$
- $\langle K2, K4 \rangle = \cos(2,4)$
- $\langle K3, K4 \rangle = \cos(3,4)$
- $\langle K4, K4 \rangle = 1$

Προέκυψαν τα  $X4, \Psi4, Z4, \Omega4$ .

Για το  $K5$ :

Από τις εξισώσεις:

- $\langle K1, K5 \rangle = \cos(1,5)$
- $\langle K2, K5 \rangle = \cos(2,5)$
- $\langle K3, K5 \rangle = \cos(3,5)$
- $\langle K4, K5 \rangle = \cos(4,5)$
- $\langle K5, K5 \rangle = 1$

Προέκυψαν τα  $X5, \Psi5, Z5, \Omega5, \Phi5$ .

Για το  $K6$ :

Από τις εξισώσεις:

- $\langle K1, K6 \rangle = \cos(1,6)$
- $\langle K2, K6 \rangle = \cos(2,6)$
- $\langle K3, K6 \rangle = \cos(3,6)$
- $\langle K4, K6 \rangle = \cos(4,6)$
- $\langle K5, K6 \rangle = \cos(5,6)$
- $\langle K6, K6 \rangle = 1$

Προέκυψαν τα  $X6, \Psi6, Z6, \Omega6, \Phi6, T6$ .

*Προσδιορισμός Γωνιών μεταξύ Κριτηρίων και Ορθογωνίου Συστήματος χώρου Hilbert*

Επίσης, μπορεί να προσδιορισθεί η γωνία του  $Km$  με έκαστο των  $Kj'$ , όπου το σύνολο των  $Kj'$  αποτελεί μία ορθογώνια βάση διανυσματικού χώρου, ήτοι δύο  $Kj'$  είναι κάθετα μεταξύ τους. Οι εξισώσεις που διατίθενται και αξιοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι της μορφής:

$$\langle Kj', Km \rangle = \cos(j', m)$$

όπου το  $j'$  μεταβάλλεται από 2 έως και  $m-1$ , αφού για  $j' = 1$ , έχουμε  $K1 = K1'$ .

Βέβαια, έχοντας πλέον τις συντεταγμένες εκάστου  $Km$ , μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το  $\cos(j', m)$  ισούται με τη συντεταγμένη της θέσης  $j'$  του διανύσματος  $Km$ , δεδομένου ότι το  $Km$  είναι μοναδιαίο διάνυσμα.

*Δυναμικά Συνόλου Διανυσμάτων-Κριτηρίων*

Υπολογίζονται τα Δυναμικά Συνόλων Κριτηρίων στο εδώ παράδειγμα και προκύπτουν:

$$\det(K1) = +1,000.$$

$$\det(K1, K2) = +0,870.$$

$$\det(K1, K2, K3) = +0,713.$$

$$\det(K1, K2, K3, K4) = +0,568.$$

$$\det(K1, K2, K3, K4, K5) = +0,407.$$

$$\det(K1, K2, K3, K4, K5, K6) = +0,099.$$

*Συνιστώσα εκάστου Κριτηρίου Ανεξάρτητη από το Χώρο των σπουδαιότερων αυτού Κριτηρίων*

Για να ευρεθεί η συνιστώσα κριτηρίου που είναι ανεξάρτητη από το Χώρο των σπουδαιότερων αυτού κριτηρίων, ήτοι για να ευρεθεί για το κριτήριο  $Kj$  η  $Kj^\perp(1,2,3, \dots, j-1)$ , λαμβάνεται το πηλίκο των ακολούθων Δυναμικών:

$$[\text{Δυναμικό Συνόλου } (K1, K2, K3, \dots, Kj-1, Kj)] / [\text{Δυναμικό Συνόλου } (K1, K2, K3, \dots, Kj-1)]$$

ήτοι:

$$Kj^\perp(1,2,3, \dots, j-1) = [\det(K1, K2, K3, \dots, Kj-1, Kj)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, Kj-1)]$$

Στο εδώ παράδειγμα ευρίσκουμε:

$$K2^\perp 1 = [\det(K1, K2)] / [\det(K1)] = 0,870 / 1,000 = 0,870.$$

$$K3^\perp(1,2) = [\det(K1, K2, K3)] / [\det(K1, K2)] = 0,713 / 0,870 = 0,820.$$

$$K4^\perp(1,2,3) = [\det(K1, K2, K3, K4)] / [\det(K1, K2, K3)] = 0,568 / 0,713 = 0,797.$$

$$K5^\perp(1,2,3,4) = [\det(K1, K2, K3, K4, K5)] / [\det(K1, K2, K3, K4)] = 0,407 / 0,568 = 0,716.$$

$$K6^\perp(1,2,3,4,5) = [\det(K1, K2, K3, K4, K5, K6)] / [\det(K1, K2, K3, K4, K5)] = 0,099 / 0,407 = 0,243.$$

Εν συνεχεία, για κάθε επίδοση κριτηρίου, υπολογίζεται η συνιστώσα αυτής που είναι ανεξάρτητη από τα σπουδαιότερα του κριτηρίου αυτού κριτήρια, με την ακόλουθη σχέση:

$$g_{i,j}^\perp(1,2,3, \dots, j-1) = g_{i,j} * Kj^\perp(1, 2, 3, \dots, j-1)$$

Επομένως:

$$g_{1,2}^\perp K1 = g_{1,2} * K2^\perp 1 = 0,71 * 0,870 = 0,62.$$

$$g_{1,3}^\perp (K2, K1) = g_{1,3} * K3^\perp(1,2) = 1,00 * 0,820 = 0,82.$$

$$g_{1,4}^\perp (K3, K2, K1) = g_{1,4} * K4^\perp(1,2,3) = 0,43 * 0,797 = 0,34.$$

$$g_{1,5}^\perp (K4, K3, K2, K1) = g_{1,5} * K5^\perp(1,2,3,4) = 0,44 * 0,716 = 0,32.$$

$$g_{1,6}^\perp (K5, K4, K3, K2, K1) = g_{1,6} * K6^\perp(1,2,3,4,5) = 0,83 * 0,243 = 0,20.$$

$$g_{2,2}^\perp K1 = g_{2,2} * K2^\perp 1 = 0,86 * 0,870 = 0,75.$$

$$g_{2,3}^\perp (K2, K1) = g_{2,3} * K3^\perp(1,2) = 0,80 * 0,820 = 0,66.$$

$$g_{2,4}^\perp (K3, K2, K1) = g_{2,4} * K4^\perp(1,2,3) = 1,00 * 0,797 = 0,79.$$

$$g_{2,5}^\perp (K4, K3, K2, K1) = g_{2,5} * K5^\perp(1,2,3,4) = 0,67 * 0,716 = 0,48.$$

$$g_{2,6}^{\perp}(K5,K4,K3,K2,K1) = g_{2,6} * K6^{\perp}(1,2,3,4,5) = 1,00 * 0,243 = 0,24.$$

$$g_{3,2}^{\perp} K1 = g_{3,2} * K2^{\perp} 1 = 1,00 * 0,870 = 0,87.$$

$$g_{3,3}^{\perp}(K2,K1) = g_{3,3} * K3^{\perp}(1,2) = 0,50 * 0,820 = 0,41.$$

$$g_{3,4}^{\perp}(K3,K2,K1) = g_{3,4} * K4^{\perp}(1,2,3) = 0,64 * 0,797 = 0,51.$$

$$g_{3,5}^{\perp}(K4,K3,K2,K1) = g_{3,5} * K5^{\perp}(1,2,3,4) = 1,00 * 0,716 = 0,71.$$

$$g_{3,6}^{\perp}(K5,K4,K3,K2,K1) = g_{3,6} * K6^{\perp}(1,2,3,4,5) = 0,58 * 0,243 = 0,14.$$

#### **Επιμέρους Βήμα 4.Β.: Η επιρροή των τιμών των τεχνητών επιδόσεων – Χρηστική βαρύτητα**

Στην περίπτωση (II), όπου και εμπίπτουμε, δεν ενεργοποιείται το παρόν επιμέρους βήμα.

#### **Επιμέρους Βήμα 4.Γ.: Υπολογισμός της Ολικής Επίδοσης κάθε Εναλλακτικής.**

Στην περίπτωση (II), όπου και εμπίπτουμε, η ολική επίδοση κάθε εναλλακτικής δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^b + \sum_j [g_{i,j} * \sin \omega_j, (1, 2, 3, \dots, j-1)]^b \}^{1/b}$$

όπου ο j κυμαίνεται από j=2 έως j, κατά τον προσεγγιστικό τρόπο και από τη σχέση:

$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^b + \sum_j \{ g_{i,j} * \{ [\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1}, K_j)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1})] \}^b \} \}^{1/b}$$

όπου ο j κυμαίνεται από j=2 έως j, κατά τον ακριβή τρόπο.

Εάν αποφασισθεί για τον εκθέτη: b=2.

Τότε:

Η νόρμα για κάθε εναλλακτική υπολογίζεται, ήτοι η NE<sub>i</sub>, στη βάση της προαναφερθείσας φόρμουλας:

$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^2 + \sum_j [g_{i,j}^{\perp}(1,2,3, \dots, j-1)]^2 \}^{1/2}$$

όπου ο j κυμαίνεται από j=2 έως j.

*1) Απλός Προσεγγιστικός τρόπος:*

$$NE_i = \{ [g_{i,1}]^2 + \sum_j [g_{i,j} * \sin \omega_j, (1, 2, 3, \dots, j-1)]^2 \}^{1/2}$$

όπου ο j κυμαίνεται από j=2 έως j, κατά τον προσεγγιστικό τρόπο

Έτσι, με αριθμητική αντικατάσταση των τιμών:

$$\begin{aligned} NE1 &= \{ [g_{1,1}]^2 + \sum_j [g_{1,j} * \sin \omega_j, (1, 2, 3, \dots, j-1)]^2 \}^{1/2} = \\ &= \{ [1,00]^2 + [0,62]^2 + [0,87]^2 + [0,37]^2 + [0,30]^2 + [0,22]^2 \}^{1/2} = \\ &= \{ 1,00 + 0,38 + 0,76 + 0,14 + 0,09 + 0,05 \}^{1/2} = \{ 2,42 \}^{1/2} = \mathbf{1,56}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} NE2 &= \{ [g_{2,1}]^2 + \sum_j [g_{2,j} * \sin \omega_j, (1, 2, 3, \dots, j-1)]^2 \}^{1/2} = \\ &= \{ [0,88]^2 + [0,75]^2 + [0,70]^2 + [0,87]^2 + [0,46]^2 + [0,27]^2 \}^{1/2} = \\ &= \{ 0,77 + 0,56 + 0,49 + 0,76 + 0,21 + 0,07 \}^{1/2} = \{ 2,86 \}^{1/2} = \mathbf{1,69}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} NE3 &= \{ [g_{3,1}]^2 + \sum_j [g_{3,j} * \sin \omega_j, (1, 2, 3, \dots, j-1)]^2 \}^{1/2} = \\ &= \{ [0,75]^2 + [0,87]^2 + [0,44]^2 + [0,56]^2 + [0,68]^2 + [0,16]^2 \}^{1/2} = \\ &= \{ 0,56 + 0,76 + 0,19 + 0,31 + 0,46 + 0,03 \}^{1/2} = \{ 2,31 \}^{1/2} = \mathbf{1,52}. \end{aligned}$$

II) *Σύνθετος Ακριβής τρόπος:*

$$NE_i = \{[g_{i,1}]^2 + \sum_j \{g_{i,j} * \{[\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1}, K_j)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1})]\}^2\}^{1/2}$$

όπου ο j κυμαίνεται από j=2 έως j.

Έτσι, με αριθμητική αντικατάσταση των τιμών:

$$NE1 = \{[g_{1,1}]^2 + \sum_j \{g_{1,j} * \{[\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1}, K_j)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1})]\}^2\}^{1/2} = \{[1,00]^2 + [0,62]^2 + [0,82]^2 + [0,34]^2 + [0,32]^2 + [0,20]^2\}^{1/2} = \\ = \{1,00 + 0,38 + 0,67 + 0,12 + 0,10 + 0,04\}^{1/2} = \{2,31\}^{1/2} = \mathbf{1,52}.$$

$$NE2 = \{[g_{2,1}]^2 + \sum_j \{g_{2,j} * \{[\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1}, K_j)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1})]\}^2\}^{1/2} = \{[0,88]^2 + [0,75]^2 + [0,66]^2 + [0,79]^2 + [0,48]^2 + [0,24]^2\}^{1/2} = \\ = \{0,77 + 0,56 + 0,44 + 0,62 + 0,23 + 0,06\}^{1/2} = \{2,68\}^{1/2} = \mathbf{1,64}.$$

$$NE3 = \{[g_{3,1}]^2 + \sum_j \{g_{3,j} * \{[\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1}, K_j)] / [\det(K1, K2, K3, \dots, K_{j-1})]\}^2\}^{1/2} = \{[0,75]^2 + [0,87]^2 + [0,41]^2 + [0,51]^2 + [0,71]^2 + [0,14]^2\}^{1/2} = \\ = \{0,56 + 0,76 + 0,17 + 0,26 + 0,50 + 0,02\}^{1/2} = \{2,27\}^{1/2} = \mathbf{1,50}.$$

#### **Επιμέρους Βήμα 4.Δ.: Τελική Διάταξη των Εναλλακτικών.**

Οι εναλλακτικές διατάσσονται συμφώνως με τις γενικές τελικές τους επιδόσεις, ήτοι η μεγαλύτερη NE<sub>i</sub>, η καλύτερη εναλλακτική E<sub>i</sub>.

I) *Απλός Προσεγγιστικός Τρόπος:*

Η τελική διάταξη των εναλλακτικών λαμβάνει χώρα στη βάση των NE<sub>i</sub>. Έτσι, όσο μεγαλύτερη η NE<sub>i</sub>, τόσο καλύτερη η εναλλακτική E<sub>i</sub>.

Επομένως, αφού: NE<sub>2</sub> > NE<sub>1</sub> > NE<sub>3</sub>, η τελική διάταξη των εναλλακτικών (από την καλύτερη στη χειρότερη) έχει ως εξής: E<sub>2</sub> - E<sub>1</sub> - E<sub>3</sub>.

II) *Σύνθετος Ακριβής Τρόπος:*

Αφού: NE<sub>2</sub> > NE<sub>1</sub> > NE<sub>3</sub>, η τελική διάταξη των εναλλακτικών (από την καλύτερη στη χειρότερη) έχει ως εξής: E<sub>2</sub> - E<sub>1</sub> - E<sub>3</sub>.

*Συμπερασματικά για την τελική αξιολόγηση των εναλλακτικών:*

Η τελική διάταξη των εναλλακτικών είναι η ίδια και με τους δύο τρόπους (απλό και σύνθετο). Οι όποιες μεταβολές στα αποτελέσματα είναι μικρές και οφείλονται στη διαφορά ακρίβειας μεταξύ των δύο τρόπων, η οποία άλλωστε έχει ήδη επισημανθεί.

## 20.4 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας: 3ο Παράδειγμα (Ειδική Εφαρμογή)

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης επιμέρους μεθόδου/τεχνικής των ανά ζεύγη συγκρίσεων αναφορικά με τα βάρη κριτηρίων και τις επιδόσεις των εναλλακτικών. Η εν λόγω προτεινόμενη επιμέρους μέθοδος αποτελεί εξειδίκευση/τμήμα της εν γένει προτεινόμενης μεθόδου και ενδείκνυται σε περιπτώσεις αξιολόγησης όπου υπάρχει σημαντική έλλειψη στοιχείων/δεδομένων.

### 20.4.1 Παρουσίαση των δεδομένων του προβλήματος αξιολόγησης

Παρατίθεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, σε πρόβλημα αξιολόγησης συγκοινωνιακών έργων της Βουλγαρίας (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999), (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999).

Υπάρχουν τρία προς αξιολόγηση σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά έργα, τα οποία είναι τα εξής:

«E1»: Ηλεκτροδότηση και ανακατασκευή του τμήματος Dupnitsa-Kulata.

«E2»: Εκσυγχρονισμός ορισμένων τμημάτων της γραμμής Vidin-Sofia-Kulata.

«E3»: Κατασκευή του τμήματος από Gyueshevo μέχρι σύνορα Βουλγαρίας-Σκοπίων.

Αξιολογούνται με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία είναι τα εξής:

«K1»: Χρηματική αποδοτικότητα του έργου για τον ιδιώτη επενδυτή.

«K2»: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

«K3»: Ποιότητα προσφερομένων συγκοινωνιακών υπηρεσιών.

Από τα τρία κριτήρια, για το K1 δίδεται ως δείκτης έκφρασης ο Δείκτης Εσωτερικής Ανταποδοτικότητας (IRR).

Στα άλλα δύο κριτήρια (K2, K3) οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων εκφράζονται σε αριθμητική κλίμακα από 0 έως και 10, με βήμα 1.

Στον Πίνακα 20.25 παρουσιάζονται οι ανά κριτήριο αξιολόγησης επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, όπως προέκυψαν από εφαρμογή των δεδομένων:

Πίνακας 20.25: Επιδόσεις Εναλλακτικών Λύσεων στα Κριτήρια Αξιολόγησης.

Table 20.25: Performances of Alternatives per Criterion.

ΚΡΙΤΗΡΙΟ →			
ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ↓	«K1»: IRR	«K2»: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	«K3»: Ποιότητα συγκοινωνιακών υπηρεσιών
Λύση «E1»	94%	8	9
Λύση «E2»	162%	5	5
Λύση «E3»	74%	8	6

### 20.4.2 Βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης

Για την εύρεση των σχετικών βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης θα μορφωθεί καταρχήν το μητρώο των στοιχείων  $w_{i,j}$ . Έκαστο των στοιχείων  $w_{i,j}$  αναφέρεται στη σύγκριση εντός του διατεταγμένου ζεύγους κριτηρίων  $K_i$ ,  $K_j$  και έχει τιμή 1 (για υπεροχή του  $K_i$  έναντι του  $K_j$ ) ή 0 (για υστέρηση του  $K_i$  έναντι του  $K_j$ ) ή 0,5 (για ισοδυναμία των  $K_i$  και  $K_j$ ).

Έστω ότι από μία ομάδα ειδικών θεωρούνται τα:

K1 ολιγότερο σπουδαίο του K2,

K1 ολιγότερο σπουδαίο του K3,

K2 σπουδαιότερο του K3.



Αυτά, εκφράζονται στο παρακάτω μητρώο (Πίνακας 20.26):

Πίνακας 20.26: Κατά ζεύγη συγκρίσεις των κριτηρίων αξιολόγησης.  
Table 20.26: Pair wise comparisons of evaluation criteria.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	K1	K2	K3
→ ↓			
K1	0,50	0	0
K2	1,00	0,50	1,00
K3	1,00	0	0,50

Από τη σχέση:

$$W_i = \sum_j (w_{i,j})$$

προκύπτουν τα μη κανονικοποιημένα σχετικά βάρη  $W_i$  των κριτηρίων:

$$W_1 = 0,50, W_2 = 2,50, W_3 = 1,50.$$

Από τη σχέση:

$$W_i = W_i / [\sum_i (W_i)]$$

προκύπτουν τα κανονικοποιημένα σχετικά βάρη  $W_i$  των κριτηρίων:

$$W_1 = 0,11, W_2 = 0,56, W_3 = 0,33.$$

### 20.4.3 Επιδόσεις ανά κριτήριο των εναλλακτικών λύσεων

Μετά την εύρεση των σχετικών βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης, στη συνέχεια ευρίσκονται οι τελικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών αξιολογούμενων λύσεων.

Για κάθε κριτήριο  $K_i$  μορφώνεται ένας αντίστοιχος πίνακας, ο οποίος αποτελείται από στοιχεία  $p_{l,l',i}$ . Οι τιμές των στοιχείων  $p_{l,l',i}$  προκύπτουν από τις αρχικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων (οι οποίες εμφανίστηκαν στον πίνακα 20.25). Συγκεκριμένα, έκαστο στοιχείο  $p_{l,l',i}$ , αναφέρεται στη σύγκριση των επιδόσεων των διατεταγμένων εναλλακτικών  $E_l$  και  $E_{l'}$  και έχει τιμή 1 (για καλύτερη επίδοση της  $E_l$  έναντι της  $E_{l'}$ ) ή 0 (για χειρότερη επίδοση της  $E_l$  έναντι της  $E_{l'}$ ) ή 0,5 (για ισοδυναμία των επιδόσεων των  $E_l$  και  $E_{l'}$ ).

Έτσι, προκύπτουν οι Πίνακες 20.27, 20.28, 20.29 (ένας πίνακας ανά κριτήριο αξιολόγησης) στους οποίους εμφανίζονται τα στοιχεία  $p_{l,l',i}$ . Από τα στοιχεία  $p_{l,l',i}$ , με άθροιση κατά σειρά, ευρίσκονται τα στοιχεία  $P_{l,i}$ , δηλαδή οι τελικές ανά κριτήριο επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων, τα οποία παρατίθενται αμέσως μετά από κάθε Πίνακα.

Ήτοι:

$$P_{l,i} = \sum_{l'} (p_{l,l',i})$$

Πίνακας 20.27: Στοιχεία για το κριτήριο  $K_1$ .

Table 20.27: Elements for criterion  $K_1$ .

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ	E1	E2	E3
→ ↓			
E1	0,50	0	1,00
E2	1,00	0,50	1,00
E3	0	0	0,50

Τα προκύπτοντα  $P_{l,1}$ , έχουν ως εξής:

$$P_{1,1} = 1,50, P_{2,1} = 2,50, P_{3,1} = 0,50.$$

Πίνακας 20.28: Στοιχεία για το κριτήριο K2.

Table 20.28: Elements for criterion K2.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ → ↓	E1	E2	E3
E1	0,50	1,00	0,50
E2	0	0,50	0
E3	0,50	1,00	0,50

Τα προκύπτοντα P<sub>1,2</sub>, έχουν ως εξής:  
P<sub>1,2</sub> = 2,00, P<sub>2,2</sub> = 0,50, P<sub>3,2</sub> = 2,00.

Πίνακας 20.29: Στοιχεία για το κριτήριο K3.

Table 20.29: Elements for criterion K3.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ → ↓	E1	E2	E3
E1	0,50	1,00	1,00
E2	0	0,50	0
E3	0	1,00	0,50

Τα προκύπτοντα P<sub>1,3</sub>, έχουν ως εξής:  
P<sub>1,3</sub> = 2,50, P<sub>2,3</sub> = 0,50, P<sub>3,3</sub> = 1,50.

Τελικά, όλα τα προκύπτοντα P<sub>1,i</sub>, παρουσιάζονται, για λόγους καλύτερης εποπτείας, και συγκεντρωτικά, στον ακόλουθο Πίνακα 20.30:

Πίνακας 20.30: Συγκεντρωτικά στοιχεία ανά εναλλακτική και κριτήριο.

Table 20.30: Elements values per alternative and criterion.

Κριτήρια K <sub>i</sub> → Εναλλακτικές Λύσεις E <sub>i</sub> ↓	K1	K2	K3
E1	1,50	2,00	2,50
E2	2,50	0,50	0,50
E3	0,50	2,00	1,50

#### 20.4.4 Αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων

Υπολογίζονται οι τελικές ολικές επιδόσεις P<sub>0i</sub> των εναλλακτικών λύσεων E<sub>i</sub>, από τη σχέση:

$$P_{0i} = \sum (W_i * P_{1,i})$$

Έτσι, αντικαθιστώντας στη σχέση αυτή τις ευρεθείσες για το υπόψη παράδειγμα τιμές των βαρών των κριτηρίων και των ανά κριτήριο τελικών επιδόσεων των εναλλακτικών λύσεων, οι προκύπτουσες P<sub>0i</sub>, έχουν ως εξής:

$$P_{01} = 2,11,$$

$$P_{02} = 0,72,$$

$$P_{03} = 1,67.$$

Οι εναλλακτικές λύσεις E<sub>i</sub> κατατάσσονται από την καλύτερη ως τη χειρότερη σε ευθεία αναλογία των μεγεθών των P<sub>0i</sub>. Επομένως, η τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων του υπόψη παραδείγματος, από την καλύτερη ως τη χειρότερη έχει ως εξής:

E1 – E3 – E2.

Σημειώνεται ότι και σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση που έγινε βάσει άλλων μεθόδων, με τη συμμετοχή διεθνών φορέων και του Υπουργείου Μεταφορών της Βουλγαρίας (Bonifica – Doxiadis Associates – TECNIC, 1999), η κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων ήταν ακριβώς η ίδια με αυτή εδώ.

#### 20.4.5 Έλεγχοι

Αναφορικά με τη συνοχή της κλίμακας αναγωγής, έγινε ανάλυση προηγουμένως. Εδώ, ακολουθεί εφαρμογή των όσων έχουν αναπτυχθεί.

Πιο συγκεκριμένα, γίνεται έλεγχος του «συγκείμενου», για κάθε πίνακα έκφρασης κατά ζεύγη συγκρίσεων.

- (α) Έλεγχος σύγκρισης κριτηρίων :

Λαμβάνονται τα ιδεατά στοιχεία:

$v-\sigma-0,5$ , όπου εδώ το  $\sigma$  παίρνει τις τιμές: 0,1,2, αφού το πλήθος των κριτηρίων είναι 3, δηλαδή  $v=3$ .

Επομένως, στην πράξη, τα στοιχεία της απόλυτης συμβατότητας έχουν ως εξής (για  $v=3$ ):

$$3-0-0,5 = 2,50,$$

$$3-1-0,5 = 1,50,$$

$$3-2-0,5 = 0,50.$$

Επομένως, προέκυψε το «ιδεατό διάνυσμα» του απολύτως συγκείμενου: (2,50, 1,50, 0,50).

Στη συνέχεια λαμβάνονται τα πραγματικά (προκύψαντα) βάρη των κριτηρίων, και μάλιστα τα απλά, όχι τα κανονικά, τα οποία και τίθενται κατά φθίνουσα τάξη, οπότε δημιουργείται το ακόλουθο «πραγματικό διάνυσμα»: (2,50, 1,50, 0,50).

Όπως αναφέρθηκε και κατά τη θεωρητική παρουσίαση, ακολουθεί αφαίρεση (διανυσμάτων) κατά αντιστοιχούν στοιχείο, δηλαδή εδώ με αριθμούς:

$$(2,50-2,50, 1,50-1,50, 0,50-0,50) = (0, 0, 0).$$

Λαμβάνοντας έναν καθαρά αθροιστικό σταθερότυπο, το μέτρο του υπόψη διανύσματος ισούται με:

$$0+0+0=0.$$

Επομένως, υπάρχει μηδενική «απόσταση» μεταξύ ιδεατού και πραγματικά προκύψαντος συνόλου βαρών, ήτοι, στην περίπτωση αυτή παρατηρείται η μέγιστη δυνατή συμβατότητα.

- (β) Έλεγχος σύγκρισης επιδόσεων στο κριτήριο K1:

Εδώ το πλήθος των εναλλακτικών είναι τρία, επομένως, για  $v=3$ , το «διάνυσμα» της απόλυτης συμβατότητας έχει ως εξής:

$$(2,50, 1,50, 0,50).$$

Θέτοντας σε φθίνουσα τάξη τα προκύψαντα στοιχεία –επιδόσεις, το «διάνυσμα» πραγματικών επιδόσεων (στο κριτήριο K1), έχει ως εξής:

$$(2,50, 1,50, 0,50).$$

Με αφαίρεση του πραγματικού από το ιδεατό διάνυσμα, προκύπτει:

$$(2,50-2,50, 1,50-1,50, 0,50-0,50) = (0, 0, 0),$$

το οποίο είναι το μηδενικό διάνυσμα, του οποίου ο σταθερότυπος αθροιστικού τύπου είναι μηδενικός.

Επομένως, και εδώ υπάρχει απόλυτη συμβατότητα, ήτοι, πλήρη συνοχή της κλίμακας.

- (γ) Έλεγχος σύγκρισης επιδόσεων στο κριτήριο K2:

Εδώ το πλήθος των εναλλακτικών είναι τρία, επομένως, για  $v=3$ , το «διάνυσμα» της απόλυτης συμβατότητας έχει ως εξής:

$$(2,50, 1,50, 0,50).$$

Θέτοντας σε φθίνουσα τάξη τα προκύψαντα στοιχεία –επιδόσεις, το «διάνυσμα» πραγματικών επιδόσεων (στο κριτήριο K2), έχει ως εξής:

(2,00, 2,00, 0,50).

Στη συνέχεια, ευρίσκονται οι απόλυτες τιμές των κατά στοιχείο αφαιρέσεων μεταξύ του ιδεατού και του πραγματικού διανύσματος:

$(|2,50-2,00|, |1,50-2,00|, |0,50-0,50|) = (0,50, 0,50, 0)$ .

Λαμβάνοντας τον αθροιστικό σταθερότυπο πρώτου εκθετικού βαθμού, το μέτρο του προκύψαντος διανύσματος έχει ως εξής:  $0,50+0,50+0 = 1,00$ .

Στη συνέχεια, για  $v=3$  προκύπτουν αντίστοιχα:

$v = 0,00$ ,

[ως ο μέγιστος των φυσικών αριθμών οι οποίοι πληρούν τη σχέση:  $v < (v/2) - 0,5$ ]

και

$\max(\text{Π.Δ.Σ.}) = 2,00$

[από τη σχέση:  $\max(\text{Π.Δ.Σ.}) = (v+1) * (v-1-v)$ ].

Επομένως, ο Π.Δ.Σ. του εδώ ελέγχου είναι 1,00, άρα σημαντικά μικρότερος του αντίστοιχου  $\max(\text{Π.Δ.Σ.})$ , ο οποίος ισούται με 2,00.

Άρα, ο Π.Δ.Σ. του εδώ ελέγχου κρίνεται ικανοποιητικός, ήτοι η συνοχή της μεθόδου ως προς τις επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων στο κριτήριο K2, κρίνεται ικανοποιητική.

- (δ) Έλεγχος σύγκρισης επιδόσεων στο κριτήριο K3:

Εδώ το πλήθος των εναλλακτικών είναι τρία, επομένως, για  $v=3$ , το «διάνυσμα» της απόλυτης συμβατότητας έχει ως εξής:

(2,50, 1,50, 0,50).

Θέτοντας σε φθίνουσα τάξη τα προκύψαντα στοιχεία –επιδόσεις, το «διάνυσμα» πραγματικών επιδόσεων (στο κριτήριο K3), έχει ως εξής:

(2,50, 1,50, 0,50).

Επομένως, όπως και στην περίπτωση των επιδόσεων εντός του κριτηρίου K1, έτσι και εδώ, για τις επιδόσεις των εναλλακτικών εντός του K3, υφίσταται απόλυτη συμβατότητα.

Κατά συνέπεια: Όλοι οι έλεγχοι συνοχής της κλίμακας για την παρούσα εφαρμογή έδειξαν από αρκετά καλή έως και άριστη συνοχή (συμβατότητα).

#### **20.4.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με αυτά με εφαρμογή της κλίμακας Saaty**

Το συγκεκριμένο πραγματικό πρόβλημα αξιολόγησης (συγκοινωνιακών έργων) έχει επιλυθεί με εφαρμογή της κλίμακας Saaty (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), δίδοντας τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα, ήτοι πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, από την καλύτερη ως τη χειρότερη ως εξής:

E1 – E3 – E2.

Αυτό ενισχύει την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου.

Πρέπει ακόμη να τονισθεί, ότι στο υπόψη πρόβλημα, η εδώ εφαρμογή έναντι αυτής της κλίμακας Saaty, είναι πολύ πιο απλή. Η εφαρμογή της κλίμακας Saaty (Τσαμπούλας Δ. – Γιώτης Γ. – Ροϊλός Η., 1999), απέβη πιο δύσκολη και πιο χρονοβόρα για το υπόψη πρόβλημα έναντι της εδώ προτεινόμενης μεθόδου. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τη χρησιμότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

## ΕΝΟΤΗΤΑ Ε: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ – 21: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 21.1 Γενικά

Η προτεινόμενη μέθοδος είναι μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Προορίζεται κυρίως για εφαρμογή σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, χωρίς να αποκλείεται η εφαρμογή της και αλλού.

Οι κυριότεροι άξονες θεωρήσεως της μεθόδου, από όπου προκύπτουν και τα κυριότερα στοιχεία/καινοτομίες αυτής, είναι οι ακόλουθοι:

- 1<sup>ο</sup> Η Στάθμιση των Κριτηρίων αξιολόγησης
- 2<sup>ο</sup> Η Ενοποίηση των Κριτηρίων
- 3<sup>ο</sup> Η Μεταβολή των Επιδόσεων των εναλλακτικών με το χρόνο
- 4<sup>ο</sup> Η Εξάρτηση Κριτηρίων και η Ιεράρχησή τους
- 5<sup>ο</sup> Οι Κλίμακες Αναγωγής
- 6<sup>ο</sup> Η Αβεβαιότητα στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση

#### 21.2 Συμπεράσματα

Η προτεινόμενη μέθοδος, μπορεί να αξιολογηθεί στη βάση της διερεύνησης των δυνατοτήτων της σε όρους **διαφάνειας, απλότητας, ισχύος, λογικής**. Αναλυτικά η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου έχει ως εξής:

- (i) Διαφάνεια

Επιμέρους κριτήρια που εντάσσονται στο ευρύτερο κριτήριο Διαφάνεια είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η καλύτερη δυνατή συμβατότητα/απόκριση σε πραγματικές συνθήκες.
- 2) Η εγγύτητα προς την ανθρώπινη λογική.
- 3) Η καλή δόμηση της μεθόδου και η ευκολία στο να ακολουθηθεί.
- 4) Η χρήση ισχυρών μαθηματικών προσεγγίσεων για την αναπαράσταση της πραγματικότητας.

Καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε η παρούσα μέθοδος να αποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες, όπως ετερογένεια κριτηρίων αξιολόγησης, διακύμανση των επιδόσεων στο χρόνο, ενδεχόμενες ακραίες επιδόσεις, συνάφεια κριτηρίων αξιολόγησης. Ο στόχος της μέγιστης δυνατής συμβατότητας της μεθόδου με πραγματικές συνθήκες, αποτέλεσε σημαντικό γνώμονα για τη διάκριση δύο (2) βασικών μαθηματικών περιπτώσεων κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ήτοι της περίπτωσης (I), όπου δεν είναι διαθέσιμα αρκετά στοιχεία ώστε να ευρεθούν αξιόπιστα οι γωνίες (άρα και ο ακριβής βαθμός συνάφειας) μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης γενικά και της περίπτωσης (II), όπου είναι διαθέσιμα αρκετά στοιχεία προσδιορισμού των γωνιών μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης.

Η μαθηματική υπόσταση - δόμηση της μεθόδου σε τέσσερα (4) βασικά βήματα κατατείνει στην ευκολία του να ακολουθηθεί.

Η ύπαρξη επιμέρους βημάτων εντός των ευρύτερων βασικών τεσσάρων (4) αλγοριθμικών βημάτων, συνάδει με την αναλυτικότητα της ανθρώπινης λογικής.

Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί ισχυρά και σαφή μαθηματικά εργαλεία για την αναπαράσταση της πραγματικότητας. Έτσι, χρησιμοποιεί Συναρτησιακή Ανάλυση (Χώρους Hilbert) και Αναλυτική Γεωμετρία για τον προσδιορισμό των γωνιών μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης (όταν βέβαια υφίστανται αρκετά αξιόπιστα στοιχεία προς αξιοποίηση). Επίσης, στην περίπτωση που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι εν λόγω γεωμετρικές δομές, λόγω

έλλειψης στοιχείων προς αξιοποίηση, η μέθοδος χρησιμοποιεί τις Σειρές Αριθμών – Συναρτήσεις, χρησιμοποιώντας την αρμονική ακολουθία και σειρά, για να ενοποιήσει κριτήρια σε ευρύτερα κριτήρια, στη βάση της εννοιολογικής και πραγματιστικής μεταξύ τους συνάφειας. Επίσης, η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί συναρτησιακές και ολοκληρωματικές δομές από τη Μαθηματική Ανάλυση ώστε να περιγράψει τη χρονική μεταβολή-διακύμανση των επιδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια. Ακόμη, χρησιμοποιούνται δομές Πινάκων Άλγεβρας για την υπέρθεση κατά ζεύγη συγκρίσεων μεγεθών σε τελικές τιμές αυτών, όπως στην περίπτωση κατά ζεύγη συγκρίσεων των βαρών των κριτηρίων και των επιδόσεων των εναλλακτικών.

- (ii) Απλότητα

Ένα από τα πιο επιθυμητά χαρακτηριστικά των μεθοδολογιών αξιολόγησης είναι η απλότητα. Η ικανότητα μίας μεθόδου να παρέχει μία ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικών καταστάσεων και περιβάλλοντος κόσμου, ήτοι μία καλή απόδοση των πραγματικών συνθηκών, μπορεί να θεωρηθεί ως ο ορισμός της απλότητας.

Η προτεινόμενη μέθοδος ακολουθεί μία σαφή δόμηση, η οποία μάλιστα εξειδικεύεται μαθηματικά κατά περίπτωση. Έτσι, διακρίνονται δύο βασικές περιπτώσεις [(I) και (II)], ανάλογα με την ύπαρξη ή μη επαρκών στοιχείων για να προσδιορισθούν οι γωνίες (βαθμός εξάρτησης) μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης.

Χάριν απλότητας, ακόμη και σε ιδιάζοντες από τη φύση τους τομείς, χρησιμοποιούνται στην προτεινόμενη μέθοδο απλά εργαλεία, όπως οι συντελεστές χρονικής απόκλισης για τη χρονική διακύμανση των επιδόσεων. Επίσης, κατά τη μελέτη και προσδιορισμό κάθετης συνιστώσας διανύσματος επί χώρου άλλων διανυσμάτων, αφενός απλουστεύεται μαθηματικά όσο είναι δυνατόν η ακριβής μέθοδος Χώρων Hilbert, αφετέρου προτείνεται και μία απλούστερη ακόμη τεχνική (προσεγγιστική) η οποία βασίζεται σε Τριγωνομετρικές δομές.

Ακόμη, παρά το ότι θεωρούνται και μελετώνται από την προτεινόμενη μέθοδο κλίμακες συναρτησιακής ενδελέχειας, παράλληλα προτείνονται απλούστεροι τρόποι αναγωγής από αρχικά στοιχεία σε μεγέθη αξιολόγησης (βάρη κριτηρίων, επιδόσεις εναλλακτικών), όπως η κατά ζεύγη σύγκριση.

- (iii) Ισχύς

Η ισχύς είναι μία πολύ σημαντική ιδιότητα, ιδιαίτερα στη στρατηγική αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων, όπου οι περισσότερες αποφάσεις λαμβάνονται υπό συνθήκες αβεβαιότητας, χρησιμοποιώντας διάσπαρτες πληροφορίες. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ισχύς αναφέρεται στην λειτουργική ικανότητα μίας μεθόδου όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

*(α) Απαιτήσεις Δεδομένων*

Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να αξιοποιήσει και ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες, λόγω των αρκετών εργαλείων τα οποία ενσωματώνει, αλλά και της διάκρισης-εξειδίκευσης κατά περίπτωση δεδομένων [(I) και (II) περιπτώσεις] την οποία επιτυγχάνει σε μαθηματική υπόσταση.

Μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων μορφών και τύπων κλιμάκων αναγωγής, μπορεί να αξιοποιήσει ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία αναφορικά με τις επιδόσεις των εναλλακτικών στα κριτήρια.

Επίσης, διαθέτει μηχανισμούς και τεχνικές ενσωμάτωσης κριτηρίων σε ευρύτερα κριτήρια αλλά και αξιοποίησης μίας δεδομένης ιεράρχησης κριτηρίων.

Ακόμη, επειδή διαθέτει τη θεώρηση της μεταβολής των επιδόσεων στο χρόνο και τον τρόπο εφαρμογής, η προτεινόμενη μέθοδος δύναται να αξιοποιήσει πληροφορίες σχετικά με τη μεταβολή των επιδόσεων των εναλλακτικών κατά τη χρονική περίοδο αξιολόγησης.

*(β) Χειρισμός κάθε αριθμού Εναλλακτικών/Κριτηρίων*

Η προτεινόμενη μέθοδος δεν παρουσιάζει πρόβλημα με ενδεχόμενο μεγάλο αριθμό εναλλακτικών, ούτε σε πιθανό μεγάλο αριθμό κριτηρίων, αφού τελικά καταλήγει σε απλή αθροιστική δομή.

Επίσης, ακόμη και όπου λειτουργεί με κατά ζεύγη μεγεθών μελέτη-σύγκριση (π.χ. συνάφεια μεταξύ δύο κριτηρίων, σύγκριση επιδόσεων δύο εναλλακτικών στο ίδιο κριτήριο), διαθέτει μηχανισμούς υπέρθεσης της κατά ζεύγη δομής και λειτουργίας σε σαφή επαλληλίζοντα μεγέθη. Παραδείγματα τέτοιων μηχανισμών στην προτεινόμενη μέθοδο είναι οι Αλγεβρικοί Πίνακες, όπου με άθροισμα κατά σειρά μπορεί να υπερτεθούν στοιχεία τους και οι Τριγωνομετρικές δομές, όπου με πολλαπλασιασμό ημιτόνων υπερθέτονται αρχικά στοιχεία.

*(γ) Χειρισμός της Αβεβαιότητας*

Η προτεινόμενη μέθοδος διαθέτει ιδιαίτερους μηχανισμούς χειρισμού/αντιμετώπισης της Αβεβαιότητας, όπου ποιοτικές σχέσεις δύνανται να μετατραπούν σε ποσοτικές και να αξιοποιηθούν.

Εκτός όμως από τα περιλαμβανόμενα στο εξειδικευμένο αυτό τμήμα της μεθοδολογίας (στο 6<sup>ο</sup> Στοιχείο), πρέπει να τονισθεί ότι και η γενικότερη δομή της προτεινόμενης μεθόδου αντιμετωπίζει την Αβεβαιότητα. Συγκεκριμένα, μπορεί να αναφερθεί ότι ακόμη και όταν δεν υπάρχουν αρκετά αρχικά στοιχεία για τον ακριβή και αξιόπιστο προσδιορισμό των γωνιών μεταξύ των κριτηρίων, άρα όταν δεν εμπίπτουμε στην μαθηματική περίπτωση (II), ακόμη και τότε [περίπτωση (I)] η προτεινόμενη μέθοδος έχει δυνατότητες αντιμετώπισης του συγκεκριμένου ζητήματος, αφού με την εφαρμογή της αρμονικής ακολουθίας και σειράς συντελεστών, μπορεί να ενοποιήσει κατά κάποιο τρόπο επιδόσεις κριτηρίων. Από θεωρητικής μάλιστα άποψης, η ακολουθία αρμονικών συντελεστών αποτελεί εφαρμογή ακολουθίας μεσοσταθμικών πιθανοτικών βαθμών εξάρτησης μεταξύ κριτηρίων.

*(δ) Ενθάρρυνση των ειδημόνων να συμμετάσχουν*

Η προτεινόμενη μέθοδος ενθαρρύνει κατά την μαθηματική της υπόσταση τη συμμετοχή ειδημόνων.

Έτσι, πολύ βασικό στοιχείο ενθάρρυνσης ειδημόνων είναι η διάκριση σε δύο επιμέρους μαθηματικές περιπτώσεις [(I) και (II)] που γίνεται κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, ανάλογα με τα υφιστάμενα αρχικά στοιχεία.

Επίσης, η ύπαρξη αρκετών μηχανισμών λειτουργίας εντός της προτεινόμενης μεθόδου, όπως ο μηχανισμός μελέτης της χρονικής μεταβολής-διακύμανσης των επιδόσεων και ο μηχανισμός της «χρηστικής στάθμισης» κριτηρίων με βάση τις επιδόσεις, ενθαρρύνουν τη συμμετοχή ειδημόνων.

*(ε) Ευαισθησία*

Η Ευαισθησία αναφέρεται στην ικανότητα κάθε μεθόδου να διακρίνει διαφορές επιδόσεων εναλλακτικών ή βαρών κριτηρίων, όταν οι διαφορές αυτές είναι πολύ μικρές. Αυτό το πρόβλημα έχει δύο πτυχές και σχετίζεται (1) με την ποιότητα των μετασχηματισμών από φυσική σε τεχνητή κλίμακα μέτρησης και (2) στην ελάχιστη «αποφασιστικότητα» κάθε μεθόδου όπως αυτή θεωρείται.

Ως προς το (1), η προτεινόμενη μέθοδος το αντιμετωπίζει με τον τρόπο που περιγράφεται στο 5<sup>ο</sup> Στοιχείο της μεθοδολογίας της. Επίσης, μπορεί να ενσωματώνει ποικίλες μορφές/τύπους κλιμάκων αναγωγής από φυσικές σε τεχνητές επιδόσεις, όπως συναρτησιακής μορφής κλίμακες, απλές οιονεί γραμμικής κλίμακας αναγωγές κανονικοποίησης επιδόσεων, έμμεσα ορισμένες κλίμακες μέσω απλών ιεραρχικών διατάξεων τιμών.

Ως προς το (2), με το μηχανισμό της χρηστικής στάθμισης κριτηρίων μπορεί να αποτρέψει έγκριση εναλλακτικών με ακραία χαμηλές επιδόσεις σε κάποια κριτήρια, ενώ με το

μηχανισμό ελέγχου της χρονικής μεταβολής των επιδόσεων, μπορεί να αποτρέψει έγκριση εναλλακτικών με πολύ άσχημη χρονικά κατανομή επιδόσεων.

- (iv) Λογική

Μία λογική πολυκριτηριακή ανάλυση, παράλληλα με το να μπορεί να ιχνηλατήσει μία απόφαση, είναι σχετιζόμενη με το βαθμό των αλληλοσυμψηφισμών μεταξύ των εναλλακτικών. Αυτό μπορεί να γίνει καλύτερα αντιληπτό μέσω της έννοιας της ασυγκριτότητας. Στην ανάλυση λήψης αποφάσεων, οι σχέσεις ασυγκριτότητας συχνά κάνουν την διαδικασία αξιολόγησης πιο ρεαλιστική και ενδυναμώνουν τη λογική των αποτελεσμάτων. Παρόλα αυτά, αυτές οι σχέσεις μπορούν να τυποποιηθούν μόνον όταν δεν επιτρέπεται πλήρης συμψηφιστικότητα (π.χ. όταν οι επιδόσεις στα κριτήρια δεν αλληλοαναιρούνται πλήρως). Επομένως, μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η λογική αξιολόγηση και ο αλληλοσυμψηφισμός είναι έννοιες αντίθετες.

Η προτεινόμενη μέθοδος μέσω των ορίων που θέτει και χρησιμοποιεί στη χρηστική στάθμιση κριτηρίων, ουσιαστικά θέτει υπό μία έννοια κατώφλια επιδόσεων εν δυνάμει ενεργοποίησης αρνησικυρίας. Αυτό συνάδει με τη λογικότητα της διαδικασίας αξιολόγησης.

Επίσης, η εν δυνάμει ποσοτικοποίηση της συνάφειας μεταξύ κριτηρίων αξιολόγησης, συνάδει με τη λογικότητα, αφού προσομοιώνει τα κριτήρια με διανύσματα, επιτρέποντας λειτουργία δομών επεξεργασίας του φυσικού/πραγματικού κόσμου.

### **21.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Λόγω της πολυδιάστατης μορφής της πολυκριτηριακής αξιολόγησης των συγκοινωνιακών έργων –και όχι μόνο αυτών– προκύπτει ότι υπάρχουν αρκετοί τομείς στους οποίους θα μπορούσε να επεκταθεί η έρευνα και οι μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή. Μερικοί από τους τομείς αυτούς είναι:

- Δυνατότητες εφαρμογής δυναμικής αξιολόγησης όχι μόνο με τη χρονική διάσταση, αλλά και με άλλες οντότητες, όπως ο χώρος, τα ανθρωποσύνολα κ.ά.
- Η εικόνα της καλύτερης λύσης στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση. Αντί για σταθερή ροή χρόνου, να εξετασθούν συνθήκες σταθερής ροής χρημάτων με κριτήριο αξιολόγησης τον ελάχιστο χρόνο μετάβασης από μία εναλλακτική σε μία άλλη εναλλακτική (προφανώς η οποιαδήποτε δυάδα εναλλακτικών σε αυτή τη θεώρηση είναι διατεταγμένη).
- Διθανότητες αξιοποίησης ευρύτερων μαθηματικών εργαλείων, όπως για παράδειγμα η Θεωρία Βελτιστοποίησης Συναρτήσεων Πολλών Μεταβλητών με χρήση Εσσιανών Οριζουσών (Hesse determinants).



## ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ (GLOSSARY)

- **Εναλλακτική Λύση (Alternative):** Η εναλλακτική υπό αξιολόγηση λύση.
- **Παράγοντας (Object):** Τομέας του εννοιολογικού πεδίου επιρροής μίας εναλλακτικής λύσης.
- **Κριτήριο (Criterion):** Οντότητα (entity) μορφοποίησης ενός ή περισσότερων παραγόντων.
- **Υποκριτήριο (Subcriterion):** Επιμέρους κριτήριο, μικρότερου εύρους από το βασικό κριτήριο στο οποίο ανήκει.
- **Δείκτης κριτηρίου (Indicator):** Οντότητα (entity) έκφρασης-μέτρησης κριτηρίου.
- **Κλίμακα (Scale):** Η διάσταση αριθμητικής έκφρασης του δείκτη κριτηρίου.
- **Βάρος Κριτηρίου (Weight):** Μορφοποίηση της σημαντικότητας κριτηρίου.
- **Επίδοση (Attribute/Performance):** Η οντότητα (entity) βάσει της οποίας αποτιμάται μία εναλλακτική (συνολικά ή ως προς ένα κριτήριο).
- **Αξιολόγηση (Evaluation/Assessment):** Διαδικασία θεώρησης, έκφρασης, αποτίμησης και σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων.
- **Λήψη Απόφασης (Decision Making):** Η λήψη απόφασης για την τύχη των εναλλακτικών, η οποία έπεται της αξιολόγησής τους (του αντικειμένου των εναλλακτικών) και η οποία εκτός από την ίδια την αξιολόγηση απαιτεί και την επίγνωση της εν γένει κατάστασης του υποκειμένου (αποφασίζοντος) (π.χ. οικονομική και κοινωνική κατάσταση της χώρας ή της περιφέρειας όταν ο αποφασίζων είναι Δημόσια Αρχή).
- **Τιμή (Value):** Οντότητα (entity) αποτίμησης της αξίας επιδόσεων εντός ενός κριτηρίου αξιολόγησης.
- **Χρησιμότητα (Utility):** Οντότητα (entity) αποτίμησης της χρησιμότητας επιδόσεων.
- **Χώρος Λύσεων (Space of Solution):** Ο Χώρος που περιλαμβάνει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τιμών των βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης, με δεδομένες βέβαια κάποιες συνθήκες, όπως η κανονικότητα των βαρών και ίσως κάποια σχέση διάταξης των βαρών και στον οποίο Χώρο υπάρχει αμφιμονοσήμαντη αντιστοίχιση σημείων και συνδυασμών των βαρών των κριτηρίων.
- **Υπόχωρος Λύσεων (Subspace of Solution):** Τμήμα του Χώρου Λύσεων, στο οποίο πέραν των συνθηκών που ισχύουν στον όλο Χώρο Λύσεων, ισχύουν και άλλες συνθήκες, με αμφιμονοσήμαντη πάντοτε αντιστοίχιση σημείων και συνδυασμών των βαρών των κριτηρίων.
- **Αβεβαιότητα (Uncertainty):** Η Αβεβαιότητα προκύπτει από την αδυναμία απόδοσης συγκεκριμένης τιμής σε κάποιο μέγεθος λόγω έλλειψης στοιχείων ή αδυναμίας λογιστικής μεθόδου. Ως Αβεβαιότητα μπορεί να οριστεί η απόκλιση της εκτιμηθείσας (μετρηθείσας, προβλεφθείσας, υπολογισθείσας) τιμής ενός μεγέθους/ποσότητας από την πραγματική τιμή αυτού.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:**

1. Abo-Sinna M.A., Amer A.H. (2005): **“Extensions of TOPSIS for multi-objective large-scale nonlinear programming problems”**, Applied Mathematics and Computation 162 (2005) 243–256.
2. Adler H.A. (1987): **“Economic Appraisal of Transport Projects”**, The Johns Hopkins University Press, 1987.
3. Αμπακούμκιν Κ. (1990): **«Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων»** Εκδόσεις Συμμετρία, 1990.
4. Αμπακούμκιν Κ., Τσαμπούλας Δ. (1997): **«Αξιολόγηση Συγκοινωνιακών Έργων»**, Ε.Μ.Π., 1997.
5. APAS (1995): **“Methodologies for Transport Impact Assessment”**, Directorate General for Transport, Commission of the European Communities Brussels, Final Report, 1995.
6. APAS/ROAD/3 (1995): **“Evaluation”**, Directorate General for Transport, unit A4, Commission of the European Communities Brussels, Final Report, 1995.
7. Bana e Costa Carlos A. (1990): **“Readings in Multicriteria decision aid”**, Springer-Verlag.
8. Banister D. (1997): **“Decision makers requirements for assessment”**. Working paper 1, DG VII, SAMI Project, European Commission, Brussels, Belgium.
9. Barr N. (2004): **“Economics of the welfare state”**. New York, Oxford University Press (USA).
10. Battiti Roberto, Mauro Brunato, Franco Mascia (2008): **“Reactive Search and Intelligent Optimization”**.
11. Battiti Roberto, Mauro Brunato (2011): **“Reactive Business Intelligence. From Data to Models to Insight”**. Trento, Italy: Reactive Search Srl.
12. Bell D.E., Keeney, R.L., Raiffa, H. (Editors) (1977): **“Conflicting Objectives in Decisions”**, John Wiley and Sons, New York.
13. Bellman R.E., Zadeh L.A. (2007): **“Decision Making in fuzzy environment”**. Management Science 17(4): 141-164, 2007.
14. Berberian K. Sterling (1999): **“An Introduction to Hilbert Space”**. American Mathematical Society, 1999.
15. Beuthe M., Scanella G. (1996): **“Applications compares des methods d’ analyse multicritere UTA”**. R.A.I.R.O., Operations Res., 30(3), 293-315, 1996.
16. Beuthe M., Eeckhoudt L., Scanella G. (2000): **“A practical multicriteria methodology for assessing risky public investments”**. Socio-Economic Planning Sciences 34 (2000), pp 121-139.
17. Beuthe M., Scanella G. (2001): **“Comparative analysis of UTA multicriteria methods”**. EJOR, 130 (2001), pp 246-262.
18. Blanchard B.S. (2004): **“Logistics Engineering and Management”**, (6<sup>th</sup> Ed.), Pearson – Prentice Hall, 2004.
19. Bose U., Davey A.M., Olson D.L. (1997): **“Multi-attribute utility methods in group decision-making: Past applications and potential for inclusion in GDSS”**. International Journal of Management Sciences 25:691–706, 1997.
20. Bouyssou D., Perny P. (1990): **“Ranking methods for valued preference relations: A characterization of a method based on leaving and entering flows”**. Eur. J. Operational Research, 610, 186-194.
21. Brans J.P., Vincke Ph. (1985): **“A Preference Ranking Organisation Method (The Promethee method for MCDM)”**. Management Science, Vol 31, No 6, Jun 1985.
22. Brans J.P., Vincke Ph., Mareschal B. (1986): **“How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method”**, EJOR, 24, pp. 228-238, 1986.
23. Brans J.P. (1994): **“The space of freedom of the decision maker or modelling the human brain”**, Vrije. Universiteit Brussel, Centre for statistics and operations research, working paper CSOOTW/265, 1994.
24. Brent R.J. (2006): **“Applied Cost-Benefit Analysis”**, Edward Elgar Publishing, 2006.
25. Button K.J., Pearman A.D. (Editors) (1983): **“The Practice of Transport Investment Appraisal”**, Gower Publishing Company.

26. Buede D. M. (1992): **“Software review: Three packages for AHP: Criterium, Expert Choice, and HIPRE 3+”**, Journal of Multicriteria Decision Analysis 1:2, 119-121, 1992.
27. Bonifica, Doxiadis Associates, T.E.C.N.I.C.: **“Preparation of Traffic Forecasts and Investment Programmes for the years 2000 and 2010 for the Development of the Bulgarian Transport System, in consideration of the transition to a free market economy”**, Republic of Bulgaria, Ministry of Transport.
28. Camargo M., Fonteix C., Koeh L., Zeng X., Delmotte F.: **“Using MAUT based multi-criteria decision support techniques for integrating expert knowledge in designing fashion oriented products”**.
29. Campbell H.F., Brown R.P.C. (2003): **“Benefit-Cost Analysis”**, Cambridge University Press, 2003.
30. Chen S., Billings S.A., Luo W. (1989): **“Orthogonal least squares methods and their application to non-linear system identification”**. Int. J. Contr. Vol. 50, no 5, pp 1873-1896, 1989.
31. Chen S., Cowan C.F.N., Grant P.M. (1991): **“Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks”**. IEEE Trans. Neural Networks, vol. 2, pp 302-309, Mar 1991.
32. Choi, Hyun-a Suh, Eui-ho, Suh, Chang-kyo (1994): **“Analytic Hierarchy Process: It can work for group decision support systems”**, Computers & Industrial Engineering, vol. 27, Iss: 1-4, Sept 1994, pp. 167-171.
33. Climaco J. (Ed.) (1997): **“Multicriteria Analysis”**, Springer.
34. Coello Coello C. A., Lamont G. B., Van Veldhuizen D. A. (2007): **“Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems”** (2 ed.). Springer.
35. Craft D., Halabi T., Shih H., Bortfeld T. (2006): **“Approximating convex Pareto surfaces in multiobjective radiotherapy planning”**. Medical Physics 33 (9): 3399–3407, 2006.
36. Cybenko G. (1989): **“Approximation by superpositions of a sigmoidal function”**. Math. Control, Signals and Systems, vol. 2, pp 303-314, 1989.
37. Dantzig G. (1949): **“Programming of Independent Activities: II Mathematical Model”**, Econometrica 17 (3), pp:200-211, 1949.
38. Dantzig G. (1963): **“Linear programming and extensions”**, Princeton University Press.
39. Das I., Dennis J. E. (1998): **“Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems”**. SIAM Journal on Optimization 8 (3): 631–657.
40. Deb K. (2001): **“Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms”**. John Wiley & Sons.
41. Deb, K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. (2002): **“A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II”**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6 (2): 182–197, 2002.
42. De Brucker K., De Winne N., Peeters C., Verbeke A., Winkelmans W. (1995): **“The Economic Evaluation of Public Investments in Transport Infrastructure: the Use of Multicriteria Analysis”**, International Journal of Transport Economics, vol. 22, no 3, Oct 1995.
43. De Leeneer, Pastijn H.(2002): **“Selecting land mine detection strategies by means of outranking MCDM techniques”**, EJOR, 139, pp. 327-338, 2002.
44. Despotis D.K., Yanacopoulos D., Zopounidis C. (1990): **“A review of the UTA multicriteria method and some improvements”**. Foundations of Computing and Decision Sciences, 15(2): 63-76, 1990.
45. Dungan J.L., Gao D., Pang A.T. (2002): **“Definitions of Uncertainty”**. NASA Ames Research Center – University of California Santa Cruz, April 13, 2002.
46. Dyer J.S., Fishburn P.C., Steuer R.E., Wallenius J., Zionts S.: **“Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: The Next Ten Years”**.
47. Edwards W., Barron F. H. (1994): **“SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multiattribute utility measurement”**, Organizational Behavior and Human Decision Processes, vol. 60, pp.306-325, 1994.

48. Edwards W. (1997): **“How to use Multiattribute Utility Theory for Social Decision Making”**, IEEE Trans. Systems Man, Cybern. 7, 326-340, 1997.
49. Geoffrion M., Dyer J.S., Feinberg A. (December 1972): **“An Interactive Approach for Multi-Criterion Optimization, with an Application to the Operation of an Academic Department”**. Management Science. Application Series (INFORMS) 19 (4 Part 1): 357–368.
50. Givescu O. (2007): **“The Oreste’s Method in the Multicriteria’s Decision Process for the Management of Tourism Field”**, Economia, Seria Management, 2007, vol 10, issue 1, pp 37-51.
51. Grabisch M. (1996): **“The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making”** European Journal of Operational Research, Vol: 89 Iss: 3, p: 445-456, 1996.
52. Hallot F., Beirens Ph., Pastijn H. (2000): **“MCDM Tool”**, Brussels, Belgium.
53. Hinloopen E., Nijkamp P., Rietveld P. (1983): **“Qualitative Discrete Multiple Criteria Choice Models in Regional Planning”**, Regional Science and Urban Economics 13 (1983), North Holland.
54. Holder R.D. (1990): **“Some Comments on the Analytic Hierarchy Process”**, Journal of the Operational Research Society, vol. 41, iss. 11, Nov. 1990, pp. 1073-1076.
55. Huang W.C., Teng J.Y., Huang M.J., Kou M.S. (2003): **“Port Competitiveness Evaluation by Fuzzy Multicriteria Grade Classification Model”**. Journal of Marine Science and Technology, vol. 11, No 1, pp: 53-60 (2003).
56. Hwang C.L., Yoon K. (1981): **“Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications”**, Springer, Berlin Heidelberg, 1981.
57. Ibrahim E.H., Mohamed S.E., Atwan A.A.: **“Combining Fuzzy Analytic Hierarchy Process and GIS to select the best location for a wastewater lift station in El-Mahalla El-Kubra, North Egypt”**. International Journal of Engineering and Technology, Vol 11, No 5.
58. Irvin G. (1978): **“Modern Cost-Benefit Methods: An Introduction to Financial, Economic and Social Appraisal of Development Projects”**. The Macmillan Press.
59. Jacquet-Lagrange E., Siskos J. (1982): **“Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method”**. EJOR, 10 (1982), pp 151-164.
60. Jahanshahloo G.R., Hosseinzadeh Lotfi, Izadikhah M. (2005): **“An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data”**, Applied Mathematics and Computation (2005).
61. Jean-Charles Pomerol, Sergio Barba-Romero: **“Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice”**. Kluwer’s International Series.
62. Jensen P., Leleur S. (1989): **“A PC Software Package for Planning and Decision Making of Multi-Criteria Investment Problems: WARP”**.
63. Junn-Yuan Teng, Gwo-Hshiong Tzeng: **“A Multiobjective Programming Approach for Selecting Non-Independent Alternatives”**, Transportation Investments Alternatives.
64. Kamenetzky R. (1982): **“The Relationship Between the Analytic Hierarchy Process and the Additive Value Function”**, Decision Sciences Vol. 13, 702-716, 1982.
65. Keeney R.L., Raiffa H. (1976): **“Decisions with Multiple Objectives: Performances and Value Trade-Offs”**, Wiley, New York, 1976.
66. Khorramshahgol, Moustakis V.S. (1988): **“Delphic Hierarchy Process (D.H.P); A methodology for priority setting derived from the Delphi method and Analytical Hierarchy Process”**, European Journal of Operational Research, vol. 37, 1988, pp. 347-354.
67. Κοινοπραξία NAMA – ΕΥΠΑΛΙΝΟΣ (1995): **«Προδιαγραφές Μελετών Σκοπιμότητας, μελέτη ανατεθείσα από το ΥΠΕΧΩΔΕ, 1995.**
68. Koksalan M., Wallenius J., Zionts S.: **“Multiple Criteria Decision Making: from Early History to the 21st Century”**, World Scientific.
69. Lai Y.J., Liu T.Y., Hwang C.L. (1994): **“TOPSIS for MODM”**, European Journal of Operational Research 76 (3) (1994) 486–500.
70. Larkin L.I. (1985): **“A fuzzy logic controller for aircraft flight control”**. In Industrial Applications of Fuzzy Control, M. Sugeno, Ed. Amsterdam: North Holland, 1985, pp 87-104.
71. Layard R., Glaister S. (1994): **“Cost-Benefit Analysis”**. Cambridge University Press, 1994.
72. Lee C.C. (1990): **“Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller, part I”**, IEEE Trans. Syst., Man., Cybern, vol. 20, no 2, pp 404-418, 1990.

73. Lee C.C. (1990): **“Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller, part II”**, IEEE Trans. Syst., Man., Cybern, vol. 20, no 2, pp 419-435, 1990.
74. Leleur S. (1995): **“Road Infrastructure Planning”**, Polyteknisk Forlag, 1995.
75. Mackie P.J., Palmer A., Pearman A.D., Watson S.M., Whelan G.A. (1994): **“Cost-Benefit and Multi-Criteria Analysis for New Road Construction”**, Final Report, Consultancy report for the Commission of the European Communities, Directorate General for Transport, published as DOC EURET/385/94 R&D Unit, DGVII,CEC, Brussels, 1994.
76. Maimone M. (1985): **“An Application of Multi-Criteria Evaluation in Assessing Municipal Solid Waste Treatment and Disposal Systems”**, 1985, Waste Management and Research, vol. 3, pp. 217 – 231.
77. Mareschal B. (1988): **“Weight stability intervals in multicriteria decision aid”**, EJOR, 33, pp.54-64, 1988.
78. Mareschal B., Brans J.P. (1988): **“Geometrical Representation for MCDM, the GAIA procedure”**, EJOR, 34, pp. 69-77, 1988.
79. Messac A., Ismail-Yahaya A., Mattson C.A. (2003): **“The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier”**. Structural and multidisciplinary optimization 25 (2): 86–98.
80. Messac A., Mattson C. A. (2004): **“Normal constraint method with guarantee of even representation of complete Pareto frontier”**. AIAA journal 42 (10): 2101–2111.
81. Mintzberg H.(1979): **“The structure of organisations: A synthesis of the research”**. Prentice-Hall, New York.
82. Motta S., Renato, Afonso, Silvana M. B., Lyra, Paulo R. M. (2012): **“A modified NBI and NC method for the solution of N-multiobjective optimization problems”**. Structural and Multidisciplinary Optimization, 8 January 2012.
83. Mueller-Gritschneider Daniel, Graeb Helmut, Schlichtmann Ulf (2009): **“A Successive Approach to Compute the Bounded Pareto Front of Practical Multiobjective Optimization Problems”**. SIAM Journal on Optimization 20 (2): 915–934, 2009.
84. Munda G. (1995): **“Multicriteria evaluation in a fuzzy environment”**. Contributions to economic Series. Physica-Verlag, Heidelberg.
85. Munda G. (2008): **“Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy”**. Springer.
86. Nas T.F. (1996): **“Cost-benefit analysis: theory and application”**, 1996.
87. Nijkamp P. (1979): **“Multidimensional Spatial Data and Decision Analysis”**. Wiley, New York.
88. Nijkamp P. (1981): **“Environmental Policy Analysis”**. John Wiley, New York, USA.
89. Nijkamp P., Leitner H., Wrigley N. (1985): **“Measuring the Unmeasurable”**. Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands.
90. Nijkamp P., Rietveld P., Voogd H. (1990): **“Multicriteria evaluation in physical planning: Contributions to economic analysis”**, North Holland, Amsterdam.
91. Nijkamp P., Blaas E. (1993): **“Impact Assessment and Evaluation in Transportation Planning”**, Kluwer Academic Publishers, 1993.
92. Nijkamp. P., Scholten H.J. (1993): **“Spatial Information Systems: design. modelling and use in plaming”**. International Journal of Geographical Information Systems, vol. 7, pp.85-96, 1993.
93. Orlin J.B. (1985): **“On the Simplex Algorithm for Networks and Generalized Networks”**, Mathematical Programming Studies 24 (1985), pp: 166-178, North Holland.
94. Paelinck J.H.P. (1978): **“Qualiflex: A flexible Multiple Criteria Method”**. Economic Letters, 1978, vol.1, issue 3, pp 193-197.
95. Παντελίδης Γ., Κραββαρίτης Δ., Νασόπουλος Β., Τσεκρέκος Π.: **«Γραμμική Άλγεβρα»**. Εκδόσεις Συμμεών.
96. Papadopoulos – Konidari: **“Overview and selection of multi-criteria evaluation methods for mitigation/adaptation policy instruments”**.
97. Pastijn H., Leysen J. (1989): **“Constructing an Outranking Relation with ORESTE”**, Mathematical Computer Modelling, Pergamon Press, Vol. 12, No 10/11, pp. 1255-1268, 1989.

98. Pastijn H., Leysen J.: **“Using an Ordinal Outranking Method Supporting the Acquisition of Military Equipment”**, NATO, Royal Military Academy, Brussels.
99. Pearce D. W. (1978): **“The valuation of social cost”**. Allen and Ubwin, London.
100. Polatidis H., Haralambopoulos D.A., Munda G., Vreeker R. (2006): **“Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning”**. Energy Sources, Part B.
101. Pomerol Jean-Charles, Barba-Romero Sergio: **“Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice”**. Kluwer’s International Series.
102. Raiffa (1970): **“Decision analysis introductory lectures on choices under uncertainty”**. Addison-Wesley, Reading, Mass.
103. Rogers M., Bruen M., Maystre L.-Y. (2000): **“Electre and Decision Support – Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment”**, Kluwer, 2000.
104. Roubens M. (1982): **“Preference relations on actions and criteria in multicriteria decision making”**, EJOR, 10, pp. 51-55, 1982.
105. Roy Bernard (1968): **« Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE) »**, Rev. Française Automat., Informat., Recherche Opérationnelle, 8, 1968.
106. Roy B., Vincke Ph. (1981): **“Multicriteria analysis : survey and new directions”**, EJOR, 8, pp. 207-218, 1981.
107. Roy Bernard (1985) : **« Methodologie Multicritere d’ Aide a la Decision”**, Economica, 1985.
108. Roy B., Bouyssou D. (1993): **« Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas »**, Economica, 1993.
109. Saaty T.L. (1980): **“The analytical hierarchical process”**. Wiley, New York.
110. Saaty T.L (1990): **“How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process”**, European Journal of Operational Research, vol. 48, iss. 1, Sept. 1990, pp. 9-26.
111. Sawaragi Y., Nakayama H. and Tanino T. (1985): **“Theory of Multiobjective Optimization”** (vol. 176 of Mathematics in Science and Engineering). Orlando, FL: Academic Press Inc.
112. Schaerlig Alain: **“Decider sur plusieurs criteres”**, Presses Politechniques Romandes, 1985.
113. Seo Fumiko, Sakawa Masatoshi (1988): **“Multiple Criteria Decision Analysis in Regional Planning”**. D. Reidel Publishing Company, 1988.
114. Siskos Y., Grigoroudis E., Matsatsinis N.F. (2005): **“UTA methods”**. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, pp: 297-344, Springer Verlag, 2005.
115. Steuer R.E. (1986): **“Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application”**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
116. Suman B., Kumar P. (2006): **“A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization”**. Journal of the Operational Research Society 57 (10): 1143–1160.
117. Szidarovsky F., Gershon M.E., Duckstein L. (1986): **“Techniques for Multiobjective Decision Making in Systems Management”**, Elsevier Science Publishers, 1986.
118. Talasova Jana, Holocek Pavel: **“Multiple-Criteria Fuzzy Evaluation: The FuzzME Software Package”**. Palacky University Olomouc, Czech Republic.
119. **“The Highway Design and Maintenance Standards Model”**, The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 1987.
120. Tsamboulas D., Pearman A., Watson S., Yiotis G. (1997): **“Deliverable-2 (D-2) of EUNET Project”**, 1997.
121. Tsamboulas et al (1998): **“Assessing the Socio-Economic and Spatial Impacts of Transport Initiatives: The EUNET Project”**, Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research, Antwerp, July 12 to 17, 1998, Elsevier Science Ltd., Netherlands.
122. Tsamboulas D., Yiotis G., Panou K. (1999): **“Use of Multicriteria Methods for Assessment of Transport Projects”**, ASCE, Transportation Engineering, Volume 125, No5, Sep.-Oct. 1999.
123. Τσαμπούλας Δ., Γιώτης Γ., Ροϊλός Η. (1999): **«Δυνατότητες Εφαρμογής και Ενσωμάτωσης Ποσοτικών – Ποιοτικών Κριτηρίων σε Πολυκριτηριακή Αξιολόγηση**

- Συγκοινωνιακών Έργων», Τεχνικά Χρονικά, Επιστημ. Έκδοση, Σεπτέμβριος-Δεκέμβριος 1999, Τόμος 19, Νο 3.
124. Τσαμπούλας Δ. (2004): «Στοιχεία για την αξιολόγηση έργων συγκοινωνιακής υποδομής», Εγχειρίδιο Ε.Μ.Π., 2004.
  125. Τσαμπούλας Δ., Γιώτης Γ. (2006): «Κλίμακα αποτίμησης κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων», Τεχνικά Χρονικά, Επιστημ. Έκδοση, 2006, Vol 1-2.
  126. Tsamboulas D., Yiotis G., Mikroudis G. (2007): “**A Method for Multi-Criteria Analysis in Transportation Infrastructure Investments**”, International Journal of Transport Economics, 2007, Vol 1.
  127. Van Herwijnen Marjan: “**Multiple-attribute value theory (MAVT)**”.
  128. Vincke Ph. (1980): “**Linear Utility Functions on Semioordered Mixture Spaces**”, Econometric, Vol. 48, No 3, April 1980.
  129. Vincke Ph. (1985): “**Multiattribute utility theory as a Basic approach**”, Multiple Criteria Decision Methods and Applications, pp: 27-40, Springer Verlag, Berlin, 1985.
  130. Vincke Ph. (1989) : “**L’Aide Multicritère à la Décision**”, Editions Ellipses, 1989.
  131. Vincke Ph. (1992): “**Multicriteria Decision-aid**”, Wiley, 1992.
  132. Von Winterfelt, D. and W. Edwards (1986): “**Decision Analysis and Behavioral Research**”, Cambridge University Press, 1986.
  133. Voogd H. (1976): “**Concordance Analysis: Some Alternative Approaches**”, 1976, Research Paper 2, Research Centre for Physical Planning, PSC – TNO, Delft, The Netherlands.
  134. Voogd H. (1981): “**Qualitative Multi-Criteria Evaluation Methods for Development Planning**”, 1981, The Canadian Journal of Regional Science, 4 (1), pp 73 – 87.
  135. Voogd H. (1982): “**Multi-Criteria Evaluation with Mixed Qualitative and Quantitative Data**”, 1982, Environment and Planning, vol. 9, pp 221 – 236.
  136. Voogd H. (1983): “**Multi-Criteria Evaluation for Urban and Regional Planning**”, 1983, Pion Limited, London.
  137. Wang L.X., Mendel J.M. (1991): “**Analysis and design of fuzzy logic controller**”. USC SIPI, Rep 184, 1991.
  138. Wang L.X. (1992): “**Fuzzy Systems are universal approximators**” in Proc. IEEE 1992, Int. Conf. Fuzzy Systems (San Diego), March 1992, pp 1163-1170.
  139. Wang L.X., Mendel J.M. (1992): “**Fuzzy Basis Functions Universal Approximation and Orthogonal Least-Squares Learning**”. IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 3, No 5, Sept. 1992.
  140. Willis K. G. (1980): “**The economics of town and country planning**”. Granada, London.
  141. Γιώτης Γ. (2006): «Δυνατότητες εφαρμογής μεθόδων οικογένειας Electre σε αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων», Διμηνιαία Έκδοση Τ.Ε.Ε., Nov-Dec 2006.
  142. Γιώτης Γ. (2011): «Δυνατότητες εφαρμογής μεθόδου Regime σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση συγκοινωνιακών έργων», Τεχνικά Χρονικά, Επιστημ. Έκδοση, 2011, Vol 1.
  143. Zadeh L.A. (1965): “**Fuzzy Sets**”. Informat. Control, vol. 8, pp 338-353, 1965.
  144. Zeleny M. (1982): “**Multiple Criteria Decision Making**”, Mc Graw-Hiil Company, 1982.
  145. Zerbe R.O., Dively D.D. (1994): “**Benefit-Cost Analysis in Theory and Practice**”, The Harpercollins Series in Economics, 1994.
  146. Zimmermann H.J. (1987): “**Fuzzy sets, Decision-making and expert systems**”. Kluwer, Boston.
  147. Zionts S., Wallenius J. (1976): “**An Interactive Programming Method for Solving the Multiple Criteria Problem**,” Management Science. Vol. 22, No. 6, pp. 652–663, 1976.
  148. Zopounidis C., Doumpos M. (1999): “**Business failure prediction using the UTADIS multicriteria analysis method**”. Journal of the Operational research Society, 50(11): 1138, 1999.
  149. Zopounidis C., Doumpos M. (2000): “**Building additive utilities for Multi-Group Hierarchical Discrimination: The MHDIS method**”. Optimization Methods and Software, 14(3): 219-240, 2000.