

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Εφαρμογή πολυκριτήριων μεθόδων λήψης αποφάσεων στον
χρονικό προγραμματισμό εργασιών**

Φοιτητής

Στυλιανός Χατζάκης

Επιβλέπων Καθηγητής

Μιχάλης Δούμπος

Εξεταστική επιτροπή

Μιχάλης Δούμπος

Στέλιος Τσαφαράκης

Κωσταντίνος Τσαγκαράκης

Χανιά, 2023

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ

Ευχαριστίες.....	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	5
Αντί - Προλόγου	5
Δομή της εργασίας.....	5
Κεφάλαιο 2: Διοίκηση έργων	7
2.1 Τι είναι έργο	7
2.2 Χαρακτηριστικά ενός έργου.....	8
2.3 Κύκλος ζωής έργου	9
2.4 Προγραμματισμός έργου	10
2.4.1 Τι είναι η διαχείριση έργων	10
2.4.2 Υπεύθυνος Έργου.....	11
2.4.3 Κριτήρια Επιτυχούς Ολοκλήρωσης του Έργου	13
2.4.4 Διαχείριση Κινδύνου	14
2.5 Μοντελοποίηση του έργου	17
2.5.1 Δικτυωτό Μοντέλο.....	17
2.5.2 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method).....	17
Κεφαλαίο 3: Λήψη Αποφάσεων	23
3.1 Θεωρία Αποφάσεων.....	23
3.2 Αβεβαιότητα στη λήψη αποφάσεων.....	23
3.3 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων	25
3.3.1 Νοητική Φάση.....	25
3.3.2 Φάση Σχεδιασμού.....	25
3.3.3 Φάση Επιλογής	27
3.3.4 Φάση Ολοκλήρωσης.....	27
3.4. Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων	27
3.5 Οι μέθοδοι της οικογένειάς ELECTRE.....	30
3.5.1 Σύντομο ιστορικό.....	30
3.5.2. Κύρια Χαρακτηριστικά των Μεθόδων ELECTRE	31
3.5.3. Προβληματική επιλογής.....	33
3.5.4. Προβληματική κατάταξης	35
3.6 Οικογένεια μεθόδων PROMETHEE	39

3.6.1 Δείκτης προτίμησης και γραφήματα υπεροχής	44
3.6.2 PROMETHEE I	46
3.6.3 PROMETHEE II	47
Τα προφίλ των εναλλακτικών	47
3.6.4 PROMETHE III, IV, V, VI και GDSS.....	49
3.7 Προσομοίωση Monte Carlo.....	49
3.7.1 Ορολογίες.....	50
3.7.2 Μεθοδολογία.....	51
Κεφαλαίο 4: Πρακτική Εφαρμογή	53
4.1 Δεδομένα του έργου.....	53
4.2 Προτεινόμενη ανάλυση.....	55
Κεφαλαίο 5: Αποτελέσματα και Συμπεράσματα.....	58
5.1 Καθυστέρηση μίας περιόδου	59
5.2 Καθυστέρηση τριών χρονικών περιόδων	63
5.3 Καθυστέρηση δέκα χρονικών περιόδων.....	67
5.4 Τελικά συμπεράσματα	71
Παράρτημα: Κώδικας MATLAB	72
Βιβλιογραφία	79

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρώ μεγάλη ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας, παρέχοντάς μου υλική και ψυχολογική υποστήριξη. Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μιχάλη Δούμπο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το θέμα της Εφαρμογής Πολυκριτήριων Μεθόδων στο Χρονικό Προγραμματισμό Έργων και για την πολύτιμη συμβολή του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για την αποδοχή τους. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, αλλά και τους φίλους μου, που ήταν δίπλα μου καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης από το 2017 μέχρι και σήμερα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντί - Προλόγου

Στον προγραμματισμό έργων βασικός κίνδυνος είναι να αποτύχει ένα έργο να τηρήσει τις προγραμματισμένες προθεσμίες ολοκλήρωσης λόγω καθυστερήσεων σε μεμονωμένες εργασίες. Ως εκ τούτου, ορισμένα κρίσιμα σημεία μπορεί να είναι υποψηφία για την διαχείριση του κινδύνου και την αποφυγή καθυστερήσεων, όπως για παράδειγμα η κατανομή πρόσθετων πόρων σε μια εργασία, το ανθρώπινο δυναμικό και ο εξοπλισμός.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τον εντοπισμό κρίσιμων εργασιών είναι η μέθοδος κρίσιμης διαδρομής (CPM). Η συγκεκριμένη εργασία προσφέρει μια συμπληρωματική, στοχαστική προσέγγιση στη CPM

, η οποία κατατάσσει τις εργασίες ανάλογα με την επίδραση τους στην κατανομή του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου, όταν καθυστερούν οι κατανομές του χρόνου ολοκλήρωσης των εργασιών. Η νέα υβριδική προσέγγιση βασίζεται στη χρήση μιας προσομοίωσης Monte Carlo και την εφαρμογή πολυκριτήριων μεθόδων όπως η ELECTRE III και η PROMETHEE. Η προσομοίωση Monte Carlo επιτρέπει την προσέγγιση της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής της συνολικής διάρκειας του έργου, ενώ οι πολυκριτήριες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση και την ταξινόμηση των εργασιών.

Η προτεινόμενη προσέγγιση εντοπίζει ορισμένες εργασίες ως κρίσιμες, οι οποίες μπορεί να μην βρίσκονται πάντα στην κρίσιμη διαδρομή όπως προσδιορίζεται από τη CPM.

Δομή της εργασίας

Στο 2^ο Κεφάλαιο της εργασίας περιέχονται γενικές πληροφορίες για τα έργα και τα χαρακτηριστικά τους. Εξετάζονται, επίσης, ο ρόλος και τα χαρακτηριστικά του υπευθύνου του έργου, ενώ στη συνέχεια αναλύεται το πως προγραμματίζονται και πως μοντελοποιούνται τα έργα ώστε να επιτευχθεί η ολοκλήρωση τους με τον

συντομότερο, τον οικονομικότερο και τον ασφαλέστερο τρόπο. Τέλος παρουσιάζεται με αναλυτικό τρόπο η μέθοδος κρίσιμης διαδρομής (CPM).

Το 3^ο Κεφάλαιο αφορά την λήψη αποφάσεων. Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται τη διαδικασία που ακολουθείται από τον αποφασίζοντα ώστε να ληφθεί μια απόφαση, αλλά και τους παράγοντες που μπορεί να προκαλούν αβεβαιότητα. Στη συνέχεια αναλύεται η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων καθώς και οι οικογένειες μεθόδων ELECTRE και PROMETHEE. Στη τελευταία υποενότητα του κεφαλαίου αυτού γίνεται αναφορά στην προσομοίωση Monte Carlo

Το 4^ο και το 5^ο Κεφάλαιο είναι τα πιο σημαντικά της εργασίας, καθώς στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται η πρακτική εφαρμογή της υβριδικής προσέγγισης, η οποία βασίζεται στη χρήση μιας προσομοίωσης Monte Carlo και στην εφαρμογή πολυκριτήριων μεθόδων όπως η ELECTRE και η PROMETHEE, ενώ στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που μπορούμε να αντλήσουμε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΡΓΩΝ

2.1 Τι είναι έργο

Τα έργα είναι ο ακρογωνιαίος λίθος του σχεδιασμού και της υλοποίησης των στρατηγικών κάθε οργανισμού ή γενικότερα κάθε οργανωτικής δομής, διότι παρέχουν τις βάσεις για την κατανόηση, την ανάπτυξη και τη δημιουργία νέων ή βελτιωμένων προϊόντων και υπηρεσιών, υπό την ευρύτερη έννοια.

Ένα έργο μπορεί να οριστεί ως “ένα μοναδικό σύνολο συντονισμένων δραστηριοτήτων, με καθορισμένα σημεία εκκίνησης και τερματισμού, που αναλαμβάνονται από ένα άτομο ή οργανισμό, για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων εντός καθορισμένου χρονοδιαγράμματος, κόστους και παραμέτρων απόδοσης” (Lester, 2021). Είναι, δηλαδή, ένα σύνολο εργασιών που πρέπει να ολοκληρωθούν για να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος ή αποτέλεσμα. Ανάλογα με το μέγεθος και το πεδίο εφαρμογής του έργου, αυτές οι εργασίες μπορεί να είναι απλές ή περίπλοκες. Ορισμένα έργα είναι απαραίτητα για την ταχεία επίλυση προβλημάτων, με την κατανόηση ότι θα γίνουν βελτιώσεις στη συνέχεια αφού ολοκληρωθούν σε πρώτη φάση. Άλλα έργα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ή παράγουν ένα προϊόν ή άλλο αποτέλεσμα που δεν θα χρειαστεί σημαντικές βελτιώσεις εκτός της προβλεπόμενης συντήρησης, όπως ένας αυτοκινητόδρομος. Επιπροσθέτως μπορεί να είναι μοναδικά όσον αφορά το σκοπό τους, καθώς ορισμένα έργα εξυπηρετούν πολύ συγκεκριμένες ανάγκες. Φυσικά η συσσωρευμένη εμπειρία του υπεύθυνου του έργου, αλλά και όλης της ομάδας από παρόμοια έργα, μπορεί να συμβάλλει στη φάση του σχεδιασμού.

Οι οργανισμοί και τα άτομα διαχειρίζονται έργα με ένα ευρύ φάσμα στόχων. Μπορούν να λάβουν πολλές μορφές, από την κατασκευή ενός κτιρίου έως το σχεδιασμό μιας εκδήλωσης ή ακόμη και την ολοκλήρωση ενός συγκεκριμένου καθήκοντος. Έργα μπορεί να αναληφθούν για τη δημιουργία εσόδων ή μπορεί να είναι έργα κεφαλαίου, τα οποία απαιτούν πρόσθετες δαπάνες και πόρους. Όλα τα έργα είναι μια προσωρινή προσπάθεια δημιουργίας αξίας μέσω ενός μοναδικού προϊόντος, υπηρεσίας ή αποτελέσματος. Όλα τα έργα έχουν αρχή και τέλος. Έχουν μια ομάδα, ένα μπάτζετ, ένα πρόγραμμα και ένα σύνολο προσδοκιών, στο οποίο πρέπει να ανταποκριθεί η ομάδα, που το έχει αναλάβει.

2.2 Χαρακτηριστικά ενός έργου

Υπάρχουν ορισμένα χαρακτηριστικά-όροι που είναι κοινά σε όλα τα έργα, ανεξάρτητα από τον τύπο, το μέγεθος ή τη σημαντικότητα του έργου και τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια (Lock, 2000):

- Ο χρονικός ορίζοντας ή χρονοδιάγραμμα, βάσει του οποίου το έργο θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί, καθορίζεται από τη χρονική στιγμή έναρξης και τη χρονική στιγμή λήξης του έργου και εξαρτάται από τη διάρκεια ορισμένων κρίσιμων εργασιών, αλλά και από τους χρονικούς ή οικονομικούς περιορισμούς που πρέπει να τηρηθούν.
- Ο αποδέκτης του έργου πολλές φορές είναι ο ίδιος ο χρήστης του τελικού προϊόντος. Ο πελάτης με βάση τις ανάγκες, τις απαιτήσεις και το κεφάλαιο του, καθορίζει τα χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφουν την ποιότητα, σε κάποιο βαθμό, το χρόνο ολοκλήρωσης και το βαθμό απόδοσης του έργου.
- Υπάρχουν δεδομένοι διαθέσιμοι πόροι που μπορεί να είναι το ανθρώπινο δυναμικό, το κεφάλαιο, η υλικοτεχνική υποδομή, οι πρώτες ύλες, κ.ά.
- Κάθε έργο προορίζεται για την ικανοποίηση και την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων αναγκών και πρέπει να είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές που τέθηκαν κατά την έναρξη του. Αυτές μπορούν να αφορούν το μέγεθος του έργου, το κόστος του, την απόδοση του, το χρόνο ολοκλήρωσής του, και την ασφάλεια του.
- Ένα έργο χαρακτηρίζεται από επιμέρους εργασίες οι οποίες αλληλοεπηρεάζονται και ενδεχομένως να έχουν μεταξύ τους προτεραιότητες, καθώς για να ξεκινήσουν κάποιες εργασίες, πρέπει προηγουμένως να έχουν ολοκληρωθεί ορισμένες άλλες.
- Ο υπεύθυνος διαχείρισης του έργου είναι αρμόδιος για τη συγκρότηση και την οργάνωση της ομάδας του έργου και έχει τον πρώτο λόγο στη σχεδίαση, τον προγραμματισμό, την εκτέλεση, και τον έλεγχο του έργου, ενώ μετά την ολοκλήρωση έχει και την ευθύνη της έγκρισης του τελικού αποτελέσματος, πριν αυτό παρουσιαστεί στον πελάτη.
- Η ομάδα εκτέλεσης του έργου είναι μία ομάδα ατόμων που συγκροτείται για να φέρει σε πέρας το έργο και απαρτίζεται από άτομα με διαφορετικές δεξιότητες και γνώσεις, τα οποία συνεργάζονται με σκοπό την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου.

2.3 Κύκλος ζωής έργου

Ο κύκλος ζωής του έργου περιλαμβάνει τα βήματα που απαιτούνται για την επιτυχή διαχείριση ενός έργου, από την αρχή έως το τέλος του. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Διαχείρισης Έργων (PMI) ο κύκλος ζωής αναφέρεται στις πέντε φάσεις του έργου. Κάθε μία από αυτές τις φάσεις αντιπροσωπεύει μια ομάδα αλληλένδετων διαδικασιών, που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Αυτές οι πέντε φάσεις είναι:

- Η φάση έναρξης: Σκοπός αυτής της φάσης είναι να καθοριστεί το όραμα του έργου, να καταγραφούν οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν, να εξασφαλισθούν οι εγκρίσεις, που απαιτούνται, από τις αρμόδιες αρχές και οι χρηματοδοτήσεις από τους επενδυτές.
- Η φάση σχεδιασμού: Στη φάση αυτή δημιουργούνται οι υποδομές του έργου, που θα συμβάλλουν στο να επιτευχθούν οι στόχοι, που έχουν τεθεί εντός των προκαθορισμένων περιορισμών χρόνου και προϋπολογισμού. Στο τέλος αυτής της φάσης του κύκλου ζωής, είναι σαφής η σειρά αλλά και ο τρόπος εκτέλεσης των απαιτούμενων εργασιών, ώστε να ολοκληρωθεί έγκαιρα το έργο
- Η φάση εκτέλεσης: Στη συγκεκριμένη φάση κατανέμεται το μεγαλύτερο μέρος του προϋπολογισμού και εφαρμόζεται το σχέδιο του έργου. Στόχος αυτής της φάσης είναι η «αποτελεσματική διαχείριση των ομάδων, η τήρηση του χρονοδιαγράμματος και η επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί».
- Η φάση παρακολούθησης και ελέγχου: Περιλαμβάνει την παρακολούθηση της πραγματικής προόδου του έργου σε σχέση με το σχέδιό και τη λήψη διορθωτικών μέτρων όπου είναι απαραίτητο.
- Η φάση κλεισίματος: Είναι η τελική φάση του κύκλου ζωής του έργου, που περιλαμβάνει τον λεπτομερή έλεγχο του έργου, την αρχειοθέτηση εγγράφων του έργου, την έγκριση του πελάτη, των μετόχων και των αρμόδιων υπηρεσιών και τέλος την παράδοση του έργου ώστε να κλείσει ο κύκλος ζωής του.

Οι πέντε φάσεις του έργου και ορισμένες ενδεικτικές διεργασίες που εκτελούνται σε κάθε μία από αυτές τις φάσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1.

Φάση Έναρξης	Φάση Σχεδιασμού	Φάση Εκτέλεσης	Φάση Ελέγχου	Φάση Κλεισίματος
Κατασκευή διαγράμματος έργου	Δημιουργία σχεδίου διαχείρισης του έργου	Καταμερισμός πόρων και κεφαλαίου	Παρακολούθηση προόδου	Έλεγχος τελικών παραδοτέων
Προσδιορισμός συμμετόχων	Προσδιορισμός στόχων και πεδίου εφαρμογής	Προγραμματισμός εργασιών του έργου	Μέτρηση βασικών δεικτών απόδοσης (KPI)	Λήψη τελικής έγκρισης
Δημιουργία ολοκληρωμένου επιχειρηματικού σχεδίου	Καταμερισμός εργασιών	Εξασφάλιση συνεχών ενημερώσεων για την πρόοδο του έργου	Εφαρμογή διορθωτικών κινήσεων	Ολοκλήρωση έργου
	Αναγνώριση κινδύνων			

Πίνακας 1.1 Οι πέντε φάσεις του έργου και ορισμένες ενδεικτικές διαδικασίες που συμβαίνουν σε κάθε φάση (Σημείωση: Διασκευή από Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge PMBOK® Guide (2021), Seventh Edition)

2.4 Προγραμματισμός έργου

2.4.1 Τι είναι η διαχείριση έργων

Ο Albert Lester (2021) έδωσε τον δικό του ορισμό για τη διαχείριση έργων λέγοντας ότι είναι ο σχεδιασμός, η παρακολούθηση και ο έλεγχος όλων των πτυχών ενός έργου και των κινήτρων όλων αυτών που συμμετέχουν σε αυτό, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του έργου εντός συμφωνημένων κριτηρίων χρόνου, κόστους και απόδοσης. Η διαχείριση έργου έχει τελικά παραδοτέα, που περιορίζονται από ένα πεπερασμένο χρονοδιάγραμμα και ένα συγκεκριμένο προϋπολογισμό, τα οποία για να ολοκληρωθούν απαιτείται η εφαρμογή διαδικασιών, μεθόδων, δεξιοτήτων, γνώσεων και εμπειρίας.

Επικεφαλής αυτών των έργων είναι οι διαχειριστές του έργου, οι οποίοι χρησιμοποιώντας πολλά διαφορετικά εργαλεία, τεχνικές και προσεγγίσεις καλούνται να σχεδιάσουν και να οργανώσουν το έργο, να καλύψουν τις ανάγκες του και να διασφαλίσουν ότι η ομάδα του έργου θα πετυχαίνει τους στόχους της, μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια.

Ένας βασικός παράγοντας που διακρίνει τη διαχείριση έργων από την απλή «διαχείριση» είναι ότι έχει αυτό το τελικό παραδοτέο και ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα, σε αντίθεση με την «διαχείριση», που υπονοεί μια συνεχή διαδικασία. Εξαιτίας αυτού, ένας υπεύθυνος έργου χρειάζεται ένα ευρύ φάσμα δεξιοτήτων, όπως τεχνικές δεξιότητες, αλλά και δεξιότητες διαχείρισης ανθρώπινου δυναμικού και πόρων.

Είναι προφανές ότι το πεδίο της διαχείρισης έργων δεν είναι νέο. Παρόλα αυτά, άρχισε να αναδύεται ως ανεξάρτητο πεδίο στα μέσα του 20ου αιώνα, όταν ομάδες εργασίας από τους τομείς της αεροδιαστημικής, της μηχανικής, της φαρμακευτικής και των τηλεπικοινωνιών συνειδητοποίησαν ότι ένας μεταβαλλόμενος κόσμος χρειαζόταν νέα εργαλεία. Με βάση την ανάγκη αντιμετώπισης των ζητημάτων προγραμματισμού και πόρων που σχετίζονται με όλο και πιο περίπλοκα έργα, μία ομάδα ερευνητών και επαγγελματιών συναντήθηκαν για να καθορίσουν και να τυποποιήσουν τα εργαλεία στο πεδίο αυτό, με αποτέλεσμα το 1969 να ιδρυθεί το Ινστιτούτο Διαχείρισης Έργων (Project Management Institute, PMI).

2.4.2 Υπεύθυνος Έργου

Ένας διαχειριστής έργου μπορεί να οριστεί ως το άτομο που έχει την ευθύνη, την εξουσία και τη λογοδοσία που του έχουν ανατεθεί, ώστε να επιτύχει με ασφάλεια τους στόχους του έργου εντός συμφωνηθέντος χρόνου, κόστους και κριτηρίων απόδοσης, ποιότητας και ασφάλειας (Lester, 2021).

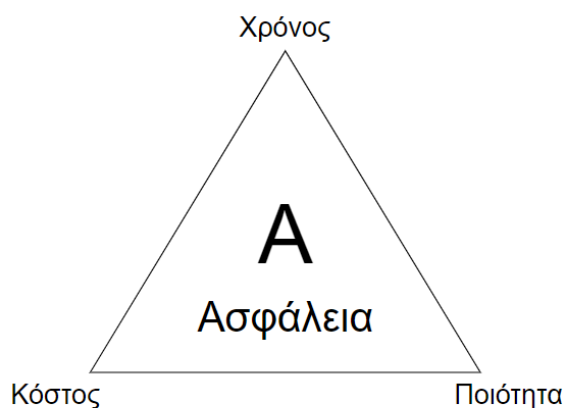
Δεν είναι εύκολο να καθοριστούν οι αρμοδιότητες ενός διαχειριστή έργου, κυρίως λόγω του ότι το πεδίο εποπτείας που καλύπτεται από μια τέτοια θέση διαφέρει όχι μόνο από κλάδο σε κλάδο, αλλά και από εταιρεία σε εταιρεία. Τρεις τομείς ευθύνης, ωστόσο, είναι σχεδόν πάντα μέρος των αρμοδιοτήτων του:

- Πρέπει να κατασκευάσει το έργο σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές, έτσι ώστε να ικανοποιήσει τις λειτουργικές του απαιτήσεις.
- Πρέπει να ολοκληρώσει το έργο έγκαιρα.
- Πρέπει να το πραγματοποιήσει εντός των συμφωνημένων οικονομικών περιορισμών.

Τα δύο τελευταία είναι, φυσικά, συνδεδεμένα, καθώς εάν το εγχείρημα είναι εντός προγράμματος, είτε το κόστος δεν έχει υπερβεί τον αρχικό προϋπολογισμό είτε θα είναι πιο πιθανό να παραχωρηθούν παραπάνω χρήματα από τον πελάτη. Είναι πολύ πιο δύσκολο να αποκτηθεί επιπλέον κεφάλαιο εάν το έργο είναι εκτός προγράμματος και ο πελάτης έχει, ήδη, υποστεί ζημία λόγω της καθυστέρησης. Ο χρόνος, επομένως, είναι ζωτικής σημασίας, και ο έλεγχος του χρόνου, είτε στο στάδιο του σχεδιασμού ή στο στάδιο κατασκευής, θα πρέπει να είναι θέμα ύψιστης προτεραιότητας για τον διαχειριστή του έργου.

Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, ενώ την ευθύνη και τη λογοδοσία την έχει ο διαχειριστής του έργου, η εξουσία που του δίνεται είναι είτε αυστηρά περιορισμένη είτε ανύπαρκτη. Οι λόγοι για αυτό μπορεί να είναι η απροθυμία ενός τμήματος να παραιτηθεί από τον οικονομικό έλεγχο, ή να έχει γίνει αντιληπτό ότι ο διαχειριστής του έργου δεν έχει επαρκή εμπειρία διαχείρισης ορισμένων καθηκόντων, όπως ο έλεγχος των δαπανών. Μπορεί, επίσης, να υπάρχουν περιορισμοί στη δικαιοδοσία του πρότζεκτ μάντζερ που εξαρτώνται από το μέγεθος και τον τύπο του έργου, αλλά και το μέγεθος και τον τύπο του οργανισμού. Εφόσον όμως υποτίθεται ότι είναι ουσιαστικά ο διευθύνων σύμβουλος του έργου, αυτός ή αυτή πρέπει να έχει τον έλεγχο του κόστους και των δαπανών, τα οποία πρέπει να κυμαίνονται εντός καθορισμένων και συμφωνηθέντων ορίων.

Εκτός από τις συμβατικές ευθύνες για το χρόνο, το κόστος, την απόδοση και την ποιότητα, ο υπεύθυνος του έργου πρέπει να διασφαλίσει ότι τηρούνται όλα τα πρωτόκολλα ασφαλείας και ακολουθούνται όλοι οι απαραίτητοι κανονισμοί. Για το λόγο αυτό η λέξη ασφάλεια έχει εισαχθεί στο τρίγωνο διαχείρισης έργου, ώστε να επισημανθεί η σημασία της διασφάλισης της τήρησης των κανονισμών για την υγεία και την ασφάλεια. Το τρίγωνο διαχείρισης έργου στην νέα του μορφή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Τρίγωνο του έργου, ένα μοντέλο των περιορισμών της διαχείρισης έργου το οποίο συμπεριλαμβάνει και την ασφάλεια, εκτός από τις συμβατικά κριτήρια. (Lester, 2021),

2.4.3 Κριτήρια Επιτυχούς Ολοκλήρωσης του Έργου

Ένα από τα θέματα του σχεδίου διαχείρισης ενός έργου είναι τα κριτήρια επιτυχίας του έργου. Αυτά είναι τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά και στόχοι που πρέπει να εκπληρωθούν για να καταστεί δυνατή η αίσια ολοκλήρωση του έργου. Είναι πάντα πιθανό κατά τη διάρκεια του έργου να προκύψουν προβλήματα, που απαιτούν να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις, οι οποίες πολλές φορές συνεπάγονται συμβιβασμούς, που μπορεί να αφορούν είτε το χρόνο εργασίας των εμπλεκόμενων είτε την ποσότητα των υλικών είτε άλλους παράγοντες, ώστε το έργο να είναι εντός χρονοδιαγράμματος και εντός των ορίων κόστους. Ο βαθμός στον οποίο οι συμβιβασμοί αυτοί είναι αποδεκτοί ή επιτρεπτοί εξαρτάται από το εύρος και τη φύση τους, ενώ απαιτούν την έγκριση του διαχειριστή του έργου και πιθανώς και του πελάτη. Ωστόσο σε περίπτωση που μία τέτοια προβλεπόμενη αλλαγή θα επηρεάσει ένα από τα κριτήρια επιτυχίας του έργου, μπορεί να μην είναι αποδεκτή. Για παράδειγμα, εάν ένα από τα κριτήρια επιτυχίας του έργου είναι ότι το έργο να έχει τελειώσει έως ή πριν από μία ορισμένη ημερομηνία, τότε δεν μπορεί να υπάρξει συμβιβασμός σε πιθανή αλλαγή της καταληκτικής ημερομηνίας, αλλά αυτό συνεπάγεται ότι για να αντιμετωπιστεί ένα πιθανό πρόβλημα, θα πρέπει να αυξηθεί το κόστος ή να θυσιαστεί η ποιότητα.

Τα κριτήρια επιτυχίας μπορεί φυσικά να είναι υποκειμενικά και συχνά εξαρτώνται από την οπτική γωνία του παρατηρητή. Για παράδειγμα αν εξετάσουμε σαν έργο την Όπερα του Σίδνεϋ, υπό την οπτική των συμβατικών κριτηρίων ενός καλά σχεδιασμένου έργου, δηλαδή το κόστος, τον χρόνο ολοκλήρωσης και την

απόδοση κρίνεται ως αποτυχημένο έργο, καθώς ήταν πολύ πάνω από τον προϋπολογισμό, άργησε πολύ να ολοκληρωθεί και ο χώρος των παραστάσεων θεωρείται πολύ μικρός για όπερα. Παρόλα αυτά, οι περισσότεροι οι άνθρωποι θεωρούν ότι είναι ένα υπέροχο κομμάτι αρχιτεκτονικής και ένα υπέροχο ορόσημο για την πόλη του Σίδνεϋ (Lester, 2021).

Ορισμένοι παράγοντες που διευκολύνουν ένα έργο να ολοκληρωθεί με επιτυχία είναι:

- Σαφείς στόχοι και σύνοψη του έργου που συμφωνήθηκαν με τον πελάτη
- Καλή πελατειακή σχέση
- Ακριβείς μέθοδοι προγραμματισμού, σχεδιασμού και μία έμπειρη ομάδα
- Επαρκής διαθεσιμότητα πόρων (χρηματοδότηση, εργατικό δυναμικό, εγκαταστάσεις, υλικά, κ.ά.)
- Ακριβές σύστημα παρακολούθησης, ελέγχου χρόνου και ανάδρασης
- Καλά σχεδιασμένο σύστημα αναφοράς προς τη διοίκηση και τον πελάτη
- Αυστηρός οικονομικός έλεγχος
- Ολοκληρωμένες διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου
- Καλή εσωτερική και εξωτερική επικοινωνία

2.4.4 Διαχείριση Κινδύνου

Τα έργα από την φύση τους είναι επιρρεπή στον κίνδυνο, ο οποίος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από την αρχή. Για αυτό το λόγο, κατά τη φάση του σχεδιασμού, ένα έργο πρέπει να υποβληθεί σε έναν πολύ εξονυχιστικό και ακριβή έλεγχο των κινδύνων που είναι πιθανό να επηρεάσουν την υλοποίηση του.

Η διαχείριση κινδύνων είναι ζωτικής σημασίας για τους διαχειριστές έργων, καθώς οι μη διαχειριζόμενοι ή μη μετριάσμενοι κίνδυνοι είναι μερικές από τις κύριες αιτίες αποτυχίας του έργου. Οι κίνδυνοι πρέπει να αναγνωριστούν έγκαιρα, ώστε να εφαρμοστούν τα κατάλληλά μέτρα περιορισμού ή εξάλειψής τους. Χωρίς μετριάσμό, οι κίνδυνοι θα επιφέρουν χάος και αποτυχία σε ένα κατά τα άλλα καλά σχεδιασμένο και διαχειριζόμενο έργο.

Είναι σχεδόν αδύνατο για έναν υπεύθυνο έργου να μπορέσει να ασχοληθεί ταυτόχρονα με τους εγγενείς κινδύνους, τους περισπασμούς και την πολυπλοκότητα της διαχείριση του έργου, χωρίς λεπτομερή σχέδια και διαδικασίες.

Σύμφωνα με τον Royer (2000), υπάρχουν ορισμένοι κίνδυνοι, οι οποίοι αναγνωρίζονται ευκολότερα. Οι αναγνωρίσιμοι κίνδυνοι είναι αυτοί που μπορούν να εντοπιστούν κατά τη διάρκεια τη φάσης σχεδιασμού του έργου. Ως επί το πλείστον, είναι ιδιαίτερα ορατοί και αμέσως εμφανείς στους περισσότερους που εμπλέκονται στο έργο, όπως για παράδειγμα περιορισμοί των οικονομικών πόρων, περιορισμοί πόρων προσωπικού, κ.λπ. Καθώς εντοπίζονται οι κίνδυνοι, θα πρέπει να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί ένα σχέδιο μετριασμού τους, ενώ για πολύ υψηλούς κινδύνους μπορεί να χρειαστεί και ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης, το οποίο ίσως χρειαστεί να εφαρμοστεί κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Τόσο οι στρατηγικές μετριασμού του κινδύνου όσο και τα σχέδια έκτακτης ανάγκης κοστίζουν χρόνο, χρήμα και πόρους για την ανάπτυξη και την εφαρμογή τους. Επιπροσθέτως, οι χρηματοδότες των έργων συχνά δεν θέλουν να δαπανήσουν χρόνο, και κατ' επέκταση χρήμα, για λεπτομερή σχεδιασμό μετριασμού του κινδύνου. Για τους λόγους αυτούς, η διαχείριση κινδύνου δεν προσεγγίζεται με την ίδια αυστηρότητα όπως οι υπόλοιπες διεργασίες. Με την πάροδο του χρόνου, πολλοί διαχειριστές έργων μαθαίνουν να διαχειρίζονται τον κίνδυνο με την άρνηση, την παράκαμψη και την προσπάθεια θωράκισης του εαυτούς τους. Το πρόβλημα με αυτές τις συμπεριφορές είναι ότι δεν υπάρχει μάθηση και, ως εκ τούτου, τα λάθη τείνουν να επαναλαμβάνονται, με αποτέλεσμα να οδηγούν σε αποτυχιές έργων και στην αποδυνάμωση της αξιοπιστίας και της εμπιστοσύνη στον διαχειριστή του έργου

Τεχνικές Αναγνώρισης Κινδύνων

Όπως προαναφέρθηκε, για να γίνει σωστή διαχείριση των κινδύνων πρέπει πρώτα να «ανακαλυφθούν». Δύο κοινές τεχνικές για να επιτευχθεί αυτό είναι η αξιολόγηση κινδύνου που βασίζεται στην εμπειρία και στην ανταλλαγή ιδεών ή αλλιώς ιδεοκαταιγισμό (Royer,2014).

Εκτίμηση Κινδύνου με βάση την εμπειρία. Το χαρακτηριστικό ενός επιτυχημένου διαχειριστή έργου είναι η ικανότητα να μαθαίνει συνεχώς και να αποκτά εμπειρία. Λάθη σε προηγούμενα έργα ή κίνδυνοι που δεν αντιμετωπίστηκαν και εν τέλει είχαν

αρνητικές συνέπειες στο έργο του διαχειριστή έργου, πρέπει να αποτελούν μαθήματα για τον υπεύθυνο, ώστε να μην επαναληφθούν σε μελλοντικά έργα.

Αξιολόγηση κινδύνου βασισμένη σε καταιγισμό ιδεών. Συνεδρίες καταιγισμού ιδεών με τους ενδιαφερόμενους πελάτες, μέλη της ομάδας του έργου και το προσωπικό υποστήριξης υποδομών είναι μια κύρια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των κινδύνων, των στρατηγικών μετριασμού τους και των σχεδίων έκτακτης ανάγκης. Κατά την διαδικασία αυτή, συνήθως, κατασκευάζεται ένας πίνακας που ορίζει τους κινδύνους σε μία στήλη, τις στρατηγικές αντιμετώπισης στη δεύτερη στήλη και τα πιθανά σχέδια έκτακτης ανάγκης σε μια τρίτη στήλη.

Ταξινόμηση κινδύνου

Σε πραγματικές συνθήκες, δεν υπάρχουν ούτε τα χρήματα ούτε ο χρόνος ούτε οι πόροι για να τα αντιμετωπιστούν όλοι οι κίνδυνοι. Ως εκ τούτου, ο υπεύθυνος του έργου και κατ' επέκταση η διοικητική ομάδα του έργου πρέπει να επιλέξουν σε ποιους κινδύνους θα επικεντρωθούν. Μια προσέγγιση είναι να εξεταστεί κάθε κίνδυνος και να ταξινομηθεί με βάση τους εξής τρεις παράγοντες: κατηγορία κινδύνου, σοβαρότητα ή επίδραση στην επιτυχή ολοκλήρωση του έργου και πιθανότητα να συμβεί.

Για να ποσοτικοποιήσουμε τον κίνδυνο του έργου, υιοθετούμε την τριπλέτα κινδύνου που συνδυάζει: τα πιθανά *σενάρια*, την *πιθανότητα* και τις *συνέπειες* (Kaplan & Garrick, 1981; Pfeifer, Barker, Ramirez-Marquez, & Morshedlou, 2015). Ένα *σενάριο* αντιπροσωπεύει μια διακοπή σε μια εργασία του έργου ή σε ένα σύνολο εργασιών, η *συνέπεια* της οποίας ορίζεται ως η επίπτωση της καθυστέρησης στο χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Καθώς ο χρόνος ολοκλήρωσης της εργασίας και, ως εκ τούτου, ο χρόνος ολοκλήρωσης του έργου είναι τυχαίες μεταβλητές, υπάρχει πιθανότητα καθυστέρησης στο χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Οι εργασίες θεωρούνται «πιο επικίνδυνες» όταν καταλήγουν σε μεγαλύτερους χρόνους ολοκλήρωσης του έργου. Ο μετριασμός του κινδύνου του έργου μπορεί να περιλαμβάνει διορθωτικές ενέργειες, όπως η επιτάχυνση καθυστερημένων εργασιών με κατανομή περισσότερων πόρων από ότι είχε αρχικά προγραμματιστεί, για να διασφαλιστεί ότι οι εργασίες θα ολοκληρωθούν έγκαιρα (Kessler & Chakrabarti, 1999).

Στη συγκεκριμένη ανάλυση η καθυστέρηση στο συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης του έργου επιλέγεται ως η μοναδική συνέπεια της καθυστέρησης των

εργασιών, αν και πολλά άλλα χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να επηρεαστούν και να κινδυνέψει το έργο όπως το κόστος του ή οι απαιτούμενοι πόροι, η ποιότητα και η ασφάλεια του (Aibinu & Jagboro, 2002; San Cristobal, 2013; Sunjka & Jacob, 2013), τα οποία αν λαμβάνονταν υπόψη θα μπορούσαν να κάνουν πιο ολοκληρωμένη την ανάλυση. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι εργασίες που είναι πρωτογενείς πηγές κινδύνου του έργου, ώστε να εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα περιορισμού.

2.5 Μοντελοποίηση του έργου

2.5.1 ΔΙΚΤΥΩΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Ένα έργο περιλαμβάνει όλα τα στάδια των εργασιών από την έναρξη έως την ολοκλήρωσή του. Για την κατανόηση του τι συμβαίνει σε ένα έργο, απαιτείται ένα μοντέλο των διαφόρων εμπλεκόμενων παραγόντων, των ευθυνών και των καθηκόντων που υπάρχουν στο έργο. Η ανάπτυξη ενός μοντέλου έργου παρέχει μία κατανόηση ως προς το ποια μοντέλα δεδομένων απαιτούνται και ποια μεταφορά δεδομένων απαιτείται μεταξύ αυτών των μοντέλων. Αυτό επηρεάζει την σχεδίαση των διαγραμμάτων και τις αντιστοιχίσεις μεταξύ τους. Ένα μοντέλο έργου παρέχει, επίσης, μια επίσημη περιγραφή των διαφόρων χρηστών που θα συμμετάσχουν στο έργο, και επισημοποιεί τους ρόλους που θα έχουν στο έργο.

Στη συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένα δίκτυο όπου οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις εργασίες και τα τόξα τις πιθανές διαδρομές. Για να κατασκευαστεί το συγκεκριμένο δίκτυο αντλούνται δεδομένα από τον πίνακα των προηγούμενων εργασιών, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις εργασίες καθώς και τις προαπαιτούμενες/προηγούμενές τους.

2.5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ (CRITICAL PATH METHOD)

Η μέθοδος κρίσιμης διαδρομής (CPM) είναι μια τεχνική με την οποία προσδιορίζονται οι εργασίες που είναι απαραίτητες για την ολοκλήρωση του έργου και καθορίζονται οι ευελιξίες στον προγραμματισμό. Μια κρίσιμη διαδρομή είναι η μεγαλύτερη ακολουθία δραστηριοτήτων που πρέπει να ολοκληρωθεί εγκαίρως για

να ολοκληρωθεί ολόκληρο το έργο. Τυχόν καθυστερήσεις σε κρίσιμες εργασίες θα καθυστερήσουν το υπόλοιπο έργο.

Η CPM αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 ως μέθοδος επίλυσης του ζητήματος του αυξημένου κόστους, λόγω αναποτελεσματικού προγραμματισμού, και από τότε έχει γίνει δημοφιλής για το σχεδιασμό έργων και την ιεράρχηση των εργασιών.

Εάν εφαρμοστεί σωστά, η ανάλυση κρίσιμης διαδρομής μπορεί να:

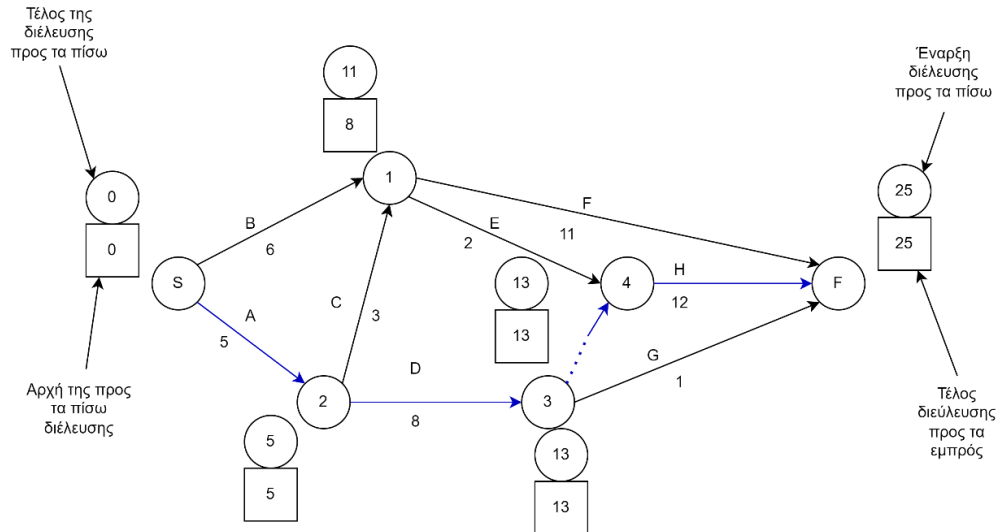
- Βοηθήσει στον προσδιορισμό των εξαρτήσεων μεταξύ των εργασιών, των περιορισμών των πόρων και των κινδύνων του έργου
- Βελτιώσει τον μελλοντικό σχεδιασμό, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των προσδοκιών με την πραγματική πρόοδο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται από τρέχοντα έργα μπορούν να τροφοδοτήσουν μελλοντικά σχέδια έργων.
- Εκτιμήσει με σχετική ακρίβεια τη διάρκεια κάθε εργασίας
- Διευκολύνει την πιο αποτελεσματική διαχείριση πόρων και ανθρωπίνου δυναμικού, αφού βοηθά τους διαχειριστές των έργων να ιεραρχούν τις εργασίες, δίνοντάς τους μια καλύτερη ιδέα για το πώς και πού να τους καταναείμουν.
- Προσδιορίζει τις κρίσιμες εργασίες που δεν έχουν περιθώριο καθυστέρησης και πρέπει να έχουν ολοκληρωθεί εγκαίρως
- Βοηθήσει στην παρακολούθηση της προόδου του έργου και στην μέτρηση της διακύμανσης του χρονοδιαγράμματος
- Βοηθήσει στην αποφυγή σημείων συμφόρησης, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια πολύτιμου χρόνου.

Ορισμένοι από τους όρους που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο της κρίσιμης διαδρομής:

- **Διάρκεια (D):** Ο χρόνος ολοκλήρωσης μιας εργασίας
- **Ενωρίτερος Χρόνος Έναρξης (EXE):** Αυτή είναι ο ενωρίτερος χρόνος που μπορεί να ξεκινήσει μια εργασία στο έργο. Δεν μπορεί να προσδιοριστεί χωρίς να είναι γνωστό πρώτα εάν υπάρχουν εξαρτήσεις εργασιών

- **Βραδύτερος Χρόνος Έναρξης (ΒΧΕ):** Αυτός είναι ο αργότερος χρόνος, που μπορεί να ξεκινήσει μια εργασία, προτού απειλήσει να καθυστερήσει το χρονοδιάγραμμα του έργου.
- **Ενωρίτερος Χρόνος Ολοκλήρωσης (ΕΧΟ):** Το νωρίτερο που μπορεί να ολοκληρωθεί μια εργασία, με βάση τη διάρκειά της και την ενωρίτερη ώρα έναρξής της.
- **Βραδύτερος Χρόνος Ολοκλήρωσής (ΒΧΟ):** Η αργότερη χρονική στιγμή που μπορεί να ολοκληρωθεί μια εργασία, με βάση την διάρκειά της και την βραδύτερη ώρα έναρξής της
- **Περιθώρια:** Περιγράφει κατά πόσο μπορεί να καθυστερήσει μια εργασία προτού επηρεάσει τις ακόλουθες εργασίες και το χρονοδιάγραμμα του έργου. Οι δύο πιο συνήθεις τύποι είναι το συνολικό περιθώριο και το ελεύθερο περιθώριο. Το συνολικό περιθώριο είναι το περιθώριο χρόνου που κάποια εργασία μπορεί να καθυστερήσει χωρίς να επηρεάσει την ολική συμπλήρωση του έργου, ενώ το ελεύθερο περιθώριο είναι το περιθώριο χρόνου που κάποια εργασία μπορεί να καθυστερήσει χωρίς να επηρεάσει την έναρξη των εργασιών που ακολουθούν. Οι εργασίες στην κρίσιμη διαδρομή έχουν μηδενικά περιθώρια, επειδή δεν είναι δυνατή η καθυστέρησή τους

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος CPM πρέπει αρχικά να οριστούν οι εργασίες του έργου, οι σχέσεις προτεραιότητας που υφίστανται μεταξύ των εργασιών και οι χρονικές τους απαιτήσεις. Στη συνέχεια, οι σχέσεις προτεραιότητας μεταξύ των εργασιών μοντελοποιούνται ως ένα δίκτυο (Taha, 2017). Στο δίκτυο ορίζουμε έναν αρχικό κόμβο S, που σηματοδοτεί την έναρξη του έργου και έναν τελικό κόμβο F, που σηματοδοτεί το τέλος του. Για να υπολογιστεί η κρίσιμη διαδρομή πρέπει να γίνουν δύο διελεύσεις. Η εμπρόσθια διέλευση προσδιορίζει τον ενωρίτερο χρόνο ολοκλήρωσης (ΕΧΟ) κάθε εργασίας, ενώ η ανάστροφη διέλευση καθορίζει τους βραδύτερους χρόνους ολοκλήρωσης (ΒΧΟ). Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι δύο διελεύσεις για ένα έργο 8 εργασιών.



Σχήμα 2.3. Υπολογισμοί για την εμπρόσθια και ανάστροφη διέλευση για έργο με 8 εργασίες. Στα τόξα αναγράφονται οι εργασίες και οι διάρκειές τους, ενώ η κρίσιμη διαδρομή έχει επισημανθεί με μπλε χρώμα. (Taha, 2017)

Εάν δίνεται ο χρόνος έναρξης για το έργο (s) – συνήθως θεωρούμε ότι το έργο ξεκινά την χρονική στιγμή 0 -, τότε υπάρχει για κάθε εργασία ένας ενωρίτερος χρόνος έναρξης (EXE), ο οποίος είναι η συντομότερη δυνατή στιγμή που μπορεί να ξεκινήσει μια εργασία, εάν όλες οι προηγούμενες της ξεκινήσουν επίσης στον EXE τους. Εάν μια εργασία έχει μία η περισσότερες προαπαιτούμενες εργασίες τότε ο EXE καθορίζεται από τον EXO των προαπαιτούμενων εργασιών ως εξής:

$$EXE_i = \max\{EXO_j\} \quad (2.1)$$

Όπου EXE_i ο ενωρίτερος χρόνος έναρξης της εργασίας i και EXO_j ο ενωρίτερος χρόνος ολοκλήρωσής της εργασίας j , η οποία είναι προηγούμενη της i . Τα i, j παίρνουν τιμές από 1 έως N , όπου N ο συνολικός αριθμός των κόμβων

Αν η διάρκεια μια εργασίας είναι D , μπορούμε να ορίσουμε, κατ' αναλογία, τον ενωρίτερο χρόνο ολοκλήρωσης (EXO) να είναι:

$$EXO_i = EXE_i + D_i \quad (2.2)$$

Η διέλευση προς τα εμπρός ολοκληρώνεται όταν έχει υπολογιστεί η τιμή του EXO για τον τελικό κόμβο F.

Στην προς τα πίσω διέλευση, οι υπολογισμοί ξεκινούν από τον τελικό κόμβο F και τελειώνουν στον αρχικό κόμβο S. Αρχικά πρέπει να οριστεί ο $BXO = 0$ για τον αρχικό κόμβο S και $BXO = EXO$ για τον τελικό κόμβο F. Για να υπολογίσουμε τον BXE

για κάθε εργασία, αφαιρούμε την προβλεπόμενη διάρκεια D από τον BXO . Για εργασίες που ακολουθούνται από μία ή περισσότερες εργασίες ο BXO υπολογίζεται:

$$BXO_j = \min\{BXE_i\} \quad (2.3)$$

Όπου BXE_i ο βραδύτερος χρόνος έναρξης της εργασίας i και BXO_j ο βραδύτερος χρόνος ολοκλήρωσής της εργασίας j , η οποία είναι προηγούμενη της i . Τα i, j παίρνουν τιμές από 1 έως N , όπου N ο συνολικός αριθμός των κόμβων.

Η διέλευση προς τα πίσω ολοκληρώνεται όταν έχει υπολογιστεί η τιμή του **BXO** για τον κόμβο 1.

Γνωρίζοντας τον ενωρίτερο και τον βραδύτερο χρόνο μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό περιθώριο για κάθε εργασία i χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$\Sigma PX_i = BXO_i - EXO_i \quad (2.4)$$

Κρίσιμες ονομάζονται όσες εργασίες έχουν Συνολικό Περιθώριο ίσο με το μηδέν. Εξ' ορισμού, οι κρίσιμες εργασίες σε ένα δίκτυο συνιστούν το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, που απλώνεται σε όλο το δίκτυο του έργου, από την αρχή μέχρι το τέλος (Hamdy A. Taha, 2010). Η εύρεση της κρίσιμης διαδρομής βοηθάει στην επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής για την τήρηση ενημερωμένων προθεσμιών.

Όταν οι χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών είναι ντετερμινιστικοί, η μέθοδος της κρίσιμης διαδρομής (CPM) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει ποιες εργασίες, όταν καθυστερούν, οδηγούν σε καθυστέρηση στον χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Ωστόσο, καθώς οι χρόνοι ολοκλήρωσης εργασιών είναι αβέβαιοι ή τουλάχιστον θεωρείται ότι ακολουθούν μια κατανομή με γνωστές παραμέτρους, η CPM έχει επεκταθεί ώστε να επιτρέπει τυχαίους χρόνους ολοκλήρωσης εργασιών με την τεχνική αποτίμησης και αναθεώρησης προγραμμάτων (PERT) (Trietsch & Baker, 2012). Οι Arashpour, Wakefield, Lee, Chan, και Hosseini (2016) προτείνουν ότι η ανάλυση του κινδύνου στα έργα μπορεί να μελετηθεί με μια σειρά προσεγγίσεων, συμπεριλαμβανομένων των στατιστικών μεθόδων, την προσομοίωση Monte Carlo, και τη θεωρία ασαφών συνόλων, μεταξύ άλλων. Στην συγκεκριμένη εργασία προτείνεται μια διαφορετική, υβριδική προσέγγιση για τον εντοπισμό κρίσιμων εργασιών του έργου, συνδυάζοντας την προσομοίωση Monte Carlo και την εφαρμογή πολυκριτήριων μεθόδων όπως η ELECTRE III και η PROMETHEE. Συγκρίνονται οι κατά προσέγγιση κατανομές των χρόνων ολοκλήρωσης των εργασιών που προκύπτουν από διαφορετικές καθυστερήσεις, οι οποίες βρέθηκαν

χρησιμοποιώντας την προσομοίωση Monte Carlo, χρησιμοποιώντας τις πολυκριτήριες μεθόδους ELECTRE III και PROMETHEE. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει σύγκριση του συνόλου της κατανομής του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

3.1 Θεωρία Αποφάσεων

Η θεωρία αποφάσεων ασχολείται με το σκεπτικό στο οποίο βασίζονται οι επιλογές του αποφασίζοντα. Μελετάει, δηλαδή, τις επιλογές ενός ατόμου, έτσι ώστε να κατανοήσουμε τη λογική πίσω από τις επιλογές αυτές. Η θεωρία αποφάσεων, συχνά πραγματεύεται το τι κάνει μια απόφαση ικανοποιητική, ποιος μπορεί να είναι αυτός ο καταλληλότερος υπεύθυνος λήψης αποφάσεων και πώς μπορεί να καταλήξει σε αυτήν την απόφαση.

Η θεωρία αποφάσεων είναι τόσο μια θεωρία πεποιθήσεων, επιθυμιών και άλλων σχετικών στάσεων, εφόσον αυτό που επιλέγει να κάνει ένα άτομο σε μια δεδομένη περίπτωση καθορίζεται, εν μέρει, από τις επιθυμίες του, όσο και μια θεωρία επιλογής. Αυτό που έχει σημασία είναι πώς αυτά τα διαφορετικά κριτήρια συμπίπτουν μεταξύ τους και τι αξία έχει το καθένα για τον αποφασίζοντα. (Steele, Stefánsson, 2020).

Οι αποφάσεις έχουν συνέπειες και συνήθως συζητούνται σε δύο ξεχωριστούς αλλά διακριτούς κλάδους. Η λήψη αποφάσεων περιγράφεται από *κανονιστικές* (normative) αλλά και *περιγραφικές* (descriptive) θεωρίες. Μια *κανονιστική* θεωρία αποφάσεων είναι μια θεωρία που ορίζει το πώς πρέπει να παίρνονται οι αποφάσεις και κάνει προβλέψεις για το μέλλον. Αναλύει τα αποτελέσματα των αποφάσεων, καθορίζει τη βέλτιστη απόφαση με βάση τα αποτελέσματα και επικεντρώνεται γύρω από τον ιδανικό υπεύθυνο λήψης αποφάσεων για μια συγκεκριμένη κατάσταση. Αντίθετα, μια *περιγραφική* θεωρία περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο παίρνονται στην πραγματικότητα οι αποφάσεις. Ασχολείται με την περιγραφή των παρατηρούμενων συμπεριφορών, συχνά με την υπόθεση ότι όσοι λαμβάνουν αποφάσεις συμπεριφέρονται σύμφωνα με ορισμένους κανόνες (Sniazhko, 2019).

3.2 Αβεβαιότητα στη λήψη αποφάσεων

Η αβεβαιότητα, που ορίζεται ως η έλλειψη γνώσης σχετικά με τις πιθανότητες της μελλοντικής κατάστασης των γεγονότων, έχει αποδειχθεί ότι

επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις αποφάσεις. Κατά τη λήψη αποφάσεων, είναι σημαντικό να προβλεφθούν οι συνέπειες που σχετίζονται με διαφορετικές επιλογές ή ενέργειες, προκειμένου να ληφθεί η καταλληλότερη απόφαση. Ωστόσο, υπάρχουν γεγονότα και περιστάσεις που επηρεάζουν το αποτέλεσμα των αποφάσεων. Τα γεγονότα που προκαλούν αβεβαιότητα μπορεί να προέρχονται εξωτερικά, από το κοινωνικό και το φυσικό περιβάλλον, καθώς και εσωτερικά, από το ίδιο το άτομο.

Η αβεβαιότητα και ο ρόλος της στη λήψη αποφάσεων είναι ένα σημαντικό φαινόμενο, που έχει λάβει σημαντική ερευνητική προσοχή στις μελέτες διεθνών επιχειρήσεων τις τελευταίες πέντε δεκαετίες. Αν και η αβεβαιότητα έχει ενσωματωθεί σε πολλές μελέτες σχετικά με τη λήψη αποφάσεων, πολλές φορές δεν γίνονται σαφείς διακρίσεις μεταξύ των διαφόρων διαστάσεων της αβεβαιότητας. Συχνά γίνεται διάκριση μεταξύ περιβαλλοντικών και σταθερών αβεβαιοτήτων, ωστόσο οι διαστάσεις που χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση τέτοιων αβεβαιοτήτων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των μελετών. Αυτή η ασυνέπεια είναι προβληματική επειδή παρέχει αντικρουόμενα αποτελέσματα σχετικά με τη λήψη αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας, εμποδίζει την ανάπτυξη της γνώσης και τη συστηματική αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και παρουσιάζει μια ελλιπή εικόνα του ρόλου που διαδραματίζει η αβεβαιότητα στη λήψη αποφάσεων. Όσον αφορά την πρακτική, η έλλειψη σαφών διακρίσεων μεταξύ των διαφόρων διαστάσεων της αβεβαιότητας μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικές αντιλήψεις για το πραγματικό περιβάλλον και, στη συνέχεια, σε ριψοκίνδυνες και αδικαιολόγητες αποφάσεις (Brouthers, 1995).

Οι διαφορετικές μεταβλητές αβεβαιότητας αποτελούν μέρος της θεωρίας λήψης αποφάσεων. Οι διαφορετικές συνθήκες αβεβαιότητας που υπάρχουν στη σύγχρονη θεωρία λήψης αποφάσεων είναι τρεις (Savage, 1954):

- *Καταστάσεις*
- *Συνέπειες*
- *Πράξεις*

Οι *καταστάσεις* αναφέρονται στα γεγονότα, που μπορούν να επηρεάσουν μια απόφαση. Οι *συνέπειες* είναι τα χαρακτηριστικά μιας απόφασης, που επηρεάζουν τον υπεύθυνο λήψης της απόφασης. Οι *πράξεις* είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ των καταστάσεων και των συνεπειών.

3.3 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων

Σύμφωνα με τον μοντέλο του Simon (1960) η διαδικασία λήψης αποφάσεων χωρίζεται σε τρεις φάσεις:

- **Νοητική φάση (Intelligent phase):** Στο αρχικό αυτό στάδιο αναζητούνται καταστάσεις για τις οποίες μπορεί να ληφθούν αποφάσεις
- **Σχεδιασμός (Design):** Στη φάση αυτή εξετάζονται, αναλύονται και αξιολογούνται όλες οι δυνατές εναλλακτικές
- **Επιλογή (Choice):** Στην τελική αυτή φάση επιλέγεται ο ευνοϊκότερος και ο αποτελεσματικότερος τρόπος δράσης

Στην τρίτη φάση περιέχεται και η διαδικασία της υλοποίησης (implementation), η οποία μπορεί να αποτελέσει και ξεχωριστή φάση από μόνη της. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται αναλυτικά και οι 4 φάσεις της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Στις παρακάτω υποενότητες αναλύεται η κάθε φάση (Ματσατσίνης, 2010).

3.3.1 Νοητική Φάση

Στη φάση αυτή αναζητούνται πιθανά προβλήματα τα οποία χρήζουν λήψη μιας απόφασης. Στη συνέχεια διευκρινίζεται αν το πρόβλημα είναι πραγματικό και αν αποτελεί μεμονωμένο πρόβλημα ή αν είναι μέρος ενός άλλου ευρύτερου προβλήματος. Έπειτα καθορίζεται η έκταση και η σημαντικότητα του κάθε προβλήματος, ώστε να γνωρίζει ο αποφασίζοντας, την σειρά με την οποία πρέπει να επιλύσει το καθένα, δηλαδή την προτεραιότητα του κάθε προβλήματος. Η φάση αυτή ολοκληρώνεται, όταν έχει γίνει πλήρης καταγραφή του κάθε προβλήματος.

3.3.2 Φάση Σχεδιασμού

Η συγκεκριμένη φάση ξεκινά με την αναλυτική μελέτη του προβλήματος, έτσι ώστε όλοι οι αποφασίζοντες να είναι ενήμεροι για τα χαρακτηριστικά του. Στη φάση αυτή, πολύ σημαντικό είναι το στάδιο της μοντελοποίησης του προβλήματος, κατά την οποία κατασκευάζεται ένα μοντέλο, το οποίο αναπαριστά με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια το πρόβλημα. Αφού κατασκευαστεί το μοντέλο,

αναζητούνται όλοι οι πιθανοί εναλλακτικοί τρόποι δράσης, οι οποίοι στη συνέχεια, αφού αναπτυχθούν και αναλυθούν, θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των πιθανών λύσεων, οι οποίες με την σειρά τους θα εξεταστούν για το αν μπορούν να εφαρμοστούν



Σχήμα 3.1 Στο σχήμα αυτό φαίνονται αναλυτικά και οι 4 φάσεις της διαδικασίας λήψης αποφάσεων (Ματσατσίνης, 2010).

3.3.3 Φάση Επιλογής

Στη φάση επιλογής εκτελούνται όλες οι εργασίες αναζήτησης, εκτίμησης και εύρεσης της καταλληλότερης λύσης του μοντέλου. Η αναζήτηση της λύσης μπορεί να είναι, είτε κατευθυνόμενη από το στόχο (goal – driven), είτε από τα δεδομένα (data-driven).

Στην φάση αυτή, επίσης, γίνεται και η ανάλυση ευαισθησίας, με την οποία ελέγχονται οι σχέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές και στις παραμέτρους του μοντέλου. Για να γίνει ο έλεγχος ευαισθησίας μεταβάλλονται οι είσοδοι ή οι παράμετροι του μοντέλου και έπειτα ελέγχονται τα αποτελέσματα του μοντέλου.

3.3.4 Φάση Ολοκλήρωσης

Στην τελική φάση, δηλαδή στη φάση ολοκλήρωσης, υλοποιείται η προτεινόμενη λύση. Στη συνέχεια γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και αν είναι ικανοποιητικά, συμπεραίνεται ότι οι εργασίες των προηγούμενων φάσεων έγιναν σωστά. Στην αντίθετη περίπτωση, που τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά, τότε εκτιμώνται οι αιτίες που οδήγησαν στην απόρριψη της λύσης. Στη συνέχεια υπάρχει η δυνατότητα είτε να γίνει επαναδιατύπωση του προβλήματος, είτε να επαναληφθούν ορισμένα από τα προηγούμενα βήματα, μέχρι τελικά να καταλήξουμε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα ή μέχρι να εγκαταλείψουμε τις προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος.

3.4. Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων

Η πολυκριτήρια ανάλυση καθορίζει τις προτιμήσεις μεταξύ επιλογών με αναφορά σε ένα σαφές σύνολο στόχων, που έχει προσδιορίσει το όργανο λήψης αποφάσεων και για τους οποίους έχει θεσπίσει μετρήσιμα κριτήρια για την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο έχουν επιτευχθεί. Σε απλές περιπτώσεις, η διαδικασία προσδιορισμού στόχων και κριτηρίων μπορεί από μόνη της να παρέχει αρκετές πληροφορίες για τους λήπτες αποφάσεων. Ωστόσο, όπου απαιτείται ένα επίπεδο λεπτομέρειας, η πολυκριτήρια ανάλυση προσφέρει διάφορους τρόπους

συγκέντρωσης των δεδομένων σε επιμέρους κριτήρια για να παρέχει δείκτες της συνολικής απόδοσης των επιλογών.

Πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά πολυκριτήριας λήψης αποφάσεων

Η πολυκριτήρια ανάλυση έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι της άτυπης κρίσης που δεν υποστηρίζεται από ανάλυση:

- Η επιλογή των στόχων και των κριτηρίων, που μπορεί να κάνει οποιαδήποτε ομάδα λήψης αποφάσεων, είναι ανοιχτή σε ανάλυση και αλλαγή, εάν θεωρηθεί ότι είναι ακατάλληλη.
- Οι βαθμολογίες και τα βάρη, όταν χρησιμοποιούνται, είναι επίσης σαφή και αναπτύσσονται σύμφωνα με τις καθιερωμένες τεχνικές. Μπορούν, επίσης, να διασταυρωθούν με άλλες πηγές πληροφοριών και να τροποποιηθούν εάν είναι απαραίτητο.
- Μπορεί να παρέχει ένα σημαντικό μέσο επικοινωνίας, εντός της ομάδας λήψης αποφάσεων και μερικές φορές μεταξύ του φορέα και της ευρύτερης κοινότητας.
- Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μπορεί να ανατεθεί σε εμπειρογνώμονες, επομένως δεν χρειάζεται απαραίτητα να αφεθεί στα χέρια του ίδιου του οργάνου λήψης αποφάσεων

Βασικό χαρακτηριστικό της πολυκριτήριας ανάλυσης είναι η έμφαση που δίνει στην κρίση της ομάδας λήψης αποφάσεων, στον καθορισμό στόχων και κριτηρίων, στην εκτίμηση των σχετικών βαρών σημασίας και, σε κάποιο βαθμό, στην αξιολόγηση της συμβολής κάθε επιλογής σε κάθε κριτήριο. Τα θεμέλια της, κατά κύριο λόγο, είναι οι επιλογές των ίδιων των αρμοδίων σχετικά με τους στόχους, τα κριτήρια, τα βάρη και τις αξιολογήσεις για την επίτευξη των στόχων.

Ένα, ακόμα, τυπικό χαρακτηριστικό της πολυκριτήριας ανάλυσης είναι ένας πίνακας επιδόσεων ή πίνακας συνεπειών, στον οποίο κάθε σειρά περιγράφει μια επιλογή και κάθε στήλη περιγράφει την επίδοση της κάθε επιλογής σε σχέση με κάθε κριτήριο. Στην απλή μορφή της πολυκριτήριας ανάλυσης, αυτός ο πίνακας επιδόσεων μπορεί να είναι το τελικό προϊόν της ανάλυσης. Στη συνέχεια, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων έχουν την ευθύνη να αξιολογήσουν τον βαθμό στον οποίο οι στόχοι τους επιτυγχάνονται. Μια τέτοια διαισθητική επεξεργασία των

δεδομένων μπορεί να είναι γρήγορη και αποτελεσματική, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει στη χρήση αδικαιολόγητων υποθέσεων, προκαλώντας λανθασμένη κατάταξη των επιλογών. Σε πιο εξελιγμένες τεχνικές πολυκριτήριας ανάλυσης, οι πληροφορίες στη βασική μήτρα συνήθως συνδυάζονται για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος.

Οι πολυκριτήριες τεχνικές συνήθως εφαρμόζουν αριθμητική ανάλυση σε έναν πίνακα επιδόσεων σε δύο στάδια:

1. **Βαθμολόγηση.** Στο στάδιο αυτό, στις αναμενόμενες συνέπειες κάθε επιλογής, εκχωρείται μια αριθμητική βαθμολογία σε μια κλίμακα προτίμησης για κάθε επιλογή και για κάθε κριτήριο. Οι επιλογές, που προτιμώνται παραπάνω, βαθμολογούνται υψηλότερα στην κλίμακα και οι λιγότερο προτιμώμενες επιλογές βαθμολογούνται χαμηλότερα. Στην πράξη, χρησιμοποιούνται συχνά κλίμακες που εκτείνονται από το 0 έως το 100, όπου το 0 αντιπροσωπεύει την λιγότερο προτιμώμενη επιλογή και το 100 σχετίζεται με την προτιμότερη επιλογή.
2. **Στάθμιση:** Στη φάση αυτή, εκχωρούνται αριθμητικά βάρη για τον καθορισμό, για κάθε κριτήριο, των σχετικών αποτιμήσεων μιας μετατόπισης μεταξύ του πάνω και του κάτω μέρους της επιλεγμένης κλίμακας

Στη συνέχεια αυτά τα δύο στοιχεία συνδυάζονται, για να δώσουν μια συνολική αξιολόγηση κάθε επιλογής. Αυτές οι προσεγγίσεις αναφέρονται συχνά ως αντισταθμιστικές τεχνικές, καθώς οι χαμηλές βαθμολογίες σε ένα κριτήριο, μπορεί να αντισταθμίζονται από υψηλές βαθμολογίες σε ένα άλλο. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος συνδυασμού βαθμολογιών σε κριτήρια και σχετικών βαρών μεταξύ κριτηρίων είναι ο υπολογισμός ενός απλού σταθμισμένου μέσου όρου βαθμολογιών. Η χρήση τέτοιων σταθμισμένων μέσων όρων εξαρτάται από την υπόθεση της αμοιβαίας ανεξαρτησίας των προτιμήσεων. Αυτό σημαίνει ότι η εκτιμώμενη ισχύς προτίμησης για μια επιλογή σε ένα κριτήριο θα είναι ανεξάρτητη από την εκτιμώμενη ισχύ της προτίμησης σε ένα άλλο.

3.5 ΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ELECTRE

3.5.1 Σύντομο ιστορικό

Η προέλευση των μεθόδων ELECTRE χρονολογείται από το 1965, στην ευρωπαϊκή εταιρεία συμβούλων SEMA, η οποία εξακολουθεί να δραστηριοποιείται σήμερα. Εκείνη την εποχή, μια ερευνητική ομάδα από την SEMA εργάστηκε σε ένα συγκεκριμένο, πολλαπλών κριτηρίων, πραγματικό πρόβλημα, σχετικά με τις αποφάσεις που αφορούν την ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων σε επιχειρήσεις. Για την «λύση» αυτού του προβλήματος δημιουργήθηκε μια γενική μέθοδος πολλαπλών κριτηρίων, η MARSAN (Méthode d'Analyse, de Recherche, et de Sélection d'Activités Nouvelles). Οι αναλυτές χρησιμοποίησαν μια τεχνική με βάση το σταθμισμένο άθροισμα που περιλαμβάνεται στη μέθοδο MARSAN για την επιλογή των νέων δραστηριοτήτων. Κατά τη χρήση της μεθόδου, οι μηχανικοί της SEMA παρατήρησαν σοβαρά μειονεκτήματα στην εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνικής. Έτσι ζητήθηκε η γνώμη του επίτιμου καθηγητή του Université Paris-Dauphine, Bernard Roy, ο οποίος προσπάθησε να βρει μια νέα μέθοδο για να ξεπεράσει τους περιορισμούς του MARSAN. Έτσι, το 1965, επινοήθηκε η μέθοδος ELECTRE, για την επιλογή των καλύτερων ενεργειών από ένα δεδομένο σύνολο ενεργειών και αργότερα αναφέρθηκε ως ELECTRE I. Λίγο μετά την εμφάνισή της, ELECTRE I διαπιστώθηκε ότι ήταν αποτελεσματική όταν εφαρμόστηκε σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, αλλά έγινε ευρέως γνωστή το 1968. Το ακρωνύμιο ELECTRE σημαίνει "ELimination Et Choix Traduisant la REalité".

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, προέκυψε μια διαφορετική κατάσταση λήψης αποφάσεων στον πραγματικό κόσμο, που αφορούσε τη διαφήμιση. Για έναν τέτοιο σκοπό, το ερώτημα ήταν: πώς να καθιερωθεί ένα κατάλληλο σύστημα κατάταξης για περιοδικά (περιοδικά, εφημερίδες, ...); Αυτό οδήγησε στη γέννηση της ELECTRE II: μια μέθοδο για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κατάταξης των ενεργειών από την καλύτερη επιλογή έως την χειρότερη.

Ωστόσο, σε έναν κόσμο όπου η τέλεια γνώση είναι σπάνια, μόνο ατελής γνώση θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη στις μεθόδους ELECTRE μέσω της χρήσης κατανομών πιθανότητας και των ανάλογων κριτηρίων χρησιμότητας. Είναι σαφές ότι έπρεπε να γίνει περισσότερη δουλειά, καθώς η έρευνα σε αυτόν τον τομέα βρισκόταν ακόμη στα αρχικά της στάδια. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης

της αβεβαιότητας, της ανακρίβειας και της κακής αποφασιστικότητας εισηχθηκε, ο αλγόριθμος με την χρήση κατωφλίου.

Το 1978 αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος για την κατάταξη των ενεργειών: η ELECTRE III. Οι κύριες νέες ιδέες που εισήχθησαν με αυτή τη μέθοδο ήταν η χρήση ψευδοκριτηρίων και ασαφών δυαδικών σχέσεων υψηλότερης κατάταξης. Το 1982 προέκυψε μια άλλη μέθοδος ELECTRE, γνωστή ως ELECTRE IV, από ένα νέο πραγματικό πρόβλημα που σχετιζόταν με το δίκτυο του μετρό στο Παρίσι. Κατέστη πλέον δυνατή η κατάταξη ενεργειών, χωρίς να χρησιμοποιούνται τα σχετικά κριτήρια συντελεστών σημαντικότητας. Αυτή είναι η μόνη μέθοδος ELECTRE που δεν χρησιμοποιεί τέτοιους συντελεστές.

Οι παραπάνω μέθοδοι σχεδιάστηκαν, κυρίως, για να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων που αφορούσαν την επιλογή και την κατάταξη ενεργειών. Ωστόσο, στα τέλη της δεκαετίας του 1970 προτάθηκε μια νέα τεχνική ταξινόμησης των ενεργειών σε προκαθορισμένες κατηγορίες. Αυτή είναι μια προσέγγιση που βασίζεται σε δέντρο αποφάσεων. Αρκετά χρόνια αργότερα, για να διευκολυνθεί η λήψη αποφάσεων σε μια μεγάλη τραπεζική εταιρεία που αντιμετώπιζε το πρόβλημα της αποδοχής ή της άρνησης πιστώσεων που ζητούσαν οι επιχειρήσεις, επινοήθηκε μια συγκεκριμένη μέθοδος, η ELECTRE A, η οποία εφαρμόστηκε σε δέκα τομείς δραστηριότητας. Αυτό θα έπρεπε να είχε παραμείνει εμπιστευτικό. Η πιο πρόσφατη μέθοδος ταξινόμησης, η ELECTRE TRI, είναι, ταυτόχρονα, απλούστερη και γενικότερη.

3.5.2. Κύρια Χαρακτηριστικά των Μεθόδων ELECTRE

Οι μέθοδοι ELECTRE είναι σχετικές όταν αντιμετωπίζονται καταστάσεις λήψης αποφάσεων με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων θέλει να συμπεριλάβει στο μοντέλο τουλάχιστον τρία κριτήρια).
2. Οι ενέργειες αξιολογούνται (για τουλάχιστον ένα κριτήριο) σε διατεταγμένη κλίμακα (ordinal scales). Αυτές οι κλίμακες δεν είναι κατάλληλες για σύγκριση διαφορών. Ως εκ τούτου, είναι δύσκολο να οριστεί μια κωδικοποίηση που έχει νόημα από την άποψη της διαφοράς προτιμήσεων στην αναλογία

$$\frac{g_j(a) - g_j(b)}{g_j(c) - g_j(d)} \quad (3.1)$$

όπου $g_j(x)$ είναι η αξιολόγηση της δράσης x στο κριτήριο g_j .

3. Υπάρχει έντονη ετερογένεια που σχετίζεται με τη φύση των αξιολογήσεων μεταξύ των κριτηρίων (π.χ. διάρκεια, θόρυβος, απόσταση, ασφάλεια, μνημεία, κλπ.). Αυτό καθιστά δύσκολη τη συγκέντρωση όλων των κριτηρίων σε μια μοναδική και κοινή κλίμακα. θ
4. Αντιστάθμιση της ζημίας σε δεδομένο κριτήριο με κέρδος σε ένα άλλο μπορεί να μην είναι αποδεκτή για τον αποφασίζοντα. Επομένως, τέτοιες καταστάσεις απαιτούν τη χρήση μη αντισταθμιστικών διαδικασιών αθροίσματος.
5. Για τουλάχιστον ένα κριτήριο ισχύει το εξής: μικρές διαφορές των αξιολογήσεων δεν είναι σημαντικές ως προς τις προτιμήσεις, ενώ η συσσώρευση αρκετών μικρών διαφορών μπορεί να γίνει σημαντική. Αυτό απαιτεί την εισαγωγή ορίων διάκρισης (αδιαφορία και προτίμηση) που οδηγεί σε δομή προτίμησης με μία περιεκτική αμετάβλητη δυαδική σχέση αδιαφορίας.

Οι προτιμήσεις στις μεθόδους ELECTRE μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας δυαδικές σχέσεις υπεροχής, S , των οποίων η σημασία είναι «τουλάχιστον τόσο καλή όσο». Θεωρώντας δύο ενέργειες a και b , μπορεί να προκύψουν τέσσερις καταστάσεις:

- aSb και όχι bSa , δηλ. aPb (το a προτιμάται αυστηρά από το b).
- bSa και όχι aSb , δηλ. bPa (το b προτιμάται αυστηρά από το a).
- aSb και bSa , δηλ. aIb (το a και το b είναι αδιάφορα μεταξύ τους).
- Όχι aSb και όχι bSa , δηλ. aRb (το a είναι ασύγκριτο με το b).

Οι μέθοδοι ELECTRE δημιουργούν μία ή περισσότερες σχέσεις υπεροχής. Η χρήση τέτοιων σχέσεων για τις προτιμήσεις μοντέλων εισάγει μια νέα σχέση προτίμησης, R (ασύγκριτη), η οποία είναι χρήσιμη για να ληφθούν υπόψιν καταστάσεις στις οποίες ο αποφασίζοντας ή ο αναλυτής δεν βρίσκεται σε θέση να συγκρίνει δύο ενέργειες. Η κατασκευή μιας σχέσης υπεροχής βασίζεται σε δύο συνθήκες:

1. **Συμφωνία.** Για να επικυρωθεί μια σχέση $a S b$, αρκεί η πλειοψηφία των κριτηρίων να είναι υπέρ αυτού του ισχυρισμού.
2. **Ασυμφωνία.** Όταν ισχύει η συνθήκη συμφωνίας, κανένα από τα κριτήρια, που βρίσκονται στη μειοψηφία, δεν θα πρέπει να αντιτίθεται πολύ έντονα στον ισχυρισμό $a S b$.

Αυτές οι δύο προϋποθέσεις πρέπει να πληρούνται για την επικύρωση του ισχυρισμού $a \succ b$.

Οι μέθοδοι ELECTRE περιλαμβάνουν δύο κύριες διαδικασίες, οι οποίες είναι η κατασκευή μιας ή αρκετών σχέσεων υπεροχής, που ακολουθούνται από μία διαδικασία εκμετάλλευσης. Η κατασκευή μιας ή περισσότερων σχέσεων στοχεύει στη σύγκριση με ολοκληρωμένο τρόπο κάθε ζεύγους ενεργειών. Η διαδικασία εκμετάλλευσης χρησιμοποιείται για να γίνουν συστάσεις, βασισμένες στα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την πρώτη φάση. Η φύση των συστάσεων εξαρτάται από το πρόβλημα (επιλογή, κατάταξη ή ταξινόμηση). Ως εκ τούτου, κάθε μέθοδος χαρακτηρίζεται από τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται οι σχέσεις και τον τρόπο με τον οποίο αξιοποιούνται.

Ο σχετικός ρόλος που αποδίδεται στα κριτήρια, στις μεθόδους ELECTRE, καθορίζεται από δύο διακριτά σύνολα παραμέτρων:

- τους συντελεστές σημασίας και
- το κατώτατο όριο βέτο.

Οι συντελεστές σημασίας στις μεθόδους ELECTRE αναφέρονται ως «βάρη». Για ένα δεδομένο κριτήριο, το βάρος, w_j , αντικατοπτρίζει την “ισχύ της ψήφου” του όταν συμβάλλει στην πλειοψηφία που τάσσεται υπέρ μιας υπεροχής. Τα βάρη δεν εξαρτώνται ούτε από τα εύρη ούτε από την κωδικοποίηση της κλίμακας.

Τα κατώφλια βέτο εκφράζουν την “εξουσία” που αποδίδεται σε ένα δεδομένο κριτήριο, έναντι του ισχυρισμού «το a υπερτερεί του b », όταν η διαφορά της αξιολόγησης μεταξύ $g(b)$ και $g(a)$ είναι μεγαλύτερη από αυτό το όριο. Αυτά τα κατώφλια μπορεί να είναι σταθερά κατά μήκος μιας κλίμακας ή μπορεί επίσης να ποικίλλουν.

3.5.3. Προβληματική επιλογής

Ο στόχος αυτής της προβληματικής είναι η παροχή βοήθειας στους αποφασίζοντες, στην επιλογή ενός υποσυνόλου ενεργειών, όσο το δυνατόν μικρότερου, με τέτοιο τρόπο ώστε τελικά να μπορεί να επιλεγεί μια μεμονωμένη ενέργεια.

ELECTRE I

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ενός συνόλου λύσεων σε ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Τα κριτήρια είναι αληθή. Έστω a και b δύο πιθανές ενέργειες, η ELECTRE I δίνει έναν πίνακα κατάταξης που μεταφράζει αριθμητικά τον ισχυρισμό "το a είναι τουλάχιστον τόσο καλό όσο το b ", που υποδηλώνεται από την σχέση $a S b$, μόνο όταν ισχύουν δύο προϋποθέσεις.

Από τη μία πλευρά, η *συνθήκη συμφωνίας* πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή για να υποστηρίξει τον παραπάνω ισχυρισμό. Η *συνθήκη συμφωνίας* εξετάζει το άθροισμα των βαρών που σχετίζονται με τα κριτήρια, που διαμορφώνουν αυτήν την συμφωνία με τον ισχυρισμό. Μπορεί να οριστεί από τον παρακάτω δείκτη συμφωνίας (υποθέτοντας, για λόγους απλότητας της παρουσίασης, ότι $\sum_{j \in J} w_j = 1$, όπου J είναι το σύνολο των κριτηρίων):

$$c(aSb) = \sum_{\{j: g_j(a) \geq g_j(b)\}} w_j \quad (3.2)$$

όπου $\{j: g_j(a) \geq g_j(b)\}$ είναι το σύνολο των δεικτών για όλα τα κριτήρια, που ανήκουν στην συνθήκη συμφωνίας για την σχέση $a S b$.

Με άλλα λόγια, η τιμή του δείκτη συμφωνίας πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από ένα δεδομένο επίπεδο συμφωνίας, s , το οποίο ορίζεται εντός του εύρους $[0.5, 1 - \min_{j \in J} w_j]$.

Από την άλλη πλευρά, μπορεί να προκύψει ασυμφωνία με τον ισχυρισμό "Το a είναι τουλάχιστον τόσο καλό όσο το b ". Η αξιολογείται σε σχέση με τον ακόλουθο δείκτη:

$$d(aSb) = \max_{\{j: g_j(a) < g_j(b)\}} \{g_j(b) - g_j(a)\} \quad (3.3)$$

Εάν αυτός ο δείκτης της *συνθήκης ασυμφωνίας*, υπερβεί ένα δεδομένο επίπεδο, v , ο ισχυρισμός δεν είναι πλέον έγκυρος. Ο ισχυρισμός δεν επηρεάζεται όταν $d(a S b) \leq v$. Πρέπει να υπολογιστούν τόσο οι δείκτες συμφωνίας όσο και οι δείκτες ασυμφωνίας για κάθε ζεύγος ενεργειών (a, b) στο σύνολο A των εξεταζόμενων εναλλακτικών.

Είναι εύκολο να δούμε ότι μια τέτοια υπολογιστική διαδικασία οδηγεί σε δυαδική σχέση. Επομένως για κάθε ζεύγος ενεργειών (a, b) , μόνο μια από τις ακόλουθες καταστάσεις μπορεί να προκύψει:

- $a S b$ και όχι $b S a$, δηλ. $a P b$ (a είναι αυστηρά προτιμώμενο από το b).

- $b S a$ και όχι $a S b$, δηλαδή $b P a$ (b είναι αυστηρά προτιμώμενο από το a).
- $a S b$ και $b S a$, δηλ., $a I b$ (a είναι αδιάφορο για το b).
- Όχι $a S b$ και όχι $b S a$, δηλαδή, $a R b$ (a είναι ασύγκριτο για b).

Αυτό το πλαίσιο προτιμήσεων-αδιαφορίας με τη δυνατότητα να καταφύγουμε σε αδυναμία σύγκρισης, δεν οδηγεί άμεσα σε συμπεράσματα για την επιλογή της καταλληλότερης ενέργειας ή ενός υποσυνόλου ενεργειών, στο οποίο θα επικεντρωθεί η προσοχή του αποφασίζοντα.

Για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος, εφαρμόζεται μια διαδικασία εκμετάλλευσης της σχέσης υπεροχής, προκειμένου να εντοπιστεί ένα μικρό υποσύνολο ενεργειών, από το οποίο θα μπορούσε να επιλεγεί η πιο κατάλληλη ενέργεια. Ένα τέτοιο υποσύνολο ενεργειών του A, Π , μπορεί να καθοριστεί ως ο πυρήνας του γραφήματος υπεροχής. Για τον πυρήνα ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

$$\forall b \in A - \Pi, \exists a \in \Pi \text{ για το οποίο } a S b \quad (3.4)$$

$$\forall A \in \Pi \text{ και } a' \in \Pi, a S a' \text{ και } a' S a \quad (3.5)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό, οι καλύτερες επιλογές του συνόλου A βρίσκονται μέσα στον πυρήνα Π .

Όταν το γράφημα υπεροχής δεν περιέχει κυκλώματα, υπάρχει ένας μόνο πυρήνας. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν το γράφημα περιέχει κυκλώματα, τότε μπορεί να μην έχει πυρήνα ή να περιέχει περισσότερους από έναν πυρήνες.

3.5.4. Προβληματική κατάταξης

Στην προβληματική κατάταξης ασχολούμαστε με την κατάταξη όλων των ενεργειών, που ανήκουν σε ένα δεδομένο σύνολο, από την καλύτερη στην χειρότερη, με το ενδεχόμενο ισοβαθμίας. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι ELECTRE για την επίλυση της συγκεκριμένης προβληματικής.

Electre III

Η ELECTRE III σχεδιάστηκε για να βελτιωθεί η ELECTRE II και για να αντιμετωπίσει ανακριβή, ασαφή, αβέβαια ή κακώς προσδιορισμένα δεδομένα. Αυτός ο σκοπός

επιτεύχθηκε και η ELECTRE III εφαρμόστηκε με επιτυχία τις τελευταίες δύο δεκαετίες σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Η καινοτομία αυτής της μεθόδου είναι η εισαγωγή ψευδοκριτηρίων. Στην ELECTRE III η σχέση υπεροχής μπορεί να ερμηνευθεί ως ασαφής σχέση. Η κατασκευή αυτής της σχέσης απαιτεί τον ορισμό ενός δείκτη αξιοπιστίας, ο οποίος χαρακτηρίζει την αξιοπιστία του ισχυρισμού "η a υπερέρχει της b ", aSb . Έστω ότι το $p(aSb)$ υποδηλώνει αυτόν το δείκτη. Ορίζεται χρησιμοποιώντας τόσο τον δείκτη συμφωνίας $c(aSb)$, όσο έναν δείκτη ασυμφωνίας για κάθε κριτήριο g_j στο F , ο οποίος είναι ο $d_j(aSb)$. Όταν $p_j(b)$ και $q_j(b)$ είναι αντίστοιχα τα κατώφλια προτίμησης και αδιαφορίας για το κριτήριο j και την εναλλακτική επιλογή b , ο δείκτης συμφωνίας, όταν το κριτήριο g_j έχει αύξουσα μορφή, μεταβάλλεται στο διάστημα $[0, 1]$ ως εξής:

$$c_j(aSb) = \begin{cases} 1 & \text{εάν } g_j(a) > g_j(b) - q_j(b) \\ 0 & \text{εάν } g_j(a) \leq g_j(b) - p_j(b) \\ \frac{p_j(b) - [g_j(b) - g_j(a)]}{p_j(b) - q_j(b)} & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.6)$$

Η ασυμφωνία ενός κριτηρίου g_j στοχεύει στο να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, αυτό το κριτήριο είναι περισσότερο ή λιγότερο ασύμφωνο με τον ισχυρισμό aSb . Ο δείκτης ασυμφωνίας φτάνει τη μέγιστη τιμή του όταν το κριτήριο g_j ασκεί βέτο στη σχέση υπεροχής, ενώ είναι ελάχιστος όταν το κριτήριο g_j δεν αντιτίθεται σε αυτή την σχέση. Για να οριστεί η τιμή του δείκτη ασυμφωνίας στην ενδιάμεση ζώνη, απλά έγινε η παραδοχή ότι η τιμή μεγαλώνει ανάλογα με τη διαφορά $g_j(b) - g_j(a)$. Αυτός ο δείκτης μπορεί τώρα να παρουσιαστεί ως εξής:

$$d_j(aSb) = \begin{cases} 1 & \text{εάν } g_j(b) > g_j(a) + v_j(g_j(a)) \\ 0 & \text{εάν } g_j(b) \leq g_j(a) + p_j(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j(a)}{v_j(a) - p_j(a)} & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.7)$$

Ο δείκτης αξιοπιστίας ορίζεται ως εξής,

$$p(aSb) = c(aSb) = \prod_{\{j \in J: d_j(aSb) > c(aSb)\}} \frac{1 - d_j(aSb)}{1 - c(aSb)} \quad (3.8)$$

Όταν $d_j(aSb) = 1$, τότε $p(aSb) = 0$, αφού $c(aSb) < 1$.

Ο ορισμός του $p(aSb)$ βασίζεται έτσι στις ακόλουθες κύριες ιδέες:

- Όταν δεν υπάρχει κανένα αντιφατικό κριτήριο, η αξιοπιστία της σχέσης υπεροχής είναι ίση με τον συνολικό δείκτη συμφωνίας.
- Όταν ένα κριτήριο ασκεί βέτο, ο ισχυρισμός δεν είναι καθόλου αξιόπιστος, οπότε ο δείκτης αξιοπιστίας μηδενίζεται.
- Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις στις οποίες ο συνολικός δείκτης συμφωνίας είναι αυστηρά χαμηλότερος από τον δείκτη ασυμφωνίας, ο δείκτης αξιοπιστίας γίνεται χαμηλότερος από το συνολικό δείκτη συμφωνίας, ως αποτέλεσμα της διαφωνίας στο κριτήριο αυτό.

Ο δείκτης $p(a \ S \ b)$ αντιστοιχεί στον δείκτη $c(a \ S \ b)$, μειωμένο από πιθανές συνέπειες του βέτο.

Η διαδικασία εκμετάλλευσης ξεκινά παίρνοντας από την ασαφή σχέση δύο πλήρεις κατατάξεις όπως στην ELECTRE II. Μια τελική μερική κατάταξη Z στη συνέχεια κατασκευάζεται ως μια σύνθεση των δύο πλήρων κατατάξεων, Z_1 και Z_2 . Η μερική κατάταξη Z_1 ορίζεται ως διαχωρισμός του συνόλου A σε q καταταγμένες κατηγορίες, $\bar{B}_1, \dots, \bar{B}_h, \dots, \bar{B}_q$, όπου η \bar{B}_1 είναι η πρώτη κατηγορία στο Z_1 . Κάθε κλάση \bar{B}_h αποτελείται από ίσα στοιχεία σύμφωνα με το Z_1 . Η πλήρης κατάταξη Z_2 καθορίζεται με παρόμοιο τρόπο, όπου το A διαχωρίζεται σε u καταταγμένες τάξεις, $B_1, \dots, B_h, \dots, B_u$, όπου η B_u είναι η πρώτη τάξη. Κάθε μία από αυτές τις τάξεις λαμβάνεται ως το τελικό απόσταγμα από μια διαδικασία απόσταξης.

Η διαδικασία που αποσκοπεί στον υπολογισμό του Z_1 ξεκινά καθορίζοντας ένα αρχικό σύνολο $D_0 = A$ και οδηγεί στην πρώτη τελική απόσταξη \bar{B}_1 . Μετά την απόκτηση του \bar{B}_h , στην απόσταξη $h + 1$, η διαδικασία ορίζει το σύνολο $D_0 = A \setminus (B_1^- \cup \dots \cup B_h^-)$. Σύμφωνα με το Z_1 , οι ενέργειες στην τάξη \bar{B}_h είναι προτιμότερες από εκείνες της τάξης \bar{B}_{h+1} . Για το λόγο αυτό, οι αποστάξεις που οδηγούν σε αυτές τις τάξεις θα καλούνται φθίνουσες (από πάνω προς τα κάτω).

Η διαδικασία που οδηγεί στο Z_2 είναι αρκετά παρόμοια, αλλά τώρα οι ενέργειες στο \bar{B}_{h+1} προτιμώνται από εκείνες της τάξης \bar{B}_h . Αυτές οι αποστάξεις θα καλούνται αύξουσες (από κάτω προς τα πάνω). Η μερική κατάταξη Z θα υπολογιστεί ως διασταύρωση των Z_1 και Z_2 . Μια πλήρης κατάταξη προτείνεται τελικά, λαμβάνοντας υπόψη την μερική κατάταξη και ορισμένες πρόσθετες εκτιμήσεις.

Η απόσταξη είναι μια διαδικασία που έχει σχεδιαστεί για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Πραγματοποιούνται δύο αποστάξεις.

Και στις δύο αποστάξεις χρησιμοποιούνται βαθμολογίες προσόντων των εναλλακτικών, οι οποίες είναι βαθμοί που προκύπτουν από τις δοκιμές υπεροχής

για όλα τα ζεύγη εναλλακτικών λύσεων. Κάθε φορά που μία εναλλακτική προτιμάται από μία άλλη, ο βαθμός της αυξάνεται κατά μια μονάδα, ενώ αν προτιμηθεί κάποια άλλη εναλλακτική σε βάρος της, τότε ο βαθμός μειώνεται κατά μια μονάδα.

Η φθίνουσα απόσταση ακολουθεί τα ακόλουθα βήματα με επανάληψη:

- Προσδιορισμός των σχετικών εναλλακτικών λύσεων (στην πρώτη επανάληψη, αφορά όλες τις εναλλακτικές λύσεις).
- Προσδιορισμός των εναλλακτικές λύσεων με υψηλά επίπεδα εμπιστοσύνης (εντός ενός συγκεκριμένου εύρους, το οποίο ορίζεται από ένα επίπεδο απόσπασης λ).
- Μέσα σε αυτό το υποσύνολο, υπολογίζεται ο αριθμός των εναλλακτικών λύσεων, έναντι των οποίων κάθε εναλλακτική υπερτερεί, αλλά και αντίθετα, υπολογίζεται ο αριθμός των εναλλακτικών που υπερτερούν κάθε εναλλακτικής. Η εναλλακτική λύση με την υψηλότερη διαφορά βγαίνει από το σύνολο και της αποδίδεται ο βαθμός της επανάληψης.
- Εάν πολλές εναλλακτικές λύσεις έχουν τις ίδιες τιμές, η σύγκριση πραγματοποιείται εκ νέου, αλλά περιορίζεται στις εναλλακτικές λύσεις του υποσυνόλου. Οι εναλλακτικές με την υψηλότερη διαφορά τίθενται εκτός σερ και τους αποδίδεται ο βαθμός της επανάληψης.

Αυτή η διαδικασία τοποθετεί στην κορυφή εναλλακτικές λύσεις που ξεπερνούν πολλές άλλες εναλλακτικές λύσεις με υψηλά επίπεδα εμπιστοσύνης και στο κάτω μέρος εναλλακτικές λύσεις που είτε συχνά υστερούν σε σχέση με άλλες εναλλακτικές είτε είναι μη συγκρίσιμες.

Η αύξουσα απόσταση εκτελεί τον ίδιο τύπο διαδικασίας, αλλά ξεκινά από τα χαμηλότερα επίπεδα εμπιστοσύνης. Βάζει στην κορυφή εναλλακτικές λύσεις που υστερούν έναντι πολλών άλλων εναλλακτικών λύσεων και στο κάτω μέρος εναλλακτικές λύσεις που συχνά ξεπερνούν άλλες ή είναι μη συγκρίσιμες,

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αποστάξεων επιτρέπει τη δημιουργία μιας τελικής κατάταξη. Αυτή η κατάταξη μπορεί να είναι λίγο πιο δύσκολο να ερμηνευτεί από μια κατάταξη με βάση τις βαθμολογίες, αλλά προσαρμόζεται καλύτερα στην πολυπλοκότητα των δεδομένων και λαμβάνει υπόψη την αδυναμία σύγκρισης.

Η τελική κατάταξη γίνεται ακολουθώντας τους εξής κανόνες:

- Η εναλλακτική a προτιμάται της b , το οποίο συμβολίζεται $a > b$, εάν και μόνο αν:
 - Η a υπερτερεί της b στην φθίνουσα και στην αύξουσα κατάταξη, ή
 - Η a είναι αδιάφορη σε σχέση με την b στην φθίνουσα κατάταξη, αλλά καλύτερη της b στην αύξουσα κατάταξη, ή
 - Η a είναι καλύτερη της b στην φθίνουσα κατάταξη, αλλά αδιάφορη σε σχέση με την b στην αύξουσα κατάταξη
- Οι εναλλακτικές a και b είναι αδιάφορες, το οποίο συμβολίζεται $a \equiv b$, εάν και μόνο αν:
 - Οι a και b είναι αδιάφορες μεταξύ τους και στις δύο κατατάξεις
- Οι a και b είναι μη συγκρίσιμες, το οποίο συμβολίζεται με $a \nabla b$, εάν και μόνο αν:
 - Η a υπερτερεί της b στην φθίνουσα κατάταξη, αλλά η b υπερτερεί της a στην αύξουσα κατάταξη, ή
 - Η b υπερτερεί της a στην φθίνουσα κατάταξη, αλλά η a υπερτερεί της b στην αύξουσα κατάταξη
- Η εναλλακτική b προτιμάται της a , το οποίο συμβολίζεται $b > a$, εάν και μόνο αν:
 - Η b υπερτερεί της a στην φθίνουσα και στην αύξουσα κατάταξη, ή
 - Η b είναι αδιάφορη σε σχέση με την a στην φθίνουσα κατάταξη, αλλά καλύτερη της a στην αύξουσα κατάταξη
 - Η b είναι καλύτερη της a στην φθίνουσα κατάταξη, αλλά αδιάφορη σε σχέση με την a στην αύξουσα κατάταξη

3.6 Οικογένεια μεθόδων PROMETHEE

Η PROMETHEE I και η PROMETHEE II αναπτύχθηκαν από τον καθηγητή Jean-Pierre Brans και παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 1982 σε ένα συνέδριο που διοργανώθηκε από τους R. Nadeau και M Landry στο Université Laval, στο Κεμπέκ του Καναδά. Την ίδια χρονιά υπήρξαν αρκετές εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτή τη μεθοδολογία. Λίγα χρόνια αργότερα οι J.P. Brans και B. Mareschal ανέπτυξαν την PROMETHEE III και την PROMETHEE VI. Έπειτα το 1992 και το 1994, πρότειναν δύο

περαιτέρω επεκτάσεις, την PROMETHEE V και την PROMETHEE VI. Η μεθοδολογία PROMETHEE έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορους τομείς, χάρις στις μαθηματικές της ιδιότητες και στην ευκολία στην χρήση της.

Οι μέθοδοι PROMETHEE σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση πολυκριτήριων προβλημάτων της μορφής;

$$\max \{g_1(\alpha), g_2(\alpha), \dots, g_j(\alpha), \dots, g_k(\alpha) / \alpha \in A\} \quad (3.9)$$

όπου το A είναι ένα πεπερασμένο σεν πιθανών εναλλακτικών $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n\}$ και το $\{g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_j(\cdot), \dots, g_k(\cdot)\}$ είναι ένα σεν κριτηρίων αξιολόγησης. Τα βασικά δεδομένα τέτοιου είδους προβλημάτων αποτελούνται από έναν πίνακα αξιολόγησης, όπως τον πίνακα 3.1, στον οποίο η πρώτη στήλη αφορά τις εναλλακτικές, ενώ οι υπόλοιπες τα κριτήρια και τις βαθμολογίες των επιλογών στα κριτήρια

α	$g_1(\bullet)$	$g_2(\bullet)$	...	$g_j(\bullet)$	...	$g_k(\bullet)$
α_1	$g_1(\alpha_1)$	$g_2(\alpha_1)$	...	$g_j(\alpha_1)$	...	$g_k(\alpha_1)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
α_i	$g_1(\alpha_i)$	$g_2(\alpha_i)$	\vdots	$g_j(\alpha_i)$	...	$g_k(\alpha_i)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
α_n	$g_1(\alpha_n)$	$g_2(\alpha_n)$	...	$g_j(\alpha_n)$	...	$g_k(\alpha_n)$

Πίνακας 3.1 Πίνακας αξιολόγησης πιθανών εναλλακτικών

Οι πρόσθετες πληροφορίες που απαιτούνται για τη λειτουργία του PROMETHEE είναι ιδιαίτερα σαφείς και κατανοητές τόσο από τους αναλυτές όσο και από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Αποτελούνται από:

- Πληροφορίες μεταξύ των κριτηρίων
- Πληροφορίες εντός κάθε κριτηρίου.

Πληροφορίες μεταξύ των κριτηρίων

Ο πίνακας 3.2 είναι ένας πίνακας που συμπληρώνεται, με την κατανόηση ότι το σύνολο $\{w_j, j = 1, 2, \dots, k\}$ αντιπροσωπεύει τα βάρη της σχετικής σημασίας των διαφορετικών κριτηρίων. Αυτά τα βάρη είναι μη αρνητικοί αριθμοί, ανεξάρτητοι από τη μονάδα μέτρησης των κριτηρίων. Όσο μεγαλύτερο το βάρος τόσο πιο σημαντικό είναι το κριτήριο. Τα βάρη είναι κανονικοποιημένα έτσι ώστε:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad (3.10)$$

$g_1(\bullet)$	$g_2(\bullet)$	...	$g_i(\bullet)$	...	$g_k(\bullet)$
w_1	w_2	...	w_j	...	w_k

Πίνακας 3.2 Πίνακας βαρών για κάθε κριτήριο

Η αξιολόγηση των βαρών των κριτηρίων δεν είναι απλή. Περιλαμβάνει τις προτεραιότητες και τις αντιλήψεις του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων.

Πληροφορίες εντός κάθε κριτηρίου

Η δομή προτιμήσεων της PROMETHEE βασίζεται σε συγκρίσεις κατά ζεύγη. Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η διαφορά μεταξύ των αξιολογήσεων δύο εναλλακτικών επιλογών με βάση ένα συγκεκριμένο κριτήριο. Για μικρές διαφορές, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων θα αποδώσει μια μικρή προτίμηση στην καλύτερη εναλλακτική και, ενδεχομένως, και καμία προτίμηση, εάν θεωρεί ότι η διαφορά είναι αμελητέα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά, τόσο μεγαλύτερη είναι η προτίμηση. Οι προτιμήσεις, αυτές, είναι πραγματικοί αριθμοί που κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε κριτήριο ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων έχει υπόψη μια συνάρτηση:

$$P_j(\alpha, b) = F_j [d_j(\alpha, b)] \quad \forall \alpha, b \in A, \quad (3.11)$$

όπου:

$$d_j(\alpha, b) = g_j(\alpha) - g_j(b) \quad (3.12)$$

και για την οποία:

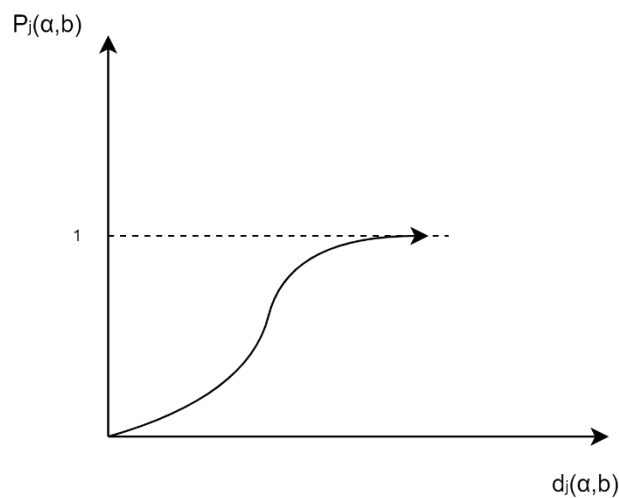
$$0 \leq P_j(\alpha, b) \leq 1$$

Σε περίπτωση που ένα κριτήριο πρέπει να μεγιστοποιηθεί, η συνάρτηση 3.11 δίνει την προτίμηση του α σε σχέση με το b στο κριτήριο $g_j(\cdot)$. Όταν η διαφορά (3.12) είναι αρνητική τότε ο βαθμός προτίμησης είναι ίσος με μηδέν. Για κριτήρια σε μορφή ελαχιστοποίησης, η συνάρτηση προτίμησης θα πρέπει να αντιστραφεί ή εναλλακτικά να δοθεί από τη σχέση:

$$P_j(\alpha, b) = F_j [-d_j(\alpha, b)] \quad (3.13)$$

Η γραφική παράσταση της συνάρτησης προτίμησης απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. Για την συνάρτηση προτίμησης ισχύει η παρακάτω ιδιότητα:

$$P_j(\alpha, b) > 0 \Rightarrow P_j(b, \alpha) = 0 \quad (3.14)$$

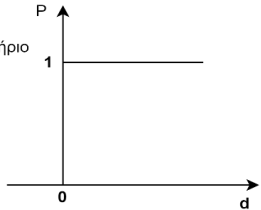
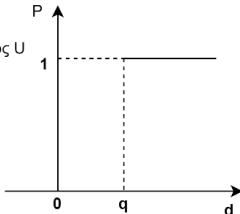
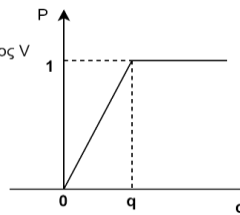
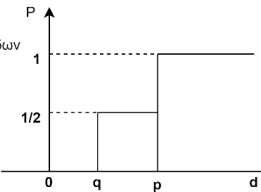
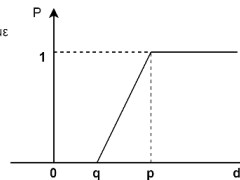


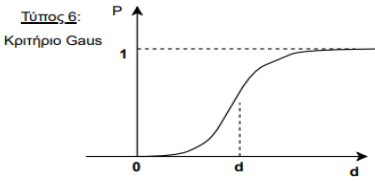
Σχήμα 3.2. Γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης προτίμησης

Το ζευγάρι $\{g_j(\cdot), P_j(\alpha, b)\}$ ονομάζεται γενικευμένο κριτήριο το οποίο σχετίζεται με το κριτήριο $g_j(\cdot)$. Ένα τέτοιο γενικευμένο κριτήριο πρέπει οριστεί για κάθε κριτήριο. Για να διευκολυνθεί ο ορισμός του κριτηρίου αυτού, έχουν προταθεί έξι διαφορετικοί τύποι συναρτήσεων προτίμησης, οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 3.3.

Η παράμετρος q ονομάζεται κατώφλι αδιαφορίας και αποτελεί την μεγαλύτερη απόκλιση, που θα θεωρηθεί αμελητέα από τον αποφασίζοντα, ενώ η παράμετρος p ονομάζεται κατώφλι γνήσιας προτίμησης και είναι η μικρότερη δυνατή απόκλιση, που θα θεωρηθεί επαρκής, ώστε να υπάρχει ισχυρή προτίμηση. Στον τελευταίο τύπο έχουμε και μία παράμετρο s , η οποία είναι μία ενδιάμεση τιμή

μεταξύ των q και p . Ο προσδιορισμός ενός γενικευμένου κριτηρίου περιορίζεται, στη συνέχεια, στην επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου.

Γενικευμένο Κριτήριο	Ορισμός	Παράμετροι
<p>Τύπος 1: Σύνθετος Κριτήριο</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$	—
<p>Τύπος 2: Κριτήριο Σχήματος U</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases}$	q (κατώφλι αδιαφορίας)
<p>Τύπος 3: Κριτήριο Σχήματος V</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 \leq d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p (κατώφλι γνήσιας προτίμησης)
<p>Τύπος 4: Κριτήριο Επιπέδων</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{1}{2}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p, q
<p>Τύπος 5: Κριτήριο σχήματος V με κατώφλι αδιαφορίας</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p, q

<p>Τύπος 6: Κριτήριο Gauss</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}}, & d > 0 \end{cases}$	<p>s (ενδιάμεσο των p και q κατώφλι)</p>
--	--	--

Πίνακας 3.3 Τύποι γενικευμένων κριτηρίων (Ματσατσίνης, 2010).

3.6.1 Δείκτης προτίμησης και γραφήματα υπεροχής

Ας ορίσουμε τώρα τον δείκτη προτίμησης π ως τον σταθμευμένο μέσο των συναρτήσεων προτίμησης P_j .

Έστω ότι $\alpha, b \in A$ και:

$$\begin{cases} \pi(\alpha, b) = \sum_{j=1}^k P_j(\alpha, b)w_j \\ \pi(b, \alpha) = \sum_{j=1}^k P_j(b, \alpha)w_j \end{cases} \quad (3.15)$$

Το $\pi(\alpha, b)$ εκφράζει σε ποιον βαθμό το α προτιμάται από το b , βάση όλων των κριτηρίων, ενώ το $\pi(b, \alpha)$ εκφράζει το αντίθετο. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν κριτήρια για το οποία το α υπερέχει του b , αλλά και κριτήρια στο οποία το b υπερέχει του α . Επομένως και το $\pi(\alpha, b)$, αλλά και το $\pi(b, \alpha)$ είναι θετικά.

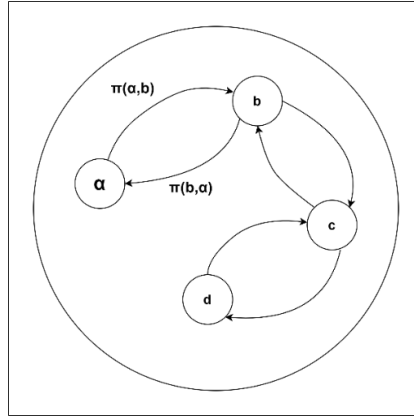
Ισχύουν για κάθε (α, b) οι παρακάτω ιδιότητες;

$$\begin{cases} \pi(\alpha, b) = 0, \\ 0 \leq \pi(\alpha, b) \leq 1, \\ 0 \leq \pi(b, \alpha) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(\alpha, b) + \pi(b, \alpha) \leq 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Είναι προφανές ότι όταν:

- $\pi(\alpha, b) \approx 0$ υπάρχει ασθενής προτίμηση του α σχέση με το b
- $\pi(\alpha, b) \approx 1$ υπάρχει ισχυρή προτίμηση του α σχέση με το b

Αφού καθοριστούν τα $\pi(\alpha, b)$ και $\pi(b, \alpha)$ για κάθε ζευγάρι εναλλακτικών του A μπορούμε να σχεδιάσουμε το γράφημα υπεροχής, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Γράφημα υπεροχής (Ματσατσίνης, ,2010).

Κάθε εναλλακτική α πρέπει να συγκριθεί με $n-1$ εναλλακτικές εντός του A , Έχουμε τις εξής ροές υπεροχής:

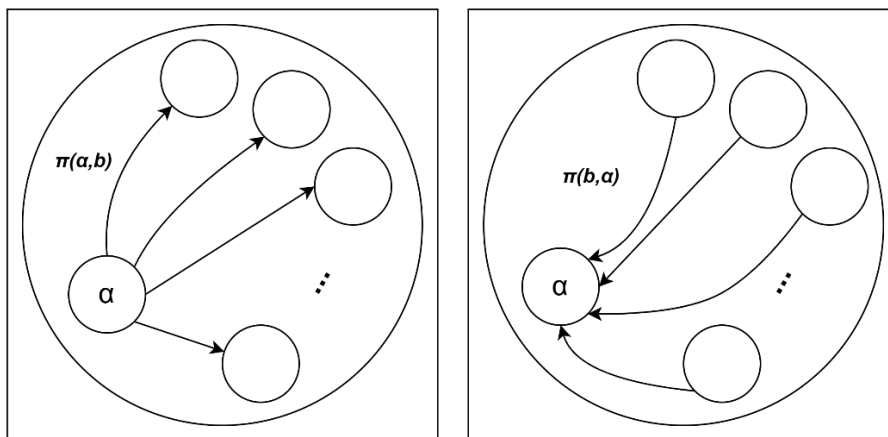
Θετική ροή υπεροχής ή ροή εισόδου

$$\phi^+(\alpha) \approx \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(\alpha, x), \quad (3.17)$$

Αρνητική ροή υπεροχής ή ροή εξόδου

$$\phi^-(\alpha) \approx \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, \alpha), \quad (3.18)$$

Η γραφική αναπαράσταση των ρών υπεροχής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Αριστερά αναπαρίσταται η θετική ροή υπεροχής, ενώ δεξιά η αρνητική ροή υπεροχής (Ματσατσίνης, 2010)

Η θετική ροή υπεροχής εκφράζει πως η εναλλακτική α υπερέχει των άλλων εναλλακτικών, για όλα τα κριτήρια, ενώ η αρνητική ροή υπεροχής αναπαριστά την υπεροχή όλων των υπόλοιπων εναλλακτικών επιλογών ως προς την α . Αυτό συνεπάγεται ότι όσο μεγαλύτερη η $\Phi^+(\alpha)$, τόσο καλύτερη η εναλλακτική α , ενώ όσο μικρότερη είναι η $\Phi^-(\alpha)$ τόσο καλύτερη είναι η α .

3.6.2 PROMETHEE I

Η μερική κατάταξη PROMETHEE I (P', I', R') προκύπτει από τις ροές εισόδου και εξόδου, όπου τα P', I', R' , αναφέρονται στην προτίμηση, στην αδιαφορία και αδυναμία σύγκρισης αντίστοιχα.

$$\left\{ \begin{array}{ll} aP'b & \text{εάν} \left\{ \begin{array}{l} \varphi^+(\alpha) > \varphi^+(b) \text{ και } \varphi^-(\alpha) < \varphi^-(\beta) \text{ ή} \\ \varphi^+(\alpha) = \varphi^+(b) \text{ και } \varphi^-(\alpha) < \varphi^-(\beta) \text{ ή} \\ \varphi^+(\alpha) > \varphi^+(b) \text{ και } \varphi^-(\alpha) = \varphi^-(\beta) \end{array} \right. \\ aI'b & \text{εάν} \quad \varphi^+(\alpha) = \varphi^+(b) \text{ και } \varphi^-(\alpha) = \varphi^-(\beta) \\ aR'b & \text{εάν} \left\{ \begin{array}{l} \varphi^+(\alpha) > \varphi^+(b) \text{ και } \varphi^-(\alpha) > \varphi^-(\beta) \text{ ή} \\ \varphi^+(\alpha) < \varphi^+(b) \text{ και } \varphi^-(\alpha) < \varphi^-(\beta) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3.19)$$

- Όταν $\alpha P'b$, ένα καλό χαρακτηριστικό του α συνδέεται με ένα πιο αδύναμο χαρακτηριστικό του α σε σχέση με το αντίστοιχο του b . Οι πληροφορίες και των δύο ροών υπεροχής είναι συνεπείς, οπότε ο αποφασίζοντας μπορεί να είναι σίγουρος.
- Όταν $\alpha P'b$ οι θετικές και οι αρνητικές ροές είναι ίσες.
- Όταν $\alpha R'b$ ένα καλό χαρακτηριστικό μιας εναλλακτικής λύσης σχετίζεται με μια αδυναμία της άλλης εναλλακτικής. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν η εναλλακτική α είναι καλή σε ένα σύνολο κριτηρίων βάσει των οποίων η εναλλακτική b είναι αδύναμη και αντίστροφα η b είναι καλή σε κάποια άλλα κριτήρια στα οποία είναι η α μειονεκτεί. Σε μια τέτοια περίπτωση, οι πληροφορίες που παρέχονται και από τις δύο ροές δεν είναι συνεπείς. Ο αποφασίζοντας θα πρέπει να είναι προσεκτικός και να θεωρήσει τις δύο εναλλακτικές ως ασύγκριτες. Η κατάταξη PROMETHEE I δεν θα αποφασίσει ποια ενέργεια είναι η καλύτερη σε τέτοιες περιπτώσεις. Εναπόκειται στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων να αναλάβει τις ευθύνες του.

3.6.3 PROMETHEE II

Η PROMETHEE II αποτελείται από την πλήρη κατάταξη (P'', I'') . Συχνά ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων ζητά μια πλήρη κατάταξη. Στη συνέχεια, μπορεί να ληφθεί υπόψη η καθαρή ροή υπεροχής:

$$\varphi(\alpha) = \varphi^+(\alpha) - \varphi^-(\alpha) \quad (3.20)$$

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική, έτσι ώστε:

$$\begin{cases} aP''b & \text{εάν } \varphi(\alpha) > \varphi(b) \\ aI''b & \text{εάν } \varphi(\alpha) = \varphi(b) \end{cases} \quad (3.21)$$

Στην PROMETHEE II όλες οι εναλλακτικές είναι συγκρίσιμες. Δεν υπάρχει αδυναμία σύγκρισης, αλλά οι παρθείσεις πληροφορίες είναι πιο αμφισβητήσιμες, επειδή περισσότερες πληροφορίες χάνονται, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά της σχέσης 3.20.

Ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

$$\begin{cases} -1 \leq \varphi(\alpha) \leq 1, \\ \sum_{\alpha \in A} \varphi(\alpha) = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Όταν $\varphi(\alpha) > 0$, η εναλλακτική α υπερτερεί περισσότερο, όλων των εναλλακτικών, σε όλα τα κριτήρια, ενώ όταν $\varphi(\alpha) < 0$ ισχύει το αντίστροφο.

Σε πραγματικές εφαρμογές είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται η PROMETHEE I και η PROMETHEE II. Η πλήρης κατάταξη είναι εύκολη στη χρήση, αλλά η ανάλυση των ασύγκριτων συχνά βοηθά στην οριστικοποίηση μιας σωστής απόφασης. Καθώς η καθαρή ροή $\varphi(\cdot)$ παρέχει μια πλήρη κατάταξη, μπορεί να συγκριθεί με μια συνάρτηση χρησιμότητας. Ένα πλεονέκτημα της $\varphi(\cdot)$ είναι ότι βασίζεται σε σαφείς και απλές πληροφορίες προτίμησης, όπως βάρη και συναρτήσεις προτιμήσεων, και το γεγονός ότι βασίζεται σε σχετικές δηλώσεις και όχι σε απόλυτες.

Τα προφίλ των εναλλακτικών

Σύμφωνα με τον ορισμό των ροών εισόδων και εξόδων, αλλά και του συντελεστή προτίμησης, έχουμε:

$$\varphi(\alpha) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] w_j \quad (3.23)$$

Συνεπώς

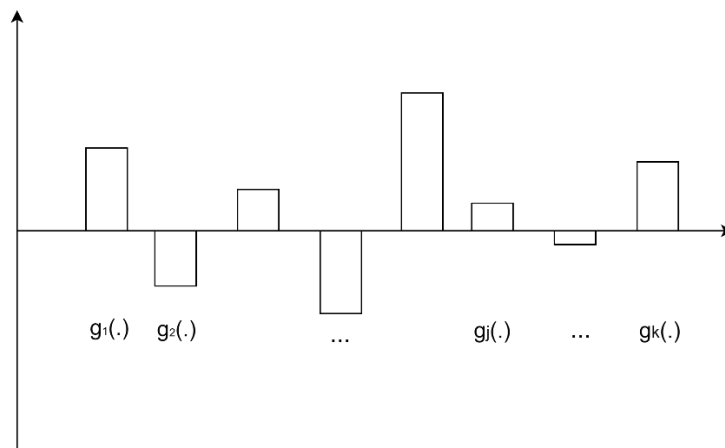
$$\varphi(\alpha) = \sum_{j=1}^k \varphi_j(a) w_j \quad (3.24)$$

Εάν

$$\varphi_j(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] \quad (3.25)$$

Η $\varphi_j(\alpha)$ είναι η καθαρή ροή που υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το κριτήριο $g_j(\cdot)$. Εκφράζει πως μια εναλλακτική α υπερτερεί ($\varphi_j(\alpha) > 0$), ή υπολείπεται ($\varphi_j(\alpha) < 0$) σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές στο κριτήριο $g_j(\cdot)$.

Τα προφίλ των εναλλακτικών αποτελούνται από το σύνολο όλων των $\varphi_j(\alpha)$.



Σχήμα 3.5 Το προφίλ μιας εναλλακτικής (Brans, Mareschal, 2005)

Τα προφίλ των εναλλακτικών λύσεων είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την ανάλυση των επιδόσεών τους με βάση τα διαφορετικά κριτήρια. Χρησιμοποιείται

ευρέως από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων για να οριστικοποιήσουν την εκτίμησή του

3.6.4 PROMETHEE III, IV, V, VI και GDSS

Στην PROMETHEE III έχουμε διάταξη διαστημάτων, ενώ η PROMETHEE αναπτύχθηκε σαν επέκταση της PROMETHEE II, ώστε να μπορέσουν να καλυφθούν οι περιπτώσεις στις οποίες είναι μη πεπερασμένο το σύνολο των εναλλακτικών επιλογών. Αντίστοιχα η PROMETHEE V αναπτύχθηκε για να καλύψει την αδυναμία των PROMETHEE I και II να καλύψουν περιπτώσεις, στις οποίες θα πρέπει, δεδομένου ενός συνόλου περιορισμών, να επιλεγεί ένα υποσύνολο του συνόλου των εναλλακτικών και όχι μια μεμονωμένη εναλλακτική. Η PROMETHEE VI παρέχει στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων πρόσθετες πληροφορίες για τη δική του προσωπική άποψη για το πολυκριτήριο πρόβλημα. Τέλος, η PROMETHEE GDAA αναπτύχθηκε για τις περιπτώσεις που η απόφαση λαμβάνεται από μία ομάδα αποφασιζόντων.

3.7 Προσομοίωση Monte Carlo

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι ένας τύπος προσομοίωσης που βασίζεται σε επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία και στατιστική ανάλυση για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Είναι πολύ στενά συνδεδεμένη με τυχαία πειράματα, δηλαδή πειράματα για τα οποία το αποτέλεσμα δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων. Στο πλαίσιο αυτό η Monte Carlo μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μεθοδικός τρόπος ώστε να κάνουμε τη ανάλυση σεναρίων μεγάλης κλίμακας.

Χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα σε φυσικές επιστήμες, κοινωνικές επιστήμες και κλάδους μηχανικής για να περιγραφούν οι αλληλεπιδράσεις σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μαθηματικές εκφράσεις. Αυτά τα μοντέλα, τυπικά, εξαρτώνται από ορισμένες παραμέτρους εισαγωγής, οι οποίες όταν υποβάλλονται σε επεξεργασία από τους μαθηματικούς τύπους στο μοντέλο, καταλήγουν σε μία ή περισσότερες εξόδους (ή αποτελέσματα). Οι παράμετροι εισόδου για τα μοντέλα εξαρτώνται από διάφορους εξωτερικούς παράγοντες. Ένα ντετερμινιστικό μοντέλο, που δεν εξετάζει παραλλαγές, συχνά αναφέρεται ως *βασική περίπτωση*, δεδομένου ότι οι παράμετροι εισόδου παίρνουν τις πιο πιθανές τους τιμές. Ένα αποτελεσματικό μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους κινδύνους που σχετίζονται με διάφορες παραμέτρους εισόδου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι

αναλυτές αναπτύσσουν διάφορες εκδοχές ενός μοντέλου, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν τη βασική περίπτωση, το καλύτερο δυνατό σενάριο, και το χειρότερο δυνατό σενάριο για τις τιμές των μεταβλητών εισόδου. Αυτή η προσέγγιση έχει διάφορα μειονεκτήματα. Πρώτον, μπορεί είναι δύσκολο να καθοριστούν τα καλύτερα και τα χειρότερα σενάρια κάθε μεταβλητής εισόδου. Δεύτερον, όλες οι μεταβλητές εισόδου μπορεί να μην είναι να είναι ταυτόχρονα στο καλύτερο ή στο χειρότερο επίπεδό τους. Η λήψη απόφασης τείνει να είναι επίσης δύσκολη, καθώς τώρα εξετάζουμε περισσότερα από ένα σενάρια. Η προσομοίωση Monte Carlo μπορεί να βοηθήσει έναν αναλυτή να διερευνήσει μεθοδικά το πλήρες φάσμα της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει κάθε μεταβλητή εισόδου.

Στην προσομοίωση Monte Carlo, προσδιορίζουμε μια στατιστική κατανομή που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως πηγή για καθεμία από τις παραμέτρους εισόδου. Στη συνέχεια, αντλούμε τυχαία δείγματα για κάθε κατανομή, τα οποία στη συνέχεια αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές εισόδου. Για κάθε σύνολο παραμέτρων εισόδου, παίρνουμε ένα σύνολο των παραμέτρων εξόδου. Η τιμή κάθε παραμέτρου εξόδου είναι ένα συγκεκριμένο σενάριο αποτελέσματος στην εκτέλεση της προσομοίωσης. Συλλέγονται αρκετές τιμές εξόδου από μια σειρά προσομοιώσεων. Τέλος, πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των τιμών των παραμέτρων εξόδου, για να αποφασιστεί η καταλληλότερη σειρά ενεργειών.

3.7.1 Ορολογίες

Παρακάτω αναλύονται ορισμένες από τις ορολογίες που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της προσομοίωσης του Μόντε Κάρλο.

Στατιστικές κατανομές

Οι στατιστικές κατανομές ή κατανομές πιθανοτήτων περιγράφουν τα αποτελέσματα των μεταβολών μιας τυχαίας μεταβλητής και την πιθανότητα εμφάνισης αυτών των αποτελεσμάτων. Όταν η τυχαία μεταβλητή παίρνει μόνο διακριτές τιμές, οι αντίστοιχες κατανομές πιθανοτήτων ονομάζονται διακριτές κατανομές πιθανοτήτων. Παραδείγματα αυτού του είδους είναι η διωνυμική κατανομή, η κατανομή Poisson και η υπεργεωμετρική κατανομή. Αντιθέτως, όταν η τυχαία μεταβλητή παίρνει συνεχείς τιμές, οι αντίστοιχες κατανομές πιθανοτήτων ονομάζονται συνεχείς κατανομές πιθανοτήτων. Παραδείγματα αυτού του είδους είναι η κανονική κατανομή, η εκθετική κατανομές και η κατανομή γάμμα.

Τυχαία δειγματοληψία

Στη στατιστική, ένα πεπερασμένο υποσύνολο από έναν πληθυσμό ονομάζεται δείγμα. Τυχαία δειγματοληψία ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία λαμβάνονται τυχαία δείγματα από τον πληθυσμό, που σημαίνει ότι κάθε μονάδα πληθυσμού έχει ίση πιθανότητα να συμπεριληφθεί στο δείγμα.

Γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG)

Μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι μια υπολογιστική ή φυσική συσκευή που έχει σχεδιαστεί για να δημιουργεί μια ακολουθία αριθμών, αντλώντας από έναν πληθυσμό, που φαίνεται να είναι ανεξάρτητοι, και που περνούν μια σειρά από στατιστικές δοκιμές (Law and Kelton 2000). Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα χρησιμοποιήσουμε μια RNG που παράγει τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1.

3.7.2 Μεθοδολογία

Τα ακόλουθα βήματα εκτελούνται για την προσομοίωση Monte Carlo:

Δημιουργία Στατιστικού μοντέλου

Κάθε προσομοίωση Monte Carlo ξεκινά με την ανάπτυξη ενός ντετερμινιστικού μοντέλου το οποίο μοιάζει πολύ με το πραγματικό σενάριο. Σε αυτό το ντετερμινιστικό μοντέλο, χρησιμοποιούμε τις πιο πιθανές τιμές των παραμέτρων εισόδου. Εφαρμόζονται μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούν τις τιμές των μεταβλητών εισόδου και τις μετασχηματίζουν στην επιθυμητή έξοδο.

Αναγνώριση Κατανομής Εισόδου

Όταν είμαστε ικανοποιημένοι με το ντετερμινιστικό μοντέλο, προσθέτουμε τις συνιστώσες αβεβαιότητας στο μοντέλο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δεδομένου ότι οι κίνδυνοι προέρχονται από τη στοχαστική φύση των μεταβλητών εισόδου, προσπαθούμε να προσδιορίσουμε τις υποκείμενες κατανομές, εάν υπάρχουν, οι οποίες διέπουν τις μεταβλητές εισόδου. Αυτό το βήμα χρειάζεται ιστορικά δεδομένα για τις μεταβλητές εισόδου.

Δημιουργία τυχαίας μεταβλητής

Αφού έχουν προσδιοριστεί οι κατανομές για τις μεταβλητές εισόδου, δημιουργούμε ένα σύνολο τυχαίων αριθμών από αυτές τις κατανομές. Ένα σύνολο τυχαίων αριθμών, που αποτελείται από μία τιμή για την κάθε μεταβλητή εισόδου, θα χρησιμοποιηθεί στο ντετερμινιστικό μοντέλο, για να παρέχει ένα σύνολο τιμών εξόδου. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία δημιουργώντας περισσότερα σύνολα τυχαίων αριθμών και συλλέγονται διαφορετικά σύνολα πιθανών τιμών εξόδου.

Ανάλυση και λήψη απόφασης

Αφού συλλέξουμε ένα δείγμα τιμών εξόδου από την προσομοίωση, εκτελούμε στατιστική ανάλυση αυτών των τιμών. Αυτό το βήμα μας παρέχει βαθμό αυτοπεποίθησης για τις αποφάσεις που θα μπορούσαν να παρθούν μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ανάλυση της πρακτικής εφαρμογής της προσομοίωσης Monte Carlo και των μεθόδων ELECTRE III και PROMETHEE. Η ανάλυση θα εφαρμοστεί σε ένα έργο 36 εργασιών, το οποίο κατασκευάστηκε από τους Wayne Haga και Kathryn Marold το 2004, για το άρθρο τους στο Project Management Journal με τίτλο "A simulation approach to the PERT/CPM time-cost trade-off problem". Έπειτα χρησιμοποιήθηκε από τους Kuhl και Tolentino-Pena (2008), ενώ Floyd, Barker, Rocco, & Whitman (2017) εφάρμοσαν σε αυτό το έργο την ανάλυση τους, πάνω στην οποία έχει στηριχτεί και η συγκεκριμένη εργασία. Υποθέτουμε ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης κάθε εργασίας ακολουθεί την τριγωνική κατανομή, αν και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη κατανομή. Εξετάζοντας μία εργασία κάθε φορά, επεκτείνεται η διάρκειά της αυξάνοντας τις παραμέτρους της κατανομής του χρόνου ολοκλήρωσής της κατά μία, τρεις και δέκα χρονικές περιόδους. Για κάθε καθυστέρηση, προσομοιώνονται 1.000 δείγματα και παρουσιάζεται γραφικά η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF: Cumulative Distribution Function) του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης του έργου για κάθε καθυστέρηση εργασίας, η οποία αντιπροσωπεύεται στη συνέχεια από τα ποσοστά της, από 0 έως 100%, σε προσαυξήσεις 10%. Εν συνεχεία, αυτά τα ποσοστημόρια χρησιμοποιούνται ως κριτήρια για τις μεθόδους ELECTRE III και PROMETHEE. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB.

4.1 Δεδομένα του έργου

Βάσει του παρακάτω πίνακα μπορούμε να κατασκευάσουμε το δικτυωτό μοντέλο του έργου. Από τη ανάλυση των Kuhl και Tolentino-Pena (2008) με την μέθοδο CPM, έχουμε ότι το παρακάτω έργο έχει μόνο μία κρίσιμη διαδρομή

1 -> 4 -> 24 -> 25 -> 26 -> 27 -> 29 -> 31 -> 34 -> 35 -> 36

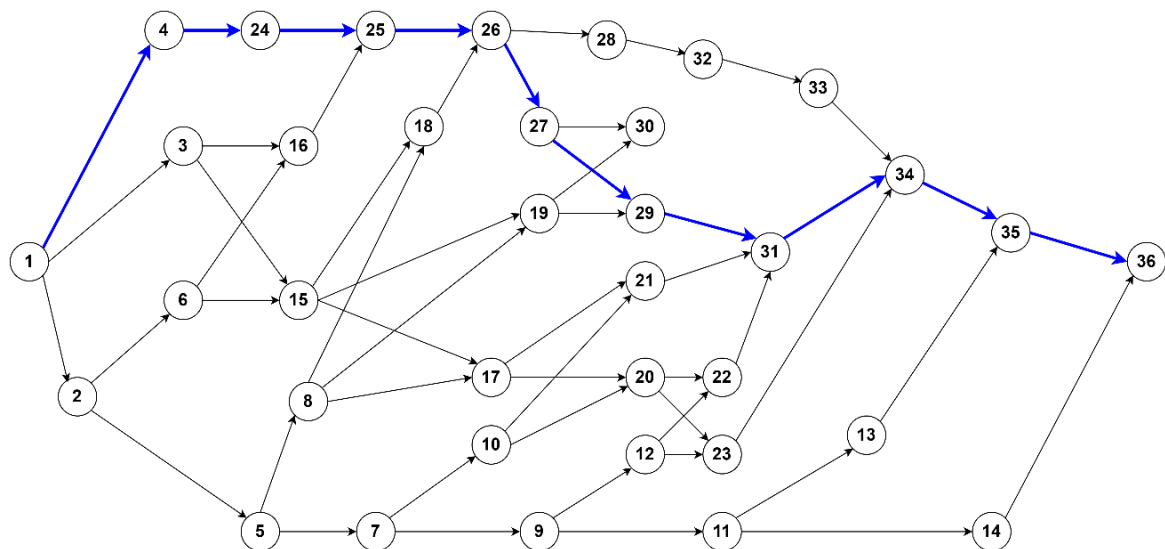
Εάν χρησιμοποιήσουμε ένα ντετερμινιστικό μοντέλο, που εξετάζει την *βασική περίπτωση*, δεδομένου ότι οι παράμετροι εισόδου παίρνουν τις πιο πιθανές τιμές, και εφαρμόσουμε την μέθοδο CPM, τότε η συνολική διάρκεια του έργου είναι ίση με 286 χρονικές περιόδους.

Εργασία	Προηγούμενες	Ελάχιστη Διάρκεια	Μέση Διάρκεια	Μέγιστη διάρκεια
1	-	20	30	40
2	1	1	2	3
3	1	2	5	9
4	1	22	24	26
5	2	1	4	8
6	2	1	5	8
7	5	2	3	5
8	5	4	6	9
9	7	1	3	6
10	7	1	2	3
11	9	3	6	10
12	9	3	6	10
13	11	1	5	7
14	11	1	4	6
15	3, 6	4	6	8
16	3, 6	8	10	12
17	8, 15	2	3	5
18	8, 15	1	4	8
19	8, 15	4	6	8
20	10, 17	3	6	8
21	10, 17	1	4	7
22	12, 20	3	5	7
23	12, 20	2	5	9
24	4	24	28	32
25	16, 24	22	28	40
26	18, 25	20	30	40
27	26	18	22	26
28	26	3	5	6
29	19, 27	28	35	42
30	19, 27	5	6	8
31	21, 22, 29	20	30	40
32	28, 30	1	4	6
33	32	5	6	7
34	23, 31, 33	25	30	35
35	13, 34	16	22	28
36	14, 35	5	7	9

Πίνακας 4.1. Πίνακας όπου παρουσιάζονται οι χρονικές παράμετροι κάθε εργασίας καθώς και οι προαπαιτούμενες της ώστε να μπορεί να ξεκινήσει. (Floyd, Barker, Rocco, & Whitman, 2017)

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το δικτυωτό μοντέλο του έργου, το οποίο έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον πίνακα 4.1 και στο οποίο έχει

επισημανθεί και η κρίσιμη διαδρομή. Ο κώδικας MATLAB, που έχει χρησιμοποιηθεί για να γίνει η ανάλυση και να προκύψει η τελική ταξινόμηση των εργασιών, ανάλογα με την επίδραση τους στην κατανομή του χρόνου ολοκλήρωσής του έργου, όταν καθυστερούν οι κατανομές του χρόνου ολοκλήρωσης της εργασίας, παρουσιάζεται και επεξηγείται στο παράρτημα .



Σχήμα 4.1 Δικτυωτό μοντέλο του έργου

4.2 Προτεινόμενη ανάλυση

Η συγκεκριμένη εργασία είναι βασισμένη στην ανάλυση που έχει γίνει από Floyd, Barker, Rocco, & Whitman, (2017). Στο εν λόγω άρθρο χρησιμοποιείται η CPM και η μέθοδος TOPSIS. Η ανάλυση αποτελείται από 4 βήματα και μοιάζει αρκετά με την ανάλυση που θα γίνει στην παρούσα εργασία. Στο πρώτο βήμα της προσέγγισης, μια εργασία i επιλέγεται από το δίκτυο και αλλάζει ο χρόνος ολοκλήρωσής της. Για χρόνους ολοκλήρωσης εργασιών που ακολουθούν τριγωνική κατανομή, οι ελάχιστες, οι μέσες και οι μέγιστες παράμετροι της κατανομής αυξάνονται κατά γ χρονικές περιόδους. Στο δεύτερο βήμα, προσομοιώνεται ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης του έργου. Πρώτον, δημιουργείται ένα σύνολο τυχαίων αποκλίσεων σύμφωνα με την κατανομή πιθανότητας των χρόνων ολοκλήρωσης κάθε εργασίας. Δεύτερον, χρησιμοποιούμε την κλασική προσέγγιση CPM για να προσδιορίσουμε την κρίσιμη διαδρομή καθώς και τη συνολική διάρκεια του έργου. Τα δύο αυτά βήματα επαναλαμβάνονται n φορές. Στο τέλος υπάρχουν n

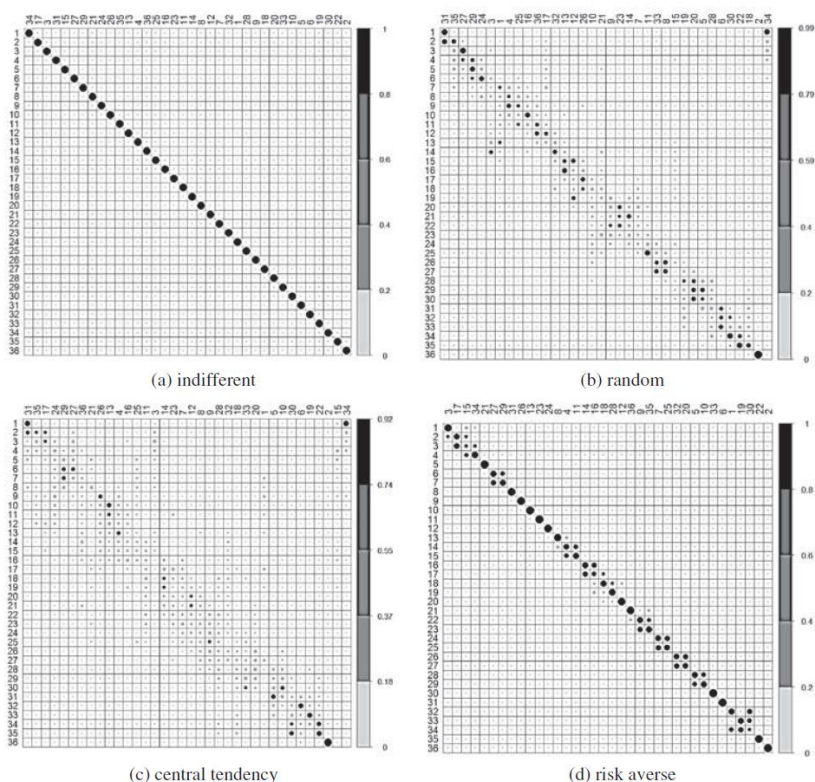
συνολικοί χρόνοι ολοκλήρωσης που προκύπτουν από καθυστέρηση της εργασίας i . Στην εργασία, αυτή, γίνονται χίλιες προσομοιώσεις για κάθε εργασία, ενώ οι συνολικές εργασίες είναι τριάντα έξι. Στο τρίτο βήμα, δημιουργείται η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (CDF) για το χρόνο ολοκλήρωσης του έργου που σχετίζεται με καθυστέρηση στην εργασία i . Από την CDF, επιλέγεται ένα σύνολο 10 ποσοστημορίων. Οι παράμετροι της κατανομής του χρόνου ολοκλήρωσης για την εργασία i επαναφέρονται στις αρχικές τους τιμές και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να έχουν καθυστερήσει όλες οι N εργασίες και έως ότου να έχουν συλλεχθεί N κατανομές του χρόνου ολοκλήρωσης.

Η διαφορά με την ανάλυση που έχει γίνει στο άρθρο από τους Floyd, Barker, Rocco, & Whitman, (2017) και την παρούσα εργασία, είναι ότι στην δική μας περίπτωση, στο τέταρτο βήμα, θα χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι ELECTRE III και PROMETHEE για την ταξινόμηση των εργασιών. Για την εφαρμογή των μεθόδων ELECTRE III και PROMETHEE θα χρησιμοποιείται ένας πίνακας, ο οποίος περιέχει για διαδοχικές καθυστερήσεις σε κάθε εργασία τους συνολικούς χρόνους ολοκλήρωσης του έργου. Από τον πίνακα αυτόν κατασκευάζεται ο πίνακας δεδομένων των μεθόδων ELECTRE III και PROMETHEE, ο οποίος έχει μία γραμμή για κάθε εργασία και μία στήλη για 0%, 10%, 20%, ..., 100% ποσοστημόρια των χρόνων ολοκλήρωσης που υπάρχουν στον αρχικό πίνακα. Άρα ο νέος πίνακας έχει συνολικά 11 στήλες.. Τα ποσοστημόρια, αυτά, θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια στις μεθόδους ELECTRE III και PROMETHEE. Όλα τα κριτήρια είναι εξίσου σημαντικά άρα έχουν όλα βάρος ίσο με $1/11$. Τα κατώφλια προτίμησης (p) και αδιαφορίας (q) της ELECTRE III, ορίζονται ίσα με το 50% και το 25%, αντίστοιχα, ποσοστημόριο των διαφορών μεταξύ των τιμών των εργασιών στα κριτήρια. Για την μέθοδο PROMETHEE χρησιμοποιούνται ο ίδιος πίνακας δεδομένων με τα ποσοστημόρια και ο ίδιος πίνακας βαρών. Κατά την εκτέλεση της PROMETHEE χρησιμοποιείται η Gaussian συνάρτηση προτίμησης, όπου η παράμετρος σ της συνάρτησης ορίστηκε ίση με την τυπική απόκλιση του πίνακα δεδομένων.

Στο αντίστοιχο βήμα, στην ανάλυση του άρθρου χρησιμοποιείται η μέθοδος TOPSIS, ώστε να επιτευχθεί η στοχαστική κατάταξη των καθυστερήσεων της εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο της κατανομής και τις ακραίες τιμές της. Η μέθοδος TOPSIS αναπτύχθηκε αρχικά από τους Ching-Lai Hwang και Yoon το 1981 με περαιτέρω εξελίξεις από τον Yoon το 1987, και Hwang, Lai και Liu το 1993. Η

TOPSIS βασίζεται στην ιδέα ότι η επιλεγμένη εναλλακτική πρέπει να έχει τη μικρότερη γεωμετρική απόσταση από τη θετική ιδανική λύση (PIS) και τη μεγαλύτερη γεωμετρική απόσταση από την αρνητική ιδανική λύση (NIS).

Άλλη μια βασική διαφορά είναι ότι στην ανάλυση του άρθρου δεν παράγεται μια τελική κατάταξη, αλλά αντίθετα παρουσιάζονται θερμοχάρτες που αντιστοιχούν στην κατάταξη των εργασιών όταν εφαρμόζεται η διαδικασία TOPSIS για τέσσερα διαφορετικά προφίλ προτιμήσεων κινδύνου. Λόγω της τυχαίας παραγωγής απόφασης δεν μπορεί να καθοριστεί μια ενιαία κατάταξη. Αντί αυτού, δημιουργείται μια ολόκληρη κατανομή των κατατάξεων για κάθε προσομοιωμένη καθυστέρηση του έργου και προφίλ του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων. Ενδεικτικά η κατάταξη που προκύπτει για +1 καθυστέρηση στις παραμέτρους των εργασιών είναι η εξής:



Σχήμα 4.2. Θερμοχάρτες που αντιστοιχούν στην κατάταξη των εργασιών που δίνεται καθυστερώντας τις παραμέτρους μίας εργασία τη φορά για τις τέσσερις διαφορετικούς λήπτες αποφάσεων, ο καθένας με διαφορετικά προσωπικά κριτήρια (Floyd, Barker, Rocco & Whitman, 2017)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

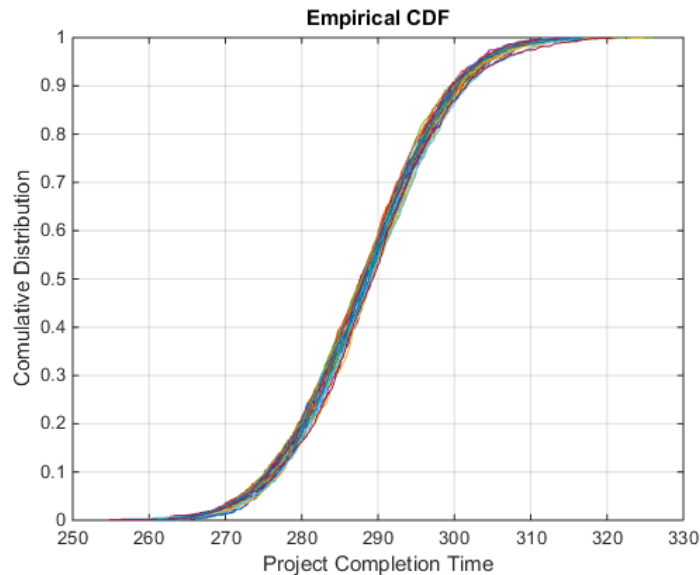
Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα αποτελέσματα και θα προκύψουν τα τελικά συμπεράσματα για την κρισιμότητα των εργασιών. Όπως προαναφέρθηκε η καθυστέρηση των παραμέτρων των εργασιών θα πάρει τρεις τιμές: μια, τρεις και δέκα χρονικές περιόδους. Στις παρακάτω μερικές κατατάξεις παρατηρείται ότι αρκετές από τις εργασίες είναι μεταξύ τους μη συγκρίσιμες, καθώς η μια υπερτερεί της άλλης στη μία κατάταξη, ενώ στη δεύτερη κατάταξη να ισχύει το αντίθετο, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προκύψει ξεκάθαρο συμπέρασμα, για το ποια είναι σημαντικότερη σε μία κοινή κατάταξη. Για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να προκύψει μία τελική κατάταξη με βάση τους κανόνες κατασκευής μιας τελικής κατάταξης από τις δύο διυλύνσεις (βλ. ενότητα 3.5.4). Από την μέθοδο PROMETHEE προκύπτει μια τελική κατάταξη των εργασιών βάση των καθαρών ροών. Παρακάτω λοιπόν θα γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο αποστάξεων αλλά και με την κατάταξη της PROMETHEE, ενώ για κάθε ζεύγος κατατάξεων θα υπολογιστεί ο συντελεστής συσχέτισης (τ) του Kendall. Όσο μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο πιο ισχυρά θετική ή αντίστοιχα αρνητική συσχέτιση έχουμε για τις μεταβλητές που μας απασχολούν. Αν η τιμή είναι ίση ή πολύ κοντά στο 0, υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει καμία σχέση ανάμεσα στις κατατάξεις, ενώ μια τιμή ίση ή πολύ κοντά στο -1 ή το +1, υποδηλώνει ότι η μια κατάταξη μπορεί να προβλέψει με υψηλή ακρίβεια την άλλη. Υπενθυμίζεται ότι οι κρίσιμες εργασίες που προκύπτουν, αν δεν λάβουμε υπόψιν τις χρονικές μεταβολές που μπορούν να υποστούν οι διάρκειες των εργασιών, είναι οι εξής:

1 -> 4 -> 24 -> 25 -> 26 -> 27 -> 29 -> 31 -> 34 -> 35 -> 36

Η ανάλυση που ακολουθεί κατατάσσει τις εργασίες ανάλογα με την επίδρασή τους στην κατανομή του χρόνου ολοκλήρωσής του έργου, όταν καθυστερούν οι χρόνοι ολοκλήρωσης των εργασιών.

5.1 Καθυστέρηση μίας περιόδου

Για καθυστέρηση μίας περιόδου στις παραμέτρους των εργασιών προκύπτει το σχήμα 5.1 για τις κατανομές του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης:



Σχήμα 5.1. Αθροιστικές Κατανομές του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου αυξάνοντας τις παραμέτρους μιας εργασίας κάθε φορά κατά μία χρονική περίοδο.

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σαφής CDF που να υπερισχύει σε σχέση με τις υπόλοιπες, υποδηλώνοντας ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη εργασία, η οποία ξεχωρίζει ως υπαίτια της βραδύτερης ή της συντομότερης ολοκλήρωσης του έργου σε όλα τα ποσοστημόρια όταν καθυστερείται. Από τα αποτελέσματα της ELECTRE III έχουμε την εξής κατάταξη των εργασιών στον πίνακα 5.1

Αύξουσα κατάταξη	Εργασίες	Φθίνουσα κατάταξη	Εργασίες
1	27	1	27
1	31	2	24
1	34	3	31
1	35	4	25
5	24	4	35
5	25	6	4
7	4	7	34
8	22	8	1
9	1	8	26
9	26	10	10
11	10	11	22
12	19	12	19
13	29	13	29
14	17	14	15
15	15	15	14
16	7	16	36
16	14	17	17
18	3	18	3
19	20	18	7
19	36	18	11
21	12	21	6
22	6	22	8
22	8	22	20
22	11	24	21
25	28	25	12
26	21	26	18
27	13	26	28
27	16	28	16
29	23	28	30
30	9	30	2
30	18	30	9
32	2	30	13
33	30	30	23
34	33	34	5
35	32	34	32
36	5	34	33

Πίνακας 5.1. Οι δύο κατατάξεις των εργασιών από την μέθοδο ELECTRE III για καθυστέρηση των παραμέτρων των εργασιών κατά μία χρονική περίοδο

Οι δύο κατατάξεις παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες και οι διαφορές στην κατάταξη των εργασιών είναι αρκετά μικρές. Για την σχέση των δύο κατατάξεων υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης του Kendall, ο οποίο είναι ίσος με 0.8876. Και στις δυο παραπάνω διυλίσσεις παρατηρούμε ότι στις πρώτες θέσεις βρίσκονται οι κρίσιμες εργασίες, το οποίο είναι λογικό. Παρατηρούμε επίσης ότι αρκετά σημαντικές είναι οι εργασίες **10** και **22**, οι οποίες όμως δεν ανήκουν στην κρίσιμη

διαδρομή. Παρόλα αυτά μία ενδεχόμενη καθυστέρηση τους θα επηρέαζε σημαντικά το συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι δύο αυτές εργασίες κατέχουν και στις δύο κατατάξεις υψηλότερες θέσεις από την εργασία **29**, η οποία ανήκει στην κρίσιμη διαδρομή. Το τ του Kendall για τη σχέση της αύξουσας κατάταξης και της κατάταξης της PROMETHEE είναι ίσο, κατ' απόλυτη τιμή με 0.9141, ενώ για την σχέση της φθίνουσας κατάταξη και της PROMTEHEE είναι ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, με 0.9285.

Οι λιγότερο σημαντικές εργασίες είναι παρόμοιες και στις δύο διυλίσεις. Οι εργασίες αυτές είναι οι εξής: **5, 32, 33**. Τυχόν καθυστέρηση των εν λόγω εργασιών δεν θα επηρεάσει σχεδόν καθόλου το συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Οι ενδιάμεσες θέσεις έχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους. Οι πιο πολλές εργασίες έχουν το πολύ τρεις θέσεις διαφορά συγκρίνοντας τις δύο κατατάξεις, αλλά όπως φαίνεται και από το σχήμα **5.1**, δεν υπάρχει κάποια CDF που να υπερισχύει όποτε δεν υπάρχει κάποια εργασία η οποία να επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την κατανομή του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου. Όπως θα παρατηρήσουμε παρακάτω αυτό δεν ισχύει για μεγαλύτερες μεταβολές στις παραμέτρους της τριγωνικής κατανομής των εργασιών.

Για την μέθοδο PROMETHEE ισχύει ότι πιο σημαντικές είναι οι εργασίες με τις μεγαλύτερες καθαρές ροές, όπου και σε αυτή την κατάταξη (βλ. πίνακα 5.2) φαίνεται να είναι οι κρίσιμες εργασίες. Στις πέντε πρώτες θέσεις βρίσκονται οι εργασίες της κρίσιμης διαδρομής: **29, 4, 36, 26, 25**. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η εργασία **29** κατατάσσεται ως η πιο σημαντική, ενώ και στις δύο διυλίσεις της ELECTRE κατείχε πολύ χαμηλότερες θέσεις. Αμέσως μετά βρίσκεται η εργασία **6**, η οποία, επίσης, βρισκόταν σε πολύ πιο χαμηλές θέσεις στις κατατάξεις της ELECTRE III. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κατάταξη των εργασιών γίνεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μέθοδο. Αντίστοιχα οι εργασίες **12** και **22**, οι οποίες βρίσκονταν σε υψηλές θέσεις στις διυλίσεις της ELECTRE, κατατάσσονται πολύ πιο χαμηλά με την **22** να βρίσκεται περίπου στην μέση της κατάταξης, ενώ η **12** βρίσκεται 5^η από το τέλος. Στις τελευταίες θέσεις της κατάταξης της PROMETHEE βρίσκονται οι εργασίες **19, 21** και **32**. Η εργασία **32** βρίσκεται τελευταία και στις δύο κατατάξεις, ενώ η εργασία 19 στις διυλίσεις της ELECTRE κατείχε υψηλότερη θέση από την **29**, η οποία βρίσκεται όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην πρώτη θέση.

Σαν μια γενική παρατήρηση θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι δύο κατατάξεις παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους, αλλά σε σύγκριση με την κατάταξη της PROMETHEE οι διαφορές είναι αρκετά σημαντικές, καθώς πέρα από τις κρίσιμες

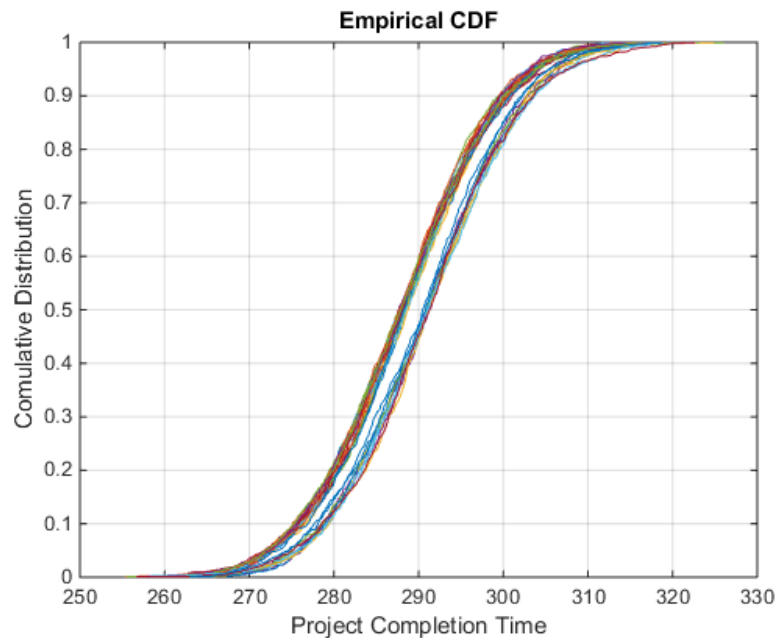
εργασίες οι οποίες κατέχουν τις πρώτες θέσεις σε όλες τις κατατάξεις, με εξαίρεση την **29**, κάποιες άλλες εργασίες όπως η **6**, η **12**, η **19** και η **22** παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές όσον αφορά τις θέσεις, στις οποίες κατατάσσονται.

Τελική κατάταξη με PROMETHEE	
Καθαρές ροές	Τελική κατάταξη εργασιών
0,639	29
0,548	4
0,476	36
0,468	26
0,440	25
0,357	6
0,350	34
0,348	27
0,337	31
0,328	35
0,278	1
0,183	24
0,111	14
0,066	20
0,056	23
-0,039	13
-0,099	5
-0,130	22
-0,132	10
-0,135	11
-0,142	7
-0,186	18
-0,194	28
-0,196	30
-0,218	3
-0,237	17
-0,239	33
-0,268	8
-0,274	9
-0,292	2
-0,304	15
-0,320	12
-0,323	16
-0,402	19
-0,409	21
-0,442	32

Πίνακας 5.2. Τελική κατάταξη των εργασιών με βάση την PROMETHEE για καθυστέρηση των παραμέτρων των εργασιών κατά 1 χρονική περίοδο

5.2 Καθυστέρηση τριών χρονικών περιόδων

Για καθυστέρηση τριών χρονικών περιόδων στις παραμέτρους των εργασιών προκύπτει το εξής διάγραμμα, που φαίνεται στο σχήμα 5.2, για τις κατανομές του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης:



Σχήμα 5.2. Αθροιστικές Κατανομές του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου αυξάνοντας τις παραμέτρους μιας εργασίας κάθε φορά κατά τρεις χρονικές περιόδους.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι υπάρχουν δυο ξεκάθαρα γκρουπ αθροιστικών κατανοών, οι οποίες διασταυρώνονται σε αρκετά σημεία κάνοντας την σύγκριση τους αρκετά δύσκολη. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω παρουσιάζονται οι διυλίσεις της ELLECTRE III (βλ. πίνακα 5.3) και η τελική κατάταξη που προκύπτει από την μέθοδο PROMETHEE (βλ. πίνακα 5.4).

Αύξουσα κατάταξη	Εργασίες	Φθίνουσα κατάταξη	Εργασίες
1	24	1	27
1	25	2	31
1	27	3	24
1	31	3	35
5	34	5	34
5	35	6	25
7	4	7	1
8	26	7	4
9	1	7	26
10	29	10	36
10	36	11	29
12	22	12	10
13	10	13	22
13	15	14	19
13	19	15	17
16	14	16	14
16	17	16	15
18	3	18	20
18	6	19	3
18	7	19	7
18	20	21	8
22	8	22	12
23	11	23	6
23	12	23	21
23	28	25	11
26	21	25	18
27	18	27	30
28	30	28	9
29	9	28	28
29	13	30	2
29	16	30	5
32	2	30	13
32	33	30	16
34	23	30	23
35	32	30	32
36	5	30	33

Πίνακας 5.3. Οι δύο κατατάξεις των εργασιών από την μέθοδο ELECTRE III για καθυστέρηση των παραμέτρων των εργασιών κατά τρεις χρονικές περιόδους

Και σε αυτή την περίπτωση, οι δύο κατατάξεις παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, αλλά οι διαφορές στην κατάταξη των εργασιών είναι μικρότερες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπως φαίνεται και από το τ του Kendall, το οποίο είναι ίσο με 0.9017. Και στις δυο παραπάνω διυλίσεις παρατηρούμε ότι, για μέτρια μεταβολή των παραμέτρων της τριγωνικής κατανομής, στις πρώτες θέσεις

βρίσκονται, πάλι, οι κρίσιμες εργασίες. Η κατάταξη των κρίσιμων εργασιών είναι παρόμοια αν συγκρίνουμε τις δύο διυλίσσεις, με μόνη εξαίρεση την εργασία **25**, η οποία ισοβαθμεί ως πιο σημαντική εργασία μαζί με την **24** στην αύξουσα κατάταξη, στην φθίνουσα όμως, έχει βαθμό ίσο με 6, άρα βρίσκεται αρκετές θέσεις πιο κάτω. Σε υψηλές θέσεις βρίσκονται, ξανά, οι εργασίες **10** και **22**, οι οποίες όμως δεν ανήκουν στην κρίσιμη διαδρομή. Παρόλα αυτά μία ενδεχόμενη καθυστέρηση τους θα επηρέαζε σημαντικά τον συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Για μέτρια καθυστέρηση των παραμέτρων παρατηρούμε ότι και οι 11 κρίσιμες εργασίες βρίσκονται στην κορυφή των κατατάξεων, χωρίς να υπάρχει ενδιάμεσά τους κάποια άλλη μη κρίσιμη εργασία.

Οι λιγότερο σημαντικές εργασίες είναι παρόμοιες με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς στις τελευταίες θέσεις βρίσκονται οι εργασίες **5**, **23**, **32** και **33**. Τυχόν καθυστέρηση των εν λόγω εργασιών δεν θα επηρεάσει σχεδόν καθόλου το συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Οι ενδιάμεσες θέσεις έχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους, με μοναδική εξαίρεση να αποτελεί η εργασία **6**, της οποίας η κατάταξη διαφέρει κατά 5 βαθμούς. Οι πιο πολλές εργασίες έχουν το πολύ τρεις θέσεις διαφορά συγκρίνοντας τις δύο κατατάξεις,

Για την μέθοδο PROMETHEE ισχύει ότι πιο σημαντικές είναι οι εργασίες με τις μεγαλύτερες καθαρές ροές, όπου και σε αυτή την κατάταξη φαίνεται να είναι οι κρίσιμες εργασίες. Στις πέντε πρώτες θέσεις βρίσκονται οι εργασίες της κρίσιμης διαδρομής: **27**, **24**, **4**, **31**, **25**. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι εργασίες **4** και **25** βρίσκονταν στις πρώτες θέσεις της κατάταξης και στην προηγούμενη περίπτωση, όπου είχαμε μικρή καθυστέρηση των παραμέτρων την τριγωνικής κατανομής του χρόνου ολοκλήρωσης των εργασιών. Στις τελευταίες θέσεις βρίσκονται οι εργασίες **5** και **32**, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που αναλύσαμε. Όπως και στις κατατάξεις της ELECTRE III, οι εργασίες **10** και **22** βρίσκονται σε αρκετά υψηλές θέσεις, γεγονός που ενισχύει την σημαντικότητά τους. Το τ του Kendall για την σχέση της αύξουσας κατάταξης και της κατάταξης της PROMETHEE είναι ίσο, κατ' απόλυτη τιμή με, 0.8416, ενώ για την σχέση της φθίνουσας κατάταξης και της PROMTEHEE είναι ίσο, πάλι κατ' απόλυτη τιμή με 0.8597. Και στις δύο περιπτώσεις ο συντελεστής είναι μικρότερος σε σχέση με πριν, που είχαμε μικρή καθυστέρηση των εργασιών.

Και σε αυτήν την περίπτωση καταλήγουμε ότι οι κρίσιμες εργασίες κατέχουν τις πρώτες θέσεις και στις τρεις κατατάξεις. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση

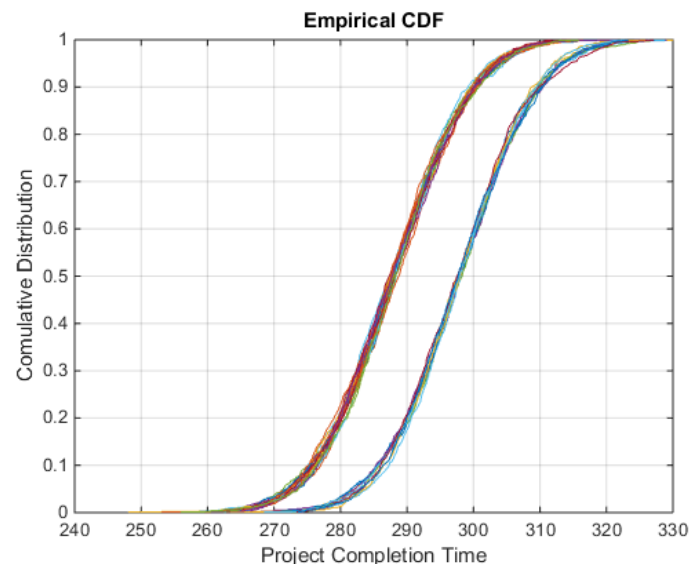
έχουμε κάποιες μη κρίσιμες εργασίες οι οποίες επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την κατανομή του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου.

Τελική κατάταξη με PROMETHEE	
Καθαρές ροές	Τελική κατάταξη εργασιών
0,622	27
0,603	24
0,588	4
0,581	31
0,556	25
0,546	26
0,535	35
0,525	34
0,520	1
0,425	29
0,398	36
-0,069	22
-0,128	19
-0,151	17
-0,165	10
-0,180	7
-0,195	14
-0,195	3
-0,196	8
-0,197	12
-0,217	28
-0,221	15
-0,223	20
-0,247	11
-0,254	9
-0,258	6
-0,268	13
-0,270	30
-0,278	21
-0,278	33
-0,279	18
-0,299	16
-0,321	23
-0,322	2
-0,334	5
-0,347	32

Πίνακας 5.4. Τελική κατάταξη των εργασιών με βάση την PROMETHEE για καθυστέρηση των παραμέτρων των εργασιών κατά τρεις χρονικές περιόδους

5.3 Καθυστέρηση δέκα χρονικών περιόδων

Για καθυστέρηση δέκα χρονικών περιόδων στις παραμέτρους των εργασιών προκύπτει το σχήμα 5.3 για τις κατανομές του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης:



Σχήμα 5.3. Αθροιστικές Κατανομές του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου αυξάνοντας τις παραμέτρους μιας εργασίας κάθε φορά κατά δέκα χρονικές περιόδους

Όπως και στην περίπτωση της καθυστέρησης κατά 3 χρονικές περιόδους, παρατηρούμε ότι για πολύ μεγάλη καθυστέρηση των παραμέτρων της τριγωνικής κατανομής των εργασιών, οι αθροιστικές κατανομές των κρίσιμων εργασιών διαχωρίζονται από τις εργασίες που δεν ανήκουν στην κρίσιμη διαδρομή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα δύο γκρουπ των αθροιστικών κατανομών είναι ακόμα πιο ευδιάκριτα. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές διασταυρώσεις, κάνοντας τη σύγκριση τους αρκετά δύσκολη.

Αύξουσα κατάταξη	Εργασίες	Φθίνουσα κατάταξη	Εργασίες
1	26	1	27
1	27	2	26
1	29	3	29
4	4	4	25
5	25	5	36
5	36	6	1
7	1	6	4
7	31	6	24
9	24	6	31
9	35	6	34
11	34	6	35
12	2	12	2
13	8	13	20
13	9	14	8
13	11	15	11
13	14	16	19
13	15	16	33
13	19	18	9
13	20	18	28
13	28	20	14
13	33	21	3
22	3	21	5
22	32	21	32
24	5	24	15
24	13	25	13
26	18	25	22
27	22	27	21
28	21	28	10
29	10	28	18
30	7	30	7
31	12	30	12
32	17	30	16
33	16	30	17
34	23	30	23
34	30	30	30
36	6	36	6

Πίνακας 5.5. Οι δύο κατατάξεις των εργασιών από την μέθοδο ELECTRE III για καθυστέρηση των παραμέτρων των εργασιών κατά δέκα χρονικές περιόδους

Από τις δυο παραπάνω διυλίσεις, που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5, παρατηρούμε ότι, για μεγάλη μεταβολή των παραμέτρων της τριγωνικής κατανομής, στις πρώτες θέσεις βρίσκονται, πάλι, οι κρίσιμες εργασίες, ενώ η κατάταξη τους είναι παρόμοια και στις δύο κατατάξεις, όπως αποδεικνύεται και από τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης του Kendall, ο οποίος προκύπτει

ίσος με 0.9168. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις οι εργασίες **10** και **22** βρίσκονται σε πολύ χαμηλές θέσεις, ενώ η εργασία **2** βρίσκεται σε αρκετά υψηλότερες θέσεις σε σχέση με αυτές που κατείχε στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις.

Οι λιγότερο σημαντικές εργασίες διαφέρουν λίγο σε σχέση με τις παραπάνω κατατάξεις, καθώς οι εργασίες **5**, **32** και **33** βρίσκονται αρκετά πιο ψηλά. Στις τελευταίες θέσεις βρίσκονται οι εργασίες **23**, **30**, **6**, με την **23** να είναι η μοναδική κοινή με τις λιγότερο σημαντικές εργασίες των παραπάνω περιπτώσεων. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι η εργασία **6** βρίσκεται τελευταία και στις δύο κατατάξεις, ενώ για στην πρώτη περίπτωση όπου είχαμε μικρή καθυστέρηση των εργασιών, βρισκόταν αρκετά υψηλότερα και μάλιστα με την μέθοδο PROMETHEE είχε βαθμολογηθεί ως η 6^η πιο σημαντική εργασία. Όσο μεγαλώνει η καθυστέρηση παρατηρούμε ότι η σημαντικότητα της μειώνεται. Το ίδιο ισχύει για όλες τις εργασίες εκτός της κρίσιμης διαδρομής.

Στην κατάταξη από την μέθοδο PROMETHEE, η οποία παρουσιάζεται στον πίνακα 5.6 στις πρώτες θέσεις είναι, για ακόμη μία φορά, οι κρίσιμες εργασίες. Η εργασία **27** παραμένει η πιο σημαντική. Παρατηρούμε, όμως, ότι η εργασία 4 που στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις βρισκόταν στις πρώτες τρεις πιο σημαντικές εργασίες πλέον τοποθετείται μερικές θέσεις παρακάτω. Επίσης ενώ στις κατατάξεις της ELECTRE, η εργασία **35** βαθμολογήθηκε ως μία από τις λιγότερο σημαντικές κρίσιμες εργασίες, στην κατάταξη της PROMETHEE βρίσκεται στις τρεις πιο σημαντικές εργασίες. Όπως και στην κατάταξη της ELECTRE, οι εργασίες 5 και 32 βρίσκονται αρκετά πιο πάνω στην κατάταξη σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Το τ του Kendall για τη σχέση της αύξουσας κατάταξης και της κατάταξης της PROMETHEE είναι ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, με 0.5848, ενώ για την σχέση της φθίνουσας κατάταξης και της PROMTEHEE είναι ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, με 0.6070.

Τελική κατάταξη με PROMETHEE	
Καθαρές ροές	Τελική κατάταξη εργασιών
0,643	27
0,641	26
0,635	35
0,632	29
0,615	36
0,607	24
0,604	4
0,600	25
0,595	1
0,587	34
0,578	31
-0,229	32
-0,235	9
-0,235	21
-0,238	3
-0,240	5
-0,241	22
-0,242	8
-0,243	18
-0,258	20
-0,262	2
-0,264	10
-0,265	13
-0,266	16
-0,266	28
-0,267	14
-0,270	6
-0,281	15
-0,288	30
-0,289	11
-0,289	33
-0,295	19
-0,311	7
-0,314	12
-0,315	23
-0,328	17

Πίνακας 5.6. Τελική κατάταξη των εργασιών με βάση την PROMETHEE για καθυστέρηση των παραμέτρων των εργασιών κατά δέκα χρονικές περιόδους

5.4 Τελικά συμπεράσματα

Η προτεινόμενη προσέγγιση επιτρέπει τον προσδιορισμό και την κατάταξη των εργασιών που είναι πιο κρίσιμες για το χρόνο ολοκλήρωσης του έργου. Η εγκυρότητα αυτής της προσέγγισης καθιερώθηκε στο γεγονός ότι, για κάθε παράδειγμα, καθεμία από τις εργασίες της κρίσιμης διαδρομής βρισκόταν σε θέση υψηλής σημασίας. Αυτή η προσέγγιση συμπληρώνει το CPM όταν ένας υπεύθυνος λήψης αποφάσεων ενδιαφέρεται να ταξινομήσει εργασίες στην κρίσιμη διαδρομή. Συμπεράναμε ότι ανάλογα το μέγεθος της καθυστέρησης οι κατατάξεις αλλάζουν, ενώ αλλάζει και η συσχέτισή τους. Παρατηρώντας τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης του Kendall συμπεραίνουμε ότι για μεγαλύτερες καθυστερήσεις οι κατατάξεις της ELECTRE III και της PROMETHEE διαφέρουν σε μεγαλύτερο βαθμό, καθώς η τιμή του συντελεστή μειώνεται, άρα η σχέση τους γίνεται ασθενέστερη. Αντίθετα όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση τόσο ισχυρότερη είναι η σχέση των δύο διυλίσεων της ELECTRE, καθώς η τιμή του τ του Kendall έχει αυξητική τάση. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι εργασίες που χαρακτηρίζονται ως κρίσιμες με αυτήν την προσέγγιση μπορεί να μην βρίσκονται πάντα στο κρίσιμο μονοπάτι, όπως η εργασία **6** για μικρές καθυστερήσεις των παραμέτρων και οι εργασίες **10** και **22** για μικρές και μέτριες καθυστερήσεις. Αυτό το γεγονός θα μπορούσε να υποδηλώνει στους διαχειριστές του έργου ότι οι συγκεκριμένες εργασίες ίσως να απαιτούν μεγαλύτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό/λειτουργία. Τέτοιες πρόσθετες πληροφορίες είναι σημαντικές για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, καθώς μπορεί να μην γνωρίζουν το επίπεδο κινδύνου κάθε εργασίας χρησιμοποιώντας μόνο την μέθοδο CPM. Η CPM δεν μπορεί να προσφέρει την κατάταξη της κρισιμότητας των εργασιών, δεδομένης της στοχαστικής φύσης των καθυστερήσεων, όπως την προσφέρει η προτεινόμενη προσέγγιση.

Αν και η προτεινόμενη προσέγγιση περιορίζεται από το γεγονός ότι η διάρκεια της εργασίας πρέπει να είναι γνωστή, ντετερμινιστικά ή στοχαστικά, μπορεί να προσφέρει στους διαχειριστές έργων συμπληρωματικές πληροφορίες σχετικά με την κρισιμότητα των εργασιών, ένα σημαντικό εργαλείο που δεν τους είναι διαθέσιμο με την παραδοσιακή μέθοδο CPM. Αυτή η εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί στο μέλλον χρησιμοποιώντας κι άλλα κριτήρια πέρα από τον χρόνο ολοκλήρωσης του έργου, όπως το κόστος κατασκευής, η ποιότητα, τα πρωτόκολλα ασφαλείας αλλά και περιορισμοί στους διαθέσιμους πόρους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

Για να εφαρμοστεί η προσομοίωση Monte Carlo αλλά και στη συνέχεια οι μέθοδοι ELECTRE III και PROMETHEE, χρησιμοποιείται η MATLAB. Παρακάτω αναλύεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε

```
N = 36; % Αριθμός εργασιών έργου

Prev = xlsread('Data.xlsx','N3:AW38'); % Ορισμός πίνακα
προηγούμενων εργασιών

minimum_duration = xlsread('Data.xlsx','B2:B37'); %
Ελάχιστη διάρκεια εργασιών
mode_duration = xlsread('Data.xlsx','C2:C37'); % Μέση
διάρκεια εργασιών
maximum_duration = xlsread('Data.xlsx','D2:D37'); %
Μέγιστη διάρκεια εργασιών

iterations=1000; % Αριθμός επαναλήψεων
delay=1; % Τιμή καθυστέρησης παραμέτρων κατανομής
```

Στις πρώτες γραμμές του κώδικα ορίζεται ο αριθμός των εργασιών του έργου, ενώ με την εντολή xlsread χρησιμοποιούνται δεδομένα από το αρχείο EXCEL 'Data.xlsx'. Στο αρχείο αυτό περιέχονται οι ελάχιστες, οι μέσες και οι μέγιστες διάρκειες των εργασιών, δηλαδή οι παράμετροι της τριγωνικής κατανομής για κάθε εργασία. Επίσης με βάση τις πρώτες δύο στήλες του πίνακα έχει κατασκευαστεί και ο πίνακας των προηγούμενων εργασιών. Ο πίνακας προηγούμενων εργασιών είναι ένας 36x36 δυαδικός πίνακας όπου εάν η εργασία της στήλης j είναι προηγούμενη της εργασίας της γραμμής i τότε το συγκεκριμένο στοιχείο παίρνει την τιμή 1, αλλιώς την τιμή 0. Στις επόμενες σειρές ορίζεται ο αριθμός των προσομοιώσεων για κάθε καθυστέρηση, καθώς και η τιμή της καθυστέρησης.

```
lower_range = mode_duration-minimum_duration; % Ορισμός
παραμέτρων για παραγωγή τυχαίων τριγωνικά κατανεμημένων
μεταβλητών
higher_range = maximum_duration-mode_duration;
total_range = maximum_duration-minimum_duration;
U = zeros(N,1); % Δημιουργία πίνακα τυχαίας μεταβλητής
από κανονική κατανομή
```

Στις παραπάνω σειρές ορίζονται οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τυχαίων τριγωνικά κατανεμημένων μεταβλητών. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο εξής θεώρημα

Θεώρημα

Τυχαιές μεταβλητές από την τριγωνική κατανομή με ελάχιστη τιμή a , μέση τιμή c και μέγιστη τιμή b μπορούν να παραχθούν σε κλειστή μορφή με αντιστροφή

(Πηγή: Stein, W. E., & Keblis, M. F. (2009). A new method to simulate the triangular distribution. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5–6), 1143–1147. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.06.013>)

Απόδειξη

Η τριγωνική κατανομή (a,b,c) έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2 * (x - a)}{(b - a) * (c - a)}, & a < x < c \\ \frac{2 * (b - x)}{(b - a) * (b - c)} & c \leq x < b \end{cases}$$

και συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας

$$F(x) = \begin{cases} \frac{(x - a)^2}{(b - a) * (c - a)} & a < x < c \\ 1 - \frac{(x - b)^2}{(b - a) * (b - c)} & c \leq x < b \end{cases}$$

Εξισώνοντας την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας με το U , όπου $0 < U < 1$, δίνεται η αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας

$$F^{-1}(U) = \begin{cases} a + \sqrt{(b - a) * (c - a) * U} & 0 < U < \frac{c - a}{b - a} \\ b - \sqrt{(b - a) * (c - a) * (1 - U)} & \frac{c - a}{b - a} < U < 1 \end{cases}$$

Επομένως ένας κλειστού τύπου αλγόριθμος παραγωγής μεταβλητών χρησιμοποιώντας την αντιστροφή για την τριγωνική κατανομή (a, b, c) είναι ο εξής

```
Generate U~U(0, 1)
if (U < (c - a)/(b - a)) then
X ← √(a + (b - a) * (c - a) * U)
else
X ← √(b - (b - a) * (c - a) * U)
endif
return(X)
```

Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται και στην συνέχεια. Η παράμετρος `lower_range` στον κώδικα της MATLAB αφορά την διαφορά $c - a$, η παράμετρος

higher_range αντιστοιχεί στην διαφορά $b - c$ και τέλος η παράμετρος total_range αντιστοιχεί στην διαφορά $b - a$. Στις επόμενες γραμμές ξεκινάει ο βρόγχος for για k από 1 έως N , όπου N ίσο με 36, όσες δηλαδή και οι εργασίες του έργου. Στις παραμέτρους της εκάστοτε εργασίας προσθέτουμε την εκάστοτε καθυστέρηση (στο συγκεκριμένο κώδικα η καθυστέρηση, delay, έχει την τιμή 1, αλλά όπως προαναφέρθηκε θα γίνουν άλλες δυο εφαρμογές, στις οποίες θα έχει την τιμή 3 και 10 αντίστοιχα. Το count αναφέρεται στην προσομοίωση στην οποία βρισκόμαστε και παίρνει τιμές από 1 έως 1000.

```
for k=1:N

    minimum_duration(k)= minimum_duration(k) + delay;    %
    Καθυστέρηση ελάχιστης διάρκειας εργασιών
    maximum_duration(k)= maximum_duration(k) + delay;    %
    Καθυστέρηση μέγιστης διάρκειας εργασιών
    mode_duration(k)= mode_duration(k) + delay;          %
    Καθυστέρηση μέσης διάρκειας εργασιών
```

```
for count=1:iterations
```

Παρακάτω γίνεται αρχικοποίηση των πινάκων όπου θα αποθηκεύονται ο Ενωρίτερος Χρόνος Έναρξης, ο Ενωρίτερος Χρόνος Ολοκλήρωσης, ο Βραδύτερος Χρόνος Έναρξης και ο Βραδύτερος Χρόνος Ολοκλήρωσης, ενώ αμέσως μετά εφαρμόζεται ο αλγόριθμος, που παρουσιάστηκε αναλυτικά παραπάνω.

```
EXE=zeros(N,1);          % Δημιουργία πίνακα Ελαχίστου
Χρόνου Έναρξης κάθε εργασίας
EXO=zeros(N,1);          % Δημιουργία πίνακα Ελαχίστου
Χρόνου Ολοκλήρωσης κάθε εργασίας
BXE=zeros(N,1);          % Δημιουργία πίνακα Βραδύτερου
Χρόνου Έναρξης κάθε εργασίας
BXO=inf(N,1);            % Δημιουργία πίνακα Βραδύτερου
Χρόνου Ολοκλήρωσης κάθε εργασίας
```

```
for i=1:N
    U(i) = rand;          % Παραγωγή τυχαίας μεταβλητής που
    ακολουθεί κανονική κατανομή
```

```
% Εφαρμογή θεωρήματος παραγωγής τυχαίων μεταβλητών
που ακολουθούν τριγωνική κατανομή
```

```
if U(i) < lower_range(i)/total_range(i)
    random_triangular(i)= minimum_duration(i) +
sqrt(U(i)*lower_range(i)*total_range(i));
else
    random_triangular(i)= maximum_duration(i) -
sqrt((1-U(i))*higher_range(i)*total_range(i));
end
end
```

Αφού εφαρμοστεί ο αλγόριθμος, έχουμε πλέον τυχαίους τριγωνομετρικά κατανομημένους χρόνους ολοκλήρωσης για κάθε εργασία, οι οποίοι βρίσκονται αποθηκευμένοι στο διάνυσμα `random_triangular`. Στη συνέχεια, όπως φαίνεται παρακάτω, ορίζουμε μηδέν τον Ενωρίτερο Χρόνο Έναρξης της 1^{ης} εργασίας και εκχωρούμε στον Ενωρίτερο Χρόνο Ολοκλήρωσης της, την νέα διάρκεια της.

```
EXE(1)= 0; % Ορισμός Ελαχίστου Χρόνου Έναρξης 1ης
εργασίας
EXO(1)= random_triangular(1); % Ορισμός Ελαχίστου Χρόνου
Ολοκλήρωσης 1ης εργασίας
```

Στη συνέχεια ξεκινάμε να εφαρμόζουμε την CPM. Ξεκινάμε με την διέλευση προς τα εμπρός και υπολογίζουμε τους Ενωρίτερους Χρόνους Έναρξης και Ολοκλήρωσής της κάθε εργασίας.

```
% Διέλευση προς τα εμπρός

for i=2:N
    for j=1:N
        if Prev(i,j) == 1
            if EXO(j) > EXE(i)
                EXE(i) = EXO(j);
            end
            EXO(i)= EXE(i) + random_triangular(i);
        end
    end
end
```

Η προς τα εμπρός διέλευση έχει ολοκληρωθεί. Εκχωρούμε στον Βραδύτερο χρόνο Ολοκλήρωσης της τελευταίας εργασίας τον αντίστοιχο Ενωρίτερο Χρόνο Ολοκλήρωσής της και στον Βραδύτερο Χρόνο Έναρξης εκχωρούμε την διαφορά του Βραδύτερου Χρόνου Ολοκλήρωσης της και της διάρκειας της. Έπειτα ξεκινάει η προς τα πίσω διέλευση.

```
BXO(N)= EXO(N); % Ορισμός Βραδύτερου Χρόνου Ολοκλήρωσης
N-οστής εργασίας
BXE(N)= BXO(N)-random_triangular(N); % Ορισμός
Βραδύτερου Χρόνου Έναρξης N-οστής εργασίας

% Διέλευση προς τα πίσω

for j=N-1:-1:1
    for i=1:N
        if Prev(i,j) == 1
            if BXO(j) > BXE(i)
                BXO(j) = BXE(i);
            end
            BXE(j)= BXO(j) - random_triangular(j);
        end
    end
```

```
end  
end
```

Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί η διέλευση προς τα πίσω άρα και η CPM. Στις παρακάτω γραμμές κατασκευάζεται ο πίνακας y , ο οποίος είναι ένας πίνακας με 36 γραμμές και 1000 στήλες. Ο πίνακας αυτός περιέχει τους συνολικούς χρόνους ολοκλήρωσης του έργου των 1000 προσομοιώσεων για delay καθυστέρηση σε κάθε εργασία. Αντίστοιχα στην επόμενη γραμμή κατασκευάζεται το διάνυσμα x , του οποίου στοιχεία είναι οι συνολικοί χρόνοι ολοκλήρωσης των 1000 προσομοιώσεων για delay καθυστέρηση στην k εργασία. Το διάνυσμα x χρησιμοποιείται για να γίνει η γραφική παράσταση της CDF. Συνολικά κατασκευάζονται 36 CDF του χρόνου ολοκλήρωσης του έργου, όταν οι παράμετροι κατανομής της κάθε εργασίας έχουν αυξηθεί κατά delay χρονικές περιόδους. Στις επόμενες τρεις γραμμές επαναφέρονται οι αρχικές παράμετροι της εργασίας στην οποία έγινε η καθυστέρηση, ώστε να ξαναγίνει η διαδικασία των 1000 προσομοιώσεων στην επόμενη.

```
y(k,count)= EXO(N); % Δημιουργία πίνακα που περιέχει τους  
% συνολικούς χρόνους ολοκλήρωσης του έργου των 1000  
% προσομοιώσεων για delay καθυστέρηση σε κάθε εργασία  
  
x(count) = EXO(N); % Δημιουργία πίνακα με τον συνολικούς  
% χρόνους ολοκλήρωσης των 1000 προσομοιώσεων για delay  
% καθυστέρηση στην k εργασία  
  
end  
  
% Κατασκευή της γραφικής παράστασης της αθροιστικής  
% συνάρτησης πιθανότητας  
  
cdfplot(x)  
hold on  
xlabel('Project Completion Time')  
ylabel('Cumulative Distribution')  
  
% Επαναφορά των αρχικών παραμέτρων  
  
minimum_duration(k)=minimum_duration(k) - delay;  
maximum_duration(k)=maximum_duration(k) - delay;  
mode_duration(k)= mode_duration(k) - delay;  
  
end
```

Για την εφαρμογή των μεθόδων ELECTRE III και PROMETHEE θα χρησιμοποιηθεί ο πίνακας y , ο οποίος όπως προαναφέρθηκε περιέχει για διαδοχικές καθυστερήσεις σε κάθε εργασία τους συνολικούς χρόνους ολοκλήρωσης του έργου. Ο πίνακας των δεδομένων και για τις δύο μεθόδους είναι ο πίνακας X . Ο συγκεκριμένος πίνακας έχει μία γραμμή για κάθε εργασία και μία στήλη για 0%,

10%, 20%, ..., 100% percentiles των CDF που υπάρχουν στον πίνακα y . Άρα έχει συνολικά 11 στήλες. Ο πίνακας W είναι ο πίνακας με τα βάρη του κάθε κριτηρίου. Όλα τα κριτήρια είναι εξίσου σημαντικά άρα έχουν όλα βάρος $1/11$. Τα $p_percentile$ και $q_percentile$ καθορίζουν τα κατώφλια προτίμησης (p) και αδιαφορίας (q) της ELECTRE III. Καθένα από αυτά είναι ένα ποσοστημόριο (percentile, μεταξύ 0-100) των διαφορών μεταξύ των τιμών των εργασιών στα κριτήρια, το οποίο καθορίζει το αντίστοιχο κατώφλι.

```
% Κατασκευή πίνακα δεδομένων και πίνακα βαρών για τις
μεθόδους ELECTRE III
% και PROMETHEE

for i=1:N
    percentage = 0;
    for j=1:11
        W(j,1)= 1/11;
        X(i,j)= prctile(y(i,:),percentage);
        percentage = percentage+10;
    end
end

p_percentile=50; % Ορισμός κατωφλίου προτίμησης
q_percentile=25; % Ορισμός κατωφλίου αδιαφορίας

[ranks,p,q] = ELECTREIII(X,W,p_percentile,q_percentile)
% Εφαρμογή ELECTRE III
```

Εφαρμόζεται η μέθοδος ELECTRE III και το αποτέλεσμα $ranks$ έχει τις κατατάξεις των εργασιών με την αύξουσα και φθίνουσα διύλιση της μεθόδου ELECTRE III, από την «καλύτερη» εργασία μέχρι την χειρότερη. Εργασίες στις πρώτες θέσεις της κατάταξης είναι εκείνες στις οποίες πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή για την έγκαιρη ολοκλήρωση του έργου.

Για την μέθοδο PROMETHEE χρησιμοποιούνται ξανά χωρίς κάποια αλλαγή οι πίνακες X και W . Για να την εκτελέσουμε χρειάζεται επιπλέον να ορίσουμε το διάνυσμα $criteria_functions$ και το διάνυσμα $params$. Το $criteria_functions$ είναι ένα $n \times 1$ δυαδικό διάνυσμα με τους τύπους των συναρτήσεων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων για κάθε κριτήριο. Το ορίζουμε $ones(11,1)$ για να χρησιμοποιηθεί η Gaussian συνάρτηση προτίμησης της PROMETHEE. Το $params$ είναι ένα διάνυσμα $n \times 1$ με τις τιμές των παραμέτρων για τις συναρτήσεις που ορίζονται στο $criteria_functions$. Το ορίζουμε ίσο με την τυπική απόκλιση του X .

```
criteria_functions = ones(11,1);
params = std(X);
```

```
[flows,pref] = promethee(X,W,criteria_functions,params)
% Εφαρμογή PROMETHEE
```

Από τα αποτελέσματα της PROMETHEE εστιάζουμε στο flows.netflows που είναι οι καθαρές ροές, ουσιαστικά οι βαθμολογίες, των εργασιών. Οι εργασίες κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά ανάλογα με την καθαρή ροή.

```
sheet = 1;
```

```
Ascending = xlsread('Ranking.xlsx',sheet,'A2:A37');
Descending = xlsread('Ranking.xlsx',sheet,'B2:B37');
corr(Ascending,Descending,'Type','Kendall')
```

```
Ascending = xlsread('Ranking.xlsx',sheet,'A2:A37');
PROMETHEE_ranking =
xlsread('Ranking.xlsx',sheet,'D2:D37');
corr(Ascending,PROMETHEE_ranking,'Type','Kendall')
```

```
Descending = xlsread('Ranking.xlsx',sheet,'B2:B37');
PROMETHEE_ranking =
xlsread('Ranking.xlsx',sheet,'D2:D37');
corr(Descending,PROMETHEE_ranking,'Type','Kendall')
```

Στο τέλος του κώδικα υπολογίζεται η συσχέτιση Kendall για κάθε ζευγάρι κατατάξεων, ώστε να ελέγξουμε την σχέση μεταξύ των δύο κατατάξεων

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aibinu, A. A., & Jagboro, G. O. (2002). *The effects of construction delays on project delivery in Nigerian construction industry*. *International Journal of Project Management*, 20 (8), 593–599.

Amor, R.W. (1997). *A Generalized Framework for the Design and Construction of Integrated Design Systems*. PhD thesis, Department of Computer Science, University of Auckland, Auckland, New Zealand.

Arashpour, M., Wakefield, R., Lee, E. W. M., Chan, R., & Hosseini, M. R. (2016). *Analysis of interacting uncertainties in on-site and off-site activities: Implications for hybrid construction*. *International Journal of Project Management*, 34(7), 1393–1402.

Brans, J.P. & Mareschal, B. (2005). *Promethee Methods*. In: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. *International Series in Operations Research & Management Science*, vol 78. Springer, New York, NY.

Brans, J.P. (1982) *L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE*. In R. Nadeau and M. Landry, editors, *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir*, pages 183–213, Québec, Canada. Presses de l'Université Laval.

Brans, J.P. & Mareschal, B. (1992) *BANK ADVISER: Un système interactif multicritère pour l'évaluation financière des entreprises à l'aide des méthodes PROMETHEE*. *Actualité Economique*, 68(4).

Brans, J.P. & Mareschal, B. (1992) *Promethee-V – MCDM problems with segmentation constraints*. *INFOR*, 30(2):85–96.

Brans, J.P. & Mareschal, B. (1995) *The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems*. *Journal of Decision Systems*, 4:213–223.

Brans, J.P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). *How to select and how to rank projects: The Promethee method*. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)

Brouthers, K. D. (1995). *The influence of international risk on entry mode strategy in the computer software industry*. *Management International Review*, 35(1), 7–28.

Figueira, J., Mousseau, V. & Roy, B. (2005). *Electre Methods*. In: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. *International Series in Operations Research & Management Science*, vol 78. Springer, New York, NY.

Floyd, M.K., Barker, K., Rocco, C.M. & Whitman, M. G. (2017): *A Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Stochastic Task Criticality in Project Management*, *Engineering Management Journal*, DOI: 10.1080/10429247.2017.1340038

- Haga, W. A., & Marold, K. A. (2004). A simulation approach to the PERT/CPM time-cost trade-off problem. *Project Management Journal*, 35(2), 31–37.
<https://doi.org/10.1177/875697280403500205>
- Hwang, C.L.; Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag.
- Hwang, C.L.; Lai, Y.J.; Liu, T.Y. (1993). "A new approach for multiple objective decision making". *Computers and Operational Research*. 20 (8): 889–899. doi:10.1016/0305-0548(93)90109-v.
- Johansen, A.M. (2010) "Monte Carlo Methods", *International Encyclopedia of Education*, edited by Peterson P., Baker E., McGaw B., 3rded., Elsevier, p. 296-303.
- Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11–27.
- Kessler, E. H., & Chakrabarti, A. K. (1999). Speeding up the pace of new product development. *Journal of Product Innovation Management*, 16(3), 231–247.
- Kuhl, M. E. & Tolentino-Pena, R.A. (2008). "A dynamic crashing method for project management using simulation-based optimization." 2008 Winter Simulation Conference: 2370-2376.
- Law, A.M., & Kelton, W.D. (2000) *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, Boston.
- Lester, A. (2021) *Project Management, Planning and Control Managing Engineering, Construction and Manufacturing Projects to PMI, APM and BSI Standards*, 8th ed., Butterworth-Heinemann.
- Lock, D. (2000) *Διαχείριση Έργου*, Εκδόσεις Έλλην, Μεταφρ. Σαρρής Ν.
- Ματσατσίνης, Νικόλαος, Φ. (2010). *Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων*. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.
- Marques, G., Gourc, D., & Luras, M. (2011). Multi-criteria performance analysis for decision making in project management. *International Journal of Project Management*, 29(8), 1057–1069. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.10.002>
- Majdi, I. (2013). Comparative evaluation of PROMETHEE and ELECTRE with application to sustainability assessment.
- Muralidhar, K., (2003) "Monte Carlo Simulation", *Encyclopedia of Information Systems*, edited by Bidgoli H., Elsevier, p. 193-201.
- Murray-Webster, R., & Dalcher, D. (2019). *APM Body of Knowledge*. (7th ed ed.) Association for Project Management.

- Monks, T. (2015) *Operational research as implementation science: definitions, challenges and research priorities*. *Implementation Sci* **11**, 81. <https://doi.org/10.1186/s13012-016-0444-0>.
- Mota, C. M. D. M., de Almeida, A. T., & Alencar, L. H. (2009). *A multiple criteria decision model for assigning priorities to activities in project management*. *International Journal of Project Management*, 27(2), 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.08.005>
- Nicholas, J. M. & Steyn, H. (2012) *Project Management for Engineering, Business, and Technology*, 4th ed., Butterworth-Heinemann.
- Pfeifer, J., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., & Morshedlou, N. (2015). *Quantifying the risk of project delays with a genetic algorithm*. *International Journal of Production Economics*, 170, 34–44.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide) (7th ed.)*. Project Management Institute.
- Royer, P. S. (2000). Risk Management: The Undiscovered Dimension of Project Management. *Project Management Journal* ,31(1), 6–13.
- Royer, P.P.S. (2014). *Project Health Assessment (1st ed.)*. Auerbach Publications. <https://doi.org/10.1201/b17576>
- Salvatore, G. & Matthias, E. & José, F. (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer New York, NY.
- San Cristobal, J. R. (2013). *Critical Path Definition Using Multicriteria Decision Making: PROMETHEE Method*. *Journal of Management in Engineering*, 29(2), 158–163. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.000013](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.000013)
- Savage, R. (1985) *Hard-Soft Problems*, *Journal of the American Statistical Association*, 80:389, 1-7, DOI: 10.1080/01621459.1985.10477118.
- Savage, L. J. (1954). *The foundations of statistics*. John Wiley & Sons.
- San Cristobal, J. (2013). *Critical path definition using multicriteria decision making: PROMETHEE method*. *Journal of Management in Engineering*, 29. 158-163. [10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000135).
- Simon, H. A. (1960). *The new science of management decision*. Harper & Brothers.
- Sniazhko, S. (2019) *Uncertainty in decision-making: A review of the international business literature*, *Cogent Business & Management*, 6:1, 1650692, DOI: [10.1080/23311975.2019.165069](https://doi.org/10.1080/23311975.2019.165069).
- Steele, K. & Stefánsson, K. O. "Decision Theory", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2020 Edition), Edward N. Zalta.

- Stein, W. E., & Kebblis, M. F. (2009). A new method to simulate the triangular distribution. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5–6), 1143–1147. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.06.013>
- Sunjka, B. P., & Jacob, U. (2013). Significant causes and effects of project delays in the Niger Delta Region, Nigeria. In C. S. L. Schutte (Ed.), *Proceedings of SAIIIE25*. Stellenbosch, South Africa: Southern African Institute for Industrial Engineering.
- Taha, H. A. (2017) Εισαγωγή στην επιχειρησιακή έρευνα. Εκδόσεις Τζιόλα, Μεταφρ. Μάργαρης Α.
- The ABCs of the Critical Path Method. (2014, August 1). Harvard Business Review. <https://hbr.org/1963/09/the-abcs-of-the-critical-path-method>.
- Targiel, K. S., Nowak, M., & Trzaskalik, T. (2018). Scheduling non-critical activities using multicriteria approach. *Central European Journal of Operations Research*, 26(3), 585–598. <https://doi.org/10.1007/s10100-018-0542-y>
- Trietsch, D., & Baker, K. R. (2012). PERT 21: Fitting PERT/ CPM for use in the 21st century. *International Journal of Project Management*, 30(4), 490–502.
- Viglioni, T. G., Cunha, J. A. O., & Moura, H. P. (2016). A Performance Evaluation Model for Project Management Office Based on a Multicriteria Approach. *Procedia Computer Science*, 100, 955–962. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.257>
- Volz, K.G., Schubotz, R.I. & von Cramon DY. (2005) Variants of uncertainty in decision-making and their neural correlates, *Brain Research Bulletin*, Volume 67, Issue 5. 403-12. [10.1016/j.brainresbull.2005.06.011](https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2005.06.011).
- Yoon, K. (1987). "A reconciliation among discrete compromise situations". *Journal of the Operational Research Society*. 38 (3): 277–286. doi:10.1057/jors.1987.44. S2CID 121379674.
- Zammori, F. A., Braglia, M., & Frosolini, M. (2009). A fuzzy multi-criteria approach for critical path definition. *International Journal of Project Management*, 27(3), 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.03.006>