

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

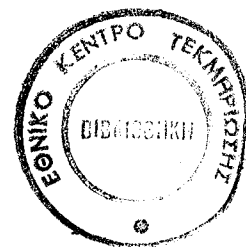
ΧΡΗΣΤΟΥ Π. ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ

ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ  
ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΟΥΝΙΟΣ 1992

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



ΧΡΗΣΤΟΥ Π. ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ

ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ  
ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ  
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΟΥΝΙΟΣ 1992

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	
Περίληψη και κύρια αποτελέσματα της διατριβής	1
1. Κατανομημένη Επίλυση Προβλημάτων	5
1.0 Γενικά	5
1.1 Εισαγωγή στην Κατανομημένη Επίλυση Προβλημάτων	7
1.2 Τομείς εφαρμογών της ΚΕΠ	10
1.3 Διάσπαση Εργασιών	14
1.4 Διάσπαση Εργασιών και Κατανομημένη Επίλυση Προβλημάτων	17
1.5 Συμπεράσματα	21
1.6 Συμβολή και διάρθρωση της διατριβής	22
2. Συγκριτική Επισκόπηση των Συστημάτων	
Κατανομημένης Επίλυσης Προβλημάτων	25
2.0 Γενικά	25
2.1 Η προσέγγιση των Ανοικτών Συστημάτων	27
2.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά	28
2.1.2 Αρμόδια Διεργασία	29
2.2 Ευμετάβλητα Συστήματα	33
2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά	34
2.2.2 Μεθοδολογία των Ευμετάβλητων Συστημάτων	35
2.3 Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων	38
2.3.1 Ομοιότητες	38
2.3.2 Διαφορές	39
2.3.3 Αρμόδια Διεργασία και	
Μεθοδολογία Ευμετάβλητων Συστημάτων	40
2.4 Συμπεράσματα	42

3. Το πρόβλημα της Διάσπασης Εργασιών	44
3.0 Γενικά	44
3.1 Καθορισμός του προβλήματος	45
3.2 Ορισμοί	49
3.3 Κατασκευή του μοντέλου	51
3.4 Μελέτη της Πολυπλοκότητας του προβλήματος Διάσπασης Εργασιών	57
3.5 Συμπεράσματα	59
4. Η προσέγγιση της Συνδυαστικής Βελτιστοποίησης	61
4.0 Γενικά	61
4.1 Ο Ακριβής αλγόριθμος	62
4.1.1 Θεωρητική θεμελίωση του αλγορίθμου	62
4.1.2 Περιγραφή του αλγορίθμου	63
4.2 Ένας Ευρετικός αλγόριθμος	65
4.3 Συμπεράσματα	69
5. Ειδικές Περιπτώσεις του προβλήματος της Διάσπασης Εργασιών	71
5.0 Γενικά	71
5.1 Διαμόρφωση και μελέτη της πολυπλοκότητας του προβλήματος	72
5.2 Ένας Ακριβής αλγόριθμος για το πρόβλημα (P2)	77
5.3 Υπολογιστικά αποτελέσματα	80
5.4 Συμπεράσματα	81
6. Γενικά Συμπεράσματα	83
6.0 Γενικά	83
6.1 Συμπεράσματα	83
6.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις	86

Παράρτημα Α	Παραδείγματα διάσπασης εργασιών	89
Παράρτημα Β	Μια συγκεκριμένη εφαρμογή	97
Βιβλιογραφία		106

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους μου συμπαράσταθηκαν στην προσπάθεια ολοκλήρωσης αυτής της διατριβής. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου και Καθηγητή του τμήματος Εφαρμοσμένης Πληροφορικής κ. Ευάγγελο Κιουντούζη ο οποίος με εισήγαγε στον ερευνητικό χώρο της Κατανεμημένης Επίλυσης Προβλημάτων και με βοήθησε σημαντικά στην ολοκλήρωση της ερευνητικής μου προσπάθειας. Επίσης ευχαριστώ τον Καθηγητή Ιωάννη Κάβουρα και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Θεόδωρο Καλαμπούκη για το ενδιαφέρον και την ενεργή συμμετοχή τους στην Τριμελή Συμβουλευτική Επιτροπή μου. Οι διορθώσεις και οι υποδείξεις τους βελτίωσαν το κείμενο και την όλη παρουσίαση της διατριβής ουσιαστικά.

Θεωρώ υποχρέωση να ευχαριστήσω ιδιαίτερα στον Αναπληρωτή Καθηγητή Ευάγγελο Μαγείρου για το ενδιαφέρον και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθώς επίσης και για το μεγάλο μέρος από τον πολύτιμο χρόνο του που μου διέθεσε. Επίσης οι υποδείξεις του Καθηγητή Χρήστου Παπαδημητρίου και του Λέκτορα Παναγιώτη Κατερίνη συνέβαλαν στην επίλυση ορισμένων προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά την περίοδο της έρευνάς μου.

Η συμπαράσταση και η συντροφιά των φίλων, των συναδέλφων και αρκετών μελών του τμήματος Εφαρμοσμένης Πληροφορικής μου έδιναν κουράγιο και πολλές φορές ήταν μια ευχάριστη νότα και ανάπαυλα στην όλη προσπάθειά μου.

Ιδιαίτερα ευγνωμονώ τους γονείς μου για τη συμπαράσταση και τους κόπους που έκαναν για να φτάσω μέχρι αυτό το σημείο. Τέλος, αφιερώνοντας τη διατριβή αυτή στη σύζυγό μου Μαριάνθη, την ευχαριστώ για την υπομονή, την κατανόηση,

τη στήριξη και τη ψυχική ξεκούραση που μου προσέφερε όλο το διάστημα της προσπάθειάς μου.

Χρήστος Π. Παπαθεοδώρου

Ιούνιος 1992

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΚΥΡΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η ανάπτυξη των μεθόδων της Τεχνολογίας Γνώσης και της Κατανεμημένης Επεξεργασίας, έφεραν στο προσκήνιο κατανεμημένα συστήματα αποτελούμενα από κόμβους (ή ειδικούς (agents)) με ιδιαίτερες ικανότητες στην εκτέλεση ορισμένων εργασιών. Οι κόμβοι αυτοί συνεργάζονται μεταξύ τους, ανταλλάσσοντας γνώσεις και δεδομένα, με σκοπό την επίλυση σύνθετων προβλημάτων που δε μπορούν να επιλυθούν με τις διαθέσιμες γνώσεις ενός μόνο κόμβου. Ο επιστημονικός χώρος που ασχολείται με την επίτευξη συνεργασίας (cooperation) μεταξύ των ειδικών ενός κατανεμημένου συστήματος, με τέτοιο τρόπο ώστε αυτοί να συμπεριφέρονται σαν μια συντονισμένη ομάδα εμπειρών που ανταλλάσσουν τις γνώσεις τους για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος, χωρίς να υπάρχει κάποιος κεντρικός έλεγχος ανάμεσά τους, ονομάζεται Κατανεμημένη Επίλυση Προβλημάτων (ΚΕΠ, Distributed Problem Solving). Τα συστήματα που λειτουργούν κάτω από τις αρχές της ΚΕΠ (ΣΚΕΠ), ολοκληρώνουν την επίλυση ενός προβλήματος σε τρεις φάσεις [SD81]: Στην πρώτη φάση το πρόβλημα διασπάται σε επιμέρους στοιχειώδη υποπροβλήματα που δεν μπορούν να διασπασθούν περισσότερο. Στη δεύτερη φάση οι κόμβοι συνεργάζονται ανταλλάσσοντας τις γνώσεις τους για να επιλύσουν τα επιμέρους προβλήματα. Στην τελευταία φάση τα επιμέρους αποτελέσματα ανακοινώνονται και ολοκληρώνονται για να επιτευχθεί η επιθυμητή λύση.

Στην πρώτη φάση λειτουργίας των ΣΚΕΠ, δηλαδή τη διαδικασία διάσπασης εργασιών, ζητείται απάντηση στο ερώτημα "ποιός κόμβος θα εκτελέσει ποιά εργασία και πότε, έτσι ώστε να λυθεί ένα δοσμένο πρόβλημα;". Ιδιαίτερο



ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της διαδικασίας διάσπασης εργασιών όταν αυτή αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των πόρων που απαιτούνται για την επίλυση μιας σύνθετης εργασίας (ή ενός προβλήματος).

Η προσπάθεια για επίτευξη συνεργασίας μεταξύ των κόμβων ενός ΣΚΕΠ - ενέργεια που γίνεται στη δεύτερη φάση - αντιμετωπίζει αρκετές δυσκολίες οι οποίες οφείλονται κυρίως στο ότι κάθε ένας από αυτούς διαθέτει γνώσεις που είναι αντιφατικές (ασυνεπείς, inconsistent) ή και ελλειπείς αναφορικά με τις γνώσεις, τους επιμέρους στόχους και γενικότερα την κατάσταση των υπόλοιπων ειδικών του συστήματος. Η ασυνέπεια των γνώσεων των ειδικών προξενεί τη διαφοροποίηση των απόψεών τους για τον τρόπο επίτευξης ενός κοινού στόχου, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συγκρουόμενες απόψεις για το τι θα κάνει κάθε ένας ειδικός. Οι επιστήμονες θέλοντας να επινοήσουν μεθόδους για τη λύση των συγκρούσεων και την επίτευξη συγκερασμού μεταξύ των διαφορετικών απόψεων θεωρούν τα ΣΚΕΠ σαν κοινωνικά συστήματα (social systems) και μεταφέρουν αρκετές έννοιες από το χώρο των κοινωνικών επιστημών που βοηθούν στην υλοποίηση διάφορων στρατηγικών οργάνωσης και λειτουργίας τέτοιων συστημάτων. Η πλέον αντιπροσωπευτική θεώρηση της συμπεριφοράς των ΣΚΕΠ έγινε από τον C.Hewitt [1985] με τη διατύπωση της θεωρίας των Ανοικτών συστημάτων.

Αντικείμενο της διατριβής αυτής είναι η μελέτη του προβλήματος της διάσπασης εργασιών και του θεωρητικού πλαισίου της προσέγγισης του C.Hewitt για την επίτευξη συγκερασμού των διαφορετικών απόψεων των μελών των Ανοικτών Συστημάτων.

Η πρωτοτυπία και η συμβολή της διατριβής έγκειται στα εξής σημεία:

I) Συγκρίνεται η προσέγγιση του C.Hewitt με τη θεώρηση του P.Checkland για τα Ευμετάβλητα Συστήματα (Soft Systems) [1981]. Αν και οι δύο θεωρίες προέρχονται από διαφορετικούς επιστημονικούς χώρους, (Τεχνητή Νοημοσύνη, Ανάλυση Συστημάτων) και διατυπώθηκαν ανεξάρτητα, ωστόσο υπάρχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ τους. Τα συμπεράσματα από τη σύγκριση των δύο προσεγγίσεων μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

α) Και οι δύο προσεγγίσεις ασχολούνται με τη συγκέντρωση και το συγκερασμό των διαφορετικών απόψεων που υπάρχουν μεταξύ των μελών των κοινωνικών συστημάτων.

β) Μπορούν να μεταφερθούν οι αρχές της Μεθοδολογίας των Ευμετάβλητων Συστημάτων (ΜΕΣ) στη μελέτη της λειτουργίας και συμπεριφοράς των ΣΚΕΠ. Συγκεκριμένα η ΜΕΣ προσφέρει μια χρήσιμη προσέγγιση στο πρόβλημα της Αρμόδιας Διεργασίας το οποίο διατυπώθηκε από μελετητές της θεώρησης των Ανοικτών Συστημάτων.

II) Για το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών σε ΣΚΕΠ:

α) Κατασκευάζονται μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού που περιγράφουν το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων που απαιτούνται για τη λύση τους.

β) Μελετάται η πολυπλοκότητα του παραπάνω προβλήματος και αποδεικνύεται ότι ακόμα και οι πιο απλές ειδικές περιπτώσεις του ανήκουν στην κλάση των NP-πλήρη προβλημάτων.

γ) Το συγκεκριμένο πρόβλημα διάσπασης εργασιών θεωρείται σαν πρόβλημα προσδιορισμού μονοπατιού με το ελάχιστο μήκος σε διαστρωματωμένα ακυκλικά κατευθυνόμενα γραφήματα και παρουσιάζεται ένας ακριβής αλγόριθμος για τη λύση του.

δ) Χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση, παρουσιάζεται ένας ευρετικός

αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στην τεχνική της συνάθροισης (aggregation) και προσδιορίζεται το φράγμα σφάλματος (error bound) από τη βέλτιστη λύση.

ε) Προτείνεται ένας τρίτος ακριβής αλγόριθμος για μια ειδική περίπτωση του παραπάνω προβλήματος.

στ) Παρουσιάζεται μια εφαρμογή των αλγορίθμων διάσπασης σε ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από επί μέρους κόμβους - υποσυστήματα - (τμήματα μιας υπηρεσίας του Υπουργείου Γεωργίας) και έχει ως αποστολή τον έλεγχο της τεχνικής αρτιότητας και οικονομικότητας των μελετών που αφορούν την κατασκευή μεγάλης κλίμακας αρδευτικών έργων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Κ Α Τ Α Ν Ε Μ Η Μ Ε Ν Η Ε Π Ι Λ Υ Σ Η Π Ρ Ο Β Λ Η Μ Α Τ Ω Ν

### 1.0 Γενικά

Η εκρηκτική ανάπτυξη των τεχνολογιών Κατανεμημένης Επεξεργασίας, Λογισμικού και Γνώσης δημιούργησαν κατανεμημένα συστήματα τα οποία συμπεριφέρονται σαν κοινωνικές ομάδες, που προσπαθούν με το συντονισμό και τη συνεργασία των μελών τους να επιτελέσουν συγκεκριμένες εργασίες ή να λύσουν καθορισμένα προβλήματα. Ο χώρος της Τεχνητής Νοημοσύνης, που μελετά τη συμπεριφορά και τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε τέτοια συστήματα, ονομάζεται Κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη (KTN). Συγκεκριμένα η KTN είναι ο επιστημονικός χώρος που ασχολείται με την επίλυση προβλημάτων από ένα σύνολο συνεργαζόμενων "ειδικών" (agents), οι οποίοι δεν υπόκεινται σε κεντρικό έλεγχο.

Ο χώρος της KTN μπορεί να διαιρεθεί σε δύο επιμέρους περιοχές [GAS88]. Η πρώτη ονομάζεται Κατανεμημένη Επίλυση Προβλημάτων (ΚΕΠ) και με αυτήν

ασχολήθηκαν αρχικά οι επιστήμονες. Στόχος της είναι η κατασκευή κατανεμημένων συστημάτων που αποτελούνται από ένα σύνολο από ειδικούς (κόμβους) οι οποίοι δεν υπόκεινται σε κεντρικό έλεγχο και συνεργάζονται σαν μια συντονισμένη ομάδα για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. Με τον όρο συνεργασία εννοείται η ανταλλαγή των γνώσεων των ειδικών γύρω από το πρόβλημα και τη λύση που πρόκειται να επιτευχθεί, ενώ με τον όρο αποκέντρωση εννοείται ότι τόσο ο έλεγχος, όσο και τα δεδομένα που απαιτούνται για τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος είναι κατανεμημένοι. Δεν υπάρχει δηλαδή ούτε κεντρικός έλεγχος ούτε μια μοναδική βάση δεδομένων [SD81],[GAS88].

Η δεύτερη περιοχή της KTN καλύπτει τα Συστήματα Πολλών Ειδικών (Multiagent Systems) και επικεντρώνει την έρευνά της στο συντονισμό μιας ομάδας αυτόνομων ειδικών [GAS88]. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται σε αυτή την περιοχή είναι πώς θα συσχετισθούν οι γνώσεις, οι επιμέρους στόχοι και τα σχέδια των ειδικών, έτσι ώστε να συντονίσουν τις ενέργειές τους για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Όπως και στην προηγούμενη περιοχή, οι ειδικοί μοιράζονται μεταξύ τους τις γνώσεις και τα δεδομένα για την επίτευξη κοινών στόχων. Η διαφορά αυτής της περιοχής με την ΚΕΠ έγκειται στο γεγονός ότι κάθε ειδικός ενός ΣΠΕ έχει τη δυνατότητα να συλλέγει γνώσεις και να εξάγει συμπεράσματα για την κατάσταση και τη συμπεριφορά των άλλων ειδικών του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό προσαρμόζει και τη δική του συμπεριφορά, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι στόχοι της ομάδας. Είναι φανερό ότι η διαδικασία συντονισμού στα ΣΠΕ είναι αρκετά δύσκολη μια και δεν υπάρχει καμιά συνεπής γνώση για την κατάσταση του συστήματος, ούτε γίνεται μια γενική ανάθεση των επιμέρους στόχων που πρέπει να επιτευχθούν από τους ειδικούς. Επίσης δεν υπάρχουν γενικά και αντικειμενικά κριτήρια αποδοχής των ενεργειών τους ούτε και εξακρίβωσης της επίτευξης του κοινού ή ακόμα και των επιμέρους στόχων

τους.

Τέλος, ένας παρεμφερής χώρος της KTN είναι η Παράλληλη Τεχνητή Νοημοσύνη [GAS88]. Ο χώρος αυτός ασχολείται με την κατασκευή παράλληλων αρχιτεκτονικών, γλωσσών και αλγορίθμων για τα προβλήματα με τα οποία ασχολείται ο χώρος της TN. Στόχος του είναι να λύσει κάποια προβλήματα απόδοσης που παρουσιάζονται σε συστήματα TN και όχι να εμβαθύνει στις μεθόδους επίτευξης μορφών οργάνωσης και συνεργασίας σε ένα σύνολο ειδικών.

Τονίζεται ότι δε θα πρέπει να συγχέονται οι έννοιες της KTN και της Κατανεμημένης Επεξεργασίας (KE). Η KE θεωρεί ότι ένα πρόβλημα που πρόκειται να λυθεί από ένα κατανεμημένο σύστημα, έχει εκ των προτέρων διασπασθεί σε επιμέρους ανεξάρτητες εργασίες και στοχεύει στην ανάθεσή τους στους επεξεργαστές του συστήματος, στην αποφυγή αδιεξόδων και γενικά στην εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας των επεξεργαστών και την αποκόμιση ορισμένων ωφελειών από την ταυτόχρονη λειτουργία τους. Από την άλλη πλευρά, η KTN θεωρεί σα σημαντική εργασία της τη διάσπαση ενός προβλήματος σε επιμέρους εργασίες. Κύριο μέλημά της είναι να αναπτύσσονται συστήματα που συμπεριφέρονται σα μια ομάδα ειδικών οι οποίοι συνεργάζονται για την αποτελεσματική επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων και όχι συστήματα που εκτελούν ταυτόχρονα και απρόσκοπτα ένα σύνολο ανεξάρτητων εργασιών. Με άλλα λόγια η KTN χρησιμοποιεί τις βασικές αρχές της KE και της TN για να επιτύχει τη συνεργασία μιας ομάδας ΕΣ.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του χώρου της ΚΕΠ και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που αφορά τη διάσπαση εργασιών, η οποία σύμφωνα με τους επιστήμονες είναι ένα από τα

βασικότερα προβλήματα της ΚΕΠ. Τέλος παρουσιάζεται η συμβολή αυτής της διατριβής.

### 1.1. Εισαγωγή στην Κατανεμημένη Επίλυση Προβλημάτων

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί του όρου επίλυση ενός προβλήματος. Ο πλέον σαφής είναι, ίσως, του Kelemen [KEL91] και έχει ως εξής: Εστω ένας χώρος καταστάσεων που αποτελείται από ένα (μετρήσιμο) σύνολο καταστάσεων και ένα πεπερασμένο σύνολο τελεστών. Οι τελεστές είναι συναρτήσεις με πεδία ορισμού και τιμών το σύνολο καταστάσεων. Ένα πρόβλημα ορίζεται σε ένα δεδομένο χώρο καταστάσεων από μια αρχική κατάσταση και ένα σύνολο επιθυμητών καταστάσεων. Η λύση του προβλήματος στο δοσμένο χώρο καταστάσεων είναι μια πεπερασμένη ακολουθία, τελεστών που μετασχηματίζουν την αρχική κατάσταση του προβλήματος σε μια από τις επιθυμητές καταστάσεις.

Ο μεγαλύτερος όγκος της εργασίας που αφορά την επίλυση προβλημάτων, στηρίζεται στην υπόθεση ότι η διαδικασία επίλυσης αναλαμβάνεται από ένα μόνο ειδικό-επεξεργαστή. Ωστόσο υπάρχουν καταστάσεις οι οποίες δεν επιτυγχάνονται από ένα μόνο ειδικό, αλλά απαιτούν διαφορετικές πηγές γνώσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να συμβεί για διάφορους λόγους όπως, για παράδειγμα, όταν ο χρόνος επίλυσης είναι πολύ μεγάλος, ή όταν το πλήθος των δεδομένων και ο όγκος της απαιτούμενης γνώσης διαχειρίζεται δύσκολα, ή όταν το ίδιο το πρόβλημα έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που απαιτούν τη λειτουργική ή τη γεωγραφική κατάτμηση της διαδικασίας επίλυσης.

Ο ερευνητικός χώρος που επικεντρώνει τις προσπάθειές του στην επίτευξη

συνεργασίας μεταξύ των στοιχείων ενός συνόλου από αποκεντρωμένους και χαλαρά συνδεδεμένους κόμβους (ειδικούς, (agents)) με σκοπό την από κοινού επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων, ονομάζεται Κατανεμημένη Επίλυση Προβλημάτων (ΚΕΠ), ενώ τα συστήματα που αποτελούνται από διάφορους ειδικούς που λειτουργούν ασύγχρονα και συνεργάζονται για την επίλυση προβλημάτων μοιράζοντας τις διαθέσιμες γνώσεις που έχουν για αυτά, ονομάζονται ΣΚΕΠ. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ΚΕΠ είναι:

1) Κανένας από τους ειδικούς δε μπορεί να λύσει μόνος του ένα πρόβλημα, αλλά απαιτείται η επικοινωνία και η ανταλλαγή των γνώσεων τουλάχιστον ενός υποσυνόλου της ομάδας των ειδικών.

2) Δεν υπάρχει κεντρικός έλεγχος ούτε μια κοινή βάση δεδομένων. Δηλαδή κάθε ειδικός επιλέγει μόνος του τις εργασίες που θα εκτελέσει και διαχειρίζεται αυτόνομα μια δική του τοπική μνήμη. Επίσης, οι ειδικοί λειτουργούν ασύγχρονα.

3) Η επίλυση του προβλήματος ολοκληρώνεται σε τρεις φάσεις [SD81]. Στην πρώτη φάση το πρόβλημα διασπάται σε επιμέρους στοιχειώδη υποπροβλήματα που δεν μπορούν να διασπασθούν περισσότερο. Στη δεύτερη φάση οι κόμβοι συνεργάζονται ανταλλάσσοντας τις γνώσεις τους για να επιλύσουν τα επιμέρους προβλήματα. Στην τελευταία φάση τα επιμέρους αποτελέσματα ανακοινώνονται και ολοκληρώνονται για να επιτευχθεί η επιθυμητή λύση.

Το ενδιαφέρον της ΚΕΠ εστιάζεται σε δύο επίπεδα: (α) ποιές πληροφορίες θα ανταλαχτούν έτσι ώστε να επιτευχθεί μια κοινά αποδεκτή και σωστή λύση στο δοσμένο πρόβλημα και (β) με ποιόν τρόπο θα συντονισθούν οι ενέργειες των ειδικών, έτσι ώστε να λειτουργούν σαν μια ομάδα που προσπαθεί να πετύχει ένα



κοινό στόχο. Ο συντονισμός των ενεργειών των κόμβων ενός ΣΚΕΠ θα ήταν μια πολύ εύκολη διαδικασία αν κάθε κόμβος είχε πλήρεις γνώσεις για τα ενδιαφέροντα, τις γνώσεις και τους στόχους των άλλων. Ωστόσο κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Κάθε κόμβος έχει περιορισμένες γνώσεις για τις γνώσεις και τις ικανότητες των υπόλοιπων [DS83], [CMAS83], για το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί ακόμα και για το χώρο γνώσης που το όλο σύστημα καλύπτει. Κάτω από αυτές τις δυσμενείς συνθήκες θα πρέπει να επιτυγχάνεται όχι μόνο η συντονισμένη εκτέλεση ενός συνόλου εργασιών από τους κόμβους έτσι ώστε να παράγονται ορθές επιμέρους λύσεις, αλλά θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι επιμέρους λύσεις είναι συμβατές μεταξύ τους για να μπορούν να σχηματίσουν μια ολοκληρωμένη και σωστή λύση στο όλο πρόβλημα [DLC87].

## 1.2 Τομείς εφαρμογών της ΚΕΠ

Η δημιουργία Συστημάτων Κατανεμημένης Επίλυσης Προβλημάτων (ΣΚΕΠ) επέτρεψε να λυθούν ορισμένα σημαντικά προβλήματα που αντιμετώπιζε ο χώρος της Τεχνολογίας Γνώσης [HUH87]:

- 1) Ορισμένα προβλήματα δε μπορούν να λυθούν από ένα μόνο ειδικό (π.χ. ανάκτηση και επεξεργασία πληροφοριών από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές).
- 2) Στην περίπτωση εφαρμογών που χρησιμοποιούν ορισμένα έμπειρα συστήματα (ΕΣ) τα οποία έχουν αναπτυχθεί για να καλύπτουν διαφορετικές ή επικαλυπτόμενες γνωστικές περιοχές και απαιτείται η επίλυση προβλημάτων που δεν ανήκουν εξ'ολοκλήρου σε μια μονο περιοχή, τότε θα πρέπει να κατασκευασθεί ένα σύστημα που καλύπτει τις νέες απαιτήσεις, χωρίς την τροποποίηση των υπαρχόντων ΕΣ. Το πρόβλημα που τίθεται στην περίπτωση αυτή είναι το πως τα επιμέρους ΕΣ θα συμπεριφέρονται σαν ένα σύστημα που λύνει προβλήματα ενός ευρύτερου γνωστικού

χώρου.

Γενικά, θα μπορούσε να λεχθεί ότι η ΚΕΠ προσφέρει μια νέα προοπτική στη σύγχρονη τεχνολογία των ΕΣ, προτείνοντας την εξής διαφορετική προσέγγιση για την ανάπτυξή τους [HUH87]:

- α) Κατασκευάζει ένα ξεχωριστό υποσύστημα για κάθε μια περιοχή προβλημάτων που θα αντιμετωπίζει το ΕΣ και
- β) Υποχρεώνει τα υποσυστήματα να συνεργάζονται για την επίλυση ευρύτερων προβλημάτων.

Οι παραπάνω αρχές της ΚΕΠ, εφαρμόστηκαν σε αρκετούς παραγωγικούς και ερευνητικούς τομείς οι οποίοι διακρίνονται για την πολυπλοκότητά τους. Ορισμένοι από αυτούς είναι:

1) Ο έλεγχος της εναέριας κυκλοφορίας όπου ορισμένα αεροσκάφη πρέπει να διασχίσουν ένα συγκεκριμένο εναέριο χώρο για να φθάσουν στους προορισμούς τους. Κάθε σκάφος είναι εφοδιασμένο με ένα ειδικό σύστημα (agent) το οποίο βοηθά στη λήψη αποφάσεων που αφορούν τον καθορισμό της πορείας του σκάφους. Το πρόβλημα που τίθεται είναι ότι τα ειδικά συστήματα πρέπει να συνεργαστούν και να επανακαθορίσουν την πορεία των σκαφών, έτσι ώστε αυτά να μη συγκρουσθούν μεταξύ τους [SCRTW81], [CMAS83].

2) Ένα άλλο πεδίο εφαρμογής των αρχών της ΚΕΠ είναι η παρακολούθηση της κίνησης οχημάτων σε μια γεωγραφική περιοχή. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί από μια ομάδα ειδικών συστημάτων (ή απλούστερα ειδικών) ως εξής: Οι ειδικοί είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά σημεία της περιοχής και κάθε ένας από αυτούς είναι εφοδιασμένος με ένα αισθητήρα (sensor) που συλλέγει ηχητικά σήματα από κάθε όχημα. Οι υποπεριοχές που καλύπτουν οι αισθητήρες

είναι αλληλοκαλυπτόμενες. Η συνεργασία των ειδικών έγκειται στο γεγονός ότι όλοι μαζί πρέπει να αποτυπώσουν την τροχιά ενός οχήματος, συμβιβάζοντας τις απόψεις τους για την κίνηση του οχήματος στις αλληλοκαλυπτόμενες περιοχές [DLC87], [DL87].

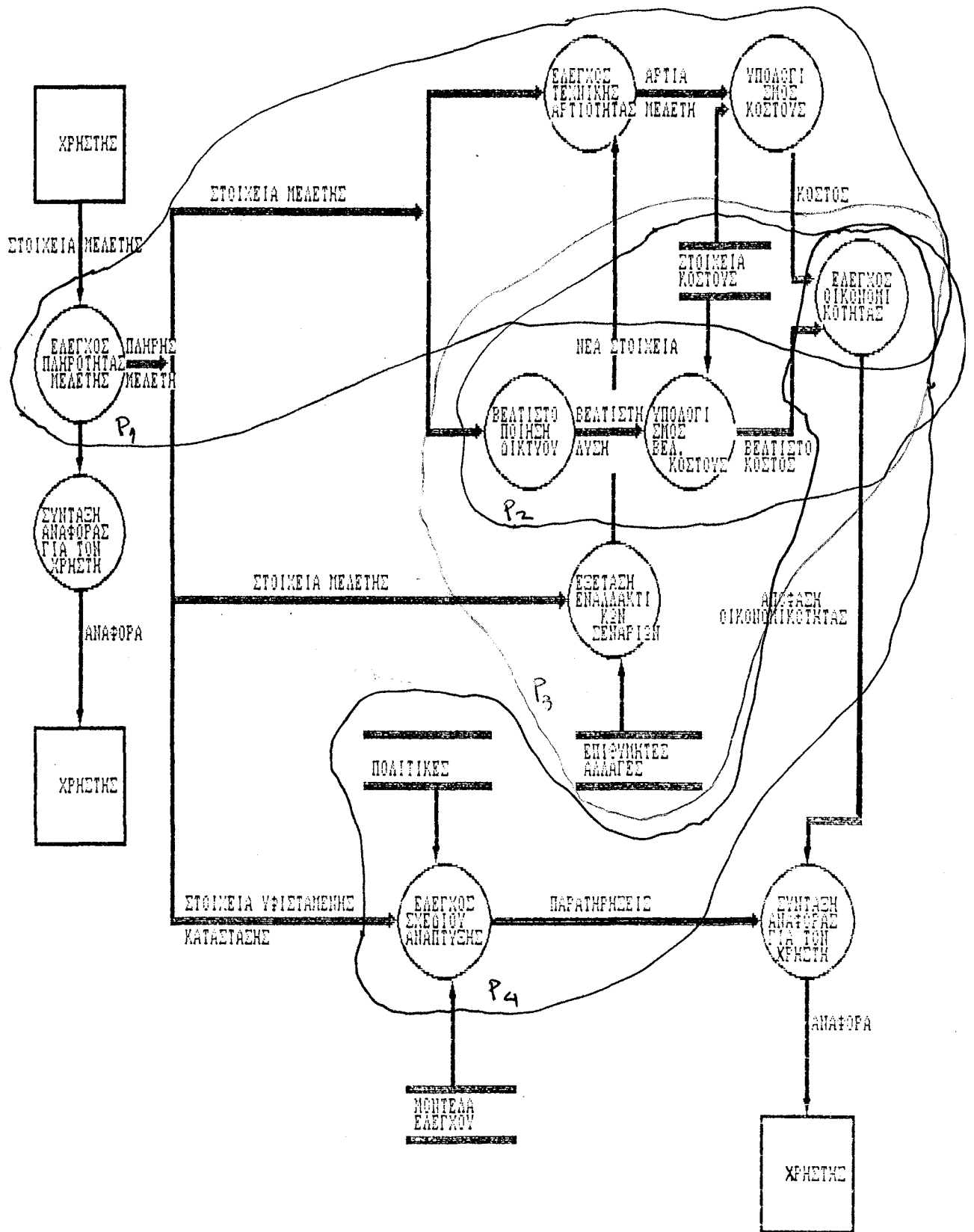
3) Τα ΣΚΕΠ χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία στον έλεγχο διάφορων παραγωγικών διαδικασιών. Τα συστήματα ελέγχου των λειτουργιών μεγάλων παραγωγικών μονάδων, ονομάζονται Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής (Flexible Manufacturing Systems) και αποτελούνται από έμπειρα συστήματα (ΕΣ) που γνωρίζουν να εκτελούν ορισμένες εργασίες. Τα επιμέρους ΕΣ πρέπει να συνεργάζονται για την εκτέλεση πολύπλοκων εργασιών που δε μπορούν να εκτελεστούν από ένα μόνο ΕΣ, είτε γιατί δεν γνωρίζει τον τρόπο εκτέλεσης της πολύπλοκης εργασίας, είτε γιατί αυτή απαιτεί τις γνώσεις περισσότερων του ενός ΕΣ [P87], [G91].

4) Ένα χαρακτηριστικό πραγματικό πρόβλημα που για τη λύση του η ΚΕΠ θα μπορούσε να βοηθήσει σημαντικά, αφορά τον έλεγχο σχεδίασης μεγάλων αρδευτικών έργων. Πιο συγκεκριμένα, μια υπηρεσία του Υπουργείου Γεωργίας (ΥΓ) αναθέτει σε ειδικούς μελετητές τη σχεδίαση αρδευτικών έργων, που πρόκειται να υλοποιηθούν σε συγκεκριμένες περιοχές της χώρας μας. Οι μελέτες αυτές (οι οποίες συνήθως είναι πολύτομες) υποβάλλονται για να ελεγχθούν, προκειμένου να ληφθεί μια απόφαση για την κατασκευή των έργων που προτείνουν. Ο έλεγχος περιλαμβάνει αφ'ενός την εξέταση της τεχνικής αρτιότητας και οικονομικότητας της κατασκευής και λειτουργίας των προτεινόμενων έργων και αφ'ετέρου την εξέταση του κατά πόσο η υλοποίηση των συγκεκριμένων έργων θα προσφέρει μια μελλοντική οικονομική (και κοινωνική) ανάπτυξη της περιοχής που πρόκειται να αρδευθεί. Ειδικότερα η αξιολόγηση μιας μελέτης σχεδίασης για ένα αρδευτικό

έργο απαιτεί τις γνώσεις μιας ομάδας μηχανικών, γεωπόνων και οικονομολόγων προκειμένου να: (1) ελέγξει αν ένα προτεινόμενο αρδευτικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει κάτω από συγκεκριμένες γεωγραφικές, τοπογραφικές αγροτικές ή και κοινωνικές συνθήκες που καθορίζουν τη ζήτηση του νερού, (2) βελτιστοποιήσει τη σχεδίαση του αρδευτικού δικτύου, αφού στο εμπόριο κυκλοφορούν σωλήνες συγκεκριμένων διαμέτρων και (3) να επαληθεύσει αν το έργο θα προσφέρει κάποια οικονομική ανάπτυξη στην περιοχή που θα υλοποιηθεί και να προσδιορίσει τις αλλαγές στην ποσότητα και το είδος της αγροτικής παραγωγής της περιοχής που πρέπει να γίνουν έτσι ώστε να προκύψει η επιθυμητή ανάπτυξη.

Είναι φανερό ότι η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος απαιτεί τη συνεργασία μιας ομάδας ειδικών με διαφορετικές ή επικαλυπτόμενες γνώσεις, οι οποίοι θα ανταλλάσσουν τις γνώσεις τους και θα συμβιβάζουν τους ατομικούς τους στόχους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αξιολόγηση μιας μελέτης και η λήψη μιας τελικής απόφασης. Είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί ειδικά όταν ληφθεί υπόψη ότι τα μέλη της ομάδας δε μιλούν την ίδια γλώσσα, βλέπουν μια μελέτη από την οπτική γωνία της δικής τους ειδικότητας και τέλος βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές της Αθήνας.

Ένα τυπικό παράδειγμα ΣΚΕΠ για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος μπορεί να θεωρηθεί το σύστημα που περιγράφεται στο σχήμα 1.1 [TE89]. Το εν λόγω σύστημα αποτελείται από τέσσερα επιμέρους υποσυστήματα (κόμβους) που βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες στην Αθήνα και συνεργάζονται για την επίτευξη των κοινών στόχων τους. Κάθε ένα από αυτά συμπεριφέρεται σαν ένας έμπειρος που γνωρίζει να εκτελεί κάποιες εργασίες και να εξάγει ορισμένα συμπεράσματα. Το πρώτο είναι επιφορτισμένο με την επαλήθευση κάποιων υπολογισμών και τη διάγνωση σφαλμάτων που υπάρχουν στη μελέτη. Το δεύτερο είναι ένα σύστημα



Σχήμα 1.1 Η δομή ενός ΣΚΕΠ για τον έλεγχο αρδευτικών μελετών

στήριξης αποφάσεων που αναλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης του αρδευτικού δικτύου. Στόχος του είναι να προσδιορίσει ποιές διάμετροι αγωγών βελτιστοποιούν το κόστος κατασκευής του δικτύου και ικανοποιούν συγκεκριμένους περιορισμούς πίεσης και παροχής του νερού. Για την επίτευξη του στόχου του χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα, μοντέλα προσομοίωσης και αλγόριθμους δυναμικού προγραμματισμού. Ο τρίτος κόμβος είναι ένα έμπειρο σύστημα το οποίο επιλέγει τον καταλληλότερο τρόπο άρδευσης σε ένα αγροτεμάχιο. Οι αποφάσεις του εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως τοπογραφικές συνθήκες, εδαφολογικά χαρακτηριστικά, είδη καλλιεργούμενων φυτών κ.λ.π. Το τελευταίο υποσύστημα είναι και αυτό ένα έμπειρο σύστημα που βοηθά στην ανάλυση του σχεδίου ανάπτυξης της περιοχής στην οποία πρόκειται να εφαρμοστεί το αρδευτικό έργο. Αυτό το υποσύστημα λαμβάνει υπόψη του κοινωνικούς, οικονομικούς και αγροτικούς παράγοντες (π.χ. είδη καλλιεργούμενων φυτών) για να εκτιμήσει την επίδραση της άρδευσης στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής.

### 1.3 Διάσπαση εργασιών

Ο όρος διάσπαση εργασιών είναι συνώνυμος με τον όρο διάσπαση προβλημάτων και εννοεί ότι μια εργασία (ή ένα πρόβλημα) διασπάται σε ένα σύνολο από στοιχειώδεις εργασίες, κάθε μια από τις οποίες απαιτεί λιγότερες γνώσεις και πόρους για την εκτέλεσή της [GAS88]. Αν και λίγοι επιστήμονες έχουν ασχοληθεί με τη διάσπαση εργασιών, εν τούτοις υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα, που προέρχονται κύρια από τους χώρους της Επιχειρησιακής Έρευνας και της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Στο χώρο της Επιχειρησιακής Έρευνας μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση [MCSW72] συσχετίζει το πρόβλημα της τετραγωνικής αντιστοίχισης (quadratic assignment problem) με τη διάσπαση προβλημάτων. Επίσης χρησιμοποιεί μια τεχνική ομαδοποίησης για την αναδιοργάνωση των δεδομένων ενός προβλήματος έτσι ώστε να προκύψουν επιμέρους επεξεργασίες για κάθε ομάδα δεδομένων.

Από την άλλη πλευρά, ερευνητές της Τεχνητής Νοημοσύνης όπως οι Niizuma και Kitahashi [NK85] έκαναν μια διαφορετική προσέγγιση στη διάσπαση ενός προβλήματος σε επιμέρους υποπροβλήματα που είναι απλούστερα από το αρχικό. Συγκεκριμένα, οι παραπάνω ερευνητές χρησιμοποίησαν τη θεωρία αυτομάτων για να διατυπώσουν ορισμούς για τις έννοιες πρόβλημα και υποπρόβλημα. Με βάση τους ορισμούς αυτούς και την επινόηση διάφορων σχέσεων και συναρτήσεων που ορίζονται στο σύνολο των καταστάσεων ενός προβλήματος διατύπωσαν ορισμένα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία διαπιστώνεται αν ένα υποπρόβλημα είναι απλούστερο από το αρχικό πρόβλημα. Τελικά οι παραπάνω ερευνητές πρότειναν ένα αλγόριθμο διάσπασης, σύμφωνα με τον οποίο κατασκευάζεται ένα AND/OR δέντρο με ρίζα το αρχικό πρόβλημα, ενδιάμεσους κόμβους τα επιμέρους υποπροβλήματά του και φύλλα τα πιο απλά (εύκολα) υποπροβλήματα τα οποία δεν μπορούν να διασπασθούν περισσότερο.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα θεώρηση είναι αυτή των Ow, Smith και Fox που κατασκεύασαν τα έμπειρα συστήματα ISIS και OPIS για την επίλυση προβλημάτων χρονικού προγραμματισμού εργασιών (jobshop scheduling) [OS88], [SFO86], [SO85]. Οι παραπάνω ερευνητές υποστηρίζουν ότι για να λυθεί ένα πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού πρέπει να διασπασθεί σε επιμέρους υποπροβλήματα και ορίζουν τρεις βασικές πολιτικές διάσπασης: (α) διάσπαση με βάση τους πόρους που απαιτούνται από τις εργασίες που πρέπει να διεκπεραιωθούν, (β) διάσπαση

με βάση τις απαιτήσεις (διαταγές, orders) για το χρονοπρογραμματισμό διάφορων ομάδων εργασιών και (γ) διάσπαση με βάση τις επιμέρους αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού κάποιας ομάδας εργασιών σε μια μηχανή, ή τις επιμέρους αποφάσεις ανάθεσης μιας μηχανής σε μια ομάδα εργασιών.

#### **1.4 Διάσπαση εργασιών και Κατανεμημένη Επίλυση Προβλημάτων**

Η διάσπαση μιας εργασίας (προβλήματος) σε ένα σύνολο από απλούστερες αποτελεί την πρώτη φάση λειτουργίας ενός ΣΚΕΠ. Όπως προαναφέρθηκε, η φάση αυτή στοχεύει στην απάντηση του ερωτήματος " ποιά εργασία θα εκτελεσθεί από ποιόν κόμβο και πότε;" [GAS88], προκειμένου να επιτευχθεί μια αποτελεσματική και συναφής [DLC87] συνεργασία μεταξύ των κόμβων για την επίλυση του προβλήματος. Μια απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι δύσκολο να δοθεί αφού κάθε κόμβος δε γνωρίζει ούτε ποιές εργασίες - όταν εκτελεσθούν - λύνουν το πρόβλημα, ούτε ποιές εργασίες μπορούν να εκτελέσουν οι άλλοι κόμβοι. Επίσης υπάρχουν αρκετά κριτήρια κάτω από τα οποία μπορούν να παρθούν εναλλακτικές αποφάσεις για τη διάσπαση μιας εργασίας. Οι Bond και Gasser [GAS88] σε μια προσπάθεια ταξινόμησης των κυριότερων κριτηρίων και μεθόδων διάσπασης εργασιών αναφέρουν ότι ένα από τα βασικότερα προβλήματα είναι το πως θα διασπασθεί ένα πρόβλημα έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται τα κόστη της διανομής και χρήσης των πόρων και της γνώσης που απαιτούνται για τη λύση του. Θεωρούν επίσης ότι το κριτήριο στο οποίο στηρίζονται όλες οι προσεγγίσεις διάσπασης εργασιών είναι το να βρεθούν λογικές εξαρτήσεις και να σχηματισθούν ομάδες από επιμέρους εργασίες που απαιτούνται για τη λύση του προβλήματος.

Αναλυτικότερα, ορισμένα από τα κριτήρια διάσπασης που έχουν χρησιμοποιηθεί



από διάφορες ερευνητικές προσπάθειες είναι:

1) **Αποφυγή κεντρικού ελέγχου:** Ένα πρόβλημα πρέπει να διασπάται με τέτοιον τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι εξαρτήσεις μεταξύ των ειδικών (κόμβων) του συστήματος που θα ασχοληθούν με τη λύση του. Δηλαδή ο κάθε ειδικός θα πρέπει να μην ασκεί έλεγχο στις ενέργειες των άλλων. Επίσης δε θα πρέπει να υπάρχουν ειδικοί που να κατέχουν αποκλειστικά κάποια δεδομένα ή κάποιες ικανότητες. Σε τέτοιες περιπτώσεις αυτοί οι ειδικοί συγκεντρώνουν τους περισσότερους πόρους του συστήματος και ασκούν έλεγχο στους άλλους ειδικούς με αποτέλεσμα αφ' ενός την υπολειτουργία του όλου συστήματος και αφ' ετέρου την εξαφάνιση της συνεργασίας και της ικανότητας για συντονισμό των ενεργειών των κόμβων.

2) **Μείωση της αβεβαιότητας:** Για λόγους αξιοπιστίας και μείωσης της αβεβαιότητας, είναι καλό ένα πρόβλημα να διασπάται σε εναλλακτικά σύνολα υποπροβλημάτων που πηγάζουν από διαφορετικές οπτικές γωνίες θεώρησης του προβλήματος. Επίσης ορισμένοι ερευνητές προτείνουν την ύπαρξη πλεοναζουσών (επιπρόσθετων) εργασιών για τη λύση ενός προβλήματος. Οι επιπρόσθετες αυτές εργασίες θα χρησιμοποιούνται για την άσκηση ελέγχου σε ένα υποσύνολο εργασιών. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να γίνεται διάκριση μεταξύ των επιθυμητών και των πλεοναζόντων αποτελεσμάτων.

3) **Ελαχιστοποίηση των πόρων:** Ένα πρόβλημα θα πρέπει να διασπάται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η χρήση των πόρων που απαιτούνται για τη λύση του. Ένα παρεμφερές κριτήριο θεωρεί ότι ένα πρόβλημα θα πρέπει να διασπάται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μια εξισορρόπηση του φόρτου των ειδικών (load balancing).

4) **Λογικές σχέσεις μεταξύ των εργασιών:** Εργασίες που χρησιμοποιούν ή παράγουν και γενικότερα που σχετίζονται με ένα σύνολο δεδομένων ή στοιχείων γνώσης, πρέπει να απαρτίζουν μια ομάδα. Επίσης τα προβλήματα θα πρέπει να διασπώνται λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική κατάταξη των δεδομένων του προβλήματος. Για

παράδειγμα στις περιπτώσεις ανάκτησης και επεξεργασίας πληροφοριών από διαφορετικές τοποθεσίες, ένας τρόπος διάσπασης προβλημάτων είναι να προσδιορισθούν οι εργασίες που θα γίνονται στην κάθε τοποθεσία.

Είναι αξιοσημείωτο ότι αν και αρκετοί ερευνητές αναφέρουν τη διάσπαση των εργασιών σε μια πρωταρχική λειτουργία των ΣΚΕΠ, εν τούτοις λίγοι από αυτούς έχουν απασχοληθεί με το συγκεκριμένο πρόβλημα. Οι ερευνητές της Rand Corporation [CMAS83] αντιμετωπίζοντας προβλήματα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας ασχολούνται με τη βέλτιστη ανάθεση ρόλων στους κόμβους ενός ΣΚΕΠ. Με άλλα λόγια αναπτύσσουν μεθόδους για τον προσδιορισμό του καταλληλότερου κόμβου που θα αναλάβει την εκτέλεση μιας εργασίας. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια συγκεκριμένη οργάνωση των κόμβων όπου κάθε ένας παίζει κάποιο ρόλο στην επίλυση του προβλήματος. Μια παρόμοια προσέγγιση είναι αυτή των Durfee, Lesser και Corkill [DLC87], όπου για την επίλυση ενός προβλήματος ο κάθε κόμβος αναλαμβάνει κάποιες αρμοδιότητες με βάση τις οποίες πρέπει να προσδιορίσει και να προγραμματίσει τις ατομικές του ενέργειες.

Πέρα από την ανάθεση αρμοδιοτήτων ή εργασιών στους κόμβους ενός ΣΚΕΠ, μια άλλη προσέγγιση προτάθηκε από τους Smith και Davis [DS83] και υιοθετήθηκε από τους Hudlica και Lesser [HL87]. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση η διάσπαση ενός προβλήματος έχει σαν αποτέλεσμα την κατασκευή ενός χάρτη (συγκεκριμένα ενός AND/OR γραφήματος) των υποπροβλημάτων και των μεταξύ τους σχέσεων. Με βάση αυτό το χάρτη οι κόμβοι αναλαμβάνουν συγκεκριμένες αρμοδιότητες και λειτουργούν σε μια οργανωμένη ομάδα. Μια ανάλογη προσέγγιση είναι αυτή του Gyires ο οποίος σε μια πρόσφατη εργασία του [G91] προσπαθεί να προσδιορίσει τις εργασίες που πρέπει να εκτελεσθούν από τους κόμβους ενός Ευέλικτου Συστήματος Παραγωγής (FMS) προκειμένου να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος

στόχος στην παραγωγική διαδικασία. Ο Gyires εστιάζει στην ανάθεση των εργασιών στους κόμβους του συστήματος και κατασκευάζει AND/OR δένδρα για την απεικόνιση της σειράς εκτέλεσης των εργασιών του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό ιεραρχεί ένα σύνολο εργασιών με κριτήριο το ποιες εργασίες προηγούνται από την εκτέλεση μιας άλλης.

Μια πρόσφατη ενδιαφέρουσα εργασία των Durfee και Lesser [DL89] παρουσιάζει μια μέθοδο διάσπασης προβλημάτων σύμφωνα με την οποία οι κόμβοι διαπραγματεύονται (negotiate) τις απόψεις, τα συμπεράσματά τους και τα επιμέρους σχέδιά τους (plans) για το πώς πρέπει να λυθεί ένα πρόβλημα, έτσι ώστε να προκύψει ένα οριστικό σχέδιο ενεργειών για τον κάθε ένα. Οι παραπάνω συγγραφείς διατυπώνουν συγκεκριμένη αρχιτεκτονική για τον κάθε κόμβο καθώς επίσης καθορίζουν τον τρόπο και τα περιεχόμενα της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Τέλος εφαρμόζουν την παραπάνω στρατηγική διαπραγμάτευσης σε ένα δίκτυο παρακολούθησης της κίνησης οχημάτων μέσα σε μια γεωγραφική περιοχή. Τα δεδομένα για τη λύση του προβλήματος είναι ηχητικά σήματα που γίνονται αντιληπτά και ερμηνεύονται από ένα σύνολο από σένσορες οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία της περιοχής.

Ανακεφαλαιώνοντας, ο Gyires [G91] σε μια προσπάθεια ταξινόμησης των προσεγγίσεων που υπάρχουν για την αντιμετώπιση του προβλήματος της διάσπασης εργασιών, αναφέρει σαν πιο αποτελεσματικές τις εξής προσεγγίσεις:

- 1) Δεδομένης μιας εργασίας σε ένα ΣΚΕΠ, ένας κόμβος επιλέγεται συντονιστής (coordinator) προκειμένου να προσδιορίσει ένα σχέδιο δράσης (plan) για όλο το σύστημα, δηλαδή να καθορίσει τις ενέργειες και τις εργασίες που θα εκτελέσει κάθε κόμβος για να επιλυθεί η δοσμένη εργασία. Οι υπόλοιποι κόμβοι βοηθούν

τον κόμβο-συντονιστή τροφοδοτώντας τον με όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την κατάρτιση του σχεδίου.

2) Όλοι οι κόμβοι ενός ΣΚΕΠ συνεργάζονται για την επίτευξη ενός κοινού στόχου παράγοντας και κοινοποιώντας μερικές ((partial) ή τοπικές (local)) λύσεις. Οι λύσεις αυτές, οι οποίες μπορεί να είναι ανακριβείς ή ακόμα και αντιφατικές (συγκρουόμενες μεταξύ τους), αναθεωρούνται, επεκτείνονται και διορθώνονται κάτω από διαδοχικές αλληλεπιδράσεις των κόμβων του συστήματος.

3) Σύμφωνα με την τελευταία προσέγγιση, μια εργασία ανατίθεται σε έναν κόμβο ο οποίος αναλαμβάνει την εκτέλεσή της και ονομάζεται "διαχειριστής" (manager). Όταν ένας διαχειριστής χρειάζεται βοήθεια για να εκτελέσει μια εργασία, τότε την διασπά σε επιμέρους υποεργασίες και τις αναθέτει σε άλλους κόμβους που ονομάζονται "συμβαλλόμενοι" (contractors). Η διαδικασία επιλογής των συμβαλλόμενων ονομάζεται *διαπραγμάτευση* (negotiation) [DS83] γιατί ο διαχειριστής αφού ανακοινώσει σε ένα υποσύνολο κόμβων την απαίτηση για την εκτέλεση μιας υποεργασίας, επιλέγει τον πιο κατάλληλο κόμβο από αυτούς που δήλωσαν ότι ενδιαφέρονται για την εκτέλεσή της.

## 1.5 Συμπεράσματα

Το κυριότερο συμπέρασμα που προκύπτει από την εξέταση των προηγούμενων ερευνητικών εργασιών ταυτίζεται με την άποψη διάφορων ερευνητών [SD81], [YHS85] ότι η διάσπαση εργασιών είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ΚΕΠ. Ωστόσο λίγες είναι οι εργασίες που αντιμετωπίζουν αυτό το θέμα και οι περισσότερες από αυτές αποτελούν ad hoc προσεγγίσεις για συγκεκριμένα ΣΚΕΠ. Επίσης το βασικό ερώτημα που διατυπώθηκε από τους Lesser

και Corkill [LC81] για τη διάσπαση προβλημάτων με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων και των επικοινωνιών που απαιτούνται για τη λύση τους, ουσιαστικά παραμένει ανοικτό, με την έννοια ότι ακόμα δεν έχει δημιουργηθεί κάποιο θεωρητικό μοντέλο που να το περιγράφει και να παρέχει συγκεκριμένα εργαλεία τόσο για την επίλυσή του, όσο και για τη μελέτη της πολυπλοκότητάς του.

Συνεπώς θα πρέπει να γίνει προσπάθεια για την κατασκευή διάφορων μοντέλων που περιγράφουν το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών με τα παραπάνω κριτήρια και βοηθούν στη μελέτη της πολυπλοκότητάς του και στην αναζήτηση αλγορίθμων για την επίλυσή του.

## 1.6 Συμβολή και διάρθρωση της διατριβής

Αρκετοί επιστήμονες ([F81], [M87], [H86]) παραλληλίζουν τα ΣΚΕΠ με ομάδες αλληλεπιδρώντων εμπειρών, δηλαδή σαν κοινωνικά συστήματα (social systems), που επιδιώκουν την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων. Ο παραλληλισμός αυτός τους οδήγησε στο να μεταφέρουν αρκετές έννοιες από το χώρο των κοινωνικών και οικονομικών επιστημών (π.χ. διαπραγμάτευση, αγορά) για να μελετήσουν τη συμπεριφορά αυτών των συστημάτων και να υλοποιήσουν διάφορες στρατηγικές οργάνωσής τους. Για παράδειγμα μια ενδιαφέρουσα θεώρηση της λειτουργίας των ΣΚΕΠ έγινε από τον C.Hewitt με τη διατύπωση της θεωρίας των Ανοικτών Συστημάτων.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των ΣΚΕΠ έφερε στο φως διάφορα προβλήματα που ο τρόπος επίλυσής τους παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία τους. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

- 1) Η διάσπαση εργασιών και η ανάθεση αρμοδιοτήτων στους κόμβους τους.
- 2) Η επίτευξη συντονισμού (coordination) στις ενέργειες των υποσυστημάτων τους και της εξασφάλισης όχι μόνο ορθών και αποδεκτών τοπικών (local) λύσεων, αλλά και συμβατών με τις άλλες τοπικές λύσεις καθώς και συναφών (coherent) με το εκάστοτε πρόβλημα που πρέπει να λυθεί, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μια ορθή και κοινά αποδεκτή καθολική (global) λύση ([DLC87], [GIN87], [RG88], [YHS85]).
- 3) Η επινόηση πρωτόκολων για την επικοινωνία των κόμβων τους [S80] και την αλληλεπίδραση και διαπραγμάτευση των διαφορετικών στόχων ή απόψεών τους ([P87], [SD81], [DS83]).

Η παρούσα διατριβή:

1) Συγκρίνει τη θεωρία του C.Hewitt για τα Ανοικτά Συστήματα με τη θεωρία των Ευμετάβλητων Συστημάτων του P.Checkland. Η σύγκριση αποσκοπεί:

- α) στη διερεύνηση αν οι δύο θεωρίες έχουν κοινά σημεία και
- β) στην εξέταση αν οι αρχές της Μεθοδολογίας των Ευμετάβλητων Συστημάτων μπορούν να βοηθήσουν στην προσπάθεια της μελέτης της συμπεριφοράς των ΣΚΕΠ.

2) Μελετά τη διάσπαση εργασιών που επιδρά στη συμπεριφορά των ΣΚΕΠ . Στην προσπάθεια αυτή επιλέγονται από τη βιβλιογραφία ορισμένα κριτήρια με βάση τα οποία γίνεται η διάσπαση και αφορούν την ελαχιστοποίηση των πόρων του ΣΚΕΠ, που θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη της εργασίας που διασπάται. Συγκεκριμένα μελετάται το εξής πρόβλημα: Δεδομένης μιας σύνθετη εργασίας σε ένα ΣΚΕΠ, ποιές από τις εργασίες που γνωρίζουν να εκτελούν οι ειδικοί πρέπει να εκτελεσθούν, με ποια σειρά και από ποιούς ειδικούς, έτσι ώστε να επιτευχθεί η εργασία με το ελάχιστο συνολικό κόστος εκτέλεσης των επιμέρους

εργασιών και επικοινωνίας των ειδικών. (Η αρχική σύνθετη εργασία υποβάλλεται στο ΣΚΕΠ με τη μορφή του ζεύγους (Σύνολο αρχικών δεδομένων, Σύνολο επιθυμητών αποτελεσμάτων)). Τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν την πολυπλοκότητα της διαδικασίας διάσπασης εργασιών και την τυπική (formal) μορφοποίησή της από διάφορα μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού. Τέλος, παρουσιάζονται ακριβείς και προσεγγιστικοί αλγόριθμοι συνδυαστικής βελτιστοποίησης για το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών.

Συμπερασματικά η διατριβή δε θεωρεί τη διάσπαση εργασιών σαν ένα απομονωμένο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η ΚΕΠ, αλλά σαν μια σημαντική παράμετρο που επιδρά στην απόδοση και λειτουργία των ΣΚΕΠ. Για το λόγο αυτό, πρώτα εξετάζει αν είναι δυνατή η βελτίωση της προσέγγισης των Ανοικτών Συστημάτων (η οποία είναι μια από τις πιο αντιπροσωπευτικές μελέτες της συμπεριφοράς των ΣΚΕΠ) με τη μεταφορά αρχών και εννοιών από το χώρο της Συστημικής Θεωρίας και συγκεκριμένα των Ευμετάβλητων Συστημάτων και κατόπιν εστιάζει στο πρόβλημα της διάσπασης εργασιών που, όπως προαναφέρθηκε, επηρεάζει το σχηματισμό της συμπεριφοράς των ΣΚΕΠ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

#### 2.0 Γενικά

Η επίτευξη συντονισμού μεταξύ ενός συνόλου κόμβων (ειδικών), έτσι ώστε να έχουν συναφή συνεργασία (coherent cooperation) για να μπορέσουν να επιτύχουν ένα στόχο, αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για τους ερευνητές της ΚΕΠ. Οι δυσκολίες που παρουσιάζονται για την επίτευξη της συναφούς συμπεριφοράς από ένα σύστημα ΚΕΠ, οφείλονται στο ότι κάθε ειδικός διαθέτει ασυνεπείς ή και ελλειπείς γνώσεις για τις γνώσεις, τους επιμέρους στόχους και γενικότερα την κατάσταση των υπόλοιπων ειδικών του συστήματος. Η ασυνέπεια των γνώσεων των ειδικών προξενεί τη διαφοροποίηση των απόψεών τους για τον τρόπο επίτευξης του κοινού στόχου, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συγκρουόμενες απόψεις για το τι θα κάνει κάθε ένας.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο οι κόμβοι ενός ΣΚΕΠ μπορεί να



θεωρηθούν σαν μια ομάδα ειδικών (agents) οι οποίοι αλληλεπιδρούν για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Αρκετοί επιστήμονες ([F81], [M87], [H86]) θεωρούν αυτές τις ομάδες σαν κοινωνικά συστήματα (social systems) και υποστηρίζουν ότι η λειτουργία τους υπόκειται στις αρχές και τους νόμους συμπεριφοράς τέτοιων συστημάτων. Για το λόγο αυτό συζητούν για τη μελέτη της "συμπεριφοράς" των ΣΚΕΠ και μεταφέρουν αρκετές έννοιες από το χώρο των κοινωνικών επιστημών που βοηθούν στην υλοποίηση διάφορων στρατηγικών οργάνωσης και λειτουργίας τέτοιων συστημάτων.

Η πλέον αντιπροσωπευτική θεώρηση της συμπεριφοράς των ΣΚΕΠ έγινε από τον C.Hewitt [H86] με τη διατύπωση της θεωρίας των Ανοικτών συστημάτων. Η προσέγγιση αυτή ορίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ΣΚΕΠ και δημιουργεί ένα πλαίσιο για τη μελέτη της συμπεριφοράς τους. Επιπλέον προτείνει μηχανισμούς για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που πηγάζουν από την ασυνέπεια των γνώσεων των μελών τους.

Από την άλλη πλευρά, ερευνητές της Συστημικής Θεωρίας έχουν μελετήσει τους παράγοντες που επιδρούν στη συμπεριφορά σύμπλοκων οργανισμών, όπως τα συστήματα ανθρώπινης δραστηριότητας, και έχουν διατυπώσει διάφορες αρχές που διέπουν τέτοιου είδους συστήματα. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι ο P.Checkland, ο οποίος προήγαγε σημαντικά τη συστημική σκέψη ορίζοντας την έννοια και τα χαρακτηριστικά των Ευμετάβλητων Συστημάτων (Soft Systems) και παρουσιάζοντας μια μεθοδολογία αντιμετώπισης των προβληματικών καταστάσεων που αναδύονται κατά τη λειτουργία τους [C81], [C85]. Η καινοτομία του Checkland ήταν η παρατήρηση ότι μεταξύ των μελών ενός ευμετάβλητου συστήματος (π.χ. ενός Οργανισμού) υπάρχει μια διαφορά απόψεων που αφορά τους σκοπούς, τις λειτουργίες και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το σύστημα. Είναι φυσικό ότι κάθε διαφορετική άποψη προτείνει διαφορετικούς, ακόμα και συγκρουόμενους

ορισμούς, των υπαρχόντων προβλημάτων και επομένως, διαφορετικούς τρόπους αντιμετώπισής τους. Όλα αυτά συνιστούν μια πολύπλοκη προβληματική κατάσταση η οποία είναι δύσκολο ακόμα και να διατυπωθεί. Η μεθοδολογία των ευμετάβλητων συστημάτων (ΜΕΣ) στοχεύει στη συλλογή και το συγκερασμό όλων των απόψεων προκειμένου να προσδιορισθούν συγκεκριμένες ενέργειες για τη βελτίωση της υπάρχουσας κατάστασης που αντιμετωπίζει ένα ευμετάβλητο σύστημα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση και η σύγκριση των παραπάνω δύο θεωριών με σκοπό να διερευνηθεί αν η ΚΕΠ μπορεί να υιοθετήσει κάποιες από τις αρχές ή ορισμένα στοιχεία της ΜΕΣ, προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα του συντονισμού (coordination) και της συνάφειας (coherency) κάτω από καθεστώς αβεβαιότητας και ασυνέπειας των γνώσεων που διαθέτει μια ομάδα ειδικών.

## **2.1 Η προσέγγιση των Ανοικτών Συστημάτων**

Η θεωρία των ανοικτών συστημάτων διατυπώθηκε από τον C.Hewitt και αποσκοπεί στην περιγραφή των χαρακτηριστικών και τη μελέτη της συμπεριφοράς των διασυνδεδεμένων υπολογιστικών συστημάτων που αλληλεπιδρούν για την επίτευξη ενός κοινού στόχου ή την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. Στη διατριβή αυτή ο όρος "ανοικτό σύστημα" θα αντιστοιχεί στην προσέγγιση του C.Hewitt και όχι σε άλλους γνωστούς ορισμούς και έννοιες που προέρχονται είτε από τον χώρο της Γενικής Θεωρίας Συστημάτων είτε από το χώρο των Λειτουργικών Συστημάτων. Ωστόσο πρέπει να παρατηρηθεί ότι ο όρος "ανοικτό σύστημα" έτσι όπως τον εννοεί ο Hewitt, αντιστοιχεί σε μια ειδική περίπτωση του ορισμού της έννοιας "ανοικτό σύστημα" που χρησιμοποιεί η Γενική Θεωρία Συστημάτων.

### 2.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Τα συστήματα των συνεδμεμένων και αλληλοεξαρτώμενων υπολογιστών, στα οποία εμπίπτουν και τα ΣΚΕΠ) διαφέρουν από τους υπολογιστές με συμβατικές αρχιτεκτονικές για διάφορους λόγους. Ο σημαντικότερος είναι η απαίτηση για τη μεταξύ τους επικοινωνία η οποία επιβάλλει περιορισμούς στη λειτουργία τους. Αυτά τα συστήματα ονομάστηκαν από τον Hewitt [H85] "ανοικτά", αποτελούνται από σταθμούς εργασίας, βάσεις δεδομένων, δίκτυα υπολογιστών κ.λπ. που είναι γεωγραφικά κατανεμημένα και έχουν τις παρακάτω ιδιότητες [H86]:

- 1) *Ταυτόχρονη και ασύγχρονη λειτουργία:* Διάφορες πληροφορίες εισάγονται στα ανοικτά συστήματα οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Επομένως πρέπει οι εργασίες τους να εκτελούνται ταυτόχρονα και τα υποσυστήματά τους να επικοινωνούν ασύγχρονα προκειμένου να μπορούν να λειτουργούν αποδοτικά.
- 2) *Αποκεντρωμένος έλεγχος:* Σε ένα ανοικτό σύστημα ο έλεγχος κατανέμεται στα υποσυστήματά του, αφ'ενός για την αποφυγή δυσλειτουργιών όπως χαμηλή απόδοση ή εμφάνιση αδιεξόδων και αφ'ετέρου γιατί ένας κεντρικός ελεγκτής μπορεί να μην έχει ποτέ πλήρεις πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος εξ'αιτίας του πλήθους των πληροφοριών που εισάγονται και τροποποιούνται κάθε χρονική στιγμή.
- 3) *Ασυνεπείς πληροφορίες:* Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από το περιβάλλον ή παράγονται από τα υποσυστήματα ενός ανοικτού συστήματος μπορεί είτε να μην είναι αξιόπιστες, είτε να είναι ασυνεπείς ή ανεπαρκείς για να εκφράσουν μια συγκεκριμένη κατάσταση.
- 4) *Απόκρυψη κατάστασης:* Τα στοιχεία ενός ανοικτού συστήματος αποκρύπτουν την εσωτερική τους οργάνωση, αρχιτεκτονική και πολλές φορές την κατάστασή τους. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται αφ' ενός ότι ορισμένες πληροφορίες διατηρούνται απροσπέλαστες και αφ' ετέρου η αποφυγή περιττών επικοινωνιών.
- 5) *Συνεχής λειτουργία:* Τα ανοικτά συστήματα πρέπει να εξακολουθούν να

λειτουργούν αξιόπιστα ακόμα και αν κάποια υποσυστήματά τους αποτυγχάνουν. Για να μπορεί να συμβαίνει κάτι τέτοιο, πρέπει να διαθέτουν μηχανισμούς επανόρθωσης βλαβών ή αντικατάστασης των αποτυχόντων συστημάτων.

6) *Συνεχής αλλαγή και εξέλιξη*: Στα ανοικτά συστήματα νέα στοιχεία μπορούν να προστεθούν ή να τροποποιηθούν τα ήδη υπάρχοντα. Επομένως η δομή, η μορφή και οι λειτουργίες τους μεταβάλλονται δυναμικά.

Κατά τον Hewitt [H86] κάθε Οργανισμός θεωρείται ανοικτό σύστημα, γιατί τα τμήματα από τα οποία αποτελείται πρέπει να επικοινωνούν και να συντονίζονται τις ενέργειές τους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή και αποδοτική λειτουργία του οργανισμού. Επιπλέον σύμφωνα με άλλους ερευνητές [GS86] τα τμήματα των οργανισμών παίρνουν αποφάσεις κάτω από καθεστώς αβεβαιότητας, γιατί οι πληροφορίες που διαθέτουν είναι ασυνεπείς ή ανεπαρκείς, γεγονός που οφείλεται στη δυσκολία διαχείρισης ενός τεράστιου πλήθους διαφορετικών και πολλές φορές αντιφατικών απόψεων και γνώσεων που εισέρχονται σε αυτά σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και από οποιοδήποτε στοιχείο τους ή στοιχείο του περιβάλλοντός τους.

### 2.1.2 Αρμόδια διεργασία

Είναι φανερό ότι στα ανοικτά συστήματα οι μηχανισμοί λήψης αποφάσεων και εξαγωγής συμπερασμάτων είναι, αφ' ενός εξαιρετικά πολύπλοκοι και αφ' ετέρου δεν εξασφαλίζουν την ορθότητα (και πολύ περισσότερο τη βελτιστοποίηση) των αποφάσεων. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων ο Hewitt υποστηρίζει ότι τα ανοικτά συστήματα θα πρέπει να διαθέτουν μια διεργασία που θα αποσκοπεί στο συμβιβασμό των αντίθετων απόψεων έτσι ώστε να παρέχονται αξιόπιστες και καθολικά αποδεκτές πληροφορίες, πριν ληφθεί μια απόφαση. Η διεργασία αυτή ονομάζεται "αρμόδια διεργασία" (due process) και θεωρείται σαν

το σύνολο των ενεργειών που επιτελούνται για την οργάνωση των στοιχείων των ανοικτών συστημάτων και την παραγωγή αξιόπιστων πληροφοριών που απαιτούνται για τη λήψη αποφάσεων [H86]. Η αρμόδια διεργασία (ΑΔ) παρέχει το χώρο στον οποίο οι διάφορες απόψεις και προτάσεις συγκεντρώνονται, αναλύονται και αξιολογούνται. Είναι λοιπόν μια βάση γνώσης που περιλαμβάνει τα διαφορετικά σχέδια, τους επιμέρους στόχους, τα αιτήματα, τις διαφωνίες, τα κριτήρια και τους περιορισμούς που αφορούν τη λήψη μιας απόφασης για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος ή γενικότερα μιας κατάστασης. Στόχος της είναι να καταγράψει και να αναβαθμίσει τη διαδικασία λήψης απόφασης παρέχοντας συνεπείς και καθολικά αποδεκτές πληροφορίες. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφει τις αποφάσεις που πάρθηκαν και αφορούν τις αναθέσεις αρμοδιοτήτων, τις πολιτικές που θα ακολουθηθούν και τα ωφέλη που θα αποκομισθούν από την υιοθέτηση της κάθε πολιτικής. Είναι φανερό ότι η καταγραφή των εναλλακτικών σχεδίων και προτάσεων καθώς επίσης και της τελικής απόφασης, βοηθά τόσο στον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος όσο και την αξιολόγηση των ενεργειών του κάθε υποσυστήματος ξεχωριστά.

Τελειώνοντας με τα χαρακτηριστικά της αρμόδιας διεργασίας, πρέπει να σημειωθεί ότι ενθαρρύνει τη συνεργασία μεταξύ των στοιχείων των ανοικτών συστημάτων (ατόμων, τμημάτων, υπολογιστών κ.λ.π.) γιατί παρέχει ένα πλαίσιο επικοινωνιών μέσα στο οποίο γίνονται σαφείς οι προθέσεις και τα σχέδιά τους, αναθεωρούνται και συμβιβάζονται οι απόψεις τους και μεταβάλλεται η τρέχουσα κατάστασή τους. Ωστόσο η σειρά και οι χρονικές στιγμές στις οποίες ανταλλάσσονται συγκεκριμένα μηνύματα, παίζουν σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς τόσο των ανοικτών συστημάτων όσο και των επιμέρους στοιχείων τους. Συμπερασματικά, τονίζεται ότι ο ρόλος της αρμόδιας διεργασίας δεν είναι η λήψη αποφάσεων αλλά η αναβάθμιση των μηχανισμών εξαγωγής συμπερασμάτων και λήψης αποφάσεων στα ανοικτά συστήματα.

Για να επιτύχει τους στόχους της η αρμόδια διεργασία διαμορφώνει τις διάφορες απόψεις που υπάρχουν σε ένα ανοικτό σύστημα σαν μικροθεωρίες [H86]. Μια μικροθεωρία είναι μια μαθηματική θεωρία που διατυπώνεται με βάση τις αρχές της μαθηματικής λογικής και περιλαμβάνει ένα μικρό αξιωματικό σύστημα για να απεικονίσει κάποιο μοντέλο ενός φυσικού συστήματος. Εξ' αιτίας των μικρών αξιωματικών συστημάτων τους οι μικροθεωρίες είναι πολύ απλές, συγκεκριμένες και συνεπείς. Οποιαδήποτε μετατροπή γίνεται σε μια από αυτές έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας νέας μικροθεωρίας. Γενικά, η αρμόδια διεργασία ασχολείται με τις συγκρουόμενες μικροθεωρίες που υπάρχουν σε ένα ανοικτό σύστημα.

Όπως έχει αναφερθεί οι συγκρούσεις προκαλούνται από την ασυνέπεια των γνώσεων και των πληροφοριών που εισέρχονται ασύγχρονα σε ένα ανοικτό σύστημα. Ένα από τα εργαλεία που χρησιμοποιεί η αρμόδια διεργασία για το χειρισμό των μικροθεωριών, είναι η λογική συνεπαγωγή (deduction). Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι (α) μπορεί να γίνει μια πρόβλεψη για τα πιθανά συμπεράσματα και αποφάσεις στις οποίες θα οδηγήσει μια μικροθεωρία ή ο συνδυασμός διάφορων μικροθεωριών και (β) βοηθά στην ανάλυση και αξιολόγηση των ήδη ληφθέντων αποφάσεων. Ωστόσο, οι ασυνέπειες μεταξύ των μικροθεωριών απαιτούν και άλλες τεχνικές όπως ο διάλογος και η διαπραγμάτευση των απόψεων που εκφράζουν. Πιο συγκεκριμένα, η αρμόδια διεργασία διενεργεί ένα διάλογο που αποσκοπεί στη σύγκριση και τη διαπραγμάτευση των αντίθετων μικροθεωριών. Κατά τη διάρκεια της διαπραγμάτευσης δημιουργούνται διάφορες μετα-μικροθεωρίες οι οποίες περιλαμβάνουν αξιώματα που αφορούν ομάδες από τις συνδιαλεγόμενες μικροθεωρίες. Πολλές από τις μετα-μικροθεωρίες είναι συγκρουόμενες και απαιτούν και αυτές διάλογο και διαπραγμάτευση για τη διάλυση των ασυνεπειών που πιθανόν να περιέχουν. Η επίτευξη του διαλόγου μεταξύ των μικροθεωριών και των μετα-μικροθεωριών θεωρείται σαν ένα εξαιρετικά δύσκολο έργο γιατί αφ'

ενός δεν υπάρχουν συγκεκριμένα πρότυπα στα οποία πρέπει να γίνει αναφορά και αφ' ετέρου το πλήθος των μικροθεωριών είναι πολύ μεγάλο.

Εκτός από το πρόβλημα του συμβιβασμού των αντίθετων απόψεων για την παραγωγή αποδεκτών και συνεπών πληροφοριών η αρμόδια διεργασία αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ορθότητας των πληροφοριών. Θα πρέπει δηλαδή να εξασφαλίζεται ότι οι πληροφορίες που παρέχονται από την αρμόδια διεργασία στους μηχανισμούς λήψης αποφάσεων να ανταποκρίνονται στην υπάρχουσα πραγματικότητα [GS86]. Αυτό το γενικό πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί στα επιμέρους ερωτήματα:

- (i) Πώς είναι δυνατόν να επιλεγεί μια συγκεκριμένη άποψη σαν ορθή όταν υπάρχουν άλλες που την αντικρούουν;
- (ii) Ποιά θα είναι τα κριτήρια με τα οποία θα χαρακτηρίζεται μια άποψη σαν αξιόπιστη;
- (iii) Ποιόν αλγόριθμο θα χρησιμοποιεί μια ομάδα υποσυστημάτων ενός ανοικτού συστήματος για να καταλήξουν σε μια κοινή απόφαση; Μήπως ο αλγόριθμος θα πρέπει να είναι κοινός ή κάθε υποσύστημα να έχει δικούς του μηχανισμούς εξαγωγής και αξιολόγησης συμπερασμάτων;

Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει καμιά σαφής απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα, ούτε οι παραδοσιακές αλγοριθμικές μέθοδοι κρίνονται επαρκείς για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων [GS86]. Ωστόσο μια αξιόλογη προσέγγιση των Gerson και Star [GS86] θέτουν δύο προϋποθέσεις για την αντιμετώπιση του γενικότερου προβλήματος της ορθότητας των πληροφοριών το οποίο το αποκαλούν σαν "πρόβλημα της αρμόδιας διεργασίας" (due process problem). Η πρώτη αφορά τις διαθέσιμες (τοπικές) γνώσεις του κάθε μέλους ενός ανοικτού συστήματος οι οποίες θα πρέπει να έχουν μια συνοχή, να είναι σαφείς και συνεπείς και να ανταποκρίνονται στους ορισμούς των προβλημάτων που παρουσιάζονται. Όταν πληρούνται οι παραπάνω ιδιότητες, οι γνώσεις των υποσυστημάτων θεωρούνται

μεταφέρσιμες δηλαδή είναι κατανοητές και μπορούν να μεταδίδονται χωρίς κανένα πρόβλημα στα υπόλοιπα υποσυστήματα. Για τη θεμελίωση της πρώτης προϋπόθεσης απαιτείται τα υποσυστήματα ή τα μέλη των ανοικτών συστημάτων να διαθέτουν ικανότητες για την αναγνώριση και απαλειφή των ασυνεπειών που τυχόν να παρουσιάζουν οι γνώσεις τους. Η δεύτερη προϋπόθεση αφορά τον εφοδιασμό της αρμόδιας διεργασίας με διαδικασίες χρονοπρογραμματισμού και συντονισμού των ενεργειών της, καθώς επίσης και με διαδικασίες χρονικής ταξινόμησης και αξιολόγησης των πληροφοριών που εισέρχονται στο σύστημα έτσι ώστε να μπορεί να ξεπερνά τα προβλήματα που δημιουργούνται από τη σύγκρουση των διαφορετικών απόψεων και από οποιοδήποτε άλλο απρόοπτο που μπορεί να συμβεί στα μέλη ή τα υποσυστήματα ενός ανοικτού συστήματος.

Συμπεραίνοντας, η αρμόδια διεργασία πρέπει να επιλύσει αρκετά και δύσκολα προβλήματα για την εκπλήρωση των στόχων της. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη εμπειρικές γνώσεις που αφορούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ανοικτού συστήματος, γεγονός που δυσχεραίνει τη διατύπωση συγκεκριμένων μεθόδων για την επίλυσή τους.

## **2.2 Ευμετάβλητα Συστήματα**

Η εφαρμογή της Γενικής Θεωρίας Συστημάτων και ειδικότερα των μεθόδων Ανάλυσης Συστημάτων, ήταν το ισχυρότερο εργαλείο για την εύρεση και κατασκευή της βέλτιστης λύσης σε πολύπλοκα και αδόμητα προβλήματα που παρουσιάζονταν σε διάφορα συστήματα. Ωστόσο η πράξη απέδειξε ότι η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων είτε αποτύγχανε, είτε δεν είχε καθόλου καλά αποτελέσματα σε προβλήματα που για τη λύση τους έπρεπε να ληφθούν διοικητικές αποφάσεις σε συστήματα τα οποία ο ανθρώπινος παράγοντας έπαιζε καθοριστικό ρόλο. Τα συστήματα αυτά



ονομάστηκαν συστήματα ανθρώπινης συμπεριφοράς και ένα τυπικό παράδειγμά τους είναι οι διάφοροι Οργανισμοί. Ο λόγος της αποτυχίας αυτών των μεθόδων ήταν ότι ενώ προσανατολίζονται στην εύρεση της βέλτιστης λύσης αδόμητων μεν προβλημάτων αλλά με συγκεκριμένη διατύπωση και διακριτούς στόχους, τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπίσουν στα συστήματα ανθρώπινης δραστηριότητας (human activity systems) πολλές φορές δεν μπορούσαν να διατυπωθούν γιατί υπήρχαν πολλές απόψεις γύρω από αυτά, γεγονός που δεν έκανε φανερό το στόχο που έπρεπε να επιτευχθεί για τη λύση τους. Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών των συστημάτων που είχαν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των συστημάτων ανθρώπινης δραστηριότητας διατυπώθηκε από τον P.Checkland η θεωρία των ευμετάβλητων συστημάτων καθώς επίσης και η ομώνυμη μεθοδολογία για την αντιμετώπιση των προβληματικών καταστάσεων που παρουσιάζονται σε τέτοια συστήματα.

### 2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Η ύπαρξη πολλών απόψεων γύρω από τους σκοπούς και τους ρόλους ενός συστήματος ανθρώπινης δραστηριότητας, τα προβλήματα που υπάρχουν σ' αυτό και τους τρόπους με τους οποίους πρέπει να αντιμετωπισθούν, έχει ως αποτέλεσμα τη δυσκολία αφ' ενός της διάκρισης των πραγματικών στόχων του και αφ' ετέρου της σαφούς καταγραφής και διατύπωσης των προβλημάτων που αντιμετωπίζει. Ολα αυτά συνιστούν μια νεφελώδη προβληματική κατάσταση η οποία δε μπορεί ούτε να διατυπωθεί με σαφήνεια ούτε να αντιμετωπισθεί εύκολα. Ιδιαίτερα η κατάσταση γίνεται πιο πολύπλοκη αν ληφθεί υπ' όψη ότι τόσο οι απόψεις γύρω από αυτή όσο και τα χαρακτηριστικά του συστήματος (στόχοι, λειτουργίες, οργάνωση) μεταβάλλονται δυναμικά.

Οι διαφορετικές και πολλές φορές συγκρουόμενες απόψεις γύρω από το σύστημα,

τους στόχους του, τις λειτουργίες που εκτελεί, την υπάρχουσα προβληματική κατάσταση και τον τρόπο αντιμετώπισής της, διαμορφώνονται από τα μέλη του συστήματος με βάση τις πληροφορίες και τις γνώσεις που έχουν, τις προσωπικές τους επιδιώξεις, τους ρόλους που ασκούν, τις μεθόδους που ακολουθούν για την εκτέλεση των καθηκόντων τους και τις επιρροές που δέχονται τόσο από άλλα μέλη, όσο και από το περιβάλλον του συστήματος. Όπως φαίνεται, οι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση μιας άποψης είναι πολλοί, αλληλοεξαρτώμενοι και μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Κάτω από αυτές τις συνθήκες δε θα πρέπει να επιδιώκεται μια βέλτιστη λύση για την προβληματική κατάσταση, αλλά μια διαρκής προσπάθεια για την βελτίωσή της.

### 2.2.2 Μεθοδολογία των Ευμετάβλητων Συστημάτων

Ο P.Checkland [C81] στην προσπάθεια να αντιμετωπίσει και να βελτιώσει τις προβληματικές καταστάσεις που παρουσιάζονται στα ευμετάβλητα συστήματα, πρότεινε ένα επαναληπτικό σχήμα με τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) Πρόκειται για μια συνεχή διαδικασία απόκτησης γνώσης που αφορά μια προβληματική κατάσταση. Όσο περισσότερες γνώσεις αποκτούνται σε κάθε επανάληψη, τόσο πιο επιτυχείς θα είναι οι αποφάσεις για τις ενέργειες που η εκτέλεσή τους θα βελτιώνει την κατάσταση.
- 2) Στοχεύει στη συλλογή όλων των απόψεων που υπάρχουν για το σύστημα και την κατάσταση που αντιμετωπίζει.
- 3) Οι προτεινόμενες ενέργειες για τη βελτίωση της κατάστασης προκύπτουν από το συμβιβασμό των διαφορετικών ή/και συγκρουόμενων απόψεων που υπάρχουν για αυτή. Ο συμβιβασμός προποθέτει το διάλογο μεταξύ των απόψεων και τη σύγκρισή τους με την πραγματικότητα.
- 4) Υποστηρίζει ότι το αποτέλεσμα της επίτευξης των προτεινόμενων βελτιώσεων είναι μια νέα προβληματική κατάσταση η οποία πρέπει να αντιμετωπισθεί από την

αρχή.

Ενας κύκλος αυτής της επαναληπτικής μεθοδολογίας ολοκληρώνεται με την εκτέλεση των εξής βημάτων:

1) *Μη δομημένη προβληματική κατάσταση*: Στο πρώτο βήμα γίνεται μια γνωριμία με την υπάρχουσα προβληματική κατάσταση. Εξετάζεται το σύστημα ως προς τις διαδικασίες που επιτελούνται σε αυτό, τους ρόλους και τις εξουσίες που έχουν ανατεθεί στα μέλη του, τις αρχές και τις νόρμες που καθορίζουν τη συμπεριφορά και τις μεταξύ τους επικοινωνίες.

2) *Εκφραση της προβληματικής κατάστασης*: Στόχος αυτού του βήματος είναι η διαμόρφωση μιας όσο το δυνατόν πιο πλούσιας εικόνας για τη μελετώμενη προβληματική κατάσταση. Η εικόνα προσδιορίζεται από την επιλογή των πιο σημαντικών θεμάτων που απασχολούν το σύστημα και των πρωταρχικών διαδικασιών και εργασιών που χαρακτηρίζουν τη δομή και τη λειτουργία του. Είναι φανερό ότι τα δύο πρώτα βήματα αποσκοπούν στη λεπτομερή αποτύπωση, κατανόηση και διατύπωση της υπάρχουσας προβληματικής κατάστασης.

3) *Καθορισμός των Σχετικών Συστημάτων και Βασικοί Ορισμοί*: Το βήμα αυτό προϋποθέτει τη συλλογή των απόψεων από διάφορα άτομα που είτε άμεσα είτε έμμεσα έρχονται σε επαφή με το σύστημα ή εμπλέκονται στην προβληματική του κατάσταση. Ο Checkland υποστηρίζει ότι κάθε άποψη εξαρτάται από την οπτική γωνία από την οποία παρατηρείται η υπάρχουσα πραγματικότητα και τις γνώσεις (πολλές φορές ελλειπείς ή ασυνεπείς) που υπάρχουν για αυτή. Κάθε άποψη εκφράζει ένα νέο σχετικό σύστημα με αυτό που μελετάται. Για κάθε σχετικό σύστημα πρέπει να δοθεί ένας ορισμός που να περιγράφει το ΤΙ (δηλαδή ποιο) είναι αυτό το σύστημα. Οι ορισμοί των σχετικών συστημάτων ονομάζονται Βασικοί Ορισμοί (root definitions) και για να είναι πλήρεις πρέπει να περιλαμβάνουν τα εξής στοιχεία:

α) Ποιους εξυπηρετεί το σύστημα (πελάτες - clients).

β) Ποιοί συμμετέχουν ενεργά στις διαδικασίες του συστήματος (actors).

γ) Τι (και όχι πώς) κάνει το σύστημα (μετασχηματισμός - transformation).

δ) Ποιός μπορεί να καταγγήσει το σύστημα (ιδιοκτήτης - owner).

ε) Ποιό είναι το περιβάλλον του συστήματος (environment).

στ) Ποιά είναι η οπτική γωνία από την οποία θεωρείται το σύστημα.

4) *Κατασκευή νοητικών προτύπων*: Δεδομένων των βασικών ορισμών των σχετικών συστημάτων ανθρώπινης δραστηριότητας, κατασκευάζονται αντίστοιχα ιδεατά μοντέλα που περιγράφουν το τι πρέπει να κάνει το σύστημα για να είναι το σχετικό σύστημα που ορίσθηκε. Τα μοντέλα κατασκευάζονται αναλύοντας το μετασχηματισμό του βασικού ορισμού του συστήματος σε ένα σύνολο ενεργητικών ρημάτων. Όσο πιο λεπτομερειακά παρουσιάζονται οι ενέργειες του σχετικού συστήματος, τόσο πιο βαθειά γνώση αποκομίζεται για το ΠΩΣ εκτελούνται οι διαδικασίες του. Τονίζεται ότι τα ιδεατά μοντέλα δεν εκφράζουν απαραίτητα την πραγματικότητα (γι' αυτό και λέγονται ιδεατά) αλλά είναι μοντέλα των σχετικών συστημάτων και εκφράζουν τις απόψεις που υπάρχουν για την πραγματικότητα. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η προσπάθεια για τη λεπτομερειακή παρουσίασή τους αποτελεί μια διάβαση από το ΤΙ κάνει το σύστημα στο ΠΩΣ το κάνει.

5) *Σύγκριση με την πραγματικότητα*: Στο βήμα αυτό, τα νοητικά πρότυπα των σχετικών συστημάτων μεταφέρονται στον πραγματικό κόσμο και συγκρίνονται με αυτόν. Σκοπός της σύγκρισης είναι η συλλογή υλικού για την έναρξη ενός διαλόγου για το συγκεκριμένο των διαφορετικών απόψεων που υπάρχουν για την προβληματική κατάσταση και εκφράζονται από τα νοητικά πρότυπα. Ο Checkland [C81] αναφέρει διάφορες μεθόδους για την υλοποίηση αυτής της σύγκρισης που εξαρτώνται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της προβληματικής κατάστασης.

6) *Καθορισμός των εφικτών και επιθυμητών αλλαγών*: Το αποτέλεσμα του διαλόγου είναι ο καθορισμός ενός συνόλου αλλαγών που πρέπει να γίνουν για να βελτιωθεί η υπάρχουσα προβληματική κατάσταση. Οι αλλαγές που θα προσδιορισθούν πρέπει αφ' ενός να είναι επιθυμητές από τα μέλη του συστήματος και αφ' ετέρου να μπορούν να πραγματοποιηθούν.

7) *Υλοποίηση των αλλαγών*: Στο βήμα αυτό μεθοδεύεται η υλοποίηση των αλλαγών που προσδιορίστηκαν και απαιτούνται για τη βελτίωση της προβληματικής κατάστασης. Η πραγματοποίηση αυτών των αλλαγών οδηγεί σε μια νέα προβληματική κατάσταση η οποία πρέπει να αντιμετωπισθεί από την αρχή.

Συμπερασματικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μεθοδολογία των ευμετάβλητων συστημάτων είναι διπλά συστημική [C85], γιατί αφ' ενός είναι μια διαρκής διαδικασία μάθησης για ένα συγκεκριμένο σύστημα και αφ' ετέρου μέσα σε αυτή τη μεθοδολογία κατασκευάζει και χρησιμοποιεί μοντέλα συστημάτων. Το μειονέκτημά της είναι ότι ποτέ δεν παράγει οριστικές και τελικές λύσεις για τη βελτίωση της προβληματικής κατάστασης ενός συστήματος, αλλά δέχεται ότι η διαδικασία μάθησης και προβληματισμού για αυτό το σύστημα δεν τελειώνει ποτέ.

### **2.3 Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων**

Μετά τη συνοπτική περιγραφή των δύο προσεγγίσεων βγαίνει το συμπέρασμα ότι και οι δύο ασχολούνται με το ίδιο αντικείμενο δηλαδή τους Οργανισμούς, αν και προέρχονται από εντελώς διαφορετικούς επιστημονικούς χώρους. Πιο συγκεκριμένα μελετούν προβλήματα σχεδιασμού συστημάτων που μεταβάλλονται δυναμικά, προσαρμόζοντας μόνα τους την οργάνωση και τη συμπεριφορά τους στις εκάστοτε συνθήκες και προβληματικές καταστάσεις που αντιμετωπίζουν.

#### **2.3.1 Ομοιότητες**

Εξετάζοντας λεπτομερειακά τα χαρακτηριστικά των ανοικτών και των μαλακών συστημάτων προκύπτουν οι παρακάτω κοινές ιδιότητες:

- 1) *Ασχολούνται με Οργανισμούς που λειτουργούν συνέχεια.*
- 2) *Οι εργασίες των ανοικτών και των ευμετάβλητων συστημάτων εκτελούνται*

ταυτόχρονα και ασύγχρονα.

3) Υπάρχει αποκεντρωμένος έλεγχος.

4) Οι αποφάσεις παίρνονται χρησιμοποιώντας ασυνεπείς πληροφορίες.

5) Προσπαθούν να επιφέρουν ένα συγκερασμό στις αντίθετες απόψεις.

Συμπεραίνοντας οι πληροφορίες που διαθέτουν τα μέλη τόσο των ευμετάβλητων όσο και των ανοικτών συστημάτων δε θεωρούνται ποτέ πλήρεις και συνεπείς εξαιτίας της συνεχούς μεταβολής των ίδιων των συστημάτων και του περιβάλλοντός τους. Ειδικότερα η ασύγχρονη και συνεχής εισροή πληροφοριών εντείνει περισσότερο το πρόβλημα της λήψης αποφάσεων κάτω από καθεστώς αβεβαιότητας. Επίσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη ότι πολλές από τις εισερχόμενες πληροφορίες έχουν διφορούμενη σημασία, γεγονός που περιπλέκει περισσότερο τη διαδικασία λήψης απόφασης. Ωστόσο είναι αξιοσημείωτο ότι και οι δύο θεωρίες συμφωνούν στο ότι θα πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός για την απαλειφή τέτοιων ασυνεπειών [GS86] [H86] [C81]. Συγκεκριμένα στη θεωρία των ευμετάβλητων συστημάτων αυτό επιτυγχάνεται από τη διαρκή διαδικασία μάθησης που εφαρμόζει η αντίστοιχη μεθοδολογία, ενώ στη θεωρία των ανοικτών συστημάτων η απαλειφή των ασυνεπειών είναι στόχος της αρμόδιας διεργασίας. Τέλος είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι ο συγκερασμός των απόψεων επιτυγχάνεται και στις δύο θεωρίες με ανάλογο τρόπο: Πρώτα κατασκευάζεται ένα μοντέλο που εκφράζει μια άποψη (ή ένα μέρος του κόσμου) με τη μορφή μικροθεωρίας ή νοητικού προτύπου και μετά γίνεται ένας διάλογος με σκοπό τη διαπραγμάτευση και το συμβιβασμό των απόψεων.

### 2.3.2 Διαφορές

Το γεγονός ότι η θεωρία των ανοικτών συστημάτων προέρχεται από το χώρο της KTN, ενώ η θεωρία των ευμετάβλητων συστημάτων ανήκει στο χώρο της συστημικής σκέψης και θεωρίας, έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη σημαντικών διαφορών μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Η κυριότερη από αυτές είναι ότι η θεωρία των

ευμετάβλητων συστημάτων διαθέτει μια συγκεκριμένη μεθοδολογία - η οποία ορίζεται ως μια επαναληπτική διαδικασία διαρκούς απόκτησης γνώσεων γύρω από μια προβληματική κατάσταση - ενώ στη θεωρία των ανοικτών συστημάτων αν και έχουν διατυπωθεί τα χαρακτηριστικά τους και έχουν επινοηθεί διάφοροι μηχανισμοί και προποθέσεις για τη συγκέντρωση και το συγκερασμό των απόψεων των μελών τους, δεν υπάρχει μια γενικότερη μεθοδολογία που τα βήματά της να φανερώνουν τον τρόπο συγκέντρωσης και παραγωγής συνεπών και ορθών πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων. Υπενθυμίζεται μάλιστα ότι ορισμένοι ερευνητές [GS86] θεωρούν ότι η αντιμετώπιση των ασυνεπειών δε θα πρέπει να παραβλέπει ορισμένες εμπειρικές γνώσεις που εκφράζουν την ιδιαιτερότητα του κάθε συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι τα προβλήματα συμβιβασμού των διαφορετικών απόψεων σε ένα ανοικτό σύστημα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερους και ξεχωριστούς τρόπους.

### 2.3.3 Αρμόδια διεργασία και μεθοδολογία ευμετάβλητων συστημάτων

Στη σύγκριση που γίνεται δε θα πρέπει να παραληφθεί η αντιπαράθεση των χαρακτηριστικών της αρμόδιας διεργασίας (ΑΔ) και της μεθοδολογίας των ευμετάβλητων συστημάτων (ΜΕΣ). Γενικά θα μπορούσε να διατυπωθεί ότι μεταξύ τους υπάρχουν σημαντικές οντολογικές διαφορές εφ' όσον η πρώτη είναι ένα σύνολο ενεργειών που χρησιμοποιούν συγκεκριμένα εργαλεία και περιλαμβάνουν καθορισμένου είδους επικοινωνίες, ενώ η δεύτερη είναι μια μεθοδολογία (όχι μέθοδος) που δεν περιέχει συγκεκριμένες τεχνικές, ούτε χρησιμοποιεί ιδιαίτερους φορμαλισμούς. Ωστόσο στόχος και των δύο είναι η απόκτηση συνεπών γνώσεων για την κατάσταση ενός συγκεκριμένου Οργανισμού και ο συμβιβασμός των διαφορετικών απόψεων που υπάρχουν μεταξύ των μελών του και αφορούν τον Οργανισμό και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει. Ειδικότερα, μπορούν να εντοπισθούν οι εξής σημαντικές διαφορές:

1) Στην προσπάθεια αναπαράστασης των διαφορετικών απόψεων, η θεωρία των ανοικτών συστημάτων χρησιμοποιεί τις μικροθεωρίες και τη λογική συνεπαγωγή. Και τα δύο εργαλεία προέρχονται από το χώρο των μαθηματικών. Αντίθετα η θεωρία των ευμετάβλητων συστημάτων κατασκευάζει χωρίς ιδιαίτερους φορμαλισμούς τα νοητικά πρότυπα των σχετικών συστημάτων.

2) Η ΜΕΣ διακρίνει το τι συμβαίνει στην πραγματικότητα σε ένα ευμετάβλητο σύστημα από τις απόψεις που υπάρχουν για αυτό. Αυτός είναι άλλωστε ο λόγος της σύγκρισης και του ελέγχου της εγκυρότητας των νοητικών προτύπων σε σχέση με την πραγματικότητα. Κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στην ΑΔ, σύμφωνα με την οποία οι διαφορετικές απόψεις, που εκφράζονται από μικροθεωρίες οι οποίες είναι μοντέλα φυσικών (πραγματικών) και όχι νοητικών συστημάτων, συγκρίνονται μεταξύ τους. Επομένως στα ανοικτά συστήματα δεν υπάρχει μια έγκυρη συνολική εικόνα της υπάρχουσας κατάστασης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα μέλη τους λειτουργούν αποκεντρωμένα και ανεξάρτητα. Το μόνο που ερευνάται κατά πόσο μπορεί να επιτευχθεί - και έχει ήδη αναφερθεί ως το πρόβλημα της ΑΔ - είναι οι απόψεις (και επομένως και οι μικροθεωρίες που τις εκφράζουν) των μελών ενός ανοικτού συστήματος να είναι ορθές και να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

3) Κάθε επανάληψη της ΜΕΣ ολοκληρώνεται με τη λήψη και την υλοποίηση ορισμένων αποφάσεων. Αντίθετα η αρμόδια διεργασία αναλαμβάνει τη δημιουργία μιας συνεπούς βάσης πληροφοριών που θα χρησιμοποιηθεί από τα μέλη ενός ανοικτού συστήματος για να λάβουν ορισμένες αποφάσεις. Επομένως στην ΑΔ δεν προβλέπονται μηχανισμοί λήψης αποφάσεων, αλλά υπάρχουν μηχανισμοί εξαγωγής συμπερασμάτων οι οποίοι είτε προβλέπουν μια πιθανή απόφαση είτε αναλύουν το πώς πάρθηκε μια απόφαση και ποιές θα είναι οι συνέπειές της στον οργανισμό.



## 2.4 Συμπεράσματα

Το σημαντικότερο συμπέρασμα της παραπάνω σύγκρισης είναι ότι και οι δύο θεωρίες ασχολούνται με το ίδιο αντικείμενο που είναι οι Οργανισμοί. Κοινός στόχος τους είναι η βελτίωση είναι ο συμβιβασμός των απόψεων των μελών των οργανισμών και η παραγωγή συνεπών και κοινά αποδεκτών πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων. Στη μεν θεωρία των ευμετάβλητων συστημάτων ο συγκερασμός των απόψεων επιτυγχάνεται στα πλαίσια μιας διαρκώς επαναληπτικής μεθοδολογίας, ενώ τα ανοικτά συστήματα υιοθετούν μια αέναη διεργασία που είναι αρμόδια για την επίτευξη επικοινωνιών μεταξύ των μελών τους και στοχεύει στη συγκέντρωση και το συγκερασμό των αντικρουόμενων και αντιφατικών γνώσεών τους.

Η θεωρία των ανοικτών συστημάτων αντιμετωπίζει ένα σοβαρό πρόβλημα που αφορά την ορθότητα των πληροφοριών που λαμβάνονται υπ' όψη προκειμένου τα μέλη τους να λάβουν μια απόφαση. Σύμφωνα με τις τρέχουσες τάσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, οι γνώσεις των μελών των ανοικτών συστημάτων θα πρέπει να ελέγχονται και να τροποποιούνται από τοπικούς μηχανισμούς, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ορθότητα και η μεταφερίσιμότητά τους. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι οι γνώσεις αυτές όσο σωστές και να είναι, εκφράζουν μέρος μιας συνολικής κατάστασης. Επιπλέον, για τη σύγκρισή τους δε φτάνει μόνο να εξασφαλίζεται η ελάχιστη απόκλιση τους από την πραγματικότητα, αλλά θα πρέπει να υπάρχει και ένα μέτρο σύγκρισης. Το ζητούμενο μέτρο σύγκρισης δε μπορεί να είναι κανένα άλλο, εκτός από μια συνολική εικόνα της υπάρχουσας κατάστασης του συστήματος και των προβλημάτων που πρέπει να λύσει. Ωστόσο, με βάση την παραπάνω σύγκριση, η έννοια της συνολικής εικόνας της πραγματικότητας δε χρησιμοποιείται από την ΑΔ, αφού αυτή εστιάζει μόνο στη συγκέντρωση και τον συγκερασμό των αντιφατικών απόψεων.

Η ΜΕΣ όχι μόνο σχηματίζει μια συνολική εικόνα της πραγματικής κατάστασης που έχει να αντιμετωπίσει, αλλά υποστηρίζει ότι όλες οι απόψεις που υπάρχουν για την κατάσταση αυτή είναι μέρος αυτής της συνολικής εικόνας [C81]. Για το λόγο αυτό συγκρίνονται και τα συστημικά (νοητικά) μοντέλα των απόψεων με την πραγματικότητα. Επομένως η μεταφορά της ιδέας του σχηματισμού μιας συνολικής εικόνας της υπάρχουσας κατάστασης ενός ανοικτού συστήματος μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση του προβλήματος της ΑΔ, γιατί διευκολύνει τη σύγκριση των διαφορετικών απόψεων και γνώσεων των μελών του και συνεπώς προάγει το μεταξύ τους διάλογο για τη λήψη μιας ορθής απόφασης. Το νέο πρόβλημα που πρέπει να διερευνηθεί είναι το κατά πόσο μπορεί σε ένα ανοικτό σύστημα να υπάρχει και να διατηρείται μια ενιαία και συνολική εικόνα της πραγματικής κατάστασής του. Ωστόσο η διερεύνηση και επίλυση του προβλήματος αυτού δεν είναι μέσα στους σκοπούς αυτής της διατριβής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Τ Ο Π Ρ Ο Β Λ Η Μ Α Τ Η Σ Δ Ι Α Σ Π Α Σ Η Σ Ε Ρ Γ Α Σ Ι Ω Ν

#### 3.0 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, η διάσπαση εργασιών αποτελεί ένα βασικό παράγοντα που επιδρά στο σχηματισμό της συμπεριφοράς ενός ΣΚΕΠ. Ωστόσο στο ίδιο κεφάλαιο διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών (προβλημάτων), με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων που απαιτούνται για την επίλυσή τους, παραμένει ακόμα ανοικτό. Στόχοι του κεφαλαίου αυτού είναι:

- α) Η σαφής διατύπωση των υποθέσεων οι οποίες αποτελούν τη βάση για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος.
- β) Η περιγραφή του τρόπου κατασκευής μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού που περιγράφουν τη διαδικασία διάσπασης εργασιών.
- γ) Η μελέτη της πολύπλοκότητάς της διαδικασίας διάσπασης εργασιών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων και η κατάταξή της στην κατηγορία

των NP - πλήρη προβλημάτων.

Στη βιβλιογραφία ο όρος ελαχιστοποίηση των πόρων περιλαμβάνει αρκετές έννοιες όπως για παράδειγμα ελαχιστοποίηση του κόστους των επικοινωνιών μεταξύ των ειδικών [LC81], των απαιτήσεων για την εκτέλεση των επιμέρους εργασιών ή την ελαχιστοποίηση του κόστους που προκύπτει από την προσπάθεια για το συντονισμό των ενεργειών των ειδικών [GAS88]. Στη διατριβή αυτή με τον όρο ελαχιστοποίηση των πόρων εννοείται η ελαχιστοποίηση (α) του κόστους των επικοινωνιών των κόμβων του συστήματος και (β) του κόστους εκτέλεσης των εργασιών από τους κόμβους. Το κόστος εκτέλεσης απεικονίζει τη χρήση των πόρων του συστήματος από τις εργασίες και κυρίως την εμπειρία ενός κόμβου στην εκτέλεση μιας εργασίας. Με βάση την παραπάνω προσέγγιση οι γνώσεις των ειδικών θεωρούνται επικαλυπτόμενες, δηλαδή μια εργασία μπορεί να εκτελεσθεί από διάφορους ειδικούς. Ωστόσο υπάρχει μια διαβάθμιση της εμπειρίας του κάθε ειδικού στην εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας η οποία απεικονίζεται σαν ένα κόστος εκτέλεσης της εργασίας από τον συγκεκριμένο ειδικό.

### 3.1 Καθορισμός του προβλήματος

Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών μπορεί να ορισθεί συνοπτικά ως εξής:

Εστω ένα ΣΚΕΠ του οποίου οι έμπειροι (κόμβοι) μπορούν να εκτελούν ένα σύνολο εργασιών. Κάθε εργασία χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο απαιτούμενων δεδομένων και ένα σύνολο παραγόμενων αποτελεσμάτων και η εκτέλεσή της από ένα έμπειρο προϋποθέτει ένα κόστος (εκτέλεσης) το οποίο απεικονίζει το πόσο ειδικός είναι για την εκτέλεσή της. Ο έμπειρος που αναλαμβάνει την εκτέλεση μιας εργασίας

θα πρέπει να διαθέτει τα απαιτούμενα δεδομένα της και να μεταδώσει τα παραγόμενα αποτελέσματά της σε οποιουδήποτε άλλους εμπειρους, των οποίων οι εργασίες τα απαιτούν σαν δεδομένα. Η μετάδοση των αποτελεσμάτων από ένα κόμβο σε έναν άλλο γίνεται με ένα (συμμετρικό) κόστος επικοινωνίας.

Μια σύνθετη εργασία ή ένα πρόβλημα ανατίθεται στους κόμβους ενός ΣΚΕΠ με τη μορφή του ζεύγους των συνόλων (Σύνολο Αρχικών Δεδομένων, Σύνολο Επιθυμητών Αποτελεσμάτων) και θεωρείται ότι έχει λυθεί αν και μόνο αν οι κόμβοι εκτελέσουν κάποιες εργασίες των οποίων τα αποτελέσματα καλύπτουν το Σύνολο των Επιθυμητών Αποτελεσμάτων.

Η διαδικασία διάσπασης ενός προβλήματος με την παραπάνω μορφή, από ένα ΣΚΕΠ, θα προσδιορίσει:

- 1) Τις εργασίες που η εκτέλεσή τους θα παράγει τα επιθυμητά αποτελέσματα
- 2) Τους εμπειρους που θα τις εκτελέσουν και τη σειρά εκτέλεσής τους έτσι ώστε:
  - (α) Κάθε εργασία να λαμβάνει τα απαιτούμενα δεδομένα της είτε από τις εργασίες που προηγούνται, είτε από το σύνολο των αρχικών δεδομένων και
  - (β) Το συνολικό κόστος επικοινωνίας των εμπειρων και της εκτέλεσης των εργασιών να ελαχιστοποιείται.

Επομένως η διαδικασία της διάσπασης εργασιών στοχεύει στην κατάρτιση ενός σχεδίου δράσης (plan), που θα περιγράφει πώς οι ειδικοί ενός ΣΚΕΠ θα επιλύσουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, το οποίο έχει τη μορφή ενός ζεύγους (Σύνολο Αρχικών Δεδομένων, Σύνολο Επιθυμητών Αποτελεσμάτων), με τον οικονομικότερο τρόπο. Ορισμένοι από τους ερευνητές [G91], [HU87], [KR89]

απεικονίζουν το ζητούμενο σχέδιο δράσης σαν ένα κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα ή δένδρο που παριστάνει τη σειρά εκτέλεσης των εργασιών οι οποίες απαιτούνται για την επίλυση μιας σύνθετης εργασίας ή ενός προβλήματος.

Τελικά, η διάσπαση μιας σύνθετης εργασίας με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων του ΣΚΕΠ στο οποίο δόθηκε να επιλυθεί, έχει σαν αποτέλεσμα την κατασκευή ενός κατευθυνόμενου ακυκλικού γραφήματος. Το γράφημα αυτό έχει ως κόμβους ζεύγη της μορφής (εργασία, ειδικός), δηλαδή τις επιλεγμένες εργασίες που εξασφαλίζουν την επίλυση της δεδομένης σύνθετης εργασίας και τους αντίστοιχους ειδικούς του συστήματος στους οποίους θα εκτελεσθούν οι εργασίες αυτές και ακμές που θα απεικονίζουν τη σειρά εκτέλεσης των εργασιών έτσι ώστε το συνολικό κόστος:

- α) εκτέλεσης των εργασιών και
- β) των επικοινωνιών μεταξύ των ειδικών του συστήματος (δηλαδή το κόστος μεταφοράς των δεδομένων από και προς τους ειδικούς) να ελαχιστοποιείται.

Η απαίτηση για ακυκλικότητα στο ζητούμενο γράφημα εξασφαλίζει την απόκτηση των απαιτούμενων δεδομένων της κάθε εργασίας, που συμμετέχει στη λύση ενός προβλήματος. Είναι προφανές ότι η ύπαρξη κύκλου σε μια ομάδα κόμβων του γραφήματος δεν επιτρέπει σε καμία από τις εργασίες που ανήκουν στην ομάδα αυτή να εκτελεσθεί, αφού καμία από αυτές δε μπορεί να εξασφαλίσει όλα τα δεδομένα της.

Τελειώνοντας την αναλυτική περιγραφή της συγκεκριμένης θεώρησης του προβλήματος της διάσπασης εργασιών, παρατίθενται οι υποθέσεις που

υιοθετούνται από τη βιβλιογραφία και αφορούν τον τρόπο επίλυσής του:

1) Ένα πρόβλημα που πρέπει να λυθεί από ένα ΣΚΕΠ ανατίθεται σε ένα οποιοδήποτε κόμβο με τη μορφή ενός ζεύγους συνόλων (Σύνολο Αρχικών Δεδομένων, Σύνολο Επιθυμητών Αποτελεσμάτων).

2) Κάθε κόμβος που δέχεται ένα ένα πρόβλημα της παραπάνω μορφής, αναλαμβάνει συντονιστής (coordinator) και έχει τα εξής καθήκοντα:

α) Φροντίζει να μάθει από τους άλλους ειδικούς τα απαιτούμενα δεδομένα και τα αποτελέσματα τα οποία παράγουν οι εργασίες που αυτοί μπορούν να εκτελέσουν καθώς επίσης και άλλες πληροφορίες γύρω από τα υφιστάμενα κόστη εκτέλεσης των εργασιών και επικοινωνίας των ειδικών.

β) Εφαρμόζει τη διαδικασία διάσπασης του προβλήματος για να προσδιορίσει ποιά εργασία θα εκτελέσει κάθε ειδικός και πότε, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πόροι του συστήματος.

γ) Διαθέτει τα στοιχεία του Συνόλου των Αρχικών Δεδομένων σε οποιοδήποτε ειδικό τα απαιτεί, προκειμένου να εκτελεστούν κάποιες από τις εργασίες του.

δ) Συγκεντρώνει τα αποτελέσματα που παράγονται από τους ειδικούς και συνθέτει την τελική λύση του δοσμένου προβλήματος.

Συμπεραίνοντας, στη διατριβή αυτή υιοθετείται εκείνη η προσέγγιση σύμφωνα με την οποία η διάσπαση μιας εργασίας αναλαμβάνεται από ένα κόμβο, που είναι υποχρεωμένος να καταρτίσει ένα σχέδιο δράσης για όλους τους κόμβους του συστήματος [G91].

### 3.2 Ορισμοί

Από την παραπάνω περιγραφή του προβλήματος της διάσπασης εργασιών με κριτήριο

την ελαχιστοποίηση των πόρων βγαίνει το συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Για αυτό το λόγο ο μαθηματικός προγραμματισμός θεωρείται ότι είναι ένα κατάλληλο εργαλείο που η χρήση του βοηθά στην προσπάθεια της κατασκευής φορμαλιστικών μοντέλων που περιγράφουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Για την κατασκευή μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού απαιτούνται οι ακόλουθοι ορισμοί:

Εστω  $T = \{t_i, i = 1, 2, \dots, N\}$  το σύνολο των εργασιών και  $P = \{p_k, k = 1, 2, \dots, M\}$  το σύνολο των ειδικών ενός ΣΚΕΠ. Κάθε εργασία  $t_i$  για να εκτελεστεί απαιτεί ένα σύνολο δεδομένων,  $IN(t_i)$  και παράγει ένα σύνολο αποτελεσμάτων  $OU(t_i)$ . Τα στοιχεία των συνόλων  $IN(t_i)$  και  $OU(t_i)$  της κάθε εργασίας, χαρακτηρίζονται σαν στοιχεία γνώσης και ανήκουν σε ένα αλφάβητο  $A = \{A_q, q = 1, 2, \dots, Q\}$ , δηλαδή  $IN(t_i), OU(t_i) \subseteq A, i = 1, 2, \dots, N$ . Το σύνολο  $IN(t_j)$  της κάθε εργασίας  $t_j, j = 1, 2, \dots, N$  απεικονίζεται σαν ένα διάνυσμα  $\underline{m}_j$ , με  $Q$  στοιχεία, όπου το κάθε ένα έχει τιμές

$$m_{jq} = \begin{cases} 1, & \text{αν η } t_j \text{ απαιτεί το } A_q \text{ σαν δεδομένο} \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$

Παρόμοια μπορεί να απεικονισθεί και το σύνολο των αποτελεσμάτων  $OU(t_j)$  της κάθε εργασίας  $t_j$  από ένα διάνυσμα  $\underline{d}_j$ , με  $Q$  στοιχεία, όπου το κάθε ένα από αυτά έχει τιμές

$$d_{jq} = \begin{cases} 1, & \text{αν η } t_j \text{ παράγει το } A_q \text{ σαν αποτέλεσμα} \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$



Εστω OUT το σύνολο των επιθυμητών στοιχείων γνώσης που πρέπει να παραχθούν για να θεωρηθεί ένα δοσμένο πρόβλημα λυμένο από το ΣΚΕΠ. Το σύνολο αυτό μπορεί να απεικονισθεί από το διάνυσμα του οποίου τα στοιχεία  $v_q$  έχουν τιμές

$$v_q = \begin{cases} 1, & \text{αν το } A_q \text{ απαιτείται σαν αποτέλεσμα για την τελική λύση} \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$

Το κόστος εκτέλεσης της εργασίας  $t_i$  στον ειδικό  $p_k$  συμβολίζεται με  $E_{ik}$ . Τέλος έστω  $c_{jk}$  το κόστος επίτευξης ενός αμφίδρομου και άπειρου σε χωρητικότητα δεδομένων επικοινωνιακού καναλιού μεταξύ δύο ειδικών  $p_j$  και  $p_k$ . Το κόστος της επικοινωνίας θεωρείται συμμετρικό, δηλαδή  $c_{jk} = c_{kj}$ .

Για την κατασκευή του μοντέλου απαιτούνται οι εξής 0-1 μεταβλητές που απεικονίζουν τη λήψη ή όχι μιας απόφασης:

1) Εστω η μεταβλητή  $x_i$  για την οποία ισχύει:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{αν η } t_i \text{ απαιτείται για την επίλυση του δοσμένου προβλήματος} \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$

2) Εστω η μεταβλητή  $z_{ik}$  η οποία έχει τιμές

$$z_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{αν η εργασία } t_i \text{ θα εκτελεσθεί από τον ειδικό } p_k \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$

3) Έστω οι μεταβλητές  $y_{ij}$  για τις οποίες ισχύει

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν η } t_i \text{ προηγείται της } t_j \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$

Ο όρος "προηγείται" εννοείται ότι η  $t_i$  δίνει τα αποτελεσματα της στην  $t_j$ . Είναι φανερό ότι οι μεταβλητές αυτές χρησιμεύουν στην απεικόνιση της ζητούμενης σειράς εκτέλεσης των εργασιών που θα επιλεγθούν για τη λύση του δοσμένου προβλήματος.

4) Τέλος έστω η μεταβλητή  $w_{kl}$  η οποία έχει τιμές:

$$w_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{αν ο ειδικός } p_k \text{ θα επικοινωνήσει με τον ειδικό } p_l \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

### 3.3 Κατασκευή του μοντέλου

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς μπορούν να προσδιορισθούν οι περιορισμοί του ζητούμενου μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού ως εξής:

#### Περιορισμός 1

Κάθε εργασία που θα επιλεγθεί για τη λύση ενός δοσμένου προβλήματος θα πρέπει να εκτελείται μόνο μια φορά από ένα και μόνο ένα έμπειρο. Η συνθήκη αυτή εξασφαλίζεται από τον περιορισμό

$$\sum_k z_{ik} = x_i \quad \text{για όλα τα } i \quad (1)$$

### Περιορισμός 2

Οι εργασίες που θα επιλεγθούν θα πρέπει να παράγουν το σύνολο των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Αυτό εκφράζεται από τον περιορισμό

$$\sum_j d_{jq} x_j \geq v_q \quad \text{για όλα τα } q \quad (2)$$

### Περιορισμός 3

Οι εργασίες που θα επιλεγούν θα πρέπει να διαθέτουν τα απαιτούμενα δεδομένα τους προκειμένου να εκτελεστούν. Η απαίτηση αυτή εκφράζεται από τον περιορισμό

$$\sum_i d_{iq} y_{ij} \geq m_{jq} x_j \quad \text{για όλα τα } q, j \quad (3)$$

### Περιορισμός 4

Στο ζητούμενο μοντέλο θα πρέπει να υπάρχουν περιορισμοί οι οποίοι απαγορεύουν την ύπαρξη κυκλωμάτων στο γράφημα των εργασιών. Οι περιορισμοί αυτοί μπορούν να σχηματισθούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

#### Τρόπος 1

Ο τρόπος αυτός στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα απεικονίζει μια σχέση μερικής διάταξης (partial order). Επομένως το ζητούμενο γράφημα των εργασιών πρέπει να εκφράζει τις κύριες ιδιότητες μιας σχέσης μερικής διάταξης που είναι η αντισυμμετρική και η μεταβατική. Για την έκφραση αυτών των ιδιοτήτων ορίζεται η 0-1 μεταβλητή  $\theta_{ik}$  για την οποία ισχύει:

$$\theta_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{αν } y_{ij} = y_{jk} = 1 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

και επίσης

$$\theta_{ik} = \begin{cases} 1, \text{ αν } \theta_{ij} = y_{jk} = 1 \\ 0, \text{ διαφορετικά} \end{cases}$$

Για τον αποκλεισμό κυκλωμάτων μήκους δύο (δηλ. την έκφραση της αντισυμμετρικής ιδιότητας) πρέπει να υπάρχει ο περιορισμός:

$$y_{ij} + y_{ji} \leq 1 \quad (4\alpha)$$

Για την υλοποίηση της μεταβατικής ιδιότητας και συνεπώς τον αποκλεισμό κυκλωμάτων μήκους μεγαλύτερου του δύο απαιτούνται οι περιορισμοί:

$$\theta_{ij} + \theta_{ji} \leq 1 \quad (4\beta)$$

$$\theta_{ij} + y_{ji} \leq 1 \quad (4\gamma)$$

$$0 \leq y_{ij} + y_{jk} - 2\theta_{ik} \leq 1 \quad (4\delta)$$

$$0 \leq \theta_{ij} + y_{jk} - 2\theta_{ik} \leq 1 \quad (4\epsilon)$$

Για να αποδειχθεί ότι η παραπάνω ομάδα περιορισμών απαγορεύουν την ύπαρξη κυκλωμάτων σε ένα κατευθυνόμενο γράφημα πρέπει να αποδειχθούν οι παρακάτω προτάσεις:

**Πρόταση (ι)** Οι περιορισμοί δεν επιτρέπουν κύκλους στο γράφημα.

**Πρόταση (ii)** Οι περιορισμοί δεν απαγορεύουν την ύπαρξη εφικτών ακμών.

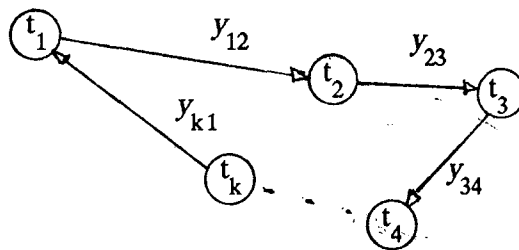
#### Απόδειξη

Όπως προαναφέρθηκε ο περιορισμός (4α) αποκλείει τα κυκλώματα μήκους δύο. Εστω ο κύκλος του σχήματος 3.1. Για αυτό τον κύκλο ισχύει  $y_{12} = y_{23}$ . Από τη δεξιά ανισότητα της σχέσης (4δ) συνεπάγεται ότι  $\theta_{13} = 1$ . Χρησιμοποιώντας την ανισότητα (4ε) βγαίνει το συμπέρασμα ότι  $\theta_{1k} = 1$ . Άρα η μεταβλητή  $y_{k1}$  δε μπορεί να είναι ίση με ένα εξ' αιτίας του περιορισμού (4β). Συνεπώς οι παραπάνω σχέσεις δεν επιτρέπουν την ύπαρξη κύκλων. Για την απόδειξη της πρότασης (ii) αρκεί να παρατηρηθεί ότι ο αποκλεισμός μιας ακμής  $y_{ki}$  γίνεται

αν οι αντίστοιχες μεταβλητές  $y_{ik}$  ή  $\theta_{ik}$  είναι ίσες με ένα. Η αριστερή ανισότητα των περιορισμών (4δ) και (4ε) εξασφαλίζει ότι:

$$\theta_{ik} = 1 \text{ αν } (y_{ij} + y_{jk} = 2) \text{ ή } (\theta_{ij} + y_{jk} = 2).$$

Δηλαδή αν μόνο μια από τις μεταβλητές  $y_{ij}$  και  $y_{jk}$  ή  $\theta_{ij}$  και  $\theta_{jk}$  είναι ίσες με ένα τότε οι αριστερές ανισώσεις των περιορισμών (4δ) και (4ε) εξασφαλίζουν ότι η μεταβλητή  $\theta_{ik}$  θα είναι ίση με μηδέν και επομένως επιτρέπουν την ισότητα  $y_{ki} = 1$ . Άρα οι παραπάνω περιορισμοί δεν επιτρέπουν την ύπαρξη μιας ακμής μόνο όταν αυτή μπορεί να προκαλέσει κύκλωμα στο γράφημα. ■



Σχήμα 3.1. Ένα τυχαίο κύκλωμα μεταξύ των εργασιών

## Τρόπος 2

Ένας πιο απλός τρόπος αποκλεισμού των κυκλωμάτων ο οποίος είναι και πιο αποδοτικός, γιατί δίνει λιγότερους περιορισμούς, θεωρεί τον πίνακα γειτνίασης (adjacency matrix)  $r$  του ζητούμενου γραφήματος των εργασιών και ορίζει τα στοιχεία του ως εξής:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν υπάρχει ακμή από την } t_i \text{ στην } t_j \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$

Ο αποκλεισμός των κυκλωμάτων εξασφαλίζεται από τους περιορισμούς:

$$r_{ij} \geq y_{ij} \quad \text{για όλα τα } i,j \quad (4\alpha)$$

$$r_{ik} + r_{kj} \leq 1 + r_{ij} \quad \text{για όλα τα } i,j,k \quad (4\beta)$$

$$r_{ii} = 0 \quad \text{για όλα τα } i \quad (4\gamma)$$

Ο πρώτος περιορισμός εξασφαλίζει ότι όταν η  $t_i$  προηγείται της  $t_j$ , τότε υπάρχει η ακμή  $r_{ij}$ . Με τον δεύτερο περιορισμό εξασφαλίζεται η απαίτηση για την ύπαρξη της μεταβατικής ιδιότητας (transitive closure) στο ζητούμενο γράφημα και με τον τρίτο αποκλείεται η ύπαρξη πιθανών κυκλωμάτων.

### Τρόπος 3

Ο τελευταίος εναλλακτικός τρόπος για την εξασφάλιση της ακυκλικότητας στο ζητούμενο γράφημα, είναι η χρήση της σχέσης του Tucker [W85]: Εστω οι πραγματικές μεταβλητές  $\pi_i$ ,  $i = 1,2,\dots,N$  που απεικονίζουν μια διάταξη του συνόλου εργασιών  $T$ . Η σχέση

$$\pi_i - \pi_j + N y_{ij} \leq N - 1 \quad \text{για όλα τα } i,j \quad (4'')$$

εγγυάται τον αποκλεισμό των κυκλωμάτων γιατί μια πιθανή ύπαρξη κύκλου οδηγεί στη λάθος σχέση

$$N \text{ (Μήκος κύκλου)} \leq (N-1) \text{ (Μήκος κύκλου)}$$

η οποία προκύπτει αν προστεθούν κατά μέλη οι περιορισμοί που προκύπτουν από την (4'') και περιέχουν τις εργασίες και συνεπώς τα  $y_{ij}$  που συμμετέχουν στον κύκλο.

### Περιορισμός 5

Ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει την επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ των ειδικών  $p_k$  και  $p_l$  όταν και μόνο όταν μια ή περισσότερες εργασίες που συμμετέχουν στη λύση ενός δοσμένου προβλήματος και εκτελούνται από τον ειδικό  $p_l$  αποκτούν όλα ή ένα μέρος των δεδομένων τους από τουλάχιστον μια εργασία που συμμετέχει και αυτή στην επίλυση του προβλήματος και εκτελείται από τον ειδικό  $p_k$ . Η συνθήκη αυτή εκφράζεται από τη σχέση

$$2 + w_{kl} \geq z_{ik} + z_{jl} + y_{ij} \quad \text{για όλα τα } i,j,k,l \quad (5)$$

Ανακεφαλαιώνοντας, το πρόβλημα απαιτεί εκτός από τη σειρά εκτέλεσης των εργασιών που θα επιλεγούν, την ανάθεσή τους στους έμπειρους έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος εκτέλεσης και επικοινωνίας. Το συνολικό κόστος εκτέλεσης δίνεται από τον όρο  $\sum_{i,k} E_{ik} z_{ik}$  και το συνολικό κόστος επικοινωνίας από τον όρο  $\sum_{i,k} c_{ik} w_{ik}$ . Επομένως το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών θεωρείται ότι έχει λυθεί όταν προσδιορισθούν τα  $w_{kl}$  και  $z_{ik}$  έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συνάρτηση

$$\sum_k \sum_l c_{kl} w_{kl} + \sum_i \sum_k E_{ik} z_{ik}$$

κάτω από τους περιορισμούς (1) - (5).

### 3.4. Μελέτη της πολυπλοκότητας του προβλήματος διάσπασης εργασιών

Το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών, έτσι όπως διαμορφώθηκε στις προηγούμενες

παραγράφους, περιέχει γνωστά NP-πλήρη προβλήματα ανάθεσης εργασιών, χρονοπρογραμματισμού και κάλυψης συνόλων (set cover). Είναι λοιπόν προφανές ότι θα ανήκει στην κλάση των NP-πλήρη προβλημάτων. Ωστόσο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εξέταση της πολυπλοκότητας ορισμένων ακραίων ειδικών περιπτώσεών του. Πιο συγκεκριμένα ας υποθεθεί ότι κάθε ειδικός μπορεί να εκτελέσει μόνο μια εργασία, χωρίς κάποιο κόστος εκτέλεσης. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι υπάρχουν μόνο κόστη επικοινωνίας μεταξύ των εργασιών. Επομένως πρέπει να αντιμετωπισθεί ένα νέο απλούστερο πρόβλημα (P1) που για τη λύση του απαιτείται η επιλογή ενός συνόλου εργασιών που θα παράγουν ένα σύνολο επιθυμητών αποτελεσμάτων και η σειρά εκτέλεσή τους θα είναι τέτοια ώστε κάθε εργασία να διαθέτει τα απαραίτητα δεδομένα της και να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος επικοινωνιών τους. Το πρόβλημα (P1) μπορεί να πάρει τη μορφή του ακόλουθου ακέραιου προγράμματος:

$$\min \sum_i \sum_j c_{ij} y_{ij}$$

με περιορισμούς

$$\sum_j d_{jq} x_j \geq v_q \quad \text{για όλα τα } q$$

$$\sum_i d_{iq} y_{ij} \geq m_{jq} x_j \quad \text{για όλα τα } j, q$$

$$r_{ij} \geq y_{ij} \quad \text{για όλα τα } i, j$$

$$r_{ik} + r_{kj} \leq 1 + r_{ij} \quad \text{για όλα τα } i, j, k$$

$$r_{ii} = 0 \quad \text{για όλα τα } i$$

$$x_i + x_j - 2y_{ij} \geq 0 \quad \text{για όλα τα } i, j$$

$$x, y, r \in \{0, 1\} \text{ μεταβλητές}$$

όπου ο τελευταίος περιορισμός εξασφαλίζει ότι δύο εργασίες  $t_i$  και  $t_j$  επικοινωνούν αν και μόνο αν έχουν επιλεγεί για τη λύση ενός προβλήματος.



Για να αποδειχθεί ότι το πρόβλημα (P1) είναι NP-πλήρες πρέπει να μορφοποιηθεί σαν ένα πρόβλημα αποφάσεως (decision problem) ως εξής:

**Δεδομένα:** Εστω ένα σύνολο εργασιών  $T = \{ t_i / i = 1,2,\dots,N \}$ . Για κάθε εργασία υπάρχει ένα σύνολο δεδομένων  $IN(t_i)$  και ένα σύνολο αποτελεσμάτων  $OU(t_i)$  με  $IN(t_i), OU(t_i) \subseteq A = \{ A_q / q = 1,2,\dots,Q \}$ . Επίσης για κάθε ζεύγος  $(t_i, t_j)$  υπάρχει ένα κόστος επικοινωνίας  $c_{ij}$ . Τέλος έστω ένα σύνολο αρχικών δεδομένων  $IN$ , ένα σύνολο επιθυμητών αποτελεσμάτων  $OUT$  ( $IN, OUT \subseteq A$ ) και ένας αριθμός  $K$ .

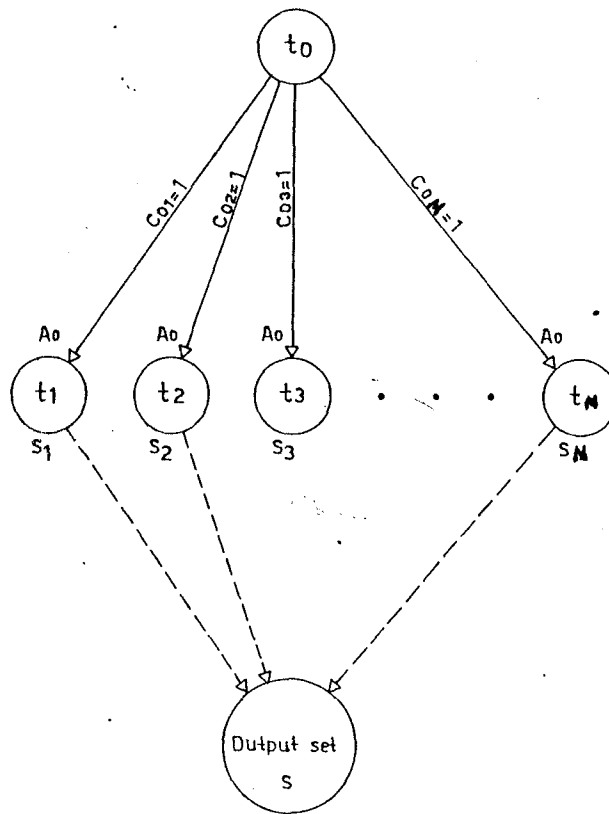
**Ερώτηση:** Υπάρχει ένα υποσύνολο από εργασίες τέτοιο ώστε τα αποτελέσματά τους να καλύπτουν το σύνολο  $OUT$  και η σειρά εκτέλεσής τους να είναι τέτοια ώστε (α) κάθε εργασία να αποκτά τα δεδομένα της από τις προηγούμενες της ή από το σύνολο  $IN$  και (β) το συνολικό κόστος επικοινωνιών τους να είναι μικρότερο του  $K$ ;

Το ακόλουθο θεώρημα αποδεικνύει την NP-πληρότητα του παραπάνω προβλήματος.

**Θεώρημα 1:** Το πρόβλημα (P1) είναι NP-πλήρες ακόμα και όταν τα  $c_{ij}$  είναι ίσα με μονάδα.

**Απόδειξη:** Δεδομένης μιας λύσης του (P1), μπορεί να διαπιστωθεί με απλή απρίθμηση αν αυτή πληρεί τις προϋποθέσεις του προβλήματος. Επομένως είναι προφανές ότι το πρόβλημα ανήκει στην κλάση NP. Για να δειχθεί η πληρότητά του, θα αποδειχθεί ότι περιλαμβάνει το πρόβλημα της ελάχιστης κάλυψης [GJ79] (minimum cover problem, MCP) σαν ειδική περίπτωση. Συνοπτικά το MCP διατυπώνεται ως εξής: Εστω τα υποσύνολα  $S_1, \dots, S_N$  ενός συνόλου  $S$  και ένας ακέραιος  $K$ . Υπάρχουν το πολύ  $K$  υποσύνολα  $S_i$  που η ένωσή τους είναι το  $S$ ; Για τη συγκεκριμένη αναγωγή έστω ότι  $S = A = OUT$ ,  $IN = \emptyset$  και έστω ότι υπάρχει μια αρχική εργασία  $t_0$  με  $IN(t_0) = IN$  και  $OU(t_0) = A_0$  όπου  $A_0 \in A$  είναι ένα επιπλέον στοιχείο γνώσης. Για τις υπόλοιπες εργασίες θεωρείται ότι  $IN(t_i) = A_0$ ,  $OU(t_i) = S_i$  και ότι υπάρχει μοναδιαίο κόστος για τις μεταξύ τους

επικοινωνίες. Συνεπώς ισχύει  $c_{0i} = 1$ . Είναι φανερό ότι το βέλτιστο κόστος για το (P1) είναι μικρότερο του  $K$  αν και μόνο αν υπάρχουν λιγότερες από  $K$  εργασίες που καλύπτουν το OUT, δηλαδή αν στο αντίστοιχο MCP το σύνολο  $S$  καλύπτεται από το πολύ  $K$  υποσύνολα  $S_i$ . Η παραπάνω κατασκευή φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Η κατασκευή για την απόδειξη της NP-πληρότητας του προβλήματος (P1)

### 3.5 Συμπεράσματα

Τα μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού που κατασκευάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, περιγράφουν την διαδικασία διάσπασης εργασιών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων. Το κυριώτερο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι το εν λόγω πρόβλημα είναι αρκετά δύσκολο, αφού η πιο απλή ειδική περίπτωση του

αποδείχθηκε ότι ανήκει στην κατηγορία των NP-πλήρη προβλημάτων. Επομένως δε θα πρέπει να αναμένεται η επινοήση μεθόδων που λύνουν το συγκεκριμένο πρόβλημα σε πολυωνυμικό χρόνο.

### Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

#### 4.0 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 στη συγκεκριμένη διατριβή θεωρείται ότι η διαδικασία διάσπασης μιας εργασίας εκτελείται από ένα κόμβο-συντονιστή ο οποίος πρέπει να καταρτίσει το βέλτιστο σχέδιο δράσης του συστήματος. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφοροι αλγόριθμοι διάσπασης εργασιών με τους οποίους πρέπει να είναι εφοδιασμένοι οι κόμβοι ενός ΣΚΕΠ, αφού οποιοσδήποτε από αυτούς μπορεί να αναλάβει συντονιστής κατά τη διάρκεια επίλυσης μιας εργασίας. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ένας ακριβής εκθετικός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος (P1). Η κύρια ιδέα στην οποία βασίζεται ο αλγόριθμος, θεωρεί το (P1) σαν ένα πρόβλημα εύρεσης του ελάχιστου μήκους μονοπατιού σε ένα κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα. Ο αλγόριθμος θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στο γενικό πρόβλημα της διάσπασης εργασιών αλλά το πλήθος των υπολογισμών που απαιτεί είναι πολύ μεγάλο. Για αυτό το λόγο προτείνεται

ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος χρησιμοποιώντας την τεχνική της συνάθροισης (aggregation) για την αντιμετώπιση του γενικού προβλήματος της διάσπασης εργασιών.

## 4.1 Ο ακριβής αλγόριθμος

### 4.1.1 Θεωρητική θεμελίωση του αλγορίθμου

Εστω ένα κατευθυνόμενο γράφημα  $G = (V, E)$ , με  $V$  το σύνολο των κόμβων του και  $E$  το σύνολο των ακμών του. Οι κόμβοι του γραφήματος θεωρούνται υποσύνολα του συνόλου των εργασιών  $T = \{t_i, i=1, \dots, N\}$ . Είναι προφανές ότι ο πληθάριθμος του συνόλου  $V$  είναι  $|V| = 2^N$ .

Οι ακόλουθοι ορισμοί αφορούν τις ακμές του γραφήματος και τις ιδιότητές τους:

1) Εστω  $OU(v)$  η ένωση των αποτελεσμάτων των εργασιών που ανήκουν σε ένα κόμβο  $v$ . Μια ακμή από ένα κόμβο  $v_1$  σε ένα άλλο κόμβο  $v_2$ , υπάρχει αν και μόνο αν ο  $v_2$  περιέχει όλες τις εργασίες του  $v_1$  και μια επιπρόσθετη εργασία  $\bar{t}$  της οποίας τα δεδομένα είναι υποσύνολα του  $OU(v_1)$ , δηλαδή:

$$(v_1, v_2) \in E \Leftrightarrow v_2 = v_1 \cup \bar{t} : \bar{t} \in T \text{ και } IN(\bar{t}) \subseteq OU(v_1)$$

Έτσι μια εργασία  $\bar{t}$  μπορεί να εκτελεσθεί μετά την εκτέλεση των εργασιών του κόμβου  $v_1$  και επομένως ένα μονοπάτι του γραφήματος  $G$  αντιστοιχεί σε μια σειρά εκτέλεσης ενός υποσυνόλου εργασιών. Ένα τέτοιο μονοπάτι μπορεί να θεωρηθεί σαν εφικτή λύση του προβλήματος (P1) αν αρχίζει από ένα κόμβο που τα δεδομένα των εργασιών που περιλαμβάνει περιέχονται στο σύνολο  $INP$  και καταλήγει σε ένα

κόμβο  $v$  που τα αποτελέσματα των εργασιών που περιλαμβάνει  $OU(v)$  περιέχουν τα επιθυμητά στοιχεία γνώσης  $OUT$ . Είναι προφανές ότι το γράφημα  $G$  είναι ακυκλικό και διαστρωματωμένο (layered). Κάθε επίπεδο ή στρώμα αντιστοιχεί στο πλήθος των εργασιών που περιλαμβάνουν οι κόμβοι αυτού του επιπέδου.

2) Σε κάθε ακμή  $e$  του γραφήματος μπορεί να καταχωρηθεί ένα βάρος  $w(e)$  που αντιστοιχεί στο επιπλέον κόστος επικοινωνίας που απαιτείται για την εκτέλεση της πρόσθετης εργασίας που ορίζεται από την ακμή. Για παράδειγμα αν  $e = (v_1, v_2)$  και η εργασία  $t_j$  είναι η πρόσθετη εργασία του  $v_2$ , τότε το βάρος της ακμής  $e$ ,  $w(e)$  είναι το ελάχιστο κόστος επικοινωνίας που απαιτείται για την απόκτηση των δεδομένων της  $t_j$  από κάποιες εργασίες  $t_i$  του κόμβου  $v_1$ , δηλαδή

$$w(e) = \min_{\substack{U \subseteq OU(t_i) \\ t_i \in v_1}} \sum_i c_{ij}$$

Είναι φανερό ότι ο υπολογισμός των  $w(e)$  αποτελεί ένα πρόβλημα ελάχιστης κάλυψης των  $IN(\bar{t})$ . Για αυτό το λόγο ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αναμένεται να λειτουργεί αποδοτικά για μικρό πλήθος δεδομένων των εργασιών.

#### 4.1.2 Περιγραφή του αλγορίθμου

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς, ο υπολογισμός της λύσης του (P1) ισοδυναμεί με την αναζήτηση του βραχύτερου μονοπατιού από τον πρώτο κόμβο (source node) του κατευθυνόμενου ακυκλικού γραφήματος  $G$  (δηλαδή τον κόμβο ο οποίος περιέχει το υποσύνολο των εργασιών που τα δεδομένα τους περιέχονται στο σύνολο  $INP$ ) στους κόμβους  $v$  για τους οποίους ισχύει  $OU(v) \supseteq OUT$ . Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί είναι παρόμοια με αυτή του αλγορίθμου του Dijkstra η οποία

θεωρείται πιο αποδοτική από αυτή του αλγορίθμου εύρεσης βραχύτερου μονοπατιού σε κατευθυνόμενα ακυκλικά γραφήματα [HS78], γιατί απαιτεί την εξέταση λιγότερων κόμβων του γραφήματος  $G$ . Η σημαντικότερη διαφορά του προτεινόμενου αλγορίθμου για τη λύση του προβλήματος της διάσπασης εργασιών, με το γνωστό αλγόριθμο του Dijkstra, έγκειται στο γεγονός ότι οι κόμβοι και οι ακμές του γραφήματος  $G$  προσδιορίζονται δυναμικά με την εξέλιξη του αλγορίθμου, ενώ ο αλγόριθμος του Dijkstra προσδιορίζει το μονοπάτι με το ελάχιστο μήκος ενός δεδομένου γραφήματος με προκαθορισμένα σύνολα κόμβων και ακμών.

Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος αρχίζει από ένα κόμβο  $v_0$  του  $G$  που περιέχει όλες τις εργασίες που τα δεδομένα τους ανήκουν στο σύνολο των αρχικών δεδομένων. Όπως και στον αλγόριθμο του Dijkstra το κόστος  $L$  του  $v_0$  θεωρείται ίσο με μηδέν,  $L(v_0) = 0$ . Αναδρομικά, δεδομένου ενός συνόλου κόμβων  $V' \subseteq V$  που έχουν λάβει  $L$ -τιμές υπολογίζονται τα κόστη  $L(v_i) + w_{ij}$  των κόμβων  $v_j$  που είναι γειτονικοί των κόμβων  $v_i$  του υποσυνόλου  $V'$  και ανατίθεται μια  $L$ -τιμή στον κόμβο με το ελάχιστο κόστος ο οποίος προστίθεται στο σύνολο  $V'$ . Ο αλγόριθμος σταματά όταν υπάρχει κάποιος κόμβος  $v$  στο  $V'$  με  $OU(v) \geq OUT$ .

Αναλυτικά ο αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$v_0 := \{ t_i/t_i \in T: IN(t_i) \leq INP \};$

$L_0 := 0;$

$V' := v_0;$

$INP := INP \cup OU(v_0);$

$T' := \emptyset$

**if**  $OUT \leq INP$  **then**

**repeat**

(\* για όλους τους  $v_k \in V'$  προσδιόρισε τους γειτονικούς κόμβους  $v_j$  και τα αντίστοιχα κόστη τους  $b_j$  \*)

**while** ( $\exists t_i \in T - v_k : IN(t_i) \subseteq INP, v_k \in V'$ ) **do**

**begin**

$v_j := v_k \cup t_i;$

**if**  $v_j \in T'$  **then**

**begin**

$T' := T' \cup v_j;$

$b_j := w_{kj} + L_k$

**end**

**else**

**begin**

$nb := w_{kj} + L_k;$

**if**  $nb < b_j$  **then**  $b_j := nb$

**end**

**end;**

(\* προσδιόρισε τον κόμβο  $v_s$  με το ελάχιστο κόστος  $b_s$ , δώσε του μια  $L$ -τιμή και εισάγαγέ τον στο σύνολο  $V'$  \*)

$L_s := \min (b_j);$

$V' := V' \cup v_s;$

$INP := INP \cup \bigcup_{t_i \in v} OU(t_i)$

$T' := \emptyset;$

**until** ( $INP \geq OUT$ )

**end** (\* αλγορίθμου επίλυσης του προβλήματος (P1) \*).



## 4.2 Ένας ευρετικός αλγόριθμος

Ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λύση του γενικού προβλήματος της διάσπασης εργασιών, το οποίο απαιτεί επιπλέον και τη βέλτιστη ανάθεση των εργασιών στους ειδικούς. Για την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου δίνονται οι ακόλουθοι ορισμοί:

- 1) Η ανάθεση μιας εργασίας  $t_i$  στον έμπειρο  $p_k$  μπορεί να συμβολισθεί από το ζεύγος  $(t_i, p_k)$ .
- 2) Εστω ένα γράφημα  $G_1 = (V_1, E_1)$  του οποίου οι κόμβοι αντιστοιχούν στην ανάθεση ενός υποσυνόλου εργασιών σε έμπειρους, δηλαδή ένας κόμβος  $v$  είναι μια συλλογή από ζεύγη  $(t_i, p_k)$ , με διαφορετικά  $t_i$ .
- 3) Μια ακμή από τον κόμβο  $v_1$  στον κόμβο  $v_2$  υπάρχει αν και μόνο αν ο  $v_2$  περιλαμβάνει τα ζεύγη του  $v_1$  και ένα ακόμη ζεύγος  $(\bar{t}, \bar{p})$  όπου τα δεδομένα της  $\bar{t}$  περιλαμβάνονται στην ένωση των αποτελεσμάτων των εργασιών του  $v_1$ .
- 4) Το βάρος της ακμής  $(v_1, v_2)$  είναι το επιπλέον κόστος επικοινωνίας και εκτέλεσης της  $\bar{t}$  στον  $\bar{p}$ , με δεδομένη τη σειρά εκτέλεσης και την ανάθεση των εργασιών στον κόμβο  $v_1$ .

Και σε αυτή την περίπτωση ένα μονοπάτι στο  $G_1$  αντιστοιχεί σε μια εφικτή ανάθεση και σειρά εκτέλεσης ενός υποσυνόλου εργασιών, ενώ το μικρότερο μονοπάτι από τον αρχικό κόμβο στον τελικό καθορίζει τη βέλτιστη λύση. Ωστόσο η χρήση ενός τέτοιου αλγορίθμου δε θεωρείται αποδοτική αφού το πλήθος των κόμβων του γραφήματος  $G_1$  είναι  $(1 + M)^N$ , όπου  $M$  το πλήθος των εμπειρών και  $N$  το πλήθος των εργασιών.

Ενας προσεγγιστικός αλγόριθμος για την εύρεση του παραπάνω μικρότερου μονοπατιού μπορεί να επινοηθεί χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SADA (Sequential Aggregation Disaggregation Algorithm) των Bean, Birge και Smith [BBS87] που βασίζεται στην τεχνική της ομαδοποίησης (aggregation). Οι παραπάνω ερευνητές εξετάζουν προβλήματα εύρεσης ελάχιστου μονοπατιού σε μεγάλα κατευθυνόμενα ακυκλικά γραφήματα, χωρίζοντας τους κόμβους σε ξένες μεταξύ τους ομάδες (σύνολα κόμβων) που ονομάζονται **μακροκόμβοι** (macronodes). Η εύρεση του ελάχιστου μήκους μονοπατιού στο νέο γράφημα των μακροκόμβων δίνει μια προσεγγιστική λύση στο αρχικό πρόβλημα. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι παρέχει ένα φράγμα σφάλματος (error bound) από τη βέλτιστη λύση.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα εύρεσης ελάχιστου μονοπατιού στο γράφημα  $G_1$ , το κριτήριο ομαδοποίησης είναι η συνάθροιση όλων των κόμβων που αντιστοιχούν στις διαφορετικές αναθέσεις ενός συγκεκριμένου υποσυνόλου εργασιών. Με αυτό το σκεπτικό για κάθε υποσύνολο εργασιών υπάρχει ένας μόνο κόμβος και επομένως το πρόβλημα εκφυλίζεται στο να βρεθεί βραχύτερο μονοπάτι σε ένα γράφημα ισομορφικό του  $G$  (δηλαδή του γραφήματος που δημιουργείται για την επίλυση του προβλήματος (P1)). Η χρήση του SADA είναι πιο αποδοτική από την υιοθέτηση της προηγούμενης προσέγγισης για την επίλυση του γενικού προβλήματος διάσπασης εργασιών, γιατί εξετάζει ένα γράφημα με το πολύ  $2^N$  κόμβους.

Η λειτουργία του SADA για το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί αναδρομικά ως εξής:

- 1) Εστω ένα σύνολο κόμβων  $V'$  για το οποίο
  - (α) για κάθε κόμβο έχουν υπολογισθεί L-τιμές (όπως και στον αλγόριθμο του Dijkstra) και
  - (β) οι εργασίες του κάθε κόμβου έχουν ανατεθεί σε συγκεκριμένους

έμπειρους.

2) Για τους κόμβους του  $V'$  προσδιορίζονται οι γειτονικοί τους κόμβοι όπου για κάθε έναν προσδιορίζεται μόνο ο έμπειρος που θα αναλάβει την εκτέλεση της επιπλέον εργασίας (που ορίζεται από τη συγκεκριμένη ακμή του γραφήματος) έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το άθροισμα του κόστους επικοινωνίας και εκτέλεσής της.

3) Το άθροισμα αυτό προστίθεται στην L-τιμή του προηγούμενου κόμβου για να προσδιορισθεί το κόστος του εξεταζόμενου κόμβου, όπως ακριβώς στον αλγόριθμο του Dijkstra.

4) Ο κόμβος με το μικρότερο κόστος προστίθεται στο σύνολο  $V'$  και αποκτά μια L-τιμή ίση με το κόστος του, ενώ η επιπλέον εργασία του ανατίθεται στον έμπειρο στον οποίο αντιστοιχεί η νέα L-τιμή.

Ο αλγόριθμος ξεκινά από ένα κόμβο, όπου τα δεδομένα των εργασιών που περιλαμβάνει είναι υποσύνολα του συνόλου των αρχικών δεδομένων. Οι εργασίες αυτές ανατίθενται στους έμπειρους στους οποίους ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος εκτέλεσής τους. Τέλος, ο αλγόριθμος τερματίζει όταν στο σύνολο  $V'$  εισαχθεί κόμβος τέτοιος ώστε τα αποτελέσματα των εργασιών του καλύπτουν το σύνολο OUT.

Για τον υπολογισμό του φράγματος σφάλματος από τη βέλτιστη λύση αποδεικνύεται η ακόλουθη πρόταση:

**Πρόταση 4.1:** Το φράγμα απόκλισης που δίνει η εφαρμογή του αλγορίθμου SADA είναι ίσο με το μέγιστο μονοπάτι στο γράφημα  $G$  όταν τα βάρη των ακμών του είναι ίσα με:

$$\rho_{V_1 V_2} = \max_{V_1} \min_{V_2} \bar{c}_{ij} - \min_{V_1} \min_{V_2} \bar{c}_{ij}$$

όπου  $V_1$  είναι το σύνολο των δυνατών αναθέσεων των εργασιών του κόμβου  $v_1$ , (δηλ. ο μακροκόμβος  $V_1$ ),  $V_2$  οι δυνατές αναθέσεις της επιπλέον εργασίας  $\bar{t}_j$  στον  $v_2$ , και  $\bar{c}_{ij}$  είναι το συνολικό κόστος επικοινωνίας και εκτέλεσης της  $\bar{t}_j$ .

**Απόδειξη:** Εστω ότι ο όρος  $\min_{V_2} \bar{c}_{ij}$  συμβολίζει το ελαχιστο κόστος επικοινωνίας

και εκτέλεσης της επιπλέον εργασίας  $\bar{t}_j = v_2 - v_1$  που επιτυγχάνεται αν είναι δοσμένη μια τυχαία ανάθεση των εργασιών του κόμβου  $v_1$ . Συνεπώς ο όρος  $\min_{V_1} \min_{V_2}$

$\bar{c}_{ij}$  δίνει το ελάχιστο δυνατό κόστος εκτέλεσης και επικοινωνίας της εργασίας  $\bar{t}_j$  που μπορεί να επιτευχθεί, δεδομένου ότι προηγούνται οι εργασίες  $t_i$  του κόμβου  $v_1$ . Παρόμοια ο όρος  $\max_{V_1} \min_{V_2} \bar{c}_{ij}$  εκφράζει το μεγαλύτερο δυνατό κόστος

επικοινωνίας και εκτέλεσης της  $\bar{t}_j$  δεδομένου ότι προηγούνται οι εργασίες που περιλαμβάνει ο κόμβος  $v_1$ . Επομένως αν το βέλτιστο μονοπάτι περνά από τους μακροκόμβους  $V_1$  και  $V_2$  τότε η ισότητα

$$\rho_{V_1 V_2} = \max_{V_1} \min_{V_2} \bar{c}_{ij} - \min_{V_1} \min_{V_2} \bar{c}_{ij}$$

δίνει το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να συμβεί από τη μετάβαση από τον  $V_1$  στον  $V_2$ . Με βάση τους Bean, Birge και Smith [BBS87] η απόκλιση από τη βέλτιστη τιμή που παρέχει ο SADA είναι το μεγαλύτερο άθροισμα των μέγιστων αποκλίσεων όλων των εφικτών μονοπατιών του γραφήματος  $G$ , το οποίο υπολογίζεται αν προσδιορισθεί το μεγαλύτερο μονοπάτι του  $G$ , με βάρη ακμών τα  $\rho_{V_1 V_2}$ . ■

### 5.3 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών εξομοιώθηκε με το πρόβλημα εύρεσης βραχύτερου μονοπατιού σε κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα, χωρισμένο σε επίπεδα. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε αποτελεί μια τροποποίηση του αλγόριθμου του Dijkstra. Η επιλογή αυτής της διαδικασίας βασίστηκε στην παρατήρηση ότι δεν απαιτείται ο υπολογισμός του κόστους (L-τιμών) όλων των κόμβων του επιπέδου που εξετάζεται κάθε φορά. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός του βάρους της κάθε ακμής του γραφήματος  $G$ , απαιτεί την επίλυση ενός προβλήματος ελάχιστης κάλυψης (minimum cover problem), γεγονός που επιβαρύνει την απόδοση του αλγορίθμου όταν οι εργασίες έχουν μεγάλα σύνολα δεδομένων.

Τέλος, η υιοθέτηση της τεχνικής της ομαδοποίησης (aggregation) για την προσεγγιστική επίλυση του γενικού προβλήματος της διάσπασης εργασιών έχει σαν αποτέλεσμα αφ' ενός τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου και αφ' ετέρου την παροχή υπολογισμών αποκλίσεων από την βέλτιστη λύση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

#### 5.0 Γενικά

Στα προηγούμενα κεφάλαια αποδείχθηκε ότι η σημαντικότερη δυσκολία του προβλήματος της διάσπασης εργασιών, πηγάζει από την απαίτηση της κάλυψης τόσο των συνόλων των δεδομένων των εργασιών, όσο και του συνόλου των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Ένα ενδιαφέρον πρόβλημα αναδύεται αν αντικατασταθεί η στηριζόμενη στα στοιχεία γνώσης περιγραφή του προβλήματος με την υπόθεση ότι τα δεδομένα και τα αποτελέσματα τόσο των εργασιών, όσο και του προβλήματος που πρέπει να λύσει ένα ΣΚΕΠ εκφράζονται από συγκεκριμένες ποσότητες πληροφορίας. Συγκεκριμένα, γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει ένα αριθμητικό (ποσοτικό) μέτρο της πληροφορίας και ότι η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος ολοκληρώνεται όταν παραχθεί ένα καθορισμένο ποσό πληροφοριών.

Παρόμοια, κάθε εργασία για να εκτελεσθεί πρέπει να διαθέτει ένα συγκεκριμένο πλήθος στοιχείων γνώσης και όταν η εκτέλεσή της ολοκληρωθεί, παράγει νέες μονάδες πληροφορίας. Στην περίπτωση αυτή κάθε εργασία  $t_i$  θα περιγράφεται από δύο ακέραιους  $I_i$  και  $O_i$  που συμβολίζουν αντίστοιχα, το απαιτούμενο ποσό πληροφοριών που απαιτεί και παράγει η  $t_i$ . Η αρχική πληροφορία που δίνεται για την επίλυση ενός προβλήματος είναι  $\Gamma$  μονάδες, ενώ το πρόβλημα θεωρείται λυμένο όταν παραχθούν συνολικά  $\Phi$  μονάδες πληροφορίας.

Είναι φανερό ότι αυτό το πρόβλημα είναι πιο απλό από το γενικό πρόβλημα της διάσπασης εργασιών, αφού η δυσκολία της ελάχιστης κάλυψης των συνόλων των δεδομένων των εργασιών και του συνόλου των επιθυμητών αποτελεσμάτων καταργείται. Αν και το νέο πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί μια πολύ ακραία περίπτωση, ωστόσο η ενασχόληση με αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί τα αποτελέσματα που εξάγονται θεμελιώνουν την άποψη ότι το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα που απαιτεί ειδικές μεθόδους αντιμετώπισης και επίλυσης.

### 5.1 Διαμόρφωση και μελέτη της πολυπλοκότητας του προβλήματος

Αν εκτός τις παραπάνω υποθέσεις, θεωρηθεί ότι κάθε έμπειρος ενός ΣΚΕΠ γνωρίζει να εκτελεί μόνο μια εργασία (δηλαδή κάθε εργασία εκτελείται από ένα και μόνο ένα έμπειρο), χωρίς να επιβαρύνεται με κάποιο κόστος εκτέλεσης και ότι ζητείται η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους επικοινωνίας μεταξύ των εργασιών, το ακόλουθο ακέραιο πρόγραμμα (P2) αποτελεί μια ειδική περίπτωση του προβλήματος (P1) και συνεπώς και του γενικού προβλήματος διάσπασης εργασιών:

$$\min \sum_i \sum_j c_{ij} y_{ij}$$

έτσι ώστε

$$\sum_i O_i x_i \geq \Phi \quad \text{για όλα τα } i$$

$$\sum_i O_i y_{ij} \geq I_j x_j \quad \text{για όλα τα } i, j$$

$$x_i + x_j - 2y_{ij} \geq 0 \quad \text{για όλα τα } i, j \quad (P2)$$

$$r_{ij} \geq y_{ij} \quad \text{για όλα τα } i, j$$

$$r_{ik} + r_{kj} \leq 1 + r_{ij} \quad \text{για όλα τα } i, j, k$$

$$r_{ii} = 0 \quad \text{για όλα τα } i$$

$x, y, r$  0,1 μεταβλητές

Αν και το πρόβλημα (P2) είναι απλούστερο από το πρόβλημα (P1) που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, δε μπορεί να υποστηριχθεί ότι είναι πιο εύκολο. Αυτό αποδεικνύεται από το ακόλουθο θεώρημα:

**Θεώρημα 2:** Το πρόβλημα (P2) είναι NP-Hard.

**Απόδειξη:** Θα δειχθεί ότι το γνωστό πρόβλημα του σακκιδίου [GJ79] σε μορφή ελαχιστοποίησης είναι μια ειδική περίπτωση του (P2). Συγκεκριμένα στο πρόβλημα του σακκιδίου υπάρχουν  $N$  αντικείμενα με βάρη  $\beta_i$  και αξίες  $\alpha_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  και εξετάζεται η δυνατότητα επιλογής ενός υποσυνόλου αντικειμένων με συνολική αξία μικρότερη ή ίση του  $V$  και συνολικό βάρος μεγαλύτερο ή ίσο του  $W$ . Εστω μια περίπτωση του (P2) όπου υπάρχουν οι εργασίες  $t_0, t_1, \dots, t_N$ . Η εργασία  $t_0$  έχει  $I_0 = 0$ ,  $O_0 = 1$ . Οι υπόλοιπες εργασίες  $t_1, \dots, t_N$  έχουν  $I_i = 1$ ,  $O_i = \beta_i$ . Οι αρχικές πληροφορίες  $\Gamma$  θεωρούνται ίσες με 0 ενώ το επιθυμητό



πλήθος πληροφοριών  $\Phi$ , που πρέπει να παραχθεί είναι ίσο με  $W$ . Τέλος έστω  $c_{0i} = a_i$  ενώ τα κόστη επικοινωνίας  $c_{ij}$  μεταξύ των υπόλοιπων εργασιών θεωρούνται ίσα με ένα μεγάλο ακέραιο.

Με βάση αυτή την κατασκευή είναι προφανές ότι θα πρέπει να επιλεγούν εκτός της  $t_0$  εκείνες οι εργασίες  $t_i$  για τις οποίες ισχύει:

$$\sum_i c_{0i} = \sum_i a_i \leq V \quad \text{και} \quad \sum_i O_i = \sum_i \beta_i \geq W$$

Δηλαδή το συγκεκριμένο παράδειγμα του (P2) λύνεται αν και μόνο αν το πρόβλημα του σακκιδίου έχει λύση ■

Το επόμενο θεώρημα επεκτείνει το παραπάνω αποτέλεσμα υποστηρίζοντας ότι ακόμα και οι πιο απλούστερες περιπτώσεις του προβλήματος (P2) ανήκουν στην κλάση των NP-πλήρη προβλημάτων.

**Θεώρημα 3:** Το πρόβλημα (P2) είναι NP-Hard ακόμα και αν τα κόστη επικοινωνίας  $c_{ij}$  είναι ίσα με μονάδα.

**Απόδειξη:** Αν υποθεθεί ότι τα κόστη επικοινωνίας μεταξύ των εργασιών είναι ίσα με μονάδα, τότε η λύση του (P2) θα είναι η επιλογή ενός υποσυνόλου εργασιών και η κατασκευή ενός κατευθυνόμενου ακυκλικού γραφήματος με κόμβους το υποσύνολο των εργασιών και το λιγότερο δυνατό πλήθος ακμών, με την προϋπόθεση ότι κάθε εργασία θα αποκτά το απαιτούμενο πλήθος των δεδομένων της.

Θαδειχθεί ότι το πρόβλημα του 3-διαχωρισμού (3-partition problem) [GJ79] είναι ειδική περίπτωση του (P2). Εστω ένα τυπικό παράδειγμα του προβλήματος του 3-διαχωρισμού, δηλαδή  $3N$  αντικείμενα  $a_i$ ,  $i=1, \dots, 3N$  με βάρη  $s(a_i)$  και

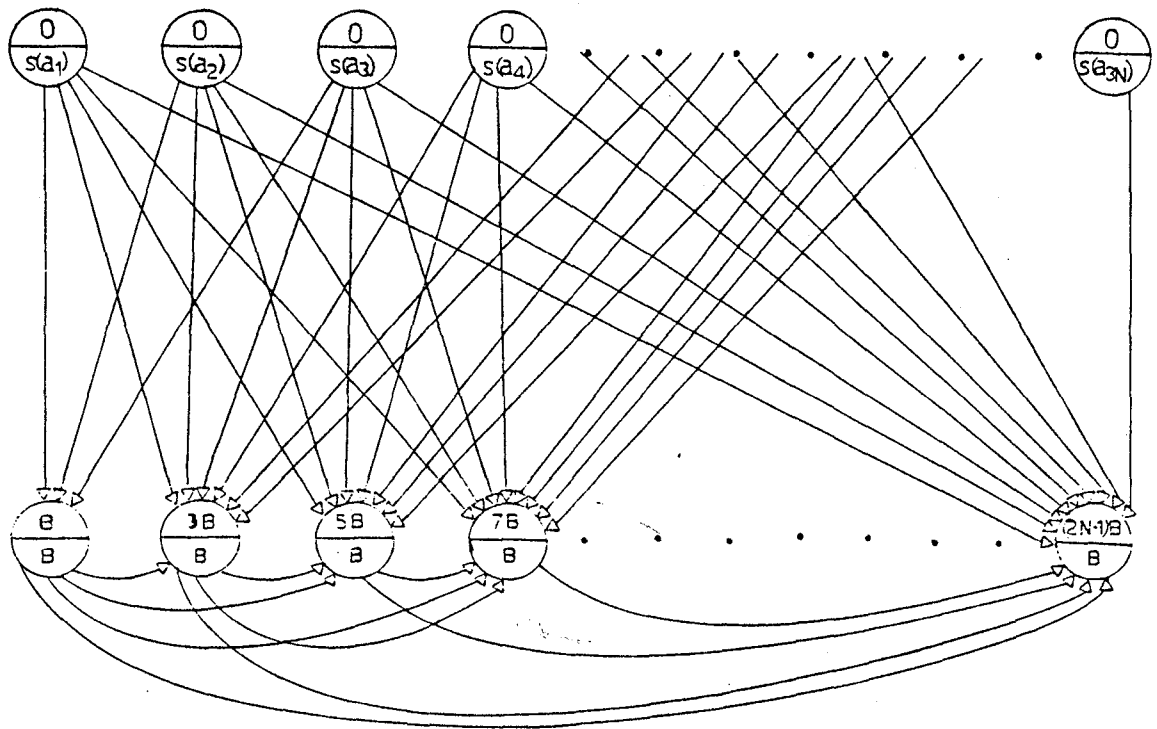
έναν θετικό ακέραιο  $B$ , τέτοιος ώστε  $B/4 < s(a_i) < B/2$  και  $\sum_i a_i = NB$ . Για τη λύση αυτού του προβλήματος θα πρέπει να προσδιορισθούν  $N$  τριάδες από τα  $a_i$ ,  $A_j = \{a_{j1}, a_{j2}, a_{j3}\}$ ,  $j = 1, \dots, N$  τέτοιες ώστε  $s(a_{j1}) + s(a_{j2}) + s(a_{j3}) = B$ .

Ο πολυωνυμικός μετασχηματισμός αυτού του προβλήματος σε ένα παράδειγμα του (P2) με  $c_{ij} = 1$ , γίνεται με την ακόλουθη κατασκευή:

Εστω μια πρώτη ομάδα από  $3N$  εργασίες  $t_i$  τέτοιες ώστε  $I_i = \Gamma = 0$ ,  $O_i = s(a_i)$ , με  $\sum_i s(a_i) = NB$  και  $B/4 < s(a_i) < B/2$ . Εστω μια δεύτερη ομάδα από  $N$  ακόμα εργασίες  $\bar{t}_j$ ,  $j = 1, \dots, N$  για τις οποίες  $I_{\bar{t}_j} = (2j - 1)B$  και  $O_{\bar{t}_j} = B$ . Τέλος έστω ότι  $\Phi = 2NB$ . Η παραπάνω κατασκευή φαίνεται στο σχήμα 5.1. Εξ' αιτίας του γεγονότος  $B/4 < s(a_i) < B/2$ , η εργασία  $\bar{t}_1$  απαιτεί τα αποτελέσματα τουλάχιστον τριών εργασιών της πρώτης ομάδας. Η  $\bar{t}_2$  απαιτεί δεδομένα ίσα με  $3B$  μονάδες από τα οποία αποκτά τα  $B$  από την  $\bar{t}_1$  και τα υπόλοιπα από την προηγούμενη τριάδα που έδωσε τα αποτελέσματά της στην  $\bar{t}_1$  και επιπλέον από τουλάχιστον μια τριάδα της πρώτης ομάδας. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις υπόλοιπες εργασίες της δεύτερης ομάδας  $\bar{t}_3, \dots, \bar{t}_N$ . Σε αυτή την περίπτωση το ζητούμενο ελάχιστο πλήθος ακμών είναι  $2N^2 + N$  και μπορεί να επιτευχθεί αν και μόνο αν μπορούν να σχηματισθούν  $N$  τριάδες από την πρώτη ομάδα εργασιών τέτοιες ώστε το άθροισμα των αποτελεσμάτων της κάθε τριάδας να είναι ίσο με  $B$ , δηλαδή αν και μόνο αν μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα του 3-διαχωρισμού ■

**Παρατήρηση:** Το πρόβλημα (P2) παραμένει NP-πλήρες ακόμα και αν δεν υπάρχει ο περιορισμός της ακυκλικότητας δηλαδή αν ζητείται η κατασκευή κατευθυνόμενου γραφήματος εργασιών, με τις λιγότερες ακμές αλλά όχι απαραίτητα ακυκλικού. Η απόδειξη στηρίζεται στον πολυωνυμικό μετασχηματισμό του προβλήματος του 3-διαχωρισμού σε μια ειδική περίπτωση του (P2) και είναι παρόμοια με αυτή του

θεωρήματος 3.



Σχήμα 5.1. Η κατασκευή για την απόδειξη της NP-πληρότητας του προβλήματος (P2)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση μιας διαφορετικής θεώρησης του προβλήματος της διάσπασης εργασιών που συναντιέται στην υπάρχουσα βιβλιογραφία [HU87], [GY91]. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση οι έμπειροι γνωρίζουν τους εναλλακτικούς τρόπους απόκτησης των δεδομένων των εργασιών που εκτελούν. Αυτό οφείλεται είτε στη διάδοση των γνώσεων του κάθε έμπειρου γύρω από το τι στοιχεία γνώσης απαιτούν και παράγουν οι εργασίες που είναι ικανός να εκτελεί, είτε από μια ισχύουσα ιεραρχική οργάνωση των εργασιών. Δεδομένου ενός προβλήματος της

μορφής (INP,OUT) ή (Γ,Φ) σε ένα ΣΚΕΠ, οι υπάρχοντες εναλλακτικοί τρόποι επίλυσης του μπορούν να απεικονισθούν από ένα AND/OR γράφο με κόμβους τις εργασίες που πρέπει να εκτελεστούν και ακμές που θα εκφράζουν τους διάφορους τρόπους απόκτησης των δεδομένων τους. Σαν αρχικός κόμβος αυτού του γραφήματος χαρακτηρίζεται το υποσύνολο των εργασιών των οποίων τα δεδομένα ανήκουν στο σύνολο των αρχικών δεδομένων του προβλήματος (ή είναι μικρότερα ή ίσα του Γ), Επίσης για κάθε ακμή από μια εργασία  $t_i$  σε μια άλλη εργασία  $t_j$  θα υπάρχει ένα βάρος ίσο με το κόστος επικοινωνίας  $c_{ij}$ . Με βάση αυτή την κατασκευή η βέλτιστη διάσπαση του δεδομένου προβλήματος είναι αυτή που ορίζει το ελάχιστο υπογράφημα του AND/OR γραφήματος, του οποίου η εύρεση αποτελεί ένα NP-πλήρες πρόβλημα [GJ79], [HS78], ακόμα και αν τα βάρη των ακμών του είναι ίσα με μονάδα. Επομένως ακόμα και με αυτή τη θεώρηση το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών μαραμένει NP-πλήρες. Η περίπτωση στην οποία το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να λυθεί από ένα πολυωνυμικό αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού, είναι όταν οι εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής του OUT ή του Φ απεικονίζονται από AND/OR δέντρο [GJ79].

## 5.2 Ένας ακριβής αλγόριθμος για το πρόβλημα (P2)

Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος (P2). Η γραφοθεωρητική κατασκευή που ανάγει το πρόβλημα (P2) σε πρόβλημα προσδιορισμού του βραχύτερου μονοπατιού σε κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα, θεωρεί ένα γράφημα  $G = (V,E)$  όπου κάθε κόμβος του είναι υποσύνολο του συνόλου των εργασιών  $T$  και μια ακμή από ένα κόμβο  $v_1$  σε έναν άλλο  $v_2$  υπάρχει αν και μόνο αν ο κόμβος  $v_2$  περιέχει τις εργασίες του  $v_1$  και μια επιπλέον εργασία, την  $\bar{t}$ . Το βάρος μιας

ακμής  $w(e)$  αντιστοιχεί στο ελάχιστο κόστος επικοινωνίας που απαιτείται για την εκτέλεση της  $\bar{t}$ . Στην περίπτωση που τα  $c_{ij}$  είναι διαφορετικοί αριθμοί, ο υπολογισμός των  $w(e)$  απαιτεί την επίλυση ενός προβλήματος σακκιδίου, ενώ στην περίπτωση που τα  $c_{ij}$  είναι ίσα με τη μονάδα, τότε προσδιορίζονται αρκετά εύκολα. Για παράδειγμα ο υπολογισμός του βάρους  $w(v_1, v_2)$  όταν  $c_{ij} = 1$ , απαιτεί μόνο την ταξινόμηση των αποτελεσμάτων των εργασιών του  $v_1$  κατά φθίνουσα τάξη. Το πλήθος των ταξινομημένων αποτελεσμάτων που αθροίσθηκαν μέχρι να καλυφθούν τα απαιτούμενα δεδομένα της  $\bar{t}$ , είναι το ζητούμενο βάρος  $w(v_1, v_2)$ .

Ο αλγόριθμος που λύνει το πρόβλημα (P2) βασίζεται στο γνωστό αλγόριθμο εύρεσης του ελάχιστου μήκους μονοπατιού σε ακυκλικά γραφήματα των Horowitz και Sahni [HS78]. Ειδικά για την περίπτωση όπου  $c_{ij} = 1$ , ο αλγόριθμος αρχίζει από τον κόμβο  $v_0$  του γραφήματος  $G$  του οποίου τα δεδομένα των εργασιών είναι μικρότερα ή ίσα του αριθμού  $\Gamma$ . Σε αυτόν τον κόμβο εκχωρείται ένα κόστος  $L_0 = 1$ . Χρησιμοποιώντας την παραπάνω διαδικασία για τον υπολογισμό του βάρους των ακμών του γραφήματος  $G$ , προσδιορίζονται τα κόστη  $L_y$  των κόμβων του κάθε επιπέδου με βάση την αναδρομική σχέση:

$$L_y = \min_x (L_x + w(v_x, v_y)) \quad \forall v_x: (v_x, v_y) \in E$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί κόμβος  $v_b$  τέτοιος ώστε το άθροισμα των αποτελεσμάτων των εργασιών του να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του αριθμού  $\Phi$ . Μόλις εντοπισθεί ένας τέτοιος κόμβος, ο αλγόριθμος προσδιορίζει τους γειτονικούς κόμβους και τα αντίστοιχα κόστη μόνο των κόμβων που έχουν κόστος μικρότερο του  $L_b$ . Αν κάποιος κόμβος  $v_b'$  έχει μικρότερο κόστος από το  $L_b$  και το άθροισμα των αποτελεσμάτων των εργασιών του είναι μεγαλύτερο ή ίσο

του  $\Phi$ , τότε το ελάχιστο κόστος γίνεται ίσο με το κόστος  $L_b'$  του κόμβου  $v_b'$ . Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν δεν υπάρχει κανένας κόμβος που το κόστος του να είναι μικρότερο του ελάχιστου κόστους.

Αναλυτικά ο αλγόριθμος περιγράφεται ως εξής:

```

 $v_0 := \{ t_i/t_i \in T: I_i \leq \Gamma \};$ 
level :=  $|v_0|$ ;
 $L_0 := 1$ ;
while  $(\exists v_j = \{t_i / t_i: \sum O_i > \Phi\})$  and  $(level \leq T)$  do
  begin
    προσδιόρισε τον κόμβο  $v_k$  του επιπέδου level + 1;
    υπολόγισε το κόστος  $L_k$ ;
    εξέτασε αν  $v_k = \{t_i / t_i: \sum O_i \geq \Phi\}$ ;
    level := level + 1
  end;
if εντοπίσθηκε κόμβος  $v_b = \{t_i / t_i: \sum O_i \geq \Phi\}$  then min :=  $L_b$ ;
while  $(\exists v_j' = \{t_i / t_i: \sum O_i < \Phi\})$  and  $(L_j' < min)$  do
  begin
    προσδιόρισε τους κόμβους  $v_q: (v_j', v_q) \in E$ ;
    υπολόγισε τα  $L_q$ ;
    if  $L_q < min$  then min :=  $L_q$ 
  end (* αλγορίθμου*).

```

### 5.3 Υπολογιστικά αποτελέσματα

Για να εξετασθεί η απόδοση του παραπάνω αλγορίθμου, κατά την επίλυση του προβλήματος (P2) με  $c_{ij} = 1$ , δοκιμάστηκαν αρκετά παραδείγματα για διαφορετικά πλήθη εργασιών, σε ένα VAX 8810 χρησιμοποιώντας ένα μεταγλωττιστή της Pascal. Συγκεκριμένα για κάθε διάσταση, δηλαδή για κάθε πλήθος εργασιών που μπορεί να εκτελέσει ένα ΣΚΕΠ, λύθηκε ένα τυχαία επιλεγμένο δείγμα από 50 προβλήματα διάσπασης της μορφής του (P2). Ο πίνακας 5.1 δίνει στατιστικά στοιχεία που αφορούν τον απαιτούμενο καθαρό χρόνο επεξεργασίας (CPU time) για την επίλυση του κάθε δείγματος προβλημάτων. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο μέσος χρόνος επίλυσης ενός προβλήματος αυξάνεται εκθετικά όσο αυξάνεται το πλήθος των εργασιών που πρέπει να εξετασθούν. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση στο μέσο χρόνο επίλυσης καθώς επίσης ότι είναι μεγάλο το εύρος μεταξύ του μεγαλύτερου και του μικρότερου χρόνου που παρατηρήθηκε κατά την επίλυση των προβλημάτων του κάθε δείγματος. Τέτοιου είδους διαφορές κάνουν δύσκολη τη σύγκριση μεταξύ προβλημάτων που ανήκουν σε διαφορετικά δείγματα και συνεπώς δυσχεραίνει την εξαγωγή συμπερασμάτων για μια αξιόπιστη εκτίμηση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου.

Πλήθος εργασιών	Μέσος χρόνος CPU (secs)	Απόκλιση τετραγώνου (secs)	Μέγιστος χρόνος (secs)	Ελάχ. χρόνος (secs)
10	1.06	2.24	6.25	0.00
12	6.61	12.40	58.44	0.00
14	125.60	249.36	996.78	0.01
15	628.28	2037.71	11752.00	0.01
16	1024.26	4242.16	33134.00	0.00

Πίνακας 5.1 Στατιστικά στοιχεία για την απόδοση του αλγορίθμου επίλυσης του προβλήματος (P2)

#### 5.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αποδείχθηκε ότι η διάσπαση σύνθετων εργασιών από ένα ΣΚΕΠ με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους επικοινωνιών και συνεπώς του κόστους χρήσης των πόρων του συστήματος είναι μια πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Ακόμα και στις απλούστερες περιπτώσεις όπου το πρόβλημα διατυπώνεται με βάση τις αρχές της θεωρίας πληροφοριών, σύμφωνα με τις οποίες η εκτέλεση μιας εργασίας απαιτεί και παράγει ένα ποσό πληροφοριών ή γνώσης, εξακολουθεί να παραμένει στην κατηγορία των NP-πλήρη προβλημάτων. Η αποδεδειγμένη θεωρητικά δυσκολία του προβλήματος αλλά και τα στατιστικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για την εκτίμηση της απόδοσης του αλγορίθμου που επινοήθηκε για τη λύση του προβλήματος (P2), οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι προσπάθειες για την ακριβή λύση μεγάλων προβλημάτων διάσπασης απαιτούν την αναζήτηση πιο αποτελεσματικών μεθόδων και τη χρήση διαφορετικών τεχνικών ειδικά προσαρμοσμένων στις ιδιομορφίες του συγκεκριμένου προβλήματος.



Η κατασκευή τέτοιων αλγορίθμων δεν πρέπει να θεωρείται προφανής. Για παράδειγμα μια εφικτή και προφανής προσέγγιση για την εύρεση κάτω ορίων (lower bounds) που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ένα αλγόριθμο κλάδου και φράγματος (branch and bound) είναι η επίλυση του απλούστερου προβλήματος (relaxed problem) που δεν περιέχει τους περιορισμούς αποκλεισμού κυκλωμάτων. Ωστόσο η λύση ενός τέτοιου προβλήματος δε θεωρείται εύκολη αφού παρατηρήθηκε παραπάνω ότι το (P2) παραμένει NP-πλήρες ακόμα και αν επιτρέπεται η ύπαρξη κυκλωμάτων στο ζητούμενο γράφημα των εργασιών.

### Γ Ε Ν Ι Κ Α   Σ Υ Μ Π Ε Ρ Α Σ Μ Α Τ Α

#### 6.0 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μια ανακεφαλαίωση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στη διατριβή. Στο δεύτερο μέρος αναφέρονται κατευθύνσεις προς τις οποίες θα μπορούσε να στραφεί η μελλοντική έρευνα. Οι κατευθύνσεις αυτές προσανατολίζονται στον προσδιορισμό ενός πλαισίου που θα προάγει τη συνεργασία μεταξύ των ειδικών ενός ΣΚΕΠ, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η συναφής και η συντονισμένη συμπεριφορά τους.

#### 6.1 Συμπεράσματα

Στο πρώτο μέρος της διατριβής συγκρίθηκε η προσέγγιση των Ανοικτών Συστημάτων (ΑΣ) που αναπτύχθηκε να μελετήσει τη συμπεριφορά των ΣΚΕΠ και γενικότερα των

συστημάτων Κατανεμημένης Τεχνητής Νοημοσύνης, με την προσέγγιση των Ευμετάβλητων Συστημάτων που αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση πολύπλοκων προβληματικών καταστάσεων σε συστήματα ανθρώπινης συμπεριφοράς. Είναι αξιοσημείωτο ότι, αν και οι δύο προσεγγίσεις διατυπώθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους και από άτομα με εντελώς διαφορετικά ερευνητικά ενδιαφέροντα, ασχολούνται και οι δύο με το ίδιο αντικείμενο, δηλαδή τους Οργανισμούς. Συγκεκριμένα, οι επιστήμονες του χώρου της ΚΕΠ θεωρούν τα αντίστοιχα συστήματα σαν Οργανισμούς με καθορισμένη διάρθρωση και αποστολή, που εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Βασιζόμενος σε αυτή την προσέγγιση ο C.Hewitt ανέπτυξε τη θεωρία των Ανοικτών Συστημάτων. Από την άλλη πλευρά, ο P.Checkland διετύπωσε τη Μεθοδολογία των Ευμετάβλητων Συστημάτων (ΜΕΣ) η οποία είναι μια διαρκής απόκτηση γνώσεων γύρω από την προβληματική κατάσταση ενός Οργανισμού. Έτσι λοιπόν και οι δύο προσεγγίσεις ασχολούνται με το ίδιο αντικείμενο. Η μεταξύ τους σύγκριση τεκμηρίωσε την άποψη ότι οι αρχές της ΜΕΣ μπορούν να μεταφερθούν στο χώρο της ΚΕΠ. Ειδικότερα, βγήκε το συμπέρασμα ότι η προσέγγιση των Ανοικτών Συστημάτων μπορεί να υιοθετήσει βασικές αρχές της ΜΕΣ προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της αρμόδιας διεργασίας.

Η συμπεριφορά των Ανοικτών Συστημάτων επηρεάζεται από τις διάφορες προσεγγίσεις και συνθήκες σχεδιασμού και λειτουργίας τους. Συνεπώς κάθε ΑΣ αντιμετωπίζει ιδιαίτερα προβλήματα λειτουργίας που πηγάζουν από τον τρόπο σχεδιασμού του. Ωστόσο, οι επιστήμονες έχουν εστιάσει το ενδιαφέρον τους σε ορισμένα προβλήματα που είναι κοινά σε όλα τα ΑΣ και η λύση τους αποσκοπεί στην επίτευξη μιας συμπεριφοράς ανάλογης με των μελών μιας ομάδας εμπειρών που συνεργάζονται για την επίτευξη ενός κοινού στόχου.

Η παρούσα διατριβή προσπάθησε να μελετήσει το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών

σε συστήματα ΚΕΠ. Το κριτήριο για τη διάσπαση ήταν η ελαχιστοποίηση των πόρων που απαιτούνται από ένα ΣΚΕΠ για την εκτέλεση μιας σύνθετης εργασίας ή τη λύση ενός προβλήματος. Εδικότερα, το πρόβλημα που μελετήθηκε αφορά τον προσδιορισμό των εργασιών που πρέπει να εκτελεστούν από ένα ΣΚΕΠ και της σειράς εκτέλεσής τους, έτσι ώστε να λύνεται ένα δοσμένο πρόβλημα με το ελάχιστο συνολικό κόστος εκτέλεσης των επιλεχθέντων εργασιών και επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του συστήματος. Το παραπάνω πρόβλημα μελετήθηκε με βάση την υπόθεση ότι η διάσπαση ενός προβλήματος γίνεται από ένα κόμβο του ΣΚΕΠ.

Οι κυριότερες συνεισφορές του μέρους της διατριβής που ασχολείται με το παραπάνω πρόβλημα είναι:

1) Χρησιμοποιήθηκε ο μαθηματικός προγραμματισμός για τη μορφοποίηση τόσο του γενικού προβλήματος της διάσπασης εργασιών, όσο και άλλων ειδικών περιπτώσεών του. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη διατύπωση εναλλακτικών συνόλων περιορισμών που αποκλείουν την ύπαρξη κυκλωμάτων στη σειρά εκτέλεσης μιας ομάδας εργασιών οι οποίες επιλέγονται για την επίλυση ενός δεδομένου προβλήματος. Αν και οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν έχουν το ίδιο αποτέλεσμα, ωστόσο δίνουν σημαντικά διαφορετικά πλήθη περιορισμών. Η κατασκευή μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού είχε σαν αποτέλεσμα: α) την τυπική (formal) διατύπωση του προβλήματος της διάσπασης εργασιών, η οποία δεν είχε συναντηθεί στη βιβλιογραφία και β) τη διαπίστωση ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα περιέχει γνωστά δύσκολα προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, όπως η ελάχιστη κάλυψη συνόλου (minimum cover problem) και η ανάθεση εργασιών (task assignment).

2) Η μελέτη της πολυπλοκότητας, τόσο του γενικού προβλήματος διάσπασης εργασιών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων, όσο και των ειδικών περιπτώσεών του, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το εν λόγω πρόβλημα είναι

NP-πλήρες, ακόμα και στις απλούστερες περιπτώσεις του. Επομένως η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων που θα μπορούν να το λύνουν αναμένεται να είναι εκθετικής τάξης.

3) Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την κατασκευή αλγορίθμων, που θα λύνουν το συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν γραφοθεωρητική. Συγκεκριμένα η διάσπαση εργασιών παραλληλίστηκε με το πρόβλημα προσδιορισμού του μονοπατιού με το ελάχιστο μήκος σε ένα διαστρωματωμένο κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν βασίστηκαν στους γνωστούς αλγορίθμους των Dijkstra και Horowitz-Sahni. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι δεν προσδιορίζουν το μονοπάτι με το ελάχιστο μήκος σε καθορισμένα ακυκλικά γραφήματα, αλλά τα σύνολα των κόμβων και των ακμών των γραφημάτων προσδιορίζονται δυναμικά.

4) Ειδικότερα για το γενικό πρόβλημα της διάσπασης εργασιών, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της συνάθροισης (aggregation) για την κατασκευή ενός ευρετικού αλγορίθμου. Η χρήση της τεχνικής αυτής είχε σαν αποτέλεσμα αφ'ενός τη μείωση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος και αφ'ετέρου τον προσδιορισμό ενός υπολογίσιμου φράγματος σφάλματος από τη βέλτιστη λύση.

## 6.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις

Με βάση τα αποτελέσματα της διατριβής αυτής, η περαιτέρω ερευνητική προσπάθεια θα μπορούσε να επικεντρωθεί στα ακόλουθα σημεία:

1) Η διαπίστωση ότι η μεταφορά των αρχών της ΜΕΣ που αφορούν την κατασκευή και διατήρηση μιας συνολικής εικόνας της πραγματικής κατάστασης ενός ΑΣ, μπορεί να προσφέρει σημαντική βοήθεια στην επίλυση του προβλήματος της

Αρμόδιας Διεργασίας, αποτελεί μια αρχή για τη διερεύνηση νέων ανοικτών προβλημάτων του χώρου της ΚΕΠ. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται με τη μελέτη της συμπεριφοράς και λειτουργίας των ΣΚΕΠ και μπορούν να διατυπωθούν ως εξής:

α) Μπορεί να υπάρχει και να διατηρείται μια συνολική εικόνα της πραγματικής κατάστασης ενός ΣΚΕΠ;

β) Αν ναι με ποιόν τρόπο, από ποιούς και πότε θα σχηματίζεται;

γ) Τέλος, κάθε πότε θα ενημερώνεται και από ποιόν μια τέτοια εικόνα;

2) Θα πρέπει να αναζητηθούν διαφορετικοί και πιο αποδοτικοί αλγόριθμοι για το πρόβλημα της διάσπασης εργασιών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των πόρων. Συγκεκριμένα θα μπορούσε να διερευνηθεί αν η χρήση της μεθόδου κλάδου και φράγματος (branch and bound) μπορεί να προσαρμοσθεί αποδοτικά στις απαιτήσεις του προβλήματος που αντιμετωπίστηκε στην διατριβή.

3) Ένα ενδιαφέρον πρόβλημα για το οποίο υπογραμμίστηκε ότι υπάρχουν λίγες αναφορές στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, προκύπτει με την άρση της υπόθεσης ότι ένας μόνο κόμβος αναλαμβάνει τη διάσπαση μιας σύνθετης εργασίας ή ενός προβλήματος. Αντί αυτής της υπόθεσης απαιτείται η συμμετοχή και η συνεργασία όλων των κόμβων, για τη βέλτιστη διάσπαση της εργασίας ή του προβλήματος. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, απαιτείται ο καθορισμός ενός πλαισίου συνεργασίας (cooperation framework) των κόμβων ενός ΣΚΕΠ, που θα εξασφαλίζει το συντονισμό των ενεργειών (coordination) τους και τη συναφή συμπεριφορά (coherency) τους. Σημαντική παράμετρος για την επίτευξη του παραπάνω πλαισίου είναι ο τρόπος με τον οποίο θα επικοινωνούν οι ειδικοί ενός ΣΚΕΠ. Οι μηχανισμοί που θα προσδιορισθούν για την εξασφάλιση συντονισμού και συνάφειας θα πρέπει να βασίζονται σε ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που θα διαθέτει ένα σύνολο μηνυμάτων για την αλληλεπίδραση των κόμβων ενός ΣΚΕΠ.

Διάφορες προσεγγίσεις έχουν γίνει για τον καθορισμό ενός τέτοιου πλαισίου που βασίζονται είτε σε μοντέλα και εργαλεία που ανήκουν στο χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης και της Θεωρίας των Τυπικών Γλωσσών (formal languages) ,είτε σε ad hoc μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συγκεκριμένων συστημάτων. Επίσης, ορισμένες από τις προσεγγίσεις αυτές συχνά δeneίζονται στοιχεία από διαφορετικούς επιστημονικούς χώρους όπως τη Θεωρία Παιγνίων ή τις αρχές των μηχανών Boltzmann.

Η άποψη που υποστηρίζει η διατριβή αυτή είναι ότι η μελέτη σε βάθος και η προαγωγή των μεθόδων και διαδικασιών εξαγωγής συμπερασμάτων σε συνδυασμό με μια από τις παραπάνω προσεγγίσεις θα μπορούσε να βοηθήσει σημαντικά στην προσπάθεια αναζήτησης και καθορισμού ενός ευέλικτου και αποδοτικού πλαισίου συνεργασίας μεταξύ των κόμβων ενός ΣΚΕΠ. Η επίτευξη ενός τέτοιου πλαισίου θα είχε σαν αποτέλεσμα όχι μόνο την επίλυση του προβλήματος της διάσπασης εργασιών με τη συμμετοχή όλων των κόμβων ενός ΣΚΕΠ, αλλά θα πρόσφερε σημαντική βοήθεια στην επίλυση και των άλλων προβλημάτων της ΚΕΠ.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται μια εφαρμογή των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.

#### Παράδειγμα 1

Εστω ένα ΣΚΕΠ το οποίο αποτελείται από τέσσερεις κόμβους οι οποίοι μπορούν να εκτελούν συνολικά δώδεκα εργασίες. Η ικανότητα των ειδικών στην εκτέλεση μιας εργασίας αντικατοπτρίζεται από ένα κόστος εκτέλεσης το οποίο παρουσιάζεται στον πίνακα Α.1. Σε αυτόν τον πίνακα φαίνεται και η επικάλυψη των ικανοτήτων των κόμβων του ΣΚΕΠ από το ότι κάθε εργασία έχει ένα διαφορετικό κόστος εκτέλεσης σε κάθε ειδικό. Ένας κόμβος που δεν γνωρίζει να εκτελεί μια εργασία θεωρείται ότι απαιτεί άπειρο κόστος για την εκτέλεση της εργασίας αυτής. Κάθε εργασία απαιτεί για την εκτέλεσή της ένα σύνολο δεδομένων και όταν εκτελεσθεί παράγει ένα σύνολο αποτελεσμάτων. Τα σύνολα των δεδομένων και των αποτελεσμάτων κάθε εργασίας παρουσιάζονται στον πίνακα Α.2. Τέλος η μεταφορά των δεδομένων και των αποτελεσμάτων μεταξύ των κόμβων που εκτελούν τις εργασίες διεξάγεται με ένα κόστος επικοινωνίας μεταξύ των ειδικών που παρουσιάζεται στον πίνακα Α.3.



Εστω ότι σε ένα κόμβο του συστήματος δίνεται ένα πρόβλημα με αρχικά δεδομένα τα  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4$ , και επιθυμητά αποτελέσματα τα  $A_6, A_7, A_8, A_{10}$ . Στο σχήμα A.1 παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση του προβλήματος της διάσπασης εργασιών, ενώ στα σχήματα A.2 και A.3 παρουσιάζονται το γράφημα που κατασκευάζει ο ευρετικός αλγόριθμος που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5 και η αντίστοιχη προτεινόμενη λύση. Το βέλτιστο συνολικό κόστος εκτέλεσης και επικοινωνίας είναι 10 μονάδες, ενώ το συνολικό κόστος που προτείνει ο ευρετικός αλγόριθμος είναι 11 μονάδες.

Πίνακας A.1

Κόστη εκτέλεσης των εργασιών

Εργασία \ Είδος	Κόστος			
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$t_1$	1	5	$\infty$	$\infty$
$t_2$	5	1	$\infty$	$\infty$
$t_3$	3	2	5	$\infty$
$t_4$	2	4	$\infty$	$\infty$
$t_5$	$\infty$	1	2	3
$t_6$	$\infty$	$\infty$	3	$\infty$
$t_7$	4	7	$\infty$	$\infty$
$t_8$	2	1	$\infty$	$\infty$
$t_9$	5	3	$\infty$	$\infty$
$t_{10}$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1
$t_{11}$	$\infty$	$\infty$	1	3
$t_{12}$	$\infty$	$\infty$	3	$\infty$

Πίνακας Α.2

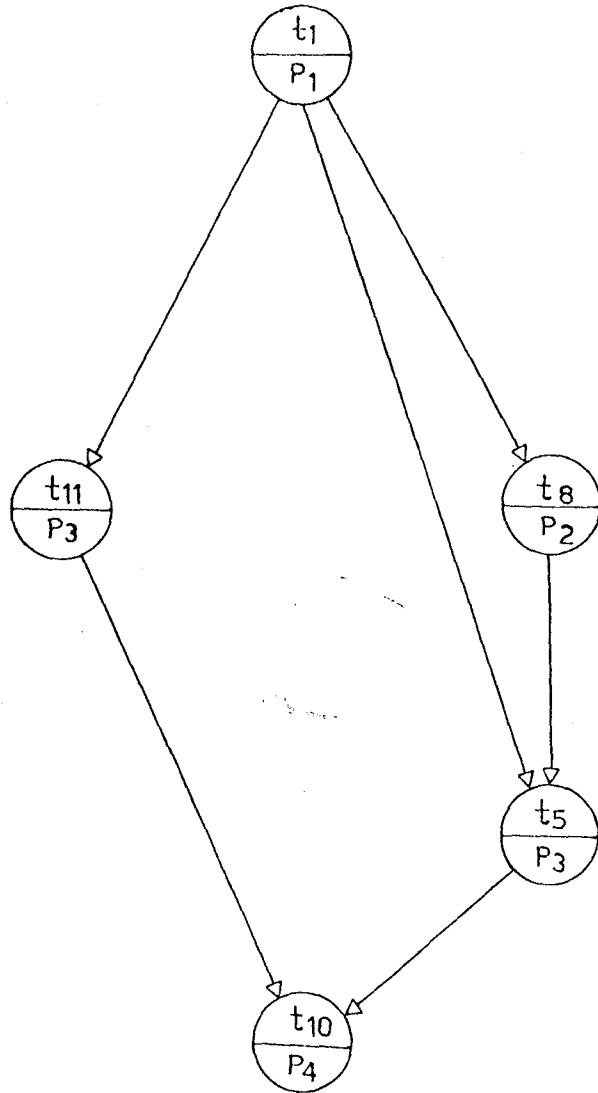
Δεδομένα και Αποτελέσματα των εργασιών

ΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
$t_1$	$A_0, A_1, A_2, A_3, A_4$	$A_{11}$
$t_2$	$A_0, A_1, A_3, A_{11}$	$A_5$
$t_3$	$A_0, A_1, A_2, A_3, A_{11}, A_8$	$A_6$
$t_4$	$A_0, A_2, A_3, A_{11}$	$A_9$
$t_5$	$A_0, A_1, A_{11}, A_6$	$A_7$
$t_6$	$A_0, A_{11}, A_6$	$A_7$
$t_7$	$A_0, A_1, A_2, A_3, A_8, A_{11}$	$A_6$
$t_8$	$A_0, A_1, A_4, A_{11}$	$A_6$
$t_9$	$A_0, A_1, A_{11}, A_4, A_5$	$A_6$
$t_{10}$	$A_7, A_8$	$A_{10}$
$t_{11}$	$A_2, A_{11}, A_3, A_4$	$A_8$
$t_{12}$	$A_2, A_{11}, A_3, A_1$	$A_8$

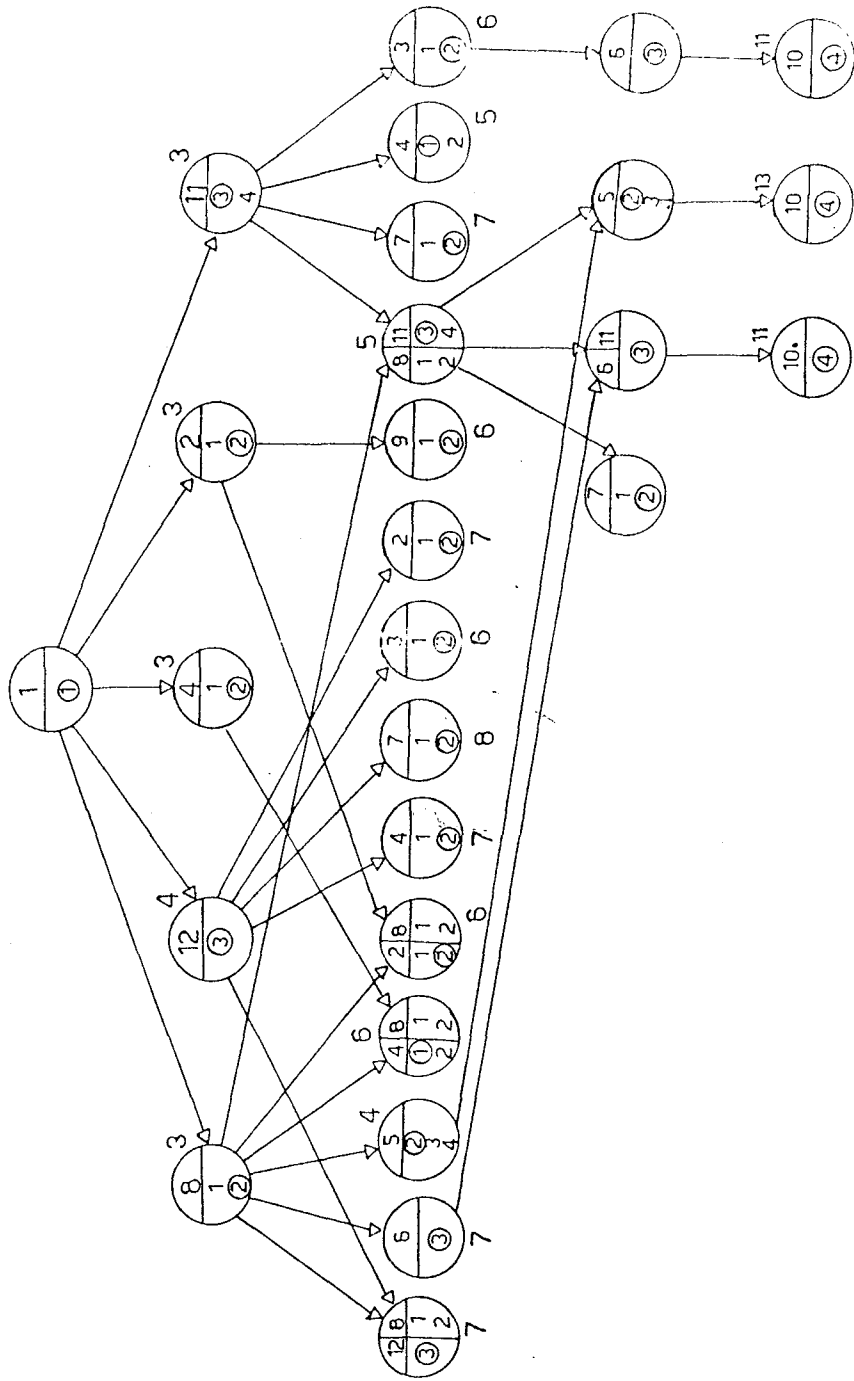
Πίνακας Α.3

Κόστη επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων

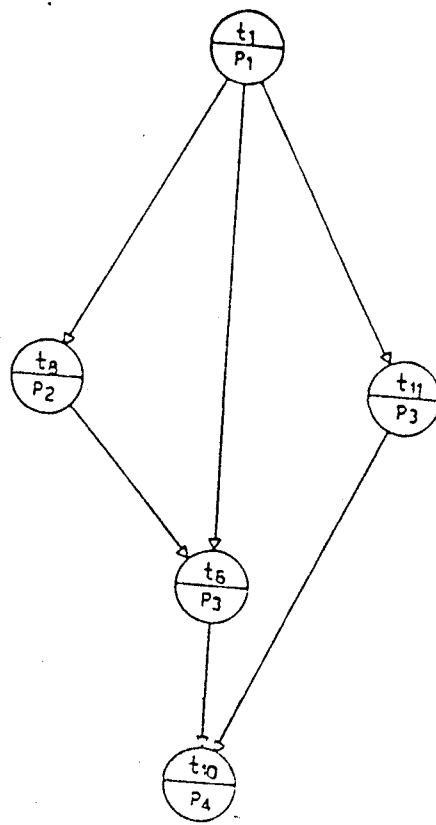
Ειδικός Ειδικός	Ειδικός	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$P_1$		0	1	1	2
$P_2$		1	0	1	5
$P_3$		1	1	0	1
$P_4$		2	5	1	0



Σχήμα A.1 Η βέλτιστη λύση του παραδείγματος 1



Σχήμα A.2 Το γράφημα που κατασκευάζει ο ευρετικός αλγόριθμος για το παράδειγμα 1

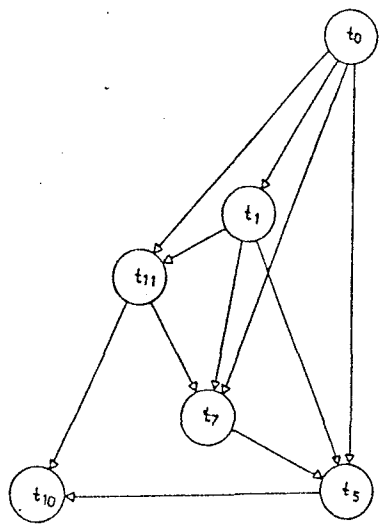


Σχήμα A.3 Η λύση του ευρετικού αλγόριθμου για το παράδειγμα 1

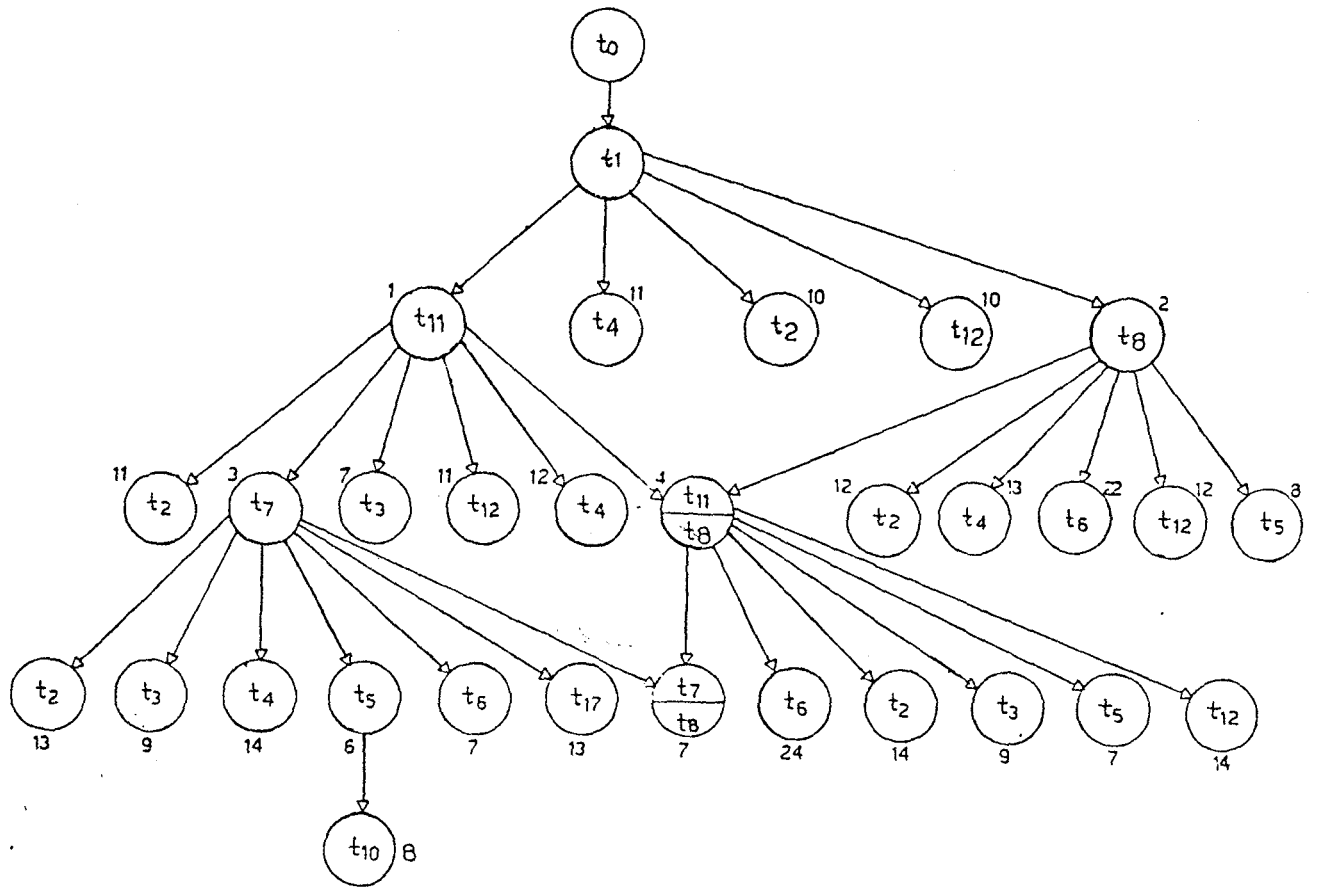
## Παράδειγμα 2

Αν θεωρηθεί ότι υπάρχει μόνο κόστος επικοινωνίας μεταξύ των εργασιών του ΣΚΕΠ του προηγούμενου παραδείγματος, τότε το παραπάνω πρόβλημα παίρνει τη μορφή του προβλήματος (P1). Ο πίνακας A.4 παρουσιάζει υποθετικά κόστη επικοινωνιών μεταξύ των εργασιών του συστήματος. Υποτίθεται ότι τα σύνολα των αρχικών δεδομένων και των επιθυμητών αποτελεσμάτων παραμένουν τα ίδια με το προηγούμενο παράδειγμα. Στο σχήμα A.5 παρουσιάζεται το γράφημα που κατασκευάζει ο αλγόριθμος για τη λύση του προβλήματος (P1) αν αυτός εφαρμοστεί στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ενώ στο σχήμα A.4 παρουσιάζεται η λύση που προκύπτει από την εκτέλεση του αλγόριθμου αυτού.

Εργασια Εργασια	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	8	1	1	0	0	0	1	3	$\infty$	0	1
1	0	2	1	10	1	10	1	1	2	4	1	9
2		0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$	$\infty$	$\infty$
3			0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	7
4				0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
5					0	$\infty$	1	4	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
6						0	2	10	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
7							0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$
8								0	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$
9									0	$\infty$	$\infty$	$\infty$
10										0	$\infty$	$\infty$
11											0	$\infty$
12												0



Σχήμα A.4 Η λύση του παραδειγματος 2



Σχήμα A.5 Το γράφημα που κατασκευάζει ο αλγόριθμος για το πρόβλημα (P1)

### ΜΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1 ότι οι αρχές της ΚΕΠ μπορούν να εφαρμοστούν σε μια πολύπλοκη διαδικασία ελέγχου και αξιολόγησης μελετών σχεδίασης αρδευτικών έργων, που διενεργεί το Υπουργείο Γεωργίας (ΥΓ) προκειμένου να λάβει μια απόφαση για την υλοποίησή τους σε διάφορες περιοχές της χώρας μας. Υπενθυμίζεται ότι η σύνταξη των μελετών ανατίθεται σε ειδικούς μελετητές που δεν ανήκουν στο ΥΓ. Η διαδικασία ελέγχου των μελετών στοχεύει: (α) στην εξέταση του κατά πόσο το προτεινόμενο αρδευτικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει κάτω από καθορισμένες συνθήκες, (β) στη βελτιστοποίηση της σχεδίασης του αρδευτικού δικτύου, (γ) στην επαλήθευση του ότι το έργο θα προσφέρει κάποια οικονομική ανάπτυξη στην περιοχή και (δ) στην αποδοχή ή όχι των προτεινόμενων αλλαγών στην ποσότητα και την ποιότητα της αγροτικής παραγωγής της περιοχής.

Υπενθυμίζεται ότι για την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας απαιτείται η συνεργασία μιας ομάδας από ειδικευμένους μηχανικούς, γεωπόνους και οικονομολόγους, οι οποίοι υπηρετούν σε τέσσερα διαφορετικά τμήματα του Υπουργείου. Το κάθε ένα από τα τμήματα αυτά βρίσκεται σε διαφορετικές τοποθεσίες της Αθήνας και οι δραστηριότητές τους είναι παρεμφερείς και ορισμένες από αυτές επικαλυπτόμενες. Το γεγονός της εγκατάστασης των τμημάτων σε διαφορετικές τοποθεσίες προξενεί πολλές φορές αρκετά επικοινωνιακά προβλήματα.



Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής των προαναφερθέντων αλγορίθμων διάσπασης εργασιών σε ένα σύστημα ελέγχου και αξιολόγησης μελετών σχεδίασης αρδευτικών έργων. Πρέπει να τονισθεί ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα γίνονται ορισμένες απλοποιήσεις - με αποτέλεσμα να μην απεικονίζεται πλήρως η πραγματικότητα - προκειμένου να γίνει εύκολα κατανοητή αφ'ενός μεν η δομή ενός συγκεκριμένου ΣΚΕΠ και αφ'ετέρου η εφαρμογή των συγκεκριμένων αλγορίθμων.

Η δομή και οι απλουστεύσεις που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας του συγκεκριμένου ΣΚΕΠ δίνονται από την ακόλουθη περιγραφή:

Όπως προαναφέρθηκε, τέσσερα τμήματα παίρνουν μέρος στη διαδικασία ελέγχου τα οποία θα αναφέρονται σαν ειδικοί  $p_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ .

Η διαδικασία ελέγχου μιας μελέτης μπορεί να θεωρηθεί σαν μια προσπάθεια παραγωγής συγκεκριμένων στοιχείων γνώσης (knowledge elements), δεδομένων κάποιων ανάλογων στοιχείων που υπάρχουν στη μελέτη. Κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης μπορεί να παράγονται και ενδιάμεσα στοιχεία γνώσης, διαφορετικά από τα δεδομένα και τα επιθυμητά αποτελέσματα. Συνολικά υπάρχουν δεκαπέντε στοιχεία γνώσης  $A_q$ ,  $q = 0, \dots, 14$ , των οποίων η σημασία δίνεται στον Πίνακα Β.1.

Η πραγματοποίηση της εν λόγω διαδικασίας απαιτεί την εκτέλεση διάφορων εργασιών. Κάθε εργασία όταν της δοθούν τα απαιτούμενα στοιχεία γνώσης, παράγει νέα στοιχεία που ορισμένα από αυτά μπορεί να είναι κάποια από τα ζητούμενα στοιχεία γνώσης και άλλα μπορεί να είναι ενδιάμεσα αποτελέσματα που θα χρησιμοποιηθούν από κάποιες άλλες εργασίες. Επομένως, κάθε εργασία καθορίζεται από ένα σύνολο δεδομένων που απαιτεί για την εκτέλεσή της και ένα

σύνολο αποτελεσμάτων που παράγει. Συνολικά υπάρχουν δέκα εργασίες  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 10$  που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία αξιολόγησης μελετών για αρδευτικά έργα. Η σημασία, τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των εργασιών αυτών δίνονται στους πίνακες Β.2 και Β.3.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να εκτελεστούν όλες οι εργασίες για τον έλεγχο μιας μελέτης. Συνεπώς θα πρέπει:

- (α) να επιλεγθούν εκείνες οι εργασίες οι οποίες εξασφαλίζουν ότι θα παραχθούν τα στοιχεία γνώσης, που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας ελέγχου και
- (β) να προσδιορισθεί η σειρά εκτέλεσής τους έτσι ώστε κάθε εργασία να διαθέτει τα απαιτούμενα δεδομένα για την εκτέλεσή της.

## Πίνακας Β.1

Σημασία των βασικών στοιχείων γνώσης

### ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΓΝΩΣΗΣ

### ΣΗΜΑΣΙΑ

A <sub>0</sub>	Είδος μελέτης
A <sub>1</sub>	Υδρολογικά δεδομένα
A <sub>2</sub>	Ανάγκες καλλιεργειών σε νερό
A <sub>3</sub>	Χαρακτηριστικά εδάφους
A <sub>4</sub>	Μορφολογία εδάφους
A <sub>5</sub>	Διαστασιολόγηση
A <sub>6</sub>	Απόφαση για την Τεχνική αρτιότητα
A <sub>7</sub>	Απόφαση για την Οικονομικότητα του έργου
A <sub>8</sub>	Απαιτήσεις πίεσης και παροχής
A <sub>9</sub>	Βέλτιστη λύση δικτύου
A <sub>10</sub>	Προμετρήσεις
A <sub>11</sub>	Είδος αρδευτικού έργου
A <sub>12</sub>	Τυποποίηση συσκευών και κατασκευών
A <sub>13</sub>	Στοιχεία κόστους
A <sub>14</sub>	Κόστος μελετητή

## Πίνακας Β.2

### Σημασία των εργασιών

ΣΗΜΑΣΙΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ
- Ανάκτηση δεδομένων από τη μελέτη	t <sub>1</sub>
- Έλεγχος των δεδομένων που χρησιμοποιεί η μελέτη	t <sub>2</sub>
- Έλεγχος διαστασιολόγησης του δικτύου (σε μόνιμη κατάσταση)	t <sub>3</sub>
- Έλεγχος αντιπληγματικής προστασίας	t <sub>4</sub>
- Βελτιστοποίηση δικτύου	t <sub>5</sub>
- Προμετρήσεις απαιτούμενου εξοπλισμού	t <sub>6</sub>
- Υπολογισμός βέλτιστου (ελάχιστου) κόστους	t <sub>7</sub>
- Σύγκριση βέλτιστης λύσης με τη λύση του μελετητή	t <sub>8</sub>
- Επιλογή εναλλακτικών σεναρίων άρδευσης σε επίπεδο αρδευτικής μονάδας	t <sub>9</sub>
- Επιλογή εναλλακτικών σεναρίων σε επίπεδο δικτύου	t <sub>10</sub>

### Πίνακας Β.3

Δεδομένα και Αποτελέσματα των εργασιών

ΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
$t_1$	$A_0, A_1, A_2, A_3, A_4$	$A_{11}$
$t_2$	$A_0, A_1, A_3, A_{11}, A_{12}$	$A_5$
$t_3$	$A_0, A_1, A_2, A_3, A_{11}, A_8$	$A_6$
$t_4$	$A_0, A_2, A_8, A_{11}, A_4$	$A_6$
$t_5$	$A_0, A_1, A_{11}, A_8, A_{12}, A_4$	$A_7, A_9$
$t_6$	$A_0, A_{11}, A_9, A_{12}$	$A_{10}$
$t_7$	$A_0, A_{12}, A_9, A_{14}$	$A_7$
$t_8$	$A_9, A_{14}, A_{11}$	$A_7$
$t_9$	$A_0, A_1, A_{11}, A_4, A_{14}, A_3, A_2$	$A_6, A_7, A_8$
$t_{10}$	$A_0, A_{11}, A_1, A_4, A_8, A_{12}$	$A_7, A_6$

Πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι κάθε τμήμα του Υπουργείου έχει μια συγκεκριμένη εμπειρία στην εκτέλεση των παραπάνω εργασιών. Στον πίνακα Β.4 παρουσιάζεται η ικανότητα του κάθε τμήματος να εκτελεί κάποιες εργασίες με τη μορφή ενός κόστους εκτέλεσης. Επίσης στον πίνακα αυτό, γίνεται φανερό το ότι μια εργασία μπορεί να εκτελείται από περισσότερους από ένα ειδικούς του συστήματος (με αυτό τον τρόπο παρουσιάζεται και η επικάλυψη των ικανοτήτων των ειδικών). Η περίπτωση στην οποία ένας ειδικός  $p_k$  δεν έχει την ικανότητα να εκτελέσει μια εργασία  $t_i$ , εκφράζεται με άπειρο κόστος εκτέλεσης της εργασίας  $t_i$  από τον ειδικό  $p_k$ . Επιπλέον, οι επικοινωνιακές δυσκολίες μεταξύ των, εμπειρών απεικονίζονται σαν κόστη επικοινωνίας και παρουσιάζονται στον πίνακα Β.5. Τα κόστη επικοινωνίας θεωρούνται σαν εφ' άπαξ κόστη για την εγκατάσταση

επικοινωνιακών καναλιών μεταξύ δύο εμπειρών και μπορεί να αντανακλούν τα προβλήματα επίτευξης επικοινωνιών που οφείλονται στο γεγονός της εγκατάστασης των τμημάτων σε απομακρυσμένες περιοχές, καθώς επίσης και τις δυσκολίες για επίτευξη συνεργασίας μεταξύ ανταγωνιζόμενων τμημάτων ή τμημάτων με συγκρουόμενους στόχους.

Πίνακας Β.4

Κόστη εκτέλεσης των εργασιών

Εργασία	Είδος			
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
t <sub>1</sub>	1	1	1	1
t <sub>2</sub>	1	2	2	3
t <sub>3</sub>	1	2	5	∞
t <sub>4</sub>	1	4	∞	∞
t <sub>5</sub>	∞	1	2	4
t <sub>6</sub>	∞	∞	3	2
t <sub>7</sub>	4	7	10	5
t <sub>8</sub>	2	1	∞	∞
t <sub>9</sub>	5	3	1	∞
t <sub>10</sub>	∞	∞	∞	1

Πίνακας Β.5

Κόστη επικοινωνίας μεταξύ των ειδικών

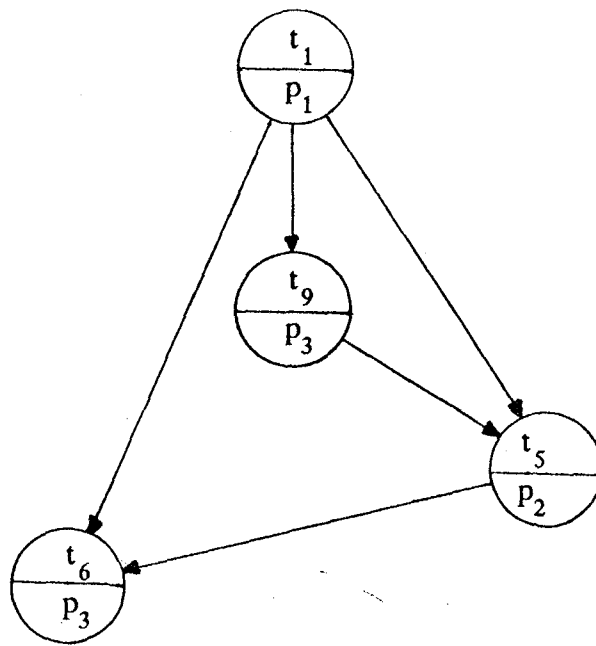
Ειδικός \ Ειδικός	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
P <sub>1</sub>	0	1	1	2
P <sub>2</sub>		0	1	5
P <sub>3</sub>			0	1
P <sub>4</sub>				0

Τέλος θεωρείται ότι υπάρχει ένας συντονιστής της όλης διαδικασίας. Ο συντονιστής αυτός γνωρίζει τα στοιχεία γνώσης που πρέπει να παραχθούν, διαθέτει στους ειδικούς τα αρχικά στοιχεία γνώσης και συγκεντρώνει τα αποτελέσματα των εργασιών που αυτοί εκτελούν. Ο συντονιστής θα πρέπει να προσδιορίσει τις εργασίες που πρέπει να εκτελεσθούν και να τις αναθέσει στους ειδικούς εξασφαλίζοντας ότι:

- (α) Κάθε εργασία παίρνει τα απαιτούμενα δεδομένα της πριν εκτελεσθεί
- (β) Παράγονται όλα τα απαιτούμενα στοιχεία γνώσης
- (γ) Το συνολικό κόστος επικοινωνίας μεταξύ των εμπειρών και εκλεσης των εργασιών ελαχιστοποιούνται.

Επομένως, ο συντονιστής θα πρέπει να διασπάσει το πρόβλημα της αξιολόγησης μιας αρδευτικής μελέτης σε επιμέρους εργασίες, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω περιορισμοί. Αν υποθεθεί ότι για μια συγκεκριμένη διαδικασία αξιολόγησης μιας μελέτης ισχύουν όσα περιγράφονται από τους πίνακες Β.1 ως Β.5 και ότι τα αρχικά στοιχεία γνώσης που υπάρχουν στη μελέτη είναι τα  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_{12}, A_{13}, A_{14}$  ενώ για τη ολοκλήρωση της διαδικασίας πρέπει να παραχθούν τα  $A_7, A_9, A_{10}$ , τότε η βέλτιστη διάσπασή της δίνεται από το σχήμα Β.1

και το συνολικό κόστος για την πραγματοποίησή της είναι 9 μονάδες ( 6 μονάδες κόστος εκτέλεσης και 3 κόστος επικοινωνίας).



Σχήμα Β.1 Η βέλτιστη διάσπαση εργασιών

Η παραπάνω διαδικασία θα μπορούσε να υλοποιηθεί από ένα ΣΚΕΠ με μορφή σαν και αυτή του σχήματος 1.1, του πρώτου κεφαλαίου. Συγκεκριμένα κάθε κόμβος του ΣΚΕΠ θα μπορούσε να είναι εγκαταστημένος σε ένα από τα τέσσερα τμήματα που είναι αρμόδια για τον έλεγχο των μελετών. Για να μπορέσει να λειτουργήσει ένα τέτοιο σύστημα κάθε κόμβος του θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος αφ'ένός με τους αλγόριθμους που περιγράφηκαν σε αυτή τη διατριβή και αφ'ετέρου με κάποια πρωτόκολα επικοινωνίας που θα του επιτρέπουν να επικοινωνεί με τους άλλους κόμβους του συστήματος μέσω μιας κοινά γνωστής γλώσσας. Για την επίτευξη της επικοινωνίας, που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία διάσπασης μιας εργασίας, θα πρέπει η κοινή γλώσσα των κόμβων να περιλαμβάνει μηνύματα τέτοια ώστε ο εκάστοτε συντονιστής της διαδικασίας να έχει τη δυνατότητα:



- 1) Να έχει διαθέσιμες τις ακόλουθες πληροφορίες:
  - α) Ποιες εργασίες εκτελεί κάθε κόμβος.
  - β) Ποια είναι η εμπειρία του κάθε κόμβου στην εκτέλεση μιας εργασίας.
  - γ) Ποιο είναι το κόστος επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων.
- 2) Να μπορεί να διαβιβάσει σε κάθε κόμβο την πληροφορία για το πότε ο κόμβος αυτός θα εκτελέσει μια συγκεκριμένη εργασία.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [BBS87] J.C.Bean, J.R.Birge and R.L.Smith, "Aggregation in dynamic programming," *Operations Research* vol 35, pp. 215 - 220, 1987.
- [C81] P.Checkland. *Systems thinking, systems practice*, J.Wiley & sons Ltd: New York, NY, 1981.
- [C85] P.Checkland "Achieving desirable and feasible change:an application of soft systems methodology,"*J.Opl.Res.Soc.* vol. 36 pp. 821-831, 1985.
- [CMAS83] S.Cammarata, D.McArthur, R.Steeb, "Strategies of cooperation in distributed problem solving," in *Reading in Distributed Artificial Intelligence*, edited by A.Bond and L.Gasser, Morgan Kaufmann Publ. Inc.:San Mateo, CA, pp. 102-105, 1988.
- [DL87] E.H.Durfee and V.R.Lesser, "Using partial global plans to coordinate distributed problem solvers," in *Reading in Distributed Artificial Intelligence* edited by A.Bond and L.Gasser, Morgan Kaufmann Publ. Inc.:San Mateo, CA, pp. 285-293, 1988.
- [DL89] E.H.Durfee and V.R.Lesser, "Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning," in *Distributed Artificial Intelligence, Volume II*, edited by L.Gasser and M.N.Huhns, Pitman: London, pp. 229 - 243, 1989.

- [DLC87] E.H.Durfee, V.R.Lesser and D.DCorkill, "Coherent cooperation among communicating problem solvers," *IEEE Trans. Comp.* vol. C-36, pp. 1275 - 1291, 1987.
- [DS83] R.Davis and R.Smith, "Negotiation as a metaphor for distributed problem solving," *Artif. Intell.* vol. 20 pp. 63-109, 1983.
- [F81] M.S.Fox, "An organizational view of distributed systems," *IEEE Trans Sys., Man, Cybern.* vol. SMC-11 pp. 70-80, 1981.
- [G91] T.Gyires, "A heuristic algorithm for distributed control in manufacturing systems," *J. Appl. Intel.*, vol 1 pp. 145 - 155, 1991.
- [GAS88] A.Bond and L. Gasser (ed.), *Reading in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publ. Inc.:San Mateo, CA, 1988.
- [GIN87] M.L.Ginsberg "Decision procedures," in *Distributed Artificial Intelligence*, edited by M.N.Huhns, Pitman: London, pp. 3-28, 1987.
- [GJ79] M.R.Garey and D.S.Johnson, *Computers and Intractability A Guide to the Theory of NP - Completeness*, W.H.Freeman and Company: New York, NY., 1979.
- [GS86] E.M.Gerson and S.L.Star "Analyzing due process in the workplace," *ACM Trans. Off. Inform. Sys*, vol 4 pp. 271-287, 1986.

- [H85] C.Hewitt, "The challenge of open systems," *Byte*, pp.223-242, April 1985
- [H86] C.Hewitt, "Offices are open systems," *ACM Trans. Off. Inform. Sys*, vol 4 pp. 271-287, 1986.
- [HL87] E.Hudlica and V.Lesser, "Modeling and diagnosing problem-solving system behavior," *IEEE Trans Sys., Man, Cybern.* vol. SMC-17 pp. 407-419, 1987.
- [HS78] E.Horowitz and S.Sahni, *Fundamentals of Computer Algorithms*, Computer Science Press: Rockville, Maryland, 1978.
- [HUH87] M.N.Huhns (ed), *Distributed Artificial Intelligence*, Pitman:London, 1987.
- [KEL91] J.Kelemen, "Syntactical models of distributed cooperative systems," *J. Exp. Theor. Artif. Intell.* vol. 3 pp. 1 - 10, 1991.
- [LC81] V.R.Lesser and D.D.Corkill "Functionally accurate, cooperative distributed systems," *IEEE Trans Sys., Man, Cybern.* vol. SMC-11 pp. 81-96, 1981.
- [M87] T.W.Malone, "Modeling coordination in organizations and markets," *Manag. Sci.* vol 33 pp. 1317-1332, 1987.
- [MCSW72] W.T.McCormick,Jr., P.J.Schweitzer, and T.W.White, "Problem decomposition and data reorganization by a clustering technique,"

- [NK85] S.Niizuma and T.Kitahashi, "A problem decomposition method using differences or equivalence relations between states," *Artif. Intell.* vol. 25 pp. 117 - 151, 1985.
- [OS88] P.S.Ow and S.F.Smith, "Viewing scheduling as an opportunistic problem - solving process," *Ann. Oper. Res* vol. 12 pp. 85 - 108, 1988.
- [P87] H.Van Dyke Parunak, "Manufacturing experience with the contract net," in *Distributed Artificial Intelligence*, edited by M.N.Huhns, Pitman: London, pp. 285 - 310, 1987.
- [RG88] J.S.Rosenschein, and M.R.Genesereth, in *The Ecology of Computation*, edited by B.A.Huberman, Elsevier Science Publishers B.V.:Amsterdam, pp. 117-132, 1988.
- [S80] R.G.Smith "The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver," *IEEE Trans. Comp.* vol. C-29, pp. 1104-1113, 1980.
- [SCRTW81] R.Steeb, S.Cammarata, F.Hayes-Roth, P.Thorndyke and R.Wesson, "Distibuted intelligence for air fleet control," in *Reading in Distributed Artificial Intelligence*, edited by A.Bond and L.Gasser, Morgan Kaufmann Publ. Inc.:San Mateo, CA, pp. 90-101 1988.
- [SD81] R.G.Smith and R.Davis, "Frameworks for cooperation in distributed

problem solving," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* vol. SMC - 11 pp. 61 - 70, 1981.

[SFO86] S.F.Smith, M.S.Fox and P.S.Ow. "Constructing and maintaining detailed production plans: Investigations into the development of knowledge-based factory scheduling systems," *AI Magazine* Fall 1986 pp. 45 - 61.

[SO85] S.F.Smith, and P.S.Ow. "The use of multiple problem decompositions in time constrained planning tasks," Intelligent Systems Laboratory, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, Pennsylvania, CMU-RI-TR-85-11, 1985.

[TE89] Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Προγραμματισμού και Γ.Τ.Ο.Μ., Ερευνητικό πρόγραμμα: "Εφαρμογή της Πληροφορικής στον έλεγχο της τεχνικής αρτιότητας και οικονομικότητας των υπό πίεση αρδευτικών δικτύων - στάδιο μελέτης," Φορέας εκτέλεσης ΕΜΠ, Επιστημονικός υπεύθυνος Καθ. Γ.Τσακίρης, Πρώτη έκθεση προόδου, Αθήνα, 1989.

[W85] H.P.Williams, *Model Building in Mathematical Programming*, second edition, John Wiley & Sons:New York, NY, 1985.

[YHS85] J.D.Yang, M.N.Huhns and L.M.Stephens "An architecture for control and communications in distributed artificial intelligence systems," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* vol. SMC - 15 pp. 316-326, 1985.

## Abstract

Distributed Problem Solving (DPS) is defined as the cooperative solution of problems by a decentralised and loosely coupled collection of problem solvers (agents), each of them knowing how to execute only some of the necessary tasks. This approach considers the problem solving process as occurring in three phases: problem decomposition, subproblem solution and answer synthesis. In the problem decomposition phase one has to determine which tasks will be executed by each agent and when. One of the key research questions in the problem decomposition process is how to decompose a problem in order to minimize the cost of resources needed for its solution. The effort for the cooperation among the agents of a Distributed Problem Solving System (DPSS) confronts many difficulties because of the fact that each agent has inconsistent knowledge about the knowledge and the local goals of the other agents. So, there are conflicting views and goals among the agents. The Open Systems approach, which was formulated by C.Hewitt in 1985, aims to study the behavior of the agents who cooperate to solve a problem (i.e. the behavior of the DPSSs) and to provide mechanisms to solve the inconsistencies of their knowledge.

This thesis deals with the first phase of the DPSSs operation, i.e. the task decomposition problem, under the criterion of resource minimization and with the Open Systems approach. The contribution of the thesis is:

- 1) The C.Hewitt's approach is compared with the consideration of P.Checkland about the Soft Systems Thinking (1981). Even if the first approach comes from the discipline of Artificial Intelligence and the second comes from the Systems Theory discipline, they are both dealing with the same object i.e.

the organizations. The main conclusions of the comparison are:

a) The two approaches try to gather and accommodate the different and conflicting aspect of the members of a social system (i.e. an organization).

b) The principles of Soft Systems Methodology, which was formulated by P.Checkland, could help the Open Systems approach to solve the Due Process problem.

2) Mathematical programming models are constructed in order to describe the decomposition process in the DPSSs under the criterion of resource minimization.

3) The complexity of the above problem is studied and it is proved that some of its simplest special cases are in the class of NP-complete problems.

4) Exact and heuristic algorithms are presented for the solution of the general decomposition problem and two of its special cases.

5) An application of the above algorithms is presented to an actual system which could be considered as a distributed problem solver used for the assesment of the design of irrigation projects.