ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΜΑ:
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ

ΚΑΦΦΕΤΖΑΚΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής
ΜΠΙΛΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2004

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ 5

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 5

1.1 Χαρακτηριστικά της Επιτυχούς Ανάπτυξης Προϊόντων 6

1.2 Ποιος Σχεδιάζει και Αναπτύσσει τα Προϊόντα; 7

1.3 Κόστος Ανάπτυξης Προϊόντος 8

1.4 Οι Προκλήσεις της Ανάπτυξης Προϊόντων 8

1.5 Γενική Διαδικασία Ανάπτυξης 9

2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ 14

3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ 19

3.1 Μοντέλα CPM και PERT 20

3.2 Αλληλουχία και Προγραμματισμός Εργασιών Σχεδιασμού 25

3.2.1 Πίνακας Δομής Σχεδιασμού 25

3.2.2 Ανατροφοδοτήσεις και Διασταυρώσεις 28

3.2.3 Μοντέλα Διαδοχικής Επανάληψης 29

3.2.4 Εκτίμηση Χρόνου Κύκλου Επανάληψης 30

3.3 Αποσύνθεση Μεγάλων Συστημάτων 30

3.3.1 Μέθοδος Πίνακα Μετασχηματισμού Εργασίας 31

3.3.2 Μοντέλο Αποσύνθεσης Δραστηριότητας – Ενότητας 32

3.3.3 Άλλα Μοντέλα Αποσύνθεσης 33

3.4 Καθορισμός Αποτελεσμάτων Στοχαστικών Χρόνων Καθυστέρησης στον Χρόνο Υλοποίησης της Ανάπτυξης Προϊόντος 34

3.4.1 Μοντέλο Q-GERT 34

3.4.2 Μοντέλο Δικτύου Αναμονής 35

3.5 Καθορισμός Κατάλληλου Χρόνου Αναθεώρησης Σχεδιασμού/ Διάθεση Προϊόντων36

3.5.1 Κατάλληλος Χρόνος Αναθεώρησης Σχεδιασμού 36

3.5.2 Προγραμματισμός Ενότητας 36

3.5.3 Διάθεση Προϊόντων ... 37

3.5.4 Στόχοι Σταδίων ... 38

3.6 Καθορισμός του Ποσού Παραλληλίας ... 39

3.6.1 Παράλληλος Προγραμματισμός ... 39

3.6.2 Μοντέλο WTM Παράλληλο / σε Σειρά ... 40

3.6.3 Επικάλυψη Σταδίων ... 41

4 ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ... 43

4.1 Εισαγωγή ... 43

4.1.1 Τυποποίηση προβλημάτων ... 44

4.1.2 Αποδόμηση προβλήματος ... 46

4.1.3 Ανάθεση Υποπροβλημάτων ... 49

4.2 Μέθοδος Πίνακα Μετασχηματισμού Εργασίας ... 50

4.2.1 Εισαγωγή ... 50

4.2.2 Ανάπτυξη Μοντέλου Επανάληψης Σχεδιασμού ... 51

4.2.2.1 Υποθέσεις Μοντέλου Πίνακα Μετασχηματισμού Εργασίας ... 52

4.2.2.2 Αποσύνθεση Ιδιοτιμών ... 55

4.2.2.3 Ερμηνεία της Eigenstructure ... 56

4.2.3 Ιδιοτιμές ... 57

4.2.4 Ιδιοδιανύσματα ... 59

4.2.5 Ταξινόμηση των Κόμβων ... 60

4.2.6 Ένα Αριθμητικό Παράδειγμα ... 61

4.2.7 Εφαρμογή στο Σχεδιασμό Συστήματος Φρένων ... 63

4.2.8 Συμπεράσματα ... 68

4.3 Αποσύνθεση και σχεδιασμός των δραστηριοτήτων σχεδιασμού ... 70

4.3.1 Αποσύνθεση συστημάτων ... 70

4.3.1.1 Αλγόριθμος Προσδιορισμού Ομάδων ... 72

4.3.1.2 Καθορισμός ενοτήτων ... 74

4.3.1.3 Καθορισμός των δραστηριοτήτων σχεδιασμού ... 75

4.3.1.4 Απεικόνιση των δραστηριοτήτων σχεδιασμού ... 76

4.3.1.5 Πλεονεκτήματα της αποσύνθεσης των δραστηριοτήτων σχεδιασμού ... 76

4.3.2 Βασισμένο στη γνώση σύστημα ... 77

4.3.2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος ... 78

4.3.2.2 Ανάλυση δικτύου ... 79

4.3.3 Αριθμητικό παράδειγμα ... 84

4.3.4 Συμπεράσματα ... 91

5 ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ... 93

5.1 Εισαγωγή ... 93

5.2 Μοντέλο ... 97

5.3 Ανάλυση μιας σταθερής εκδοχής του προβλήματος ... 101

5.4 Αριθμητικό παράδειγμα ... 108

5.5 Συμπεράσματα ... 113

6 ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΤΑΔΙΩΝ ... 116

6.1 Εισαγωγή ... 116

6.1.1 Οι κίνδυνοι της επικάλυψης ... 118

6.2 Σχετική Εργασία ... 119

6.3 Μοντέλα Επικάλυψης και Διαφορές τους ... 122

6.4 Μοντέλο 1 ... 123

6.4.1 Εξέλιξη και Ευαισθησία ... 124

6.4.1.1 Εξέλιξη Upstream Πληροφοριών ... 125

6.4.1.2 Downstream Επαναλήψεις και Ευαισθησία της Downstream Επανάληψης ... 126

6.4.1.3 Επιπτώσεις της Upstream Εξέλιξης και της Downstream Ευαισθησίας ... 128

6.4.1.4 Μέτρηση και Τροποποίηση Εξέλιξης και Ευαισθησίας 129

6.4.2 Μοντέλο Διαδικασίας Επικάλυψης..... 130

6.4.3 Παράδειγμα Μοντέλου Επικάλυψης: Διαδικασία Ανάπτυξης Εξωτερικού Πλαισίου Πόρτας 134

6.4.4 Εννοιολογικό πλαίσιο για Δραστηριότητες που Επικαλύπτονται 140

6.4.4.1 Πλαίσιο Ευαισθησίας – Εξέλιξης 140

6.4.4.2 Παράδειγμα του Εννοιολογικού Πλαισίου: Ανάπτυξη Μπίπερ στη Motorola..... 143

6.4.5 Συμπεράσματα 146

6.5 Μοντέλο 2 147

6.5.1 Εισαγωγή..... 147

6.5.2 Μαθηματικό Μοντέλο 148

6.5.2.1 Αβεβαιότητα και εξέλιξη 149

6.5.2.2 Downstream ευαισθησία..... 151

6.5.2.3 Παράλληλη Επικοινωνία και Επανάληψη 152

6.5.2.4 Περίληψη Παραμέτρων και Υποθέσεων του Μοντέλου 153

6.5.3 Βέλτιστη Παράλληλη Επικοινωνία..... 155

6.5.4 Παράλληλη επικοινωνία και επικάλυψη..... 157

6.5.5 Προ-επικοινωνία και επικάλυψη..... 160

6.5.6 Συζήτηση και συμπέρασμα 163

7 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 166

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... 169

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 198

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στην κατασκευή μοντέλων διαδικασίας για την διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος. Η κατανόηση και η μοντελοποίηση μιας διαδικασίας είναι ένα σημαντικό πρώτο βήμα στην κατασκευή διοικητικά χρήσιμων βοηθημάτων απόφασης. Η ανάπτυξη προϊόντος είναι μια σύνθετη διαδικασία και είναι πιθανό να είναι χρήσιμα πολλά μοντέλα διαδικασίας για τη λήψη αποφάσεων διαχείρισης. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η παρουσίαση κάποιων μοντέλων και η περαιτέρω ανάλυση ορισμένων από αυτά, όπως επίσης και τα προτερήματα και οι αδυναμίες των διαφόρων προσεγγίσεων μοντελοποίησης. Επίσης προτείνεται ένα νέο σύνολο κριτηρίων για την αξιολόγηση των μοντέλων ανάπτυξης προϊόντων.

Η οικονομική επιτυχία των κατασκευαστικών εταιριών εξαρτάται από τη δυνατότητά τους να προσδιορίσουν τις ανάγκες των πελατών και να δημιουργήσουν γρήγορα τα προϊόντα που ικανοποιούν αυτές τις ανάγκες και μπορούν να είναι προϊόντα με χαμηλότερο κόστος. Η επίτευξη αυτών των στόχων δεν είναι απλώς ένα πρόβλημα μάρκετινγκ, ούτε είναι απλώς ένα πρόβλημα σχεδιασμού ή ένα πρόβλημα κατασκευής. Είναι ένα πρόβλημα ανάπτυξης προϊόντων που περιλαμβάνει όλες αυτές τις λειτουργίες.

Η ανάπτυξη προϊόντος είναι μια σημαντική λειτουργία των τεχνολογικά βασιζόμενων εταιριών. Η επιτυχία της προσπάθειας ανάπτυξης προϊόντος εξασφαλίζει τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα εταιριών και οικονομιών.

Η ανάπτυξη προϊόντος σε συστήματα μεγάλης κλίμακας είναι μια σύνθετη διαδικασία. Σύνθετη λόγω του συνόλου των τεχνικών θεμάτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη και σύνθετη λόγω της ποικιλομορφίας ανθρώπων και οργανωτικών δομών που απασχολούνται καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής της προσπάθειας ανάπτυξης προϊόντος. Η ανάπτυξη προϊόντος περιλαμβάνει αρκετές οργανωτικές μονάδες και μηχανικούς τομείς. Η έρευνα στην ανάπτυξη προϊόντος περιλαμβάνει εργασίες από διάφορες περιοχές έρευνας, που έχουν σχέση με το μηχανικό και το διοικητικό κομμάτι. Οι ερευνητές του μηχανικού τομέα επικεντρώνονται στις αποφάσεις.

μηχανικού σχεδιασμού, ενώ η έρευνα στο κομμάτι της διαχείρισης επικεντρώνεται στα αναρίθμητα οργανωτικά θέματα που περιλαμβάνονται στην ανάπτυξη προϊόντος. Και οι δύο τομείς έρευνας έχουν αξία για τον ερευνητή της ανάπτυξης προϊόντος.

Ένα *προϊόν* είναι κάτι που πωλείται από μια επιχείρηση στους πελάτες της. *Ανάπτυξη Προϊόντος* είναι η διαδικασία μετατροπής (μετασχηματισμού) των αναγκών σε μια τεχνική και εμπορική λύση. Είναι η διαδικασία που περιλαμβάνει ένα νέο ή τροποποιημένο προϊόν, την εισαγωγή του στην «αγορά» και τον κύκλο ζωής του. Κάθε διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος είναι μοναδική *αλλά* οι διαδικασίες έχουν κοινά χαρακτηριστικά ή στοιχεία. Αν είμαστε σε θέση να καταλάβουμε τι κοινό έχουν αυτές οι διαδικασίες, ίσως θα είμαστε και σε θέση να καθοδηγήσουμε τη διαχείριση μελλοντικών διαδικασιών ανάπτυξης προϊόντος.

1.1 Χαρακτηριστικά της Επιτυχούς Ανάπτυξης Προϊόντων

Από την άποψη των επενδυτών σε μια επιχείρηση κέρδους, η επιτυχής ανάπτυξη προϊόντων οδηγεί σε προϊόντα που μπορούν να παραχθούν και να πωληθούν επικερδώς, όμως το επικερδώς είναι συχνά δύσκολο να καθοριστεί γρήγορα και άμεσα. Πέντε πιο συγκεκριμένες διαστάσεις, που αφορούν τελικά το κέρδος, χρησιμοποιούνται συνήθως για να αξιολογήσουν την απόδοση μιας προσπάθειας ανάπτυξης προϊόντων:

- **Ποιότητα προϊόντος:** Πόσο καλό είναι το προϊόν που προκύπτει από την προσπάθειας ανάπτυξης; Είναι εύρωστο και αξιόπιστο; Η ποιότητα του προϊόντος απεικονίζεται τελικά στο μερίδιο αγοράς και στην τιμή που οι πελάτες είναι πρόθυμοι να πληρώσουν.

- **Κόστος Προϊόντος:** Ποιο είναι το κόστος παραγωγής του προϊόντος; Αυτό το κόστος περιλαμβάνει τα έξοδα σε κύριο εξοπλισμό και σχεδίαση καθώς επίσης και το αυξητικό κόστος παραγωγής κάθε μονάδας προϊόντος. Το κόστος προϊόντος καθορίζει πόσο κέρδος προκύπτει στην εταιρία για έναν συγκεκριμένο όγκο πωλήσεων και μια συγκεκριμένη τιμή πώλησης.

- **Χρόνος Ανάπτυξης:** Πόσο γρήγορα η ομάδα ολοκλήρωσε την προσπάθεια ανάπτυξης προϊόντος; Ο χρόνος ανάπτυξης καθορίζει πόσο η εταιρία μπορεί να ανταποκριθεί στον ανταγωνισμό και στις τεχνολογικές εξελίξεις, καθώς επίσης και πόσο γρήγορα η εταιρία λαμβάνει οικονομικές επιστροφές από τις προσπάθειες της ομάδας.

- **Κόστος Ανάπτυξης:** Πόσο πρέπει η εταιρία να δαπανήσει για να αναπτύξει το προϊόν; Το κόστος ανάπτυξης είναι συνήθως ένα σημαντικό μέρος της επένδυσης που απαιτείται για να επιτευχθούν τα κέρδη.
- **Ικανότητα Ανάπτυξης:** Είναι η ομάδα και η εταιρία ικανές να αναπτύξουν μελλοντικά προϊόντα ως αποτέλεσμα της εμπειρίας τους με ένα πρόγραμμα ανάπτυξης προϊόντος; Η ικανότητα ανάπτυξης είναι ένα προτέρημα που η εταιρία μπορεί να χρησιμοποιήσει για να αναπτύξει προϊόντα αποτελεσματικότερα και οικονομικά στο μέλλον.

Η υψηλή απόδοση σε αυτές τις πέντε διαστάσεις οδηγεί τελικά σε οικονομική επιτυχία.

1.2 Ποιος Σχεδιάζει και Αναπτύσσει τα Προϊόντα;

Η ανάπτυξη προϊόντων είναι μια διεπιστημονική δραστηριότητα που απαιτεί συνεισφορές από σχεδόν όλες τις λειτουργίες μιας εταιρίας. Εντούτοις, τρεις λειτουργίες είναι σχεδόν πάντα κεντρικές σε ένα πρόγραμμα ανάπτυξης προϊόντων:

- **Marketing:** Η δραστηριότητα του μάρκετινγκ έχει να κάνει με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της εταιρίας και των πελατών της. Το μάρκετινγκ διευκολύνει συχνά στον προσδιορισμό των ευκαιριών προϊόντων, τον καθορισμό των τομέων αγοράς, και τον εντοπισμό των αναγκών πελατών.
- **Σχεδιασμός:** Η λειτουργία σχεδιασμού διαδραματίζει καθοδηγητικό ρόλο στον καθορισμό της φυσικής μορφής του προϊόντος ούτως ώστε να ικανοποιηθούν καλύτερα οι ανάγκες των πελατών. Σε αυτό το πλαίσιο, η λειτουργία σχεδιασμού περιλαμβάνει το μηχανικό σχεδιασμό (μηχανικό, ηλεκτρικό, λογισμικό, κ.λ.π.) και βιομηχανικό σχεδιασμό (αισθητική, εργονομία, user interfaces).
- **Κατασκευή:** Η λειτουργία κατασκευής είναι πρώτιστα αρμόδια για το σχεδιασμό και την ενεργοποίηση του συστήματος παραγωγής προκειμένου να παραχθεί το προϊόν. Η λειτουργία κατασκευής επίσης συχνά περιλαμβάνει την αγορά, τη διανομή, και την εγκατάσταση. Αυτή η συλλογή δραστηριοτήτων καλείται μερικές φορές *αλυσίδα ανεφοδιασμού*.

1.3 Κόστος Ανάπτυξης Προϊόντος

Το κόστος της ανάπτυξης προϊόντος είναι κατά προσέγγιση ανάλογο με τον αριθμό των ατόμων στην ομάδα προγράμματος και με τη διάρκεια του προγράμματος. Εκτός από τις δαπάνες για την προσπάθεια ανάπτυξης, μια εταιρία σχεδόν πάντα θα πρέπει να κάνει κάποια επένδυση στο σχεδιασμό και τον εξοπλισμό που απαιτούνται για την παραγωγή. Αυτή η δαπάνη είναι συχνά τόσο μεγάλη όσο το υπόλοιπο του προϋπολογισμού ανάπτυξης προϊόντων. Εντούτοις, είναι μερικές φορές χρήσιμο να υπολογίζονται αυτές οι δαπάνες ως τμήμα του σταθερού κόστους παραγωγής.

1.4 Οι Προκλήσεις της Ανάπτυξης Προϊόντων

Η ανάπτυξη σημαντικών προϊόντων είναι δύσκολη. Λίγες επιχειρήσεις είναι ιδιαίτερα επιτυχείς για αρκετό χρόνο. Αυτές οι πιθανότητες παρουσιάζουν μια σημαντική πρόκληση για μια ομάδα ανάπτυξης προϊόντων. Μερικά χαρακτηριστικά που κάνουν την ανάπτυξη προϊόντων προκλητική είναι:

- **Ανταλλαγές (Trade-offs):** Ένα αεροπλάνο μπορεί να γίνει ελαφρύτερο, αλλά αυτή η ενέργεια θα αυξήσει πιθανώς το κόστος παραγωγής. Μια από τις δυσκολότερες πτυχές της ανάπτυξης προϊόντων είναι η αναγνώριση, η κατανόηση και η διαχείριση τέτοιες ανταλλαγών με έναν τρόπο που μεγιστοποιεί την επιτυχία του προϊόντος.
- **Δυναμική:** Βελτίωση τεχνολογιών, εξέλιξη προτιμήσεων πελατών, ανταγωνιστές, εισαγωγή νέων προϊόντων. Η λήψη αποφάσεων σε ένα περιβάλλον σταθερής αλλαγής είναι ένα δύσκολο καθήκον.
- **Χρονική πίεση:** Οποιαδήποτε από αυτές τις δυσκολίες θα ήταν εύκολο να διαχειριστεί εάν υπήρχε αφθονία χρόνου, αλλά οι αποφάσεις ανάπτυξης προϊόντων πρέπει συνήθως να ληφθούν γρήγορα και χωρίς πλήρεις πληροφορίες.
- **Οικονομικά:** Η ανάπτυξη, η παραγωγή, και το μάρκετινγκ ενός νέου προϊόντος απαιτούν μια μεγάλη επένδυση. Για να έχει αυτή η επένδυση μια λογική επιστροφή, το προϊόν που προκύπτει πρέπει να είναι ελκυστικό στους πελάτες και να έχει σχετικά μικρό κόστος παραγωγής.

Για πολλούς ανθρώπους, η ανάπτυξη προϊόντων είναι ενδιαφέρουσα ακριβώς επειδή είναι προκλητική και για άλλους για κάποιες ουσιαστικές ιδιότητες:

- **Δημιουργία:** Η διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων ξεκινά με μια ιδέα και τελειώνει με την παραγωγή ενός φυσικού αντικειμένου. Οι διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντων είναι έντονα δημιουργικές.
- **Ικανοποίηση κοινωνικών και ατομικών αναγκών:** Όλα τα προϊόντα στοχεύουν στην ικανοποίηση αναγκών κάποιου είδους. Τα άτομα που ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη νέων προϊόντων μπορούν σχεδόν πάντα να βρουν θεσμικές τοποθετήσεις, στις οποίες μπορούν να αναπτύξουν τα προϊόντα που ικανοποιούν αυτά που θεωρούνται σημαντικές ανάγκες.
- **Ποικιλομορφία ομάδας:** Η επιτυχής ανάπτυξη απαιτεί πολλές διαφορετικές ικανότητες και ταλέντα. Κατά συνέπεια, οι ομάδες ανάπτυξης περιλαμβάνουν ανθρώπους με ένα ευρύ φάσμα διαφορετικής κατάρτισης, εμπειρίας, προοπτικών, και προσωπικοτήτων.
- **Ομαδικό πνεύμα:** Στις ομάδες ανάπτυξης προϊόντων τα μέλη συνδυάζονται έτσι ώστε να επικρατεί ένα κλίμα συναδελφικότητας μεταξύ τους.

1.5 Γενική Διαδικασία Ανάπτυξης

Μια διαδικασία είναι μια σειρά βημάτων που μετασχηματίζει ένα σύνολο δεδομένων εισαγωγής σε ένα σύνολο αποτελεσμάτων. Μια διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων είναι μια ακολουθία βημάτων ή δραστηριοτήτων που μια επιχείρηση χρησιμοποιεί για να συλλάβει, να σχεδιάσει, και να εμπορευματοποιήσει ένα προϊόν. Μερικές εταιρίες καθορίζουν και ακολουθούν μια ακριβή και λεπτομερή διαδικασία ανάπτυξης, ενώ άλλες μπορεί ακόμη και να μην είναι σε θέση να περιγράψουν τις διαδικασίες τους. Επιπλέον, κάθε επιχείρηση υιοθετεί μια διαδικασία τουλάχιστον κάπως διαφορετική από αυτήν κάθε άλλης επιχείρησης. Στην πραγματικότητα, η ίδια επιχείρηση μπορεί να ακολουθήσει διαφορετικές διαδικασίες για κάθε έναν από διάφορους διαφορετικούς τύπους προγραμμάτων ανάπτυξης.

Μια καλά καθορισμένη διαδικασία ανάπτυξης είναι χρήσιμη για τους ακόλουθους λόγους:

- **Εξασφάλιση ποιότητας:** Μια διαδικασία ανάπτυξης καθορίζει τις φάσεις που θα περάσει ένα πρόγραμμα ανάπτυξης και τα σημεία ελέγχου σε όλη τη διάρκεια. Όταν αυτές οι φάσεις και σημεία ελέγχου επιλέγονται σωστά τότε εξασφαλίζεται η ποιότητα του προκύπτοντος προϊόντος.

- **Συντονισμός:** Μια σωστά διορθωμένη διαδικασία ανάπτυξης λειτουργεί ως κύριο πρόγραμμα που καθορίζει τους ρόλους του καθενός στην ομάδα ανάπτυξης. Αυτό το σχέδιο ενημερώνει τα μέλη της ομάδας πότε απαιτείται η συνεισφορά τους και με ποια άτομα θα πρέπει να ανταλλάξουν πληροφορίες και υλικά.
- **Προγραμματισμός:** Μια διαδικασία ανάπτυξης περιέχει κύρια σημεία που αντιστοιχούν στην ολοκλήρωση κάθε φάσης. Ο συγχρονισμός αυτών των κύριων σημείων οδηγεί στο πρόγραμμα του συνολικού προγράμματος ανάπτυξης.
- **Διαχείριση:** Μια διαδικασία ανάπτυξης είναι ένα μέτρο σύγκρισης για τον υπολογισμό της απόδοσης μιας προσπάθειας ανάπτυξης που βρίσκεται σε εξέλιξη. Συγκρίνοντας τα πραγματικά γεγονότα με την καθιερωμένη διαδικασία, ένας διευθυντής μπορεί να αναγνωρίσει τις πιθανές προβληματικές περιοχές.
- **Βελτίωση:** Η προσεκτική τεκμηρίωση της διαδικασίας ανάπτυξης μιας οργάνωσης συχνά βοηθά να προσδιοριστούν οι ευκαιρίες για βελτίωση.

Η γενική διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων αποτελείται από έξι φάσεις. Η διαδικασία ξεκινά με μια φάση προγραμματισμού, η οποία είναι ο συνδετικός κρίκος με τις προηγμένες δραστηριότητες ανάπτυξης έρευνας και τεχνολογίας. Το αποτέλεσμα της φάσης προγραμματισμού είναι η δήλωση του στόχου του προγράμματος, ο οποίος είναι το δεδομένο εισαγωγής που απαιτείται για να ξεκινήσει η φάση ανάπτυξης της ιδέας και που χρησιμεύει ως οδηγός για την ομάδα ανάπτυξης.

Οι έξι φάσεις της γενικής διαδικασίας ανάπτυξης είναι:

0. **Προγραμματισμός:** Η δραστηριότητα προγραμματισμού αναφέρεται συχνά ως «φάση μηδέν». Αυτή η φάση ξεκινά με τη στρατηγική της εταιρίας και περιλαμβάνει την αξιολόγηση της ανάπτυξης τεχνολογίας και των στόχων της αγοράς. Το αποτέλεσμα της φάσης προγραμματισμού είναι η δήλωση του στόχου του προγράμματος, η οποία καθορίζει την αγορά για το προϊόν, τους στόχους της εταιρίας, τις βασικές υποθέσεις, και τους περιορισμούς.
1. **Ανάπτυξη ιδέας:** Στη φάση ανάπτυξης ιδέας, προσδιορίζονται οι ανάγκες της αγοράς, παράγονται και αξιολογούνται οι εναλλακτικές ιδέες προϊόντων, και

μια ή περισσότερες ιδέες επιλέγονται για περαιτέρω δοκιμή ανάπτυξης. Μια ιδέα είναι η περιγραφή της μορφής, της λειτουργίας, και των χαρακτηριστικών ενός προϊόντος και συνοδεύεται συνήθως από ένα σύνολο προδιαγραφών, μια ανάλυση των ανταγωνιστικών προϊόντων, και μια οικονομική αιτιολόγηση του προγράμματος.

2. **System-level design:** Η φάση σχεδιασμού επιπέδου συστήματος περιλαμβάνει τον καθορισμό της αρχιτεκτονικής του προϊόντος και την αποσύνθεση του προϊόντος σε υποσυστήματα και συστατικά. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης καθορίζεται συνήθως το σχέδιο συναρμολόγησης για το σύστημα παραγωγής. Το αποτέλεσμα αυτής της φάσης περιλαμβάνει συνήθως ένα γεωμετρικό σχεδιάγραμμα του προϊόντος, μια λειτουργική περιγραφή για κάθε ένα από τα υποσυστήματα του προϊόντος, και ένα προκαταρκτικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας για την τελική διαδικασία συναρμολόγησης.

3. **Λεπτομερής Σχεδιασμός:** Η φάση του λεπτομερή σχεδιασμού περιλαμβάνει τον πλήρη καθορισμό της γεωμετρίας, των υλικών, και των ανοχών όλων των μοναδικών εξαρτημάτων του προϊόντος και τον προσδιορισμού όλων των standard εξαρτημάτων που αγοράζονται από τους προμηθευτές. Δημιουργείται ένα πλάνο διαδικασίας και σχεδιάζονται όλα τα μέρη που κατασκευάζονται στο σύστημα παραγωγής. Το αποτέλεσμα αυτής της φάσης είναι η τεκμηρίωση ελέγχου για το προϊόν – τα σχέδια ή τα αρχεία υπολογιστών που περιγράφουν τη γεωμετρία κάθε εξαρτήματος και το σχεδιασμό παραγωγής του, οι προδιαγραφές των εξαρτημάτων που αγοράζονται, και τα πλάνα διαδικασίας για την κατασκευή και συναρμολόγηση του προϊόντος.

4. **Δοκιμή και Βελτίωση:** Η φάση δοκιμής και βελτίωσης περιλαμβάνει την κατασκευή και την αξιολόγηση των πολλαπλών εκδοχών προπαραγωγής του προϊόντος. Μια τυπική προσέγγιση διαμόρφωσης πρωτοτύπου ξεκινά με ένα alpha πρωτότυπο, συνεχίζει με ένα beta πρωτότυπο και τέλος έχουμε το τελικό προϊόν. Τα αρχικά (alpha) πρωτότυπα κατασκευάζονται συνήθως με εξαρτήματα σαν της παραγωγής – μέρη με την ίδια γεωμετρία και ιδιότητες υλικών όπως θα έπρεπε για την παραγωγή του προϊόντος, αλλά όχι απαραίτητα κατασκευασμένα με τις πραγματικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή. Τα alpha πρωτότυπα υποβάλλονται σε δοκιμή για να εξακριβωθεί εάν το προϊόν θα λειτουργήσει όπως σχεδιάστηκε

ή όχι και εάν το προϊόν ικανοποιεί ή όχι τις βασικές ανάγκες πελατών. Τα επόμενα (beta) πρωτότυπα κατασκευάζονται συνήθως με τα μέρη που παρέχονται από τις τελικές διαδικασίες παραγωγής αλλά μπορεί να μην συναρμολογούνται χρησιμοποιώντας την τελική διαδικασία συναρμολόγησης. Τα beta πρωτότυπα αξιολογούνται εκτενώς εσωτερικά και επίσης εξετάζονται από πελάτες στο περιβάλλον χρήσης τους. Ο στόχος των beta πρωτότυπων είναι συνήθως να απαντήσουν σε ερωτήσεις για την απόδοση και την αξιοπιστία προκειμένου να προσδιοριστούν οι απαραίτητες μηχανικές αλλαγές για το τελικό προϊόν.

5. **Παραγωγή εκκίνησης:** Στη φάση παραγωγής εκκίνησης, το προϊόν γίνεται χρησιμοποιώντας το τελικό σύστημα παραγωγής. Ο σκοπός της εκκίνησης είναι να εκπαιδευθεί το εργατικό δυναμικό και να επιλυθούν οποιαδήποτε υπόλοιπα προβλήματα στις διαδικασίες παραγωγής. Τα προϊόντα που παράγονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής παρέχονται μερικές φορές σε κάποιους πελάτες και αξιολογούνται προσεκτικά για να προσδιορίσουν οποιαδήποτε υπόλοιπα μειονεκτήματα. Η μετάβαση από την εκκίνηση παραγωγή στην κανονική παραγωγή είναι συνήθως βαθμιαία. Σε κάποιο σημείο αυτής της μετάβασης, το προϊόν προωθείται και είναι διαθέσιμο για διαδεδομένη διανομή.

Όπως και σε άλλες διαδικασίες, είναι δυνατό και χρήσιμο να κατασκευαστούν ποσοτικά μοντέλα της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος. Οι στόχοι της μοντελοποίησης της διαδικασίας είναι διάφοροι: περιλαμβάνουν εκμάθηση της διαδικασίας και προτάσεις τρόπων με τους οποίους μπορεί η διαδικασία να ελεγχθεί. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος και έχει γίνει έρευνα όσον αφορά την ανάπτυξη ή βελτίωση των μοντέλων διαδικασίας. Σ' αυτή την εργασία παρουσιάζονται τα δημοσιευμένα μοντέλα και δίνονται κατευθυντήριες γραμμές για μελλοντική ανάπτυξη μοντέλων.

Δεν προκαλεί έκπληξη η ύπαρξη ενός αριθμού μοντέλων ανάπτυξης προϊόντος που αποκλίνουν – η ανάπτυξη προϊόντος είναι σύνθετη. Οι ερευνητές εστιάζουν στη βελτίωση της λήψης απόφασης και στην κατασκευή μοντέλων που να το επιτρέπουν αυτό. Οι χρήστες πρέπει να καθορίζουν ποιο, εάν υπάρχει, από τα υπάρχοντα μοντέλα εξυπηρετεί τις ανάγκες τους. Υπάρχουν σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της

θεωρητικής δύναμης ενός μοντέλου και της πρακτικής του αξίας. Καμία δεν πρέπει να παραλείπεται.

Αυτή η εργασία περιλαμβάνει: Κεφάλαιο 1: προτείνεται ένα σύνολο κριτηρίων με τα οποία αξιολογούνται τα μοντέλα διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος, Κεφάλαιο 2: περιγράφονται τα υπάρχοντα μοντέλα ανάπτυξης προϊόντος και αξιολογούνται με βάση τα κριτήρια του κεφαλαίου 1, Κεφάλαιο 3: παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα της κατάστασης της μοντελοποίησης διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος, και στα Κεφάλαια 4, 5, 6, παρουσιάζονται αναλυτικά κάποια από τα μοντέλα που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2, Κεφάλαιο 7: συμπεράσματα και συζήτηση πάνω στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν σε αυτή την εργασία.

2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Υπάρχουν κάποια κριτήρια βάση των οποίων αξιολογούνται τα πλεονεκτήματα των προτεινόμενων μοντέλων της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος. Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αυτά τα κριτήρια και πως εφαρμόζονται στην περίπτωση της μοντελοποίησης της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος. Με βάση τον απώτερο σκοπό της μοντελοποίησης διαχείρισης της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος, δημιουργούνται ένα ή περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης που βελτιώνουν τη λήψη αποφάσεων διαχείρισης.

Για να έχει ένα μοντέλο χρηστική αξία πρόβλεψης, πρέπει να ικανοποιεί διάφορα κριτήρια: να ασχολείται με ένα σημαντικό διοικητικό θέμα, η λήψη απόφασης να βασίζεται σε πληροφορίες που είναι διαθέσιμες και ακριβείς, οι υποθέσεις και οι απλοποιήσεις του μοντέλου να είναι λογικές και το μοντέλο να είναι υπολογιστικά εύχρηστο. Κάθε ένα από τα θέματα αναλύεται στη συνέχεια.

Το **πρώτο** θέμα είναι εάν το μοντέλο ασχολείται με ένα σημαντικό διοικητικό θέμα. Αυτό είναι μια υποκειμενική κρίση. Η σημασία της ανάπτυξης προϊόντος θα υποδήλωνε ότι οποιαδήποτε ρεαλιστική διοικητική απόφαση που περιλαμβάνεται στη διαχείριση σχεδιασμού θα ήταν σε θέση να εκπληρώσει αυτό το κριτήριο. Αυτές οι αποφάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν προγραμματισμό εργασιών, κατανομή πόρων, κυκλοφορία προϊόντων, καθορισμό στόχων, ή πολλές διοικητικές εργασίες σχετικές με την ανάπτυξη προϊόντων.

Το **δεύτερο** θέμα είναι εάν το μοντέλο βασίζεται σε πληροφορίες που είναι εύκολα διαθέσιμες έγκαιρα για την υποστήριξη της λήψης απόφασης. Αυτό είναι ένα κάπως δύσκολο εμπόδιο για πολλές από τις μεθοδολογίες μοντελοποίησης, δεδομένου ότι η φύση της μαθηματικής μοντελοποίησης απαιτεί τη χρήση επακριβή στοιχείων, ενώ η ανάπτυξη προϊόντων συντελείται σε ένα περιβάλλον αβεβαιότητας και ασάφειας. Εντούτοις, υπάρχουν διάφορα δεδομένα πρόβλεψης που είναι διαθέσιμα έγκαιρα στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος, και αυτά είναι τα δεδομένα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή χρήσιμων μοντέλων πρόβλεψης. Ο προσδιορισμός αυτών των δεδομένων είναι ένα δύσκολο πρόβλημα.

Το **τρίτο** θέμα περιλαμβάνει τις υποθέσεις και τις απλοποιήσεις που είναι απαραίτητες για την κατασκευή και την ανάλυση του μοντέλου. Η μοντελοποίηση είναι μια διαδικασία απόσπασης από τον πραγματικό κόσμο. Οι εύχρηστες

μαθηματικές συναρτήσεις μπορούν να κατασκευαστούν από ένα περιορισμένο σύνολο σχέσεων (πολλαπλασιασμός, exponentiation, διαδικασίες Markov και ούτω καθ' εξής). Είναι τυπικά απαραίτητη η υπόθεση ότι η πραγματικότητα προσαρμόζεται σε μια ή περισσότερες από αυτές τις συναρτήσεις. Εάν η πραγματικότητα περιγράφεται καλά ή όχι από αυτήν την αφηρημένη μορφή είναι μια άλλη σημαντική υποκειμενική κρίση που συμβάλλει έντονα στην αντιληπτική ικανότητα της προσέγγισης μοντελοποίησης.

Το **τέταρτο** θέμα είναι κατά πόσο το μοντέλο είναι υπολογιστικά εύχρηστο. Συχνά αυτό δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό θέμα, επειδή, σύμφωνα με το δεύτερο θέμα που συζητήθηκε παραπάνω, το μέγεθος των έγκυρων συνόλων δεδομένων συχνά δεν είναι τόσο μεγάλο, και η δύναμη κάθε υπολογιστή γραφείου επιτρέπει τη χρήση και τη δυνατότητα εφαρμογής αυτών που τις προηγούμενες δεκαετίες θεωρούνταν σχετικά σύνθετα μοντέλα.

Αφού έχουν οριστεί τα κριτήρια βάση των οποίων τα μοντέλα θα αξιολογηθούν, χρειάζεται να οριστεί και το περιβάλλον στο οποίο μπορούν να αξιολογηθούν. Το πρώτο επίπεδο αξιοπιστίας είναι η πρώτη εγκυρότητα. Η πρώτη εγκυρότητα συνεπάγεται ότι το θέμα, τα δεδομένα, οι υποθέσεις, και η ευχρηστία φαίνονται λογικά σε όσους είναι εξοικειωμένοι με τον τομέα της διαχείρισης ανάπτυξης προϊόντος. Όλα τα μοντέλα που παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο έχουν αυτό το επίπεδο αξιοπιστίας.

Το δεύτερο στάδιο αξιοπιστίας είναι η εφαρμογή του πλαισίου μοντελοποίησης στα υπάρχοντα, αλλά αναδρομικά σύνολα δεδομένων που συγκεντρώνονται από την βιομηχανία. Τα καλύτερα από τα μοντέλα που παρουσιάζοντα σε αυτή την εργασία είναι τυπικά σε θέση να αποδείξουν την αξία τους με την εφαρμογή σε τέτοιους τύπους ρεαλιστικών συνόλων δεδομένων. (Να σημειωθεί ότι τα μοντέλα γενικά δεν χρησιμοποιούνται στην καθοδήγηση της λήψης απόφασης, αλλά για να δείξουν ότι θα μπορούσαν να καθοδηγήσουν τη λήψη απόφασης).

Το τρίτο στάδιο αξιοπιστίας είναι η χρήση του μοντέλου στην καθοδήγηση λήψης απόφασης σε ένα πειραματικό περιβάλλον. Αυτός ο τύπος περιβάλλοντος καλά ελεγχόμενος και επαναληπτικός και έτσι είναι δυνατόν να καταδειχθούν τα αποτελέσματα βελτίωσης της λήψης απόφασης. Αυτός ο τύπος απόδειξης είναι, εντούτοις, δύσκολος δεδομένου ότι οι τύποι προβλημάτων που είναι πιθανόν να

αντιμετωπιστούν σε πειραματικό περιβάλλον είναι συχνά πολύ απλούστεροι από εκείνους που αντιμετωπίζονται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Κανένα μοντέλο από αυτά που παρουσιάζονται εδώ δεν έχει αυτό το επίπεδο αξιοπιστίας, αλλά μπορεί να δώσει ένα σημαντικό τρόπο προσέγγισης όσον αφορά την περαιτέρω ανάπτυξη μοντελοποίησης της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος.

Το τέταρτο στάδιο αξιοπιστίας είναι η χρήση του μοντέλου στην καθοδήγηση λήψης απόφασης στον «πραγματικό» κόσμο. Αυτό είναι δύσκολο γιατί συχνά δεν υπάρχει αντικειμενική σύγκριση μεταξύ τροποποιημένης και μη τροποποιημένης κατάστασης και τα πραγματικά δεδομένα ανατρέπονται από άλλες επιδράσεις που μπορεί να επηρεάσουν την επιτυχία των αποφάσεων που λαμβάνονται από το μοντέλο. Κανένα από τα μοντέλα που παρουσιάζονται εδώ δεν επιτυγχάνουν αυτό το επίπεδο αξιοπιστίας, αλλά περιλαμβάνονται στον κατάλογο, ευλόγως, ως ο απώτερος σκοπός αυτού του τύπου προσέγγισης της μοντελοποίησης.

Έχουν επιχειρηματολογήσει ότι «η διαδικασία μέσω της οποίας ο έμπειρος επιστήμονας της διοίκησης καταλήγει σε ένα μοντέλο του υπό μελέτη φαινομένου, μπορεί πιθανότατα να περιγραφεί ως διαισθητική. Αν η μοντελοποίηση είναι διαισθητική και ευφυής, τότε τι συμβουλή θα είχαν οι ειδικοί για τους αρχάριους στη μοντελοποίηση; Ο Morris προτείνει να προσεγγίσουμε τη μοντελοποίηση ως μια διαδικασία εμπλουτισμού ή τελειοποίησης. Ξεκινά από μια αναλογία καλά αναπτυγμένων λογικών δομών και στη συνέχεια καταλήγει σε δύο είδη διαδικασίας εναλλαγής ή επανάληψης. Το πρώτο είδος της εναλλαγής παρουσιάζεται ανάμεσα στη διαφοροποίηση ενός μοντέλου και στην αντιμετώπιση των δεδομένων, με κάθε δοκιμή να αποκαλύπτει μια νέα διαφοροποίηση και κάθε διαφοροποίηση μια νέα δοκιμή. Το δεύτερο είδος είναι η εναλλαγή ανάμεσα στην διερεύνηση της συμπερασματικής ευχρηστίας και στις υποθέσεις του. Αν ένα μοντέλο είναι εύχρηστο από την άποψη ότι μπορεί να επιτύχει τους επιθυμητούς στόχους τότε ο αναλυτής μπορεί να απαιτήσει μεγαλύτερη απλούστευση ή πολυπλοκότητα στα δεδομένα. Αν το μοντέλο δεν είναι εύχρηστο, τότε ο αναλυτής επιστρέφει στην απλούστευση ή ενίσχυση των υποθέσεων.

Αλλά οι αναλυτές δεν αρκούνται στην πολυπλοκότητα και τις προεκτάσεις των μοντέλων. Ψάχνουμε για παραγωγική ενόραση και κινητήρια δύναμη. Για αυτό όσο απλούστερο είναι ένα μοντέλο τόσο ακριβέστερο είναι στην αναπαραγωγή συμπεριφορών που παρατηρούνται στον κόσμο. Ίσως για τους μηχανικούς η

νευτώνεια μηχανική να είναι το παγκόσμιο μοντέλο και να είναι διαυγής σε απλότητα, δύναμη και γενίκευση. Όταν προσπαθούμε να ανακαλύψουμε τη φυσική όσον αφορά κάποιες όψεις του κόσμου επιθυμούμε να βρούμε μοντέλα που αποτυπώνουν τέτοιου είδους κινητήρια δύναμη.

Αν αναζητούμε την εφαρμογή από άλλους των μοντέλων που αναπαράγουμε, τότε πρέπει να προετοιμαστούμε για την προβλέψιμη αντίσταση που θα προβάλλουν σε μοντέλα τα οποία δεν έχουν ενεργοποιήσει οι ίδιοι. Έχει παρατηρηθεί ένταση ανάμεσα στα «τύπος 1 λάθους», όπου πιστεύουμε τα αποτελέσματα ενός μοντέλου όταν το μοντέλο είναι λάθος, και «τύπος 2 λάθους», όπου δεν πιστεύουμε στη ορθότητα που ένα μοντέλο υποδεικνύει ενώ αυτό είναι σωστό. Πιστεύεται ότι οι ακαδημαϊκοί αναλυτές προσπαθούν περισσότερο να αποφεύγουν τα τύπου 1 λάθη εστιάζοντας στην αξιοπιστία του μοντέλου (η οποία τυπικά συσχετίζεται με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα του μοντέλου και ως εκ τούτου μεγαλύτερη αδιαφάνεια). Αυτό έχει προκαλέσει μια ανάλογη αύξηση των τύπου 2 λαθών γιατί οι ακαδημαϊκοί απέτυχαν να πείσουν τους εφαρμογείς για τη ρεαλιστικότητα των μοντέλων τους. Με άλλα λόγια τα μοντέλα τους στερούνται αξιοπιστίας. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά, υπάρχει άποψη ότι η λύση βρίσκεται στο να βοηθήσουμε τους εφαρμογείς να μάθουν τρόπους να αναπτύσσουν τα μοντέλα σύμφωνα με τους ακαδημαϊκούς.

Στην προσπάθεια να κρίνουμε τη χρησιμότητα της διαδικασίας μοντελοποίησης σε παραγωγικούς οργανισμούς, παρατηρήθηκε ότι η μοντελοποίηση έχει περιορισμένη αξία. Οι περιορισμοί προκύπτουν από:

1. Την ανάγκη των μοντελοποιών να μειώσουν την πολυπλοκότητα σε μια πιο δομημένη μορφή ούτως ώστε να ταιριάξει στο πλαίσιο μοντελοποίησης
2. Στην έλλειψη ποσοτικών παραμέτρων
3. Τα προφανή αποτελέσματα του μοντέλου
4. Τη δυσκολία σύλληψης και διατύπωσης βημάτων που συχνά είναι διαισθητικά
5. Την έλλειψη ικανότητας του μοντέλου να αναπροσαρμόζεται στην μεταβαλλόμενη κατάσταση του οργανισμού.

Στη συνέχεια που παρουσιάζονται τα μοντέλα θα δούμε ότι υπάρχουν κάποιες δομές μοντελοποίησης που επιτρέπουν να συμπεριληφθούν περισσότερες ποσοτικές

πληροφορίες στην κατασκευή του μοντέλου. Αλλά με αυτήν την εξαίρεση οι άλλες κριτικές ισχύουν ενδεχομένως για τις προσεγγίσεις μοντελοποίησης που υπάρχουν (προφανή αποτελέσματα, δυσκολία σύλληψης και διατύπωσης διαισθητικών βημάτων στη διαδικασία, δυσκολία συνεχούς αναπροσαρμογής του μοντέλου). Επιπλέον, καμία από τις ερευνητικές προσπάθειες μοντελοποίησης που έχουν γίνει (κεφάλαιο 2) δεν έχει επιχειρήσει μια αυστηρή εφαρμογή της προσέγγισης μοντελοποίησης σε μια επιχείρηση προκειμένου να τεκμηριωθεί η χρησιμότητά της. Αυτό είναι ένας στόχος που πρέπει να επιδιώξουν οι ερευνητές μοντελοποίησης ανάπτυξης προϊόντος.

Μια άλλη πλευρά του ρόλου της μοντελοποίησης στην ανάπτυξη προϊόντος εξετάζει πώς οι μελετητές μηχανικοί διαμορφώνουν τα μοντέλα του υπό σχεδιασμού αντικειμένου (design artifact) και της απόδοσής του. Δεν εστιάζουν στη μοντελοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού, αλλά εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα μοντέλα τεχνικής απόδοσης χρησιμοποιούνται από τους σχεδιαστές. Αυτός ο τύπος μοντέλου έχει τα δικά του όρια αξιοπιστίας και χρησιμότητας που διαφέρουν από τα μοντέλα διαδικασίας. Διαπιστώνεται ότι τα ανεπίσημα μοντέλα χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στη διαδικασία σχεδιασμού, και οι ερευνητές της μεθοδολογίας σχεδιασμού πρέπει να γνωρίζουν την ανεπισημότητα των αναπαραστάσεων σχεδιασμού όταν ζητούν βοήθεια από το σχεδιαστή.

Σε μια σύγκριση των προσεγγίσεων μοντελοποίησης που χρησιμοποιούνται από μηχανικούς και ερευνητές αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, έχει παρατηρηθεί ότι τα μοντέλα των μηχανικών είναι πιο δομημένα και γραμμικά, ενώ τα αρχιτεκτονικά μοντέλα της διαδικασίας σχεδιασμού βασίζονται περισσότερο σε γνώση και προκαταλήψεις. Η διαφορά πιθανόν να υπάρχει λόγω του ότι τα μηχανικά προβλήματα είναι γενικά πιο καλά δομημένα ενώ τα αρχιτεκτονικά προβλήματα είναι γενικά κακώς δομημένα. Εστιάζουμε στο μηχανικό σχεδιασμό, έτσι τα μοντέλα που θα παρουσιαστούν τείνουν να είναι υψηλά δομημένα, το οποίο δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μαθηματικές τεχνικές διάφορων τύπων. Αυτή η εστίαση στην βαθύτερη δομή επιπλέον υπονοεί ότι το μοντέλο εξετάζει τα πιο δομημένα μέρη της διαδικασίας μηχανικού σχεδιασμού. Τα μοντέλα είναι επομένως προκατειλημμένα όσον αφορά το επίπεδο και τις λεπτομέρειες σχεδιασμού του συστήματος της διαδικασίας σχεδιασμού, και επικεντρώνονται λιγότερο στις εννοιολογικές, δημιουργικές ή αλλιώς μη δομημένες πτυχές.

3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Τα μοντέλα διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος μπορούν να θεωρηθούν ως ένας τύπος διαχείρισης προγράμματος. Διαχείριση προγράμματος είναι το σύνολο δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την επιτυχή επίτευξη ενός συνόλου στόχων. Αυτό περιλαμβάνει τον προγραμματισμό, το σχεδιασμό και τη διατήρηση της προόδου των δραστηριοτήτων που εμπεριέχονται στο πρόγραμμα. Η διαχείριση του προγράμματος βοηθά στη διατήρηση του κινδύνου αποτυχίας σε μια χαμηλή τιμή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προγράμματος. Ο κίνδυνος αποτυχίας προκύπτει πρώτιστα από την παρουσία αβεβαιότητας σε όλα τα στάδια ενός προγράμματος. Τα μοντέλα διαχείρισης προγράμματος χρησιμοποιούνται όχι μόνο για έλεγχο και αξιολόγηση προγραμμάτων, αλλά και για την ανάπτυξη κοινών στόχων και την κατανόηση των εργασιών μεταξύ των μελών της ομάδας προγράμματος. Πρέπει επομένως να εξεταστούν όχι μόνο τα άμεσα οφέλη των μοντέλων (που είναι συχνά δύσκολο να καθοριστούν) αλλά και τα έμμεσα οφέλη.

Η χρησιμότητα των μοντέλων διαχείρισης προγράμματος καθιερώθηκε σε μια έρευνα των project managers έρευνας και ανάπτυξης. Εκείνη η έρευνα πρότεινε ότι οι managers ήταν απρόθυμοι να χρησιμοποιήσουν τα σύνθετα μαθηματικά μοντέλα, λόγω της δυσκολίας καθορισμού των δεδομένων εισόδου και λόγω της αδιαφάνειας του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε. Βέβαια το λογισμικό υποστήριξης απόφασης και μοντελοποίησης έχει βελτιωθεί σημαντικά από τότε που πραγματοποιήθηκε αυτή η έρευνα.

Όλα τα μοντέλα βασίζονται στην παρατήρηση ότι ο σχεδιασμός αποτελείται από έναν αριθμό εργασιών που έχουν μια βασική δομή. Αυτή η παρατήρηση βρίσκεται σε μερικά από τα πρώτα και πιο σημαντικά μοντέλα του σχεδιασμού λήψης απόφασης. Η δομή του κάθε μοντέλου ποικίλλει σημαντικά, αλλά όλα αυτά τα μοντέλα βασίζονται στην πεποίθηση ότι μια δομή υπάρχει.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σύντομα κάποια παλαιότερα μοντέλα ανάπτυξης προϊόντος, και στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστούν κάποιες λεπτομέρειες των πρόσφατων προσπαθειών μοντελοποίησης.

3.1 Μοντέλα CPM και PERT

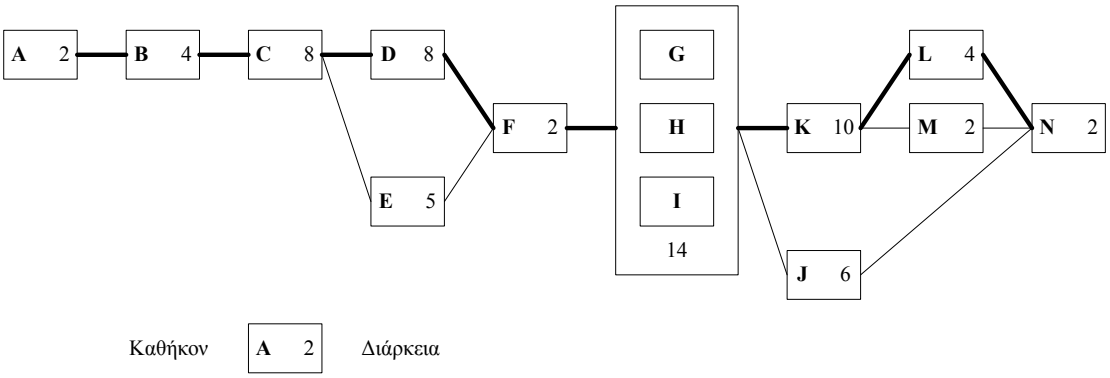
Για πολλά από τα μοντέλα που παρουσιάζονται παρακάτω, ο χρόνος είναι μια από τις μεταβλητές που έχουν ενδιαφέρον. Δεν προκαλεί έκπληξη αυτό γιατί: ο χρόνος υλοποίησης της ανάπτυξης προϊόντος είναι ένας από τους κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχία, πολλές επιλογές διαδικασίας έχουν επιπτώσεις στον χρόνο υλοποίησης, και ο χρόνος είναι ποσοτικά προσδιορίσιμος. Η πρόγονος της βασισμένης στο χρόνο μοντελοποίησης προγράμματος είναι η PERT/CPM μέθοδος. Οι μέθοδοι CPM και PERT προσπαθούν να αναλύσουν το σχεδιασμό του προγράμματος. Αυτό επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο και την αξιολόγηση του προγράμματος. Έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετά διαφορετικά προγράμματα, από σχεδιασμό και παραγωγή υπολογιστών σε σχεδιασμό μιας σύνθετης χειρουργικής επέμβασης. Οι ουσιαστικές ιδέες πίσω από αυτές τις τεχνικές είναι αρκετά απλές.

Και οι δύο μέθοδοι, CPM και PERT, χρησιμοποιούν μεθόδους δικτύου για να βοηθήσουν τη διαχείριση του προγράμματος και προσδιορίζουν μια κρίσιμη διαδρομή του προγράμματος (*project critical path)* της οποίας οι δραστηριότητες δεν μπορούν να καθυστερήσουν, και επίσης υποδεικνύουν *τις μη σημαντικές δραστηριότητες* που θα μπορούσαν κάπως να καθυστερήσουν χωρίς να επιμηκυνθεί ο χρόνος ολοκλήρωσης του προγράμματος. Οι δύο μέθοδοι έχουν μια βασική διαφορά. Η τεχνική CPM αναπτύχθηκε για προγράμματα *κατασκευής*, ενώ η PERT αναπτύχθηκε για προγράμματα *έρευνας και ανάπτυξης*.

Η CPM χρησιμοποιεί ένα δίκτυο προγράμματος με τόξα και κόμβους για να απεικονίσει γραφικά τις σχέσεις μεταξύ των καθηκόντων σε ένα πρόγραμμα. Κάθε τόξο του προγράμματος αναπαριστά ένα καθήκον ή δραστηριότητα. Κάθε κόμβος αναπαριστά ένα γεγονός. Η κατεύθυνση των τόξων δίνει την ακολουθία με την οποία πρέπει να γίνουν οι δραστηριότητες. Η διαδικασία ξεκινάει με ένα γεγονός πριν τις διαδοχικές δραστηριότητες, και ένα γεγονός συντελείται μόνο όταν εμφανίζονται όλες οι δραστηριότητες που προηγούνται αυτού. Υπάρχουν δύο ειδικοί κόμβοι, ο κόμβος έναρξης και ο κόμβος τερματισμού. Κάθε τόξο έχει δύο ρόλους: αναπαριστά μια δραστηριότητα και καθορίζει τις σχέσεις προτεραιότητας μεταξύ των δραστηριοτήτων. Μερικές φορές είναι απαραίτητο να προστεθούν τόξα που αναπαριστούν μόνο σχέσεις προτεραιότητας. Αυτά ονομάζονται εικονικά τόξα και είναι με διακεκομμένη γραμμή. Μόλις ολοκληρωθεί η μορφή ενός δικτύου προγράμματος, μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτεί κάθε δραστηριότητα. Οι

εικονικές δραστηριότητες παίρνουν χρόνο 0. Αυτοί οι χρόνοι χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν δύο βασικές ποσότητες: ο νωρίτερος χρόνος και ο αργότερος χρόνος. Ο νωρίτερος χρόνος είναι ο νωρίτερος χρόνος για ένα γεγονός υποθέτοντας ότι κάθε δραστηριότητα αρχίζει το συντομότερο δυνατόν. Η έναρξη του προγράμματος τίθεται σε χρόνο 0. Κάθε ακόλουθο γεγονός παίρνει έναν νωρίτερο χρόνο με βάση τον αργότερο χρόνο που ένα προηγούμενο γεγονός τελειώνει. Ο αργότερος χρόνος για ένα γεγονός είναι ο αργότερος χρόνος που ένα γεγονός μπορεί να συμβεί χωρίς καθυστέρηση της ολοκλήρωσης του προγράμματος πέρα από τον νωρίτερο χρόνο του. Ο αργότερος χρόνος υπολογίζεται κατά τρόπο ανάλογο με τον νωρίτερο χρόνο. Αυτή τη φορά ξεκινάμε από το τέλος και πηγαίνουμε προς τα πίσω.

Τα PERT (program evaluation and review techniques) διαγράμματα αντιπροσωπεύουν λεπτομερώς και τις εξαρτήσεις και το συγχρονισμό, στην πραγματικότητα συνδυάζοντας κάποιες από τις πληροφορίες που περιλαμβάνονται στα DSM και Gantt διαγράμματα. Υπάρχουν πολλές μορφές PERT διαγραμμάτων και μια από αυτές είναι η μορφή διαγράμματος «δραστηριοτήτων στον κόμβο», η οποία αντιστοιχεί στα δομημένα διαγράμματα. Τα τμήματα στο PERT διάγραμμα χαρακτηρίζονται από το καθήκον και την αναμενόμενη διάρκειά του. Να σημειωθεί ότι η PERT αναπαράσταση δεν επιτρέπει βρόχους ή ανατροφοδότηση. Κατά συνέπεια, τα συνδεμένα καθήκοντα G, H, και I στο παρακάτω σχήμα συγκεντρώνονται σε ένα καθήκον. Υπάρχει ένα καθιερωμένο σύνολο μοντέλων που επιτρέπουν την παρουσία βρόγχων μέσα σε ένα PERT πλαίσιο μοντελοποίησης. Αυτό το σύνολο μοντέλων είναι γνωστό ως GERT (general evaluation and review technique). Στα PERT διαγράμματα είναι κανόνας ότι όλες οι συνδέσεις μεταξύ των καθηκόντων πρέπει να προχωρούν από αριστερά προς δεξιά, υποδηλώνοντας τη χρονική ακολουθία στην οποία τα καθήκοντα μπορούν να ολοκληρωθούν.



Σχήμα 3 1: PERT διάγραμμα. Η κρίσιμη πορεία καθορίζεται από τις πιο έντονες γραμμές που συνδέουν τα καθήκοντα. Να σημειωθεί ότι τα καθήκοντα G, H, και I συγκεντρώνονται επειδή η PERT αναπαράσταση δεν απεικονίζει τα συνδεδεμένα καθήκοντα λεπτομερώς.

Οι εξαρτήσεις μεταξύ των καθηκόντων σε ένα PERT διάγραμμα, που ταξινομούνται διαδοχικά ή παράλληλα, οδηγούν στην έννοια μιας *κρίσιμης πορείας*. Η κρίσιμη πορεία είναι η μακρύτερη αλυσίδα των εξαρτώμενων γεγονότων. Αυτή είναι η μοναδική ακολουθία καθηκόντων των οποίων οι συνδυασμένοι απαραίτητοι χρόνοι καθορίζουν τον ελάχιστο πιθανό χρόνο ολοκλήρωσης για ολόκληρο το σύνολο των καθηκόντων. Είτε η ακολουθία C-D-F είτε η ακολουθία C-E-F καθορίζουν πόσος χρόνος απαιτείται για την ολοκλήρωση των τεσσάρων καθηκόντων C, D, E, και F. Σε αυτήν την περίπτωση, η πορεία C-D-F απαιτεί 18 μονάδες και η πορεία C-E-F απαιτεί 15 μονάδες, έτσι η κρίσιμη πορεία για ολόκληρο το πρόγραμμα περιλαμβάνει την C-D-F. Η κρίσιμη πορεία για το πρόγραμμα είναι η πορεία με τις έντονες γραμμές. Ο προσδιορισμός της κρίσιμης πορείας είναι σημαντικός επειδή μια καθυστέρηση σε οποιοδήποτε από αυτά τα *κρίσιμα καθήκοντα* θα οδηγούσε σε μια αύξηση της διάρκειας προγράμματος. Όλες οι άλλες πορείες περιέχουν κάποια *χαλαρότητα*, που σημαίνει ότι μια καθυστέρηση σε ένα από τα μη κρίσιμα καθήκοντα δεν δημιουργεί αυτόματα μια καθυστέρηση σε ολόκληρο το πρόγραμμα.

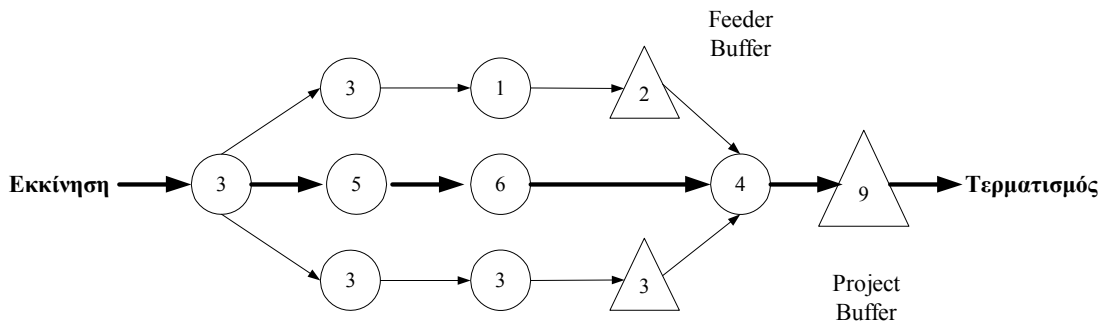
Ο χρόνος ανάπτυξης προϊόντων είναι συχνά η κύρια ανησυχία στον προγραμματισμό και την εκτέλεση προγράμματος. Σκοπός είναι η μείωση του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση των καθηκόντων στην κρίσιμη πορεία. Ο μόνος τρόπος να επιτευχθεί μείωση του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός προγράμματος, είναι η μείωση της κρίσιμης πορείας.

Ένας τρόπος να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση των καθηκόντων στην κρίσιμη πορεία είναι η άθροιση των χρόνων ασφάλειας (safety

times). Η αναμενόμενη διάρκεια κάθε καθήκοντος στο πρόγραμμα περιλαμβάνει γενικά κάποιο ποσό «χρόνου ασφάλειας». Αυτός ο χρόνος περιλαμβάνει πολλές κανονικές αλλά απρόβλεπτες καθυστερήσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης κάθε καθήκοντος. Οι κοινές καθυστερήσεις περιλαμβάνουν: αναμονή για πληροφορίες και εγκρίσεις, διακοπές από άλλα καθήκοντα ή προγράμματα, και καθήκοντα που είναι δυσκολότερα από το αναμενόμενο.

Ο Goldratt (1997) εκτιμά ότι η ενσωματωμένη ασφάλεια, διπλασιάζει την διάρκεια των καθηκόντων. Αν και οι χρόνοι ασφάλειας προστίθενται στην αναμενόμενη διάρκεια καθήκοντος για να υπολογιστούν οι τυχαίες καθυστερήσεις, αυτές οι εκτιμήσεις γίνονται στόχοι κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των καθηκόντων, το οποίο σημαίνει ότι σπάνια τα καθήκοντα ολοκληρώνονται νωρίς και πολλά καθήκοντα υπερβαίνουν το όριο. Ο Goldratt συνιστά την κατάργηση του χρόνου ασφάλειας από κάθε καθήκον κατά μήκος της κρίσιμης πορείας και την άθροιση όλων των χρόνων ασφάλειας της κρίσιμης πορείας σε έναν μοναδικό *project buffer* που τοποθετείται στο τέλος του χρονοδιαγράμματος του προγράμματος.

Επειδή η ανάγκη παράτασης της διάρκειας καθήκοντος εμφανίζεται κάπως τυχαία, μόνο μερικά από τα καθήκοντα θα πρέπει πραγματικά να χρησιμοποιήσουν το χρόνο από τον project buffer. Επομένως, ένας μοναδικός project buffer μπορεί να είναι μικρότερος από το σύνολο των χρόνων ασφάλειας που θα περιλαμβάνονταν σε κάθε εκτίμηση διάρκειας καθήκοντος, και η κρίσιμη πορεία μπορεί να ολοκληρωθεί νωρίτερα. Στην πράξη, ο project buffer χρειάζεται για να ξεκινήσει το μισό περίπου χρόνο από τη διάρκεια της μικρότερης της κρίσιμης πορείας. Ο Goldratt έχει αναπτύξει αυτές τις ιδέες σε μια μέθοδο διαχείρισης προγράμματος που ονομάζεται *Κρίσιμη Αλυσίδα*. Εκτός από τον project buffer, η μέθοδος χρησιμοποιεί *feeder buffers* για να προστατεύσει την κρίσιμη πορεία από καθυστερήσεις όπου μη κρίσιμα καθήκοντα επιφέρουν στην κρίσιμη πορεία. Κάθε feeder buffer αθροίζει τους χρόνους ασφάλειας των καθηκόντων σε μια μη κρίσιμη πορεία.



Σχήμα 3 2: Η μέθοδος Κρίσιμη Αλυσίδας αθροίζει το χρόνο ασφάλειας κατά μήκος της κρίσιμης πορείας στον project buffer. Οι Feeder buffers προστατεύουν την κρίσιμη πορεία από τις καθυστερήσεις. Σε αυτή την απεικόνιση, δίνονται οι διάρκειες καθηκόντων (σε ημέρες) για κάθε ένα από τα καθήκοντα, και η κρίσιμη πορεία παρουσιάζεται με εντονότερα βέλη που συνδέουν τα κρίσιμα καθήκοντα.

Τα μοντέλα τύπου PERT έχουν εφαρμοστεί στο μηχανικό σχεδιασμό, με επιτυχία. Αναγνωρίζεται η ότι PERT έχει διάφορους περιορισμούς: η έλλειψη της ανατροφοδότησης και της επανάληψης που είναι κοινή στη διαδικασία σχεδιασμού, και η δυσκολία για τους managers να συλλέξουν τα στοιχεία και να κατανοήσουν τα αποτελέσματα αυτών των τύπων μοντέλων, ιδιαίτερα στις πιο περίπλοκες μορφές τους. Επιπλέον, δεν είναι ξεκάθαρο ότι οι αρχικές συμπεριφορές που η PERT είναι σε θέση να συλλάβει (στοχαστική διάρκεια δραστηριότητας, διαδοχικές σχέσεις δραστηριότητας) είναι οι συμπεριφορές που είναι οι πιο σημαντικές στη διαχείριση μηχανικού σχεδιασμού. Για αυτούς τους λόγους αρκετοί μοντελοποιοί αφήνουν το πλαίσιο PERT για άλλα μοντέλα με άλλες συμπεριφορές ενώ προσπαθούν να κρατήσουν τα μοντέλα όσο το δυνατόν απλούστερα.

Έχουν ταξινομηθεί τα μοντέλα σε πέντε κατηγορίες, σύμφωνα με το τι κάθε μοντέλο προσπαθεί να επιτύχει. Η πέντε κατηγορίες είναι μοντέλα αλληλουχίας και χρονοπρογραμματισμού, μοντέλα αποσύνθεσης, μοντέλα στοχαστικού χρόνου υλοποίησης, μοντέλα κατάλληλου χρόνου αναθεώρησης σχεδιασμού, και μοντέλα παραλληλισμού. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά και στις πέντε κατηγορίες και στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθούν εκτενέστερα κάποιες κατηγορίες και μοντέλα που ενδιαφέρον περισσότερο.

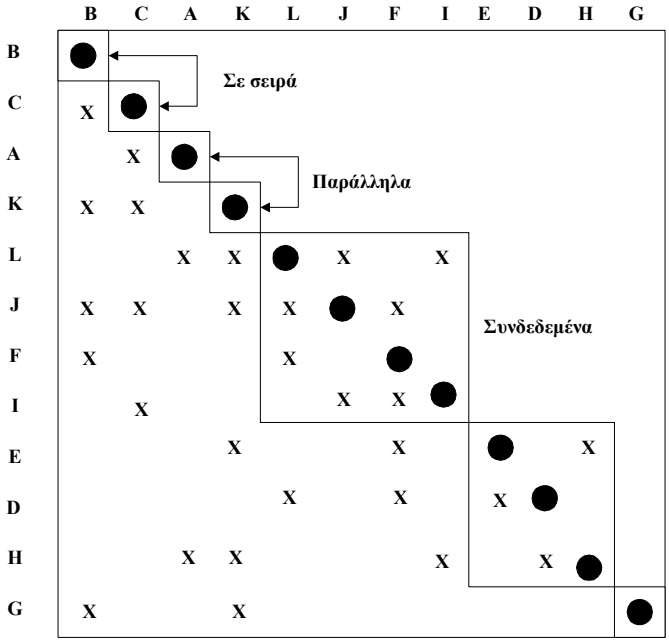
3.2 Αλληλουχία και Προγραμματισμός Εργασιών Σχεδιασμού

Υπάρχει ένας αριθμός μοντέλων που ασχολείται με την αλληλουχία και τον προγραμματισμό των καθηκόντων σχεδιασμού. Η ανάπτυξη προϊόντων είναι διαφορετική από πολλές τύπου έργου δραστηριότητες δεδομένου ότι η επανάληψη και η αναθεώρηση είναι κάτι σύνηθες. Η παρουσία επανάληψης οδηγεί στη δυσκολία εύρεσης της κατάλληλης ταξινόμησης.

Όλα τα μοντέλα αλληλουχίας και προγραμματισμού επιχειρούν να εξετάσουν ένα σημαντικό διοικητικό πρόβλημα που έχει σημαντικά αποτελέσματα στις διαδικασίες σχεδιασμού. Επίσης απαιτούν ισχυρές υποθέσεις προκειμένου να διατηρηθεί η αναλυτική ιχνηλασιμότητα. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι ενδιαφέροντα, αλλά η χρησιμότητά τους για βιομηχανική εφαρμογή δεν έχει αποδειχθεί.

3.2.1 Πίνακας Δομής Σχεδιασμού

Μια από τις σημαντικότερες οικογένειες μοντέλων είναι αυτή που βασίζεται στον πίνακα δομής σχεδιασμού (Σχήμα 3.3). Η φιλοσοφία της DMS μεθόδου είναι ότι το πρόγραμμα σχεδιασμού διαιρείται σε μεμονωμένα καθήκοντα, και οι σχέσεις μεταξύ αυτών των καθηκόντων μπορούν να αναλυθούν για να προσδιορίσουν την βασική δομή του προγράμματος. Η μελέτη των σχέσεων μεταξύ των μεμονωμένων καθηκόντων σχεδιασμού μπορεί να βελτιώσει τη συνολική διαδικασία σχεδιασμού, και είναι ένας ισχυρός τρόπος να αναλυθούν οι εναλλακτικές στρατηγικές σχεδιασμού. Κάθε καθήκον σχεδιασμού μπορεί να μοντελοποιηθεί ως καθήκον επεξεργασίας πληροφοριών, χρησιμοποιώντας και δημιουργώντας πληροφορίες. Οι πληροφορίες εξόδου από μια εργασία γίνονται εισόδου σε μια άλλη εργασία. Οι σχέσεις εισόδου/ εξόδου μπορεί (κατά πάσα πιθανότητα) να είναι περιοδικές, το οποίο δηλώνει την ανάγκη για επανάληψη. Η εύρεση των ομάδων καθηκόντων που απαιτούν περιοδικές ροές πληροφοριών (συνδεμένα καθήκοντα) είναι σχετικά εύκολη εφόσον υπάρχει ο πίνακας δεδομένων. Η DSM διατύπωση είναι ένας πίνακας που περιλαμβάνει αυτές τις σχέσεις. Τα καθήκοντα στον πίνακα μπορεί να αλλάξουν ακολουθία το οποίο διευκολύνει να προσδιοριστούν οι περιοδικές και μη περιοδικές εργασίες.



Σχήμα 3 3: Πίνακας Δομής Σχεδιασμού

Οι ερευνητές που εξετάζουν αυτή την οικογένεια μοντελοποίησης παρατηρούν είναι εφικτό να κατασκευαστεί αυτός ο τύπος πίνακα, ακόμη και για τις σχετικά σύνθετες διαδικασίες σχεδιασμού, με περισσότερες από 100 εργασίες. Ένας περιορισμός του DSM είναι ότι είναι σχετικά δύσκολο για κάποιον που δεν γνωρίζει τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου να καταλάβει.

Πιο συγκεκριμένα στη μέθοδο DSM δημιουργείται ένας τετραγωνικός πίνακας όπου κάθε σειρά και η αντίστοιχη στήλη του ταυτίζεται με ένα από τα καθήκοντα. Κατά μήκος κάθε σειράς τα σύμβολα δείχνουν το συγκεκριμένο καθήκον από ποια άλλα καθήκοντα απαιτεί δεδομένα εισόδου. Η κάθε στήλη προσδιορίζει ποια άλλα καθήκοντα λαμβάνουν τα αποτελέσματά του. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας πίνακας δομής σχεδιασμού που περιγράφει μια απλή διαδικασία σχεδιασμού φωτογραφικής μηχανής. Σε αυτήν την διαδικασία, το καθήκον **C** απαιτεί δεδομένα εισόδου από τα καθήκοντα **B**, **D**, **E** και **F**, το καθήκον **B** απαιτεί δεδομένα εισόδου μόνο από το καθήκον **A,** και το **A** δεν χρειάζεται κανένα δεδομένο εισόδου για να ξεκινήσει.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A Set Specifications	X							
B Design Concept	X	X						
C Design Shutter Mechanism		X	X	X	X	X		
D Design Viewfinder		X	X	X	X	X		
E Design Camera Body		X	X	X	X	X		
F Design Film Mechanism		X	X	X	X	X		
G Design Lens Optics		X					X	
H Design Lens Housing		X					X	X

Σχήμα 3 4: Δείγμα του Πίνακα Δομής Σχεδιασμού

Ο DSM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει την ταξινόμηση των καθηκόντων και για να προσδιορίσει τις δύσκολες πτυχές της διαδικασίας σχεδιασμού. Μερικά ή όλα τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να γίνουν εκτός της διαγωνίου (όπως εκείνα που αντιστοιχούν στα καθήκοντα **A**, **B**, **G** και **H**) με ανά-ταξινόμηση των καθηκόντων του πίνακα χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο χωρισμού (Steward 1981, Rogers and Padula 1989, Gebala and Eppinger 1991). Ένας εξ' ολοκλήρου εκτός διαγωνίου πίνακας υποδηλώνει ότι υπάρχει μια ακολουθία όπου όλα τα καθήκοντα μπορούν να ολοκληρωθούν με διαθέσιμες όλες τις πληροφορίες εισαγωγής. Μια τέτοια ακολουθία μπορεί να περιέχει και τα καθήκοντα που πρέπει να γίνουν σε σειρά, και τα καθήκοντα που μπορούν να γίνουν παράλληλα.

Υπάρχουν στοιχεία ότι ανταγωνιστικές επιχειρήσεις που αντιμετωπίζουν το ίδιο πρόβλημα σχεδιασμού μπορεί να επιλέξουν διαφορετικές στρατηγικές σχεδιασμού, το οποίο υποδηλώνει ένα διαφορετικό βασικό πίνακα δομής σχεδιασμού. Για παράδειγμα, σε ποιο βαθμό μια εταιρία επιλέγει να ασχοληθεί με τα καθήκοντα διαδοχικά αντί της επικάλυψης, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το χρόνο ανάπτυξης. Επιπλέον, ο τρόπος που μια εταιρία αποσυνθέτει το πρόβλημα ανάπτυξης σε μικρότερα προβλήματα έχει σημαντική επίδραση στη διαδικασία (von Hippel 1990), και επομένως αλλάζει τον DSM.

Υποθέτουμε ότι τα καθήκοντα και οι αλληλοσυσχετίσεις ενός προβλήματος σχεδιασμού είναι γνωστά και αμετάβλητα κατά τη διάρκεια του προγράμματος. Αυτή

η υπόθεση είναι λογική για μια εταιρία που εργάζεται σε ένα πρόγραμμα σχεδιασμού σε μια περιοχή στην οποία έχει έναν σημαντικό βαθμό εξοικείωσης. Αυτή η υπόθεση ισχύει λιγότερο για μια εντελώς νέα ή γρήγορα εξελισσόμενη τεχνολογία.

Ο χρόνος ανάπτυξης είναι ένα σημαντικό μέγεθος στη διαχείριση μηχανικού σχεδιασμού. Η σύνθετη επανάληψη είναι ένας σημαντικός λόγος στην παράταση του χρόνου ανάπτυξης. Εάν συμπεριληφθεί η διάρκεια καθήκοντος στον DSM, τότε μπορεί να υπολογιστεί η συνολική διάρκεια του προγράμματος. Για τα καθήκοντα που είναι σε σειρά υπολογίζεται αθροίζοντας τους μεμονωμένους χρόνους τους, και για τα παράλληλα καθήκοντα υπολογίζεται με την εύρεση του μεγίστου χρόνου εκείνων των καθηκόντων. Για το πρόγραμμα που χαρακτηρίζεται από το DSM του Σχήματος 3.4, εάν οι χρόνοι καθηκόντων είναι *a, b, c, ..., h*, ο χρόνος προγράμματος σχεδιασμού φωτογραφικής μηχανής θα είναι

$$a + b + \max\{f(c, d, e, f), g + h\}$$

όπου *f*(.) είναι μια άγνωστη συνάρτηση που αντιστοιχεί στο χρόνο ανάπτυξης για το συνδεμένο τμήμα.

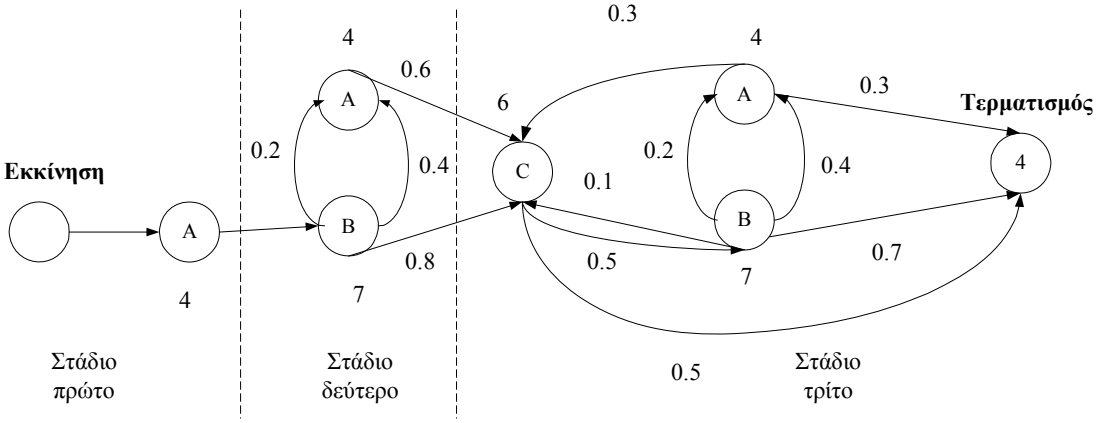
3.2.2 Ανατροφοδοτήσεις και Διασταυρώσεις

Δύο μοντέλα αλληλουχίας που βασίζονται στην DSM, ασχολούνται με την μείωση του αριθμού ανατροφοδοτήσεων πληροφοριών, των διασταυρώσεων πληροφοριών και του μήκους κύκλων επανάληψης. Αυτοί οι αριθμοί είναι σημαντικοί για το διαδοχικό προγραμματισμό καθηκόντων. Οι ανατροφοδοτήσεις υποδηλώνουν μια ανάγκη για επανάληψη, οι διασταυρώσεις πληροφοριών υποδηλώνουν μια ευκαιρία για απώλεια πληροφοριών συντονισμού, και το μήκος των κύκλων ανατροφοδότησης υποδηλώνει ένα μεγάλο ποσό απαραίτητης αναθεώρησης.

Αυτές οι μελέτες δεν παρέχουν εμπειρική αιτιολόγηση της χρησιμότητας των μέτρων ανατροφοδότησης, διασταυρώσεων και μήκους κύκλων ως κρίσιμα μέτρα καλού προγραμματισμού, ούτε παρουσιάζουν εμπειρικά δεδομένα που να αποδεικνύουν τη χρησιμότητα της μεθόδου τους. Αυτές είναι ενδεχομένως κρίσιμες ανεπάρκειες σε αυτήν την προσέγγιση μοντελοποίησης. Εντούτοις, η μέθοδος βελτιστοποίησης είναι ισχυρή.

3.2.3 Μοντέλα Διαδοχικής Επανάληψης

Άλλο ένα μοντέλο αλληλουχίας και προγραμματισμού που στηρίζεται στο πλαίσιο του DSM είναι το μοντέλο διαδοχικής επανάληψης. Σε αυτό το μοντέλο τα καθήκοντα ολοκληρώνονται ένα σε κάθε χρόνο, με μια πιθανολογική ανάγκη για επανάληψη των προηγούμενων καθηκόντων (Σχήμα 3.5). Κάθε ένα καθήκον έχει μια σταθερή, αιτιοκρατική διάρκεια. Η αναμενόμενη διάρκεια οποιασδήποτε δεδομένης κατάταξης καθηκόντων μπορεί να υπολογιστεί με την εύρεση της αναμενόμενης ανταπόδοσης μιας αλυσίδας Markov. Η κατάταξη των καθηκόντων μπορεί να τροποποιηθεί για την ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου χρόνου. Αυτό είναι ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3 5: Αλυσίδα Markov

Κάποια από τα χρήσιμα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου είναι το ότι είναι χρήσιμη η ολοκλήρωση των πιο σύντομων καθηκόντων πριν από τα καθήκοντα μεγαλύτερης διάρκειας και ότι είναι επιθυμητό να ελαττωθεί ο αριθμός μεγάλων πιθανοτήτων επανάληψης που εμφανίζονται ως ανατροφοδοτήσεις στη βέλτιστη κατάταξη.

Η δυσκολία αυτού του μοντέλου είναι στις υποθέσεις του. Προκειμένου να συνεχιστεί η εύρεση της αναμενόμενης διάρκειας μιας δεδομένης κατάταξης, το μοντέλο υποθέτει ότι τα καθήκοντα έχουν συγκεκριμένες και σταθερές διάρκειες, ανεξάρτητα από το πόσες φορές επαναλαμβάνονται. Επίσης, οι πιθανότητες επανάληψης λαμβάνονται ως γνώστες, συγκεκριμένες και σταθερές, ανεξάρτητες από την κατάταξη των καθηκόντων και από το πόσες φορές το κάθε καθήκον έχει ολοκληρωθεί.

Μερικοί από τους περιορισμούς του μοντέλου διαδοχικής επανάληψης έχουν αφαιρεθεί σε μια επέκτασή του. Η επέκταση επιτρέπει την τυχαία διάρκεια των καθηκόντων καθώς επίσης επιτρέπει την ταυτόχρονη επιχείρηση πολλαπλών καθηκόντων. Ο περιορισμός της επέκτασης είναι μια αντίστοιχη μείωση στην ευπείθεια του μοντέλου. Ενώ το αρχικό μοντέλο διαδοχικής επανάληψης μπορούσε να αναλύσει διαδικασίες με δωδεκάδες ή εικοσάδες καθηκόντων, η πιο πρόσφατη έκδοση περιορίζεται σε λιγότερα από περίπου 10, για να ληφθούν ακριβείς λύσεις. Τα μεγαλύτερα προβλήματα είναι περίπου ανιχνεύσιμα χρησιμοποιώντας προσομοίωση, αλλά οι λύσεις δεν είναι τόσο αξιόπιστες.

3.2.4 Εκτίμηση Χρόνου Κύκλου Επανάληψης

Μια περαιτέρω επέκταση του DSM πλαισίου είναι ένα μοντέλο που περιλαμβάνει πιθανολογικές σχέσεις OR και XOR (βλ. παράρτημα 3.1, 3.2) μεταξύ των καθηκόντων. Για αυτό το μοντέλο οι πιθανότητες εκτέλεσης μιας ή περισσότερων από τις OR/XOR πορείες εξαρτώνται από τον αριθμό επανάληψης, και αυτές οι πιθανότητες καθορίζονται εκ των προτέρων. Το μήκος κάθε καθήκοντος είναι συγκεκριμένο και αιτιοκρατικό, και το μήκος κάθε καθήκοντος δεν αλλάζει καθώς προχωράει η διαδικασία επανάληψης.

Το μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό της πιθανότητας κατανομής του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού. Η γνώση αυτής της κατανομής είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση της πορείας, την πρόβλεψη των απαιτούμενων ημερομηνιών, και την κατανομή των πόρων καθηκόντων.

Οι δυσκολίες με αυτό το μοντέλο είναι οι υποθέσεις και η διαθεσιμότητα των δεδομένων. Πρέπει να γίνει η υπόθεση ότι οι χρόνοι καθηκόντων και οι πιθανότητες επανάληψης καθορίζονται και είναι γνωστά εκ των προτέρων, όπως είναι η δομή επανάληψης καθήκοντος. Αυτό απαιτεί τη σημαντική γνώση για τη δομή της διαδικασίας σχεδιασμού.

3.3 Αποσύνθεση Μεγάλων Συστημάτων

Μια ουσιαστική εργασία στη διαχείριση ανάπτυξης προϊόντος είναι πώς τα μεγάλα προγράμματα σχεδιασμού πρέπει να χωριστούν σε μικρότερα στοιχεία. Αυτή η απόφαση είναι δύσκολη, σημαντική και επομένως ο στόχος διάφορων μοντέλων. Η αποσύνθεση των μεγάλων συστημάτων είναι χρήσιμη είτε για την κατανομή εργασίας

μεταξύ των σχεδιαστών ή των ομάδων σχεδιασμού, είτε επίσης για να προτείνει μια αποσύνθεση του υπό κατασκευή αντικειμένου (τεχνικού αντικειμένου) που θα ελαχιστοποιήσει την επικάλυψη μεταξύ των υποσυστημάτων. Οι αποσυνθέσεις επομένως έχουν τη δυνατότητα να επιταχύνουν τη διαδικασία σχεδιασμού καθώς επίσης και να δώσουν αποτελέσματα σχεδιασμού υψηλότερης απόδοσης.

Οι επίσημες μέθοδοι αποσύνθεσης έχουν τις τους ρίζες στον Alexander. Το μοντέλο του Alexander χρησιμοποιεί αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων σχεδιασμού (που περιγράφονται σε πίνακα ή σε γράφημα) για να καθορίσει τις κατάλληλες υποομάδες στοιχείων σχεδιασμού. Οι σχεδιαστές ψηφίζουν όπου θεωρούν ότι υπάρχουν οι ισχυρότερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ ζευγαριών καθηκόντων, και η μέθοδος είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει αυτές τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων σχεδιασμού, για να προτείνει την κατάλληλη αποσύνδεση των στοιχείων.

3.3.1 Μέθοδος Πίνακα Μετασχηματισμού Εργασίας

Μια μέθοδος που αναπτύσσεται για την αποσύνθεση είναι ο πίνακας μετασχηματισμού εργασίας (WTM). Η μέθοδος WTM είναι μια επέκταση της DSM μεθόδου που παρουσιάστηκε παραπάνω. Σε αυτό το μοντέλο οι εκτός διαγωνίου DSM καταχωρήσεις αντικαθίστανται με συντελεστές αναθεώρησης, και υπολογίζεται ο χρόνος για κάθε καθήκον (Σχήμα 3.6). Οι συντελεστές αναθεώρησης προσδιορίζουν σε ποιο βαθμό πρέπει να ολοκληρωθεί η αναθεώρηση ως συνάρτηση της εργασίας που ολοκληρώθηκε στην προηγούμενη επανάληψη. Το μοντέλο υποθέτει ότι η διαδικασία σχεδιασμού είναι επαναληπτική, και η επαναληπτική αναθεώρηση δημιουργείται γραμμικά, έτσι ώστε η αναθεώρηση είναι μια γραμμική συνάρτηση της εργασίας της αμέσως προηγούμενης επανάληψης. Η συνολική ολοκληρωμένη εργασία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μπορεί να υπολογιστεί με την εξέταση του συνόλου της εργασίας που γίνεται κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης.

	A	B	C
A		.4	.1
B	.5		.4
C		.2	

(a) Strength of dependence measures

	A	B	C
A	9		
B		6	
C			2

(b) Task times

Σχήμα 3 6: Πίνακας Μετασχηματισμού Εργασίας

Το αποτέλεσμα αυτού του μοντέλου είναι η συνολική ολοκληρωμένη εργασία. Μια διαφωτιστική παρατήρηση είναι ότι η συνολική ολοκληρωμένη εργασία είναι μια ισχυρή συνάρτηση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα που περιέχει τα μεγέθη αναθεώρησης. Αναλογικά στα δυναμικά φυσικά συστήματα, η δυναμική συμπεριφορά της διαδικασίας υποδηλώνεται έντονα από τα ιδιοδιανύσματα που συνδέονται με τις μεγαλύτερες ιδιοτιμές του πίνακα. Τα ιδιοδιανύσματα μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν για την αποσύνθεση του προβλήματος σε σχετικά μη συνδεμένες ομάδες καθηκόντων.

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί στο σχεδιασμό του συστήματος φρένων στη General Motors. Τα στοιχεία παρουσιάζουν ότι είναι σχετικά απλή η συλλογή στοιχείων από πραγματικά μηχανικά προγράμματα, και παρατηρείται ότι τα ιδιοδιανύσματα του WTM που δημιουργείται, αντιστοιχούν ικανοποιητικά με γνωστά στενά συνδεδεμένα τεχνικά θέματα. Οι ανεπάρκειες αυτού του μοντέλου προκύπτουν από την περιοριστική φύση των υποθέσεων (γραμμική δημιουργία αναθεώρησης, static measures of rework process), αλλά η δυνατότητα του μοντέλου που εφαρμόζεται σε μια πραγματική κατάσταση είναι ενθαρρυντική.

3.3.2 Μοντέλο Αποσύνθεσης Δραστηριότητας – Ενότητας

Ένα άλλο μοντέλο που περιγράφει το πρόβλημα της αποσύνθεσης βασίζεται στις ομοιότητες μεταξύ της αποσύνθεσης της διαδικασίας σχεδιασμού και των κυτταρικών συστημάτων κατασκευής (Σχήμα 3.7). Σ' αυτό το μοντέλο θεωρείται ότι οι δραστηριότητες σχεδιασμού είναι όμοιες με της εργασίες κατασκευής που υποβάλλονται σε επεξεργασία και οι πόροι σχεδιασμού (όπως μηχανικοί) θεωρείται είναι όμοιοι με τον εξοπλισμό της διαδικασίας κατασκευής. Είναι επιθυμητή η

αποσύνθεση του συστήματος σε ενότητες έτσι ώστε κάθε ενότητα (κατασκευαστικό κύτταρο ή πόρος σχεδιασμού) αποσυντίθενται σημαντικά από άλλες ενότητες. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης κυτταρικής παραγωγής είναι γνωστό ως NP-hard, και υπάρχουν διάφορες ευρετικές μέθοδοι που προσφέρουν χρήσιμες αποσυνθέσεις.

$$
\begin{array}{cc}
 & \text{Δραστηριότητα} \\
 & \begin{array}{ccccccccccc} 3 & 7 & 8 & 2 & 4 & 6 & 5 & 10 & 9 & 1 \end{array} \\
\text{Ενότητα} & \begin{array}{c} 4 \\ 5 \\ 1 \\ 6 \\ 3 \\ 2 \\ 7 \end{array}
\begin{bmatrix}
1 & & & 1 & & & & & 1 & \\
1 & & & 1 & & & & & 1 & \\
1 & 1 & 1 & 1 & & & & & & \\
 & & & & 1 & 1 & 1 & & & 1 \\
 & & & & 1 & 1 & & & & 1 \\
 & & & & 1 & & & & 1 & \\
 & & & & & & 1 & 1 & 1 & \\
 & & & & & & & & 1 & 1
\end{bmatrix}
\end{array}
$$

Σχήμα 3 7: Πίνακας Αποσύνθεσης Δραστηριότητας - Ενότητας

Δεδομένου ότι εξετάζουμε τη δυνατότητα εφαρμογής αυτού του μοντέλου, πρέπει να καθορίσουμε εάν οι δραστηριότητες απαιτούν σύνολα πόρων με τον ίδιο τρόπο που οι εργασίες κατασκευής απαιτούν σύνολα μηχανών, και εάν η ανάθεση ομάδων των δραστηριοτήτων σχεδιασμού στους μηχανικούς πόρους είναι ανάλογη με τη δημιουργία κυττάρων παραγωγής. Λόγω της ευελιξίας του ανθρώπινου δυναμικού, είναι πιθανό η κατάσταση μηχανικού σχεδιασμού να είναι περισσότερο ευμετάβλητη και λιγότερο σταθερή από την αντίστοιχη κατασκευής.

3.3.3 Άλλα Μοντέλα Αποσύνθεσης

Ένα άλλο μοντέλο αποσύνθεσης δίνει μια νέα ερμηνεία της μεθόδου DSM που παρουσιάστηκε παραπάνω. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει και τις DSM πληροφορίες σχετικά με την προτεραιότητα και την περιοδικότητα εργασιών, καθώς επίσης και τους πίνακες συμβάντων των πόρων δραστηριότητας (activity resource incidence matrices). Αυτά τα δύο σύνολα με πίνακες πληροφοριών συνδυάζονται για να προσφέρουν προτάσεις για το πώς ο μηχανισμός σχεδιασμού πρέπει να αποσυντεθεί και που είναι επιθυμητές οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ καθηκόντων και ανθρώπων. Δυστυχώς, το μοντέλο δεν είναι τυποποιημένο σε μεγάλο βαθμό, και οι υποδείξεις

του μοντέλου δεν βασίζονται σε ακριβή ανάλυση. Το ουσιώδες σημείο είναι ότι χρειάζεται πληροφόρηση για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των καθηκόντων και μεταξύ των ανθρώπων κατά τη διαμόρφωση αποσυνθέσεων και την ανάθεση εργασιών, αλλά το μοντέλο δεν προσπαθεί να το κάνει αυτό με έναν μεθοδικό τρόπο.

Μια δεύτερη επέκταση της DSM μεθόδου προσπαθεί να διαιρέσει τα καθήκοντα σχεδιασμού σε οργανωτικές μονάδες. Αυτή η μέθοδος επεκτείνει τη DSM δομή για να περιλάβει χώρο, ενέργεια, πληροφορίες και υλικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων σχεδιασμού. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τις ομάδες των στοιχείων σχεδιασμού που πρέπει να εξεταστούν από τις οργανωτικές μονάδες. Αυτό το μοντέλο περιέχει ένα σημαντικό ποσό δόμησης των αλληλεπιδράσεων των στοιχείων σχεδιασμού, αλλά το βήμα ομαδοποίησης παραμένει ανεπίσημο.

3.4 Καθορισμός Αποτελεσμάτων Στοχαστικών Χρόνων Καθυστέρησης στον Χρόνο Υλοποίησης της Ανάπτυξης Προϊόντος

Δύο αποτελέσματα που είναι ενδεχομένως σημαντικά στην ανάπτυξη προϊόντων και δεν συλλαμβάνονται στα PERT/CPM μοντέλα της ανάπτυξης προϊόντων είναι η ανάγκη για επανάληψη καθώς επίσης και οι πιθανές καθυστερήσεις στην ανάπτυξη προϊόντων λόγω των καθυστερήσεων αναμονής. Τα μοντέλα σε αυτήν την κατηγορία αναγνωρίζουν ότι τα προγράμματα ανάπτυξης προϊόντων δεν εμφανίζονται μεμονωμένα, αλλά αντίθετα υπάρχουν διάφορα ταυτόχρονα προγράμματα που ανταγωνίζονται για τους ίδιους περιορισμένους πόρους. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα πόρων προκαλεί καθυστέρηση στο συνολικό πρόγραμμα που μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς το συνολικό χρόνο υλοποίησης του προγράμματος.

3.4.1 Μοντέλο Q-GERT

Το πρώτο μοντέλο είναι το μοντέλο Q-GERT. Το GERT είναι μια επέκταση του PERT που επιτρέπει την ανατροφοδότηση και μια γενικότερη ανάλυση. Το Q-GERT είναι μια επέκταση του GERT που επιτρέπει τις καθυστερήσεις αναμονής. Οι Taylor και Moore έχουν εφαρμόσει το Q-GERT στην ανάπτυξη προϊόντων.

Το μοντέλο περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως κατανομή καθηκόντων σε εξυπηρετητές με πιθανότητες, και περιλαμβάνει πιθανότητα επανάληψης,

διακλάδωσης και σύνδεσης καθηκόντων, και πολλαπλά ταυτόχρονα προγράμματα μέσα στις πολλαπλές ομάδες ανάπτυξης. Υπάρχει ένα γνωστό σύνολο προγραμμάτων ανάπτυξης με καλά-χαρακτηρισμένες πιθανολογικές περιγραφές της διάρκειας και των αποτελεσμάτων των καθηκόντων. Η μεθοδολογία Q-GERT στηρίζεται σε ανάλυση προσομοίωσης για να κάνει παρατηρήσεις όσον αφορά τον αναμενόμενο συνολικό χρόνο του έργου.

Στην πράξη είναι δύσκολο τα upcoming προγράμματα να γίνουν αρκετά καλά κατανοητά, έτσι ώστε ένας πιθανολογικός χαρακτηρισμός να είναι ακριβής. Επίσης, η εμπιστοσύνη στην προσομοίωση, ως τρόπο ανάλυσης, σημαίνει ότι είναι δύσκολο να καθοριστεί η συναρτησιακή σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Κάθε περίπτωση του δικτύου απαιτεί μια νέα κωδικοποίηση προσομοίωσης, η οποία μπορεί να γίνει απαγορευτική για σύνθετες καταστάσεις.

3.4.2 Μοντέλο Δικτύου Αναμονής

Μια πιο πρόσφατη προσπάθεια μοντελοποίησης εστιάζει επίσης στην εξέταση των αποτελεσμάτων των καθυστερήσεων αναμονής στο χρόνο υλοποίησης της ανάπτυξης προϊόντων. Αυτό το μοντέλο εφαρμόζει τα πιο πρόσφατα αναλυτικά αποτελέσματα από τα δίκτυα αναμονής σχετικά με τις προσεγγίσεις Brown και τα fork-join δίκτυα, στο πρόβλημα της ανάπτυξης προϊόντων που αντιμετωπίζεται ως δίκτυο αναμονής. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν τη συνολική διαθέσιμη ικανότητα για οποιαδήποτε δεδομένη δομή δικτύου, όπως επίσης τον κύκλο ζωής ενός δεδομένου ποσοστού συνολικού όγκου έργου και συνδυασμού πόρων.

Για να είναι σωστό ένα μοντέλο δικτύου αναμονής υπάρχουν διάφορες υποθέσεις που πρέπει να ισχύουν. Κατ' αρχάς, πρέπει να υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός παρόμοιων προγραμμάτων έτσι ώστε μια πιθανολογική περιγραφή τους να έχει νόημα και τα δεδομένα να είναι διαθέσιμα. Δεύτερον, υποθέτουμε ότι το δίκτυο λειτουργεί για αρκετό χρονικό διάστημα ούτως ώστε να εφαρμόζεται ο τύπος πιθανότητας σταθερής κατάστασης. Τρίτον, υποτίθεται ότι δεν υπάρχει κανένας μετά-επιπέδου έλεγχος του δικτύου (όπως οι μηχανικοί που απασχολούνται στις υπερωρίες επειδή ξέρουν ότι έχουν μια μεγάλη εκκρεμότητα εργασίας). Κάθε μια από αυτές τις υποθέσεις είναι δύσκολη. Σε συνδυασμό μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική δυσκολία στην εφαρμογή του μοντέλου.

3.5 Καθορισμός Κατάλληλου Χρόνου Αναθεώρησης Σχεδιασμού/ Διάθεση Προϊόντων

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων αφορά το συγχρονισμό (timing) των δραστηριοτήτων που συσχετίζονται με τη διαδικασία σχεδιασμού, αλλά δεν είναι στις εργασίες σχεδιασμού. Αυτές οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν τις αναθεωρήσεις σχεδιασμού και την διάθεση προϊόντων.

3.5.1 Κατάλληλος Χρόνος Αναθεώρησης Σχεδιασμού

Το πρώτο μοντέλο σε αυτήν την κατηγορία βασίζεται στην έννοια του καθορισμού του κατάλληλου χρόνου των αναθεωρήσεων σχεδιασμού. Οι αναθεωρήσεις σχεδιασμού είναι σημαντικά κύρια σημεία στη διαδικασία σχεδιασμού όταν οι συμμετέχοντες ανταλλάσσουν τις μερικώς ολοκληρωμένες ιδέες τους για την τελική μορφή του αντικειμένου. Οι αναθεωρήσεις σχεδιασμού είναι πολύτιμες επειδή παρέχουν ευκαιρίες ανταλλαγής και ανάλυσης ιδεών, αλλά είναι ενδεχομένως μη παραγωγικές λόγω του χρόνου προετοιμασίας και άλλων λειτουργικών δαπανών.

Οι Ha και Porteus στο μοντέλο τους (Κεφάλαιο 5) υποθέτουν ότι υπάρχουν δύο τύποι δραστηριοτήτων σχεδιασμού: οι δραστηριότητες σχεδιασμού προϊόντων και δραστηριότητες σχεδιασμού διαδικασίας. Οποιαδήποτε δεδομένη δραστηριότητα σχεδιασμού μπορεί να δημιουργήσει μια ατέλεια που θα ανακαλυφθεί μόνο κατά την διάρκεια της επόμενης αναθεώρησης σχεδιασμού. Οι ατέλειες διορθώνονται με επανάληψη. Επίσης, σε κάθε αναθεώρηση σχεδιασμού μεταφέρεται κάποιο ποσό εργασίας από το σχεδιασμό προϊόντος στο σχεδιασμό διαδικασίας. Είναι επιθυμητή η συχνή ύπαρξη αναθεωρήσεων σχεδιασμού έτσι ώστε να ανακαλύπτονται οι ατέλειες γρήγορα και οι σχεδιαστές διαδικασίας να μην μένουν χωρίς εργασία. Είναι επιθυμητό τοποθετηθούν κατά διαστήματα οι αναθεωρήσεις σχεδιασμού έτσι ώστε οι λειτουργικές δαπάνες να μην αυξάνονται. Το μοντέλο αναπτύσσεται έτσι ώστε να μπορεί να βρεθεί μια βέλτιστη ισορροπία μεταξύ αυτών των συγκρουόμενων συμφερόντων.

3.5.2 Προγραμματισμός Ενότητας

Ένα φιλοσοφικά παρόμοιο μοντέλο προκύπτει στη μελέτη της ανάπτυξης λογισμικού. Αυτό το μοντέλο εξετάζει τα αποτελέσματα του συντονισμού των ενοτήτων στην ανάπτυξη λογισμικού.

Ο αριθμός των υπεύθυνων για την ανάπτυξη πρέπει να επιλεχτεί από τον αποφασίζοντα. Κάθε υπεύθυνος για την ανάπτυξη λειτουργεί σε μια ενότητα του προγράμματος λογισμικού. Υπάρχει ένας σταθερός συνολικός αριθμός ενοτήτων, και ένα γεγονός συντονισμού εμφανίζεται αφότου ολοκληρωθεί κάποιος αριθμός ενοτήτων, το οποίο είναι άλλη μια μεταβλητή απόφασης. Κατά τη διάρκεια και μετά από ένα γεγονός συντονισμού οι συμμετέχοντες διαβιβάζουν τα αποτελέσματά τους, οι ολοκληρωμένες ενότητες ενοποιούνται, η επανάληψη εμφανίζεται όπου υπάρχουν ασυμβατότητες, και η περαιτέρω εργασία ανάπτυξης εμφανίζεται στις μη ολοκληρωμένες ενότητες. Ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης καθορίζεται εκ των προτέρων.

Σε αυτό το μοντέλο υπάρχουν διάφορα φαινόμενα που ερευνούνται. Η ανάλυση του μοντέλου παρουσιάζεται με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα για παραδείγματα σχετικά με πολλές ίδιες ενότητες. Επιπλέον παρουσιάζει τα αποτελέσματα προσομοίωσης για συστήματα που περιέχουν ανόμοιες ενότητες. Τα αποτελέσματα αφορούν φαινόμενα όπως το βέλτιστο μέγεθος ομάδων ως συνάρτηση του διαθέσιμου χρόνου και το βέλτιστο αριθμό ενοτήτων που πρέπει να ολοκληρωθούν πριν από ένα γεγονός συντονισμού ως συνάρτηση του συνολικού αριθμού ενοτήτων.

Οι παρατηρήσεις αυτού του τύπου μοντέλου φαίνονται κατάλληλες, αλλά η δυσκολία στη λήψη των συγκεκριμένων δεδομένων για οποιοδήποτε δεδομένο πρόγραμμα περιορίζει την άμεση δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου. Οι δημιουργοί απαιτούν «τα αποτελέσματα [αυτού του μοντέλου] δεν πρέπει να ερμηνευθούν υπό μια αυστηρή αριθμητική έννοια... Είναι λογικό να χρησιμοποιηθούν αυτά τα αποτελέσματα για την πρόβλεψη της επίπτωσης της αλλαγής μιας συγκεκριμένης παραμέτρου του συστήματος στην κατεύθυνση μιας μεταβλητής αποτελέσματος».

3.5.3 Διάθεση Προϊόντων

Ένα άλλο μοντέλο που εξετάζει τον προγραμματισμό των σημαντικών κύριων σημείων στον κύκλο ανάπτυξης προϊόντων, είναι ένα μοντέλο που εξετάζει τη σχέση μεταξύ της απόδοσης προϊόντων, της διάθεσης προϊόντων, και της ανάπτυξης. Αυτό το μοντέλο εξετάζει τη συναρτησιακή σχέση μεταξύ της απόδοσης και του κέρδους ως συνάρτηση του κατάλληλου χρόνου διάθεσης των προϊόντων.

Το μοντέλο εύλογα υποθέτει ότι η απόδοση προϊόντων είναι μια αυξανόμενη συνάρτηση του χρόνου ανάπτυξης. Η απόδοση αγοράς ενός προϊόντος είναι μια

συνάρτηση της απόδοσης του προϊόντος καθώς επίσης και του τι άλλα ανταγωνιστικά προϊόντα είναι ήδη στην αγορά κατά την διάρκεια της εισαγωγής του προϊόντος. Οι διευθυντές προϊόντων επομένως πρέπει να καθορίσουν πότε να διαθέσουν τα προϊόντα έτσι ώστε η απόδοσή τους να είναι αρκετά υψηλή για να ικανοποιήσει τις προσδοκίες των πελατών, αλλά ο κύκλος ανάπτυξης να είναι αρκετά σύντομος ούτως ώστε οι ανταγωνιστές να μην καλύψουν το κενό πρώτοι.

Το μοντέλο είναι σε θέση να υποδείξει τους βέλτιστους στόχους χρόνου αγοράς και απόδοσης του προϊόντος, καθώς επίσης και την παρουσίαση άλλων σχέσεων, όπως για παράδειγμα ότι η απόλυτη ελαχιστοποίηση του χρόνου αγοράς δεν οδηγεί στη μακροπρόθεσμα βέλτιστη στρατηγική ανάπτυξης προϊόντων.

Το μοντέλο έχει ισχυρή αιτιολόγηση για τις συναρτησιακές σχέσεις του, η οποία αυξάνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του. Εντούτοις, πάσχει από ένα κοινό ελάττωμα στη μοντελοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντων, δεδομένου ότι το μοντέλο στηρίζεται σε δεδομένα που δεν είναι μπορούν να εκτιμηθούν στην πράξη, και έτσι τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα για να επιτρέψουν σε έναν διευθυντή προγράμματος να λάβει αποφάσεις για την ανάπτυξη προϊόντων.

3.5.4 Στόχοι Σταδίων

Ένα σχετικό μοντέλο έχει σχέση με το πώς οι εταιρίες διαθέτουν τους πόρους ανάπτυξης στα διαδοχικά στάδια. Αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι υπάρχει ένα περιορισμένο σύνολο πόρων (μηχανικοί) που είναι χρήσιμοι στο πρόγραμμα ανάπτυξης. Ένα σύνολο εταιριών ανταγωνίζεται για τη χρήση αυτών των πόρων. Η ανάπτυξη προϊόντων είναι μια δύο επιπέδων διαδικασία (έρευνα και ανάπτυξη), και οι εταιρίες αποφασίζουν πώς να διαθέσουν τους πόρους μεταξύ αυτών των σταδίων διαδοχικά. Οι εταιρίες αποφασίζουν επίσης πώς να θέσουν τους τεχνικούς στόχους κάθε σταδίου.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι υπάρχει πλεονέκτημα που δίνεται στις εταιρίες που είναι τη δεδομένη περίοδο μπροστά από τους ανταγωνιστές τους, και που αυτές οι εταιρίες θα δοκιμάσουν να αυξήσουν την πιθανότητα να φτάσουν πρώτες στην αγορά. Οι βραδυκίνητες εταιρίες, σε αντίθεση, θα αυξήσουν τις τεχνικές βλέψεις τους, ελπίζοντας να είναι σε θέση να παραγάγουν ένα καλύτερο προϊόν, αν και δεν θα φθάσει στην αγορά νωρίς.

Οι υπεύθυνοι ανάπτυξης του μοντέλου επεξηγούν πώς τα αποτελέσματα που περιγράφονται από το μοντέλο έχουν χρήσιμη επεξηγηματική δύναμη για τις ανταγωνιστικές ενέργειες στη βιομηχανία υπολογιστών στο τέλος της δεκαετίας του ‘80. Αν και δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν συγκεκριμένα οι τιμές των παραμέτρων και οι συναρτησιακές μορφές, τα αποτελέσματα και οι κατευθύνσεις αυτών των σημαντικών αποτελεσμάτων στο μοντέλο επιβεβαιώνονται με εμπειρικά δεδομένα.

Αυτό είναι το μόνο μοντέλο από αυτά που περιγράφονται που περιλαμβάνει έννοιες με βάση τη θεωρία παιγνίων. Οι αποφάσεις μιας εταιρίας μπορεί να έχουν επιπτώσεις στις επιλογές μιας άλλης εταιρίας. Η θεωρία παιγνίων μοντελοποίηση είναι μια ενδεχομένως καρποφόρος περιοχή για την ανάπτυξη προϊόντων, δεδομένου ότι πολλές αποφάσεις ανάπτυξης προϊόντων επηρεάζονται έντονα από τις ανταγωνιστικές ενέργειες.

3.6 Καθορισμός του Ποσού Παραλληλίας

Ένα πρόβλημα σχεδιασμού που έχει προσελκύσει την προσοχή είναι το ποσό παραλληλίας που είναι κατάλληλο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού. Η παραλληλία ή η ταύτιση έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε μια καθαρά διαδοχική διαδικασία. Τα μοντέλα που περιγράφονται παρακάτω δείχνουν ότι υπάρχουν ισχυροί λόγοι διατήρησης κάποιου ποσού διαδοχικού προγραμματισμού στη διαδικασία σχεδιασμού, ως μέθοδο μείωσης των δαπανών και μείωσης του μεγέθους και της πολυπλοκότητας της οργάνωσης που απαιτείται για να υποστηρίξει τη δραστηριότητα σχεδιασμού.

3.6.1 Παράλληλος Προγραμματισμός

Το πρώτο μοντέλο σ’ αυτή την κατηγορία εξετάζει τα αποτελέσματα του παράλληλου προγραμματισμού. Σε αυτό το μοντέλο υπάρχει ένας αριθμός καθηκόντων σχεδιασμού που πρέπει να ολοκληρωθούν, και υπάρχει μια σαφής βασική ταξινόμηση των καθηκόντων σχεδιασμού. Υπάρχει επίσης αβεβαιότητα γύρω από τα καθήκοντα σχεδιασμού, έτσι ώστε εάν ένα από τα καθήκοντα σχεδιασμού αποτύχει να ολοκληρωθεί επιτυχώς θα πρέπει να επαναληφθεί, μαζί με τα καθήκοντα που θα ακολουθούσαν φυσιολογικά το καθήκον που έχει αποτύχει. Οι βασικές υποθέσεις αυτού του μοντέλου βασίζονται στις γενικές αρχές της διαδικασίας σχεδιασμού, παρά σε οποιεσδήποτε συγκεκριμένες παρατηρήσεις.

Το πλεονέκτημα της παράλληλης εκτέλεσης καθηκόντων είναι ότι η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να ολοκληρωθεί γρηγορότερα. Το πλεονέκτημα της εκτέλεσης καθηκόντων σε σειρά είναι ότι ελαττώνεται ο αριθμός καθηκόντων που θα απαιτήσουν επανάληψη, και επομένως ελαττώνεται το κόστος ανάπτυξης. Ο στόχος του μοντέλου είναι να καθοριστεί το ποσό του παραλληλισμού που είναι επιθυμητό, και εάν η ελαχιστοποίηση του χρόνου ανάπτυξης δικαιολογεί μια αύξηση στο κόστος ανάπτυξης.

Το μοντέλο παρουσιάζεται σε μια γενική μορφή, αλλά η τυπική ανάλυση είναι μια πιο περιορισμένη έκδοση με ίδια καθήκοντα και περιορισμένη επανάληψη καθηκόντων. Λόγω της ομοιογένειας του αναπτυγμένου μοντέλου είναι απίθανο να εφαρμοστεί σε πρακτικά προγράμματα σχεδιασμού. Η εφαρμογή του γενικότερου μοντέλου θα απαιτούσε περισσότερη ανάπτυξη του μοντέλου καθώς επίσης και την εκτίμηση ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων σχετικά με το κόστος καθήκοντος, το χρόνο και την πιθανότητα επανάληψης.

3.6.2 Μοντέλο WTM Παράλληλο / σε Σειρά

Ένα άλλο μοντέλο που αντιμετωπίζει το ζήτημα επιθυμητού μεγέθους παραλληλισμού είναι η παράλληλη – σε σειρά έκδοση του μοντέλου WTM. Το μοντέλο WTM (όπως περιγράφηκε παραπάνω) επεκτείνεται για να επιτρέψει τη διαδοχική επεξεργασία των επαναληπτικά συνδεμένων καθηκόντων. Τα καθήκοντα ομαδοποιούνται σε σύνολα. Το αρχικό σύνολο καθηκόντων επεξεργάζεται έως το σημείο που δεν απομένει επαναληπτική αναθεώρηση.

Επιχειρείται στη συνέχεια το επόμενο σύνολο στόχων, με επαναληπτική αναθεώρηση και για το πρόσφατο σύνολο, καθώς επίσης και για τα προηγούμενα σύνολα καθηκόντων. Ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης και το συνολικό ποσό μηχανικής προσπάθειας μπορούν να υπολογιστούν με βάση το πλαίσιο του WTM μοντέλου.

Εκτός από τις υποθέσεις του WTM μοντέλου, δύο υποθέσεις είναι ότι δεν υπάρχει καμία αλλαγή στις παραμέτρους του μοντέλου ως συνάρτηση του πώς τα καθήκοντα τοποθετούνται διαδοχικά, και δεν υπάρχει καμία αλλαγή στο προϊόν που παράγεται με τη διαδικασία σχεδιασμού ως συνάρτηση του πώς τα καθήκοντα τοποθετούνται διαδοχικά. Και οι δύο υποθέσεις είναι ισχυρές και ενδεχομένως προβληματικές.

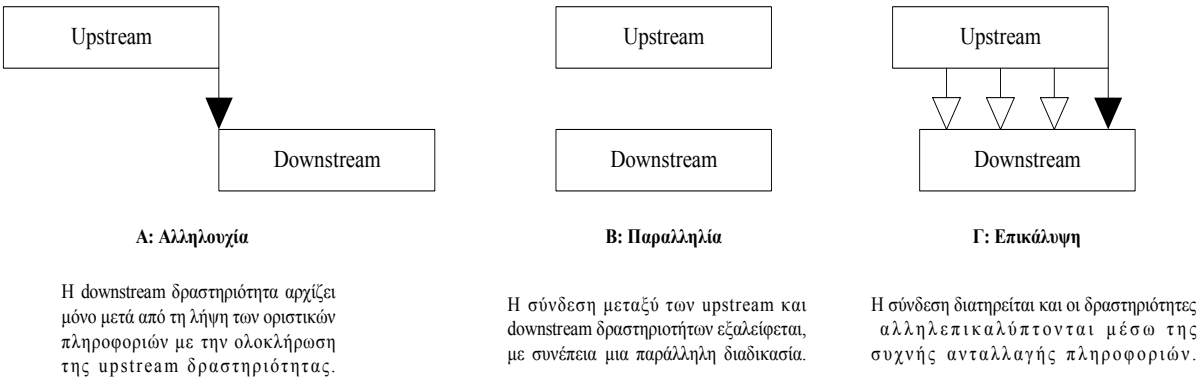
Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού τερματικών σταθμών υπολογιστών. Είναι δυνατή η συλλογή των δεδομένων που είναι απαραίτητα για να

εφαρμοστεί το μοντέλο, και το αποτέλεσμα του μοντέλου φαίνεται να είναι αξιόπιστο. Όπως για παράδειγμα αρχικά ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός προϊόντος και οι γενικές παράμετροι του σχεδιασμού της διαδικασίας κατασκευής, πρίν γίνει η λεπτομερής εργασία της διαδικασίας σχεδιασμού.

3.6.3 Επικάλυψη Σταδίων

Υπάρχουν δύο μοντέλα για την επικάλυψη σταδίων μεταξύ των διαδοχικών σταδίων σχεδιασμού. Αύξηση στην επικάλυψη μπορεί να προκύψει από πρόωρη ακινητοποίηση (freezing) των παραμέτρων σχεδιασμού σε ένα upstream (βλ. παράρτημα 3.3, 3.4) στάδιο. Η αύξηση του ποσού επικάλυψης έχει τη δυνατότητα μείωσης του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού. Η αύξηση της επικάλυψης μπορεί επίσης να οδηγήσει σε πρόωρη επιλογή εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού και ποιοτικών απωλειών, ή στη δημιουργία πρόσθετης και δαπανηρής αναθεώρησης. Αυτά τα μοντέλα προορίζονται για να διευκρινίσουν αυτό το σύνολο ζητημάτων.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων βασίζονται σε λογικές συναρτησιακές μορφές της συνάρτησης ποιοτικής απώλειας και των διατυπώσεων αλλαγής παραμέτρων. Τα μοντέλα είναι σε θέση να υπολογίσουν τον ελάχιστο χρόνο ανάπτυξης για ευπροσδιόριστα δεδομένα. Επεξηγούν επίσης πώς πρέπει να προσδιοριστούν οι παράμετροι που θα μπορούσαν και πρέπει να ακινητοποιηθούν νωρίς, προκειμένου να ελαττωθεί ο χρόνος ανάπτυξης χωρίς να θυσιαστεί η ποιότητα των προϊόντων. Τα μοντέλα έχουν εφαρμοστεί σε αυτοκινητοβιομηχανίες και βιομηχανίες ηλεκτρονικών. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι διαθέσιμα σε πολλές περιπτώσεις.



Σχήμα 3 8: Επιλογές Επικάλυψης Εργασιών

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται εκτενέστερα κάποια από τα παραπάνω μοντέλα που έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων.

4 ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

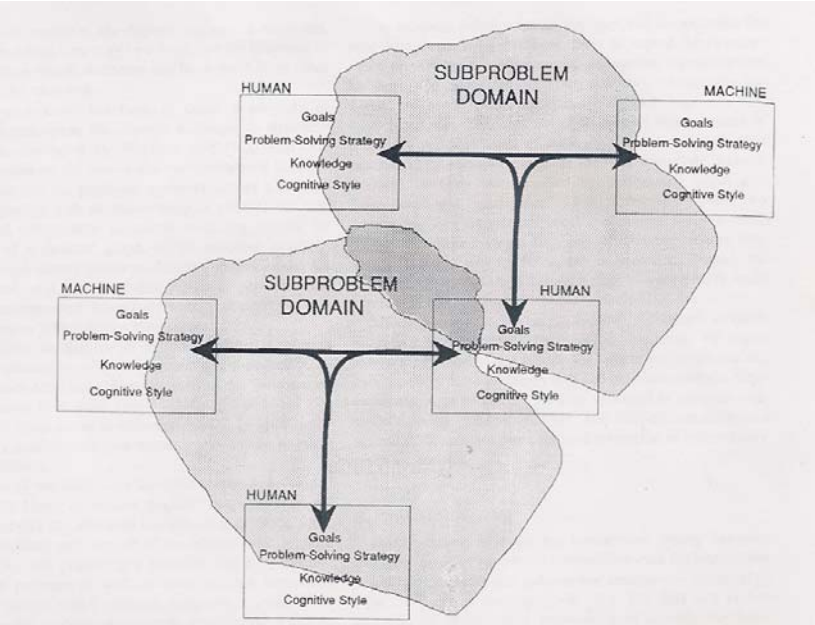
4.1 Εισαγωγή

Ο διαχωρισμός της διανοητικής εργασίας σε επί μέρους, που απαιτείται για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων, απαιτεί αυτά τα προβλήματα να αποσυντίθενται και να διανέμονται στους διαθέσιμους «εργάτες» (που θα τα επεξεργαστούν). Μια άποψη, αρκετά καλά ανεπτυγμένη στον τομέα επίλυσης προβλημάτων είναι η συνεργασία, δηλαδή η διανομή των εργασιών επίλυσης στα μέλη μιας ομάδας ή συστήματος με βάση τις δυνατότητές τους.

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα σε πολλαπλές, λογικές οντότητες στη διαδικασία επίλυσης σύνθετων προβλημάτων γενικά ονομάζεται συνεργασία. Συνεργάζομαι σημαίνει δουλεύω μαζί με άλλους σε μια κοινή διανοητική προσπάθεια. Επομένως, τα μέρη της ομάδας ή του συστήματος (γενικότερα οι φορείς που τα συνθέτουν) συνεργάζονται για να δώσουν τις ωφέλειες απόδοσης που προσφέρει αυτή η διανοητική συνεργασία. Ο όρος «συνεργαζόμενα» περιγράφει συστήματα που αποτελούνται από ποικίλους συνδυασμούς φορέων, ανθρώπινων και τεχνητών που εφαρμόζονται στις περιπτώσεις που απαιτείται η επίλυση κάποιου προβλήματος.

Η αποσύνθεση των προβλημάτων και ο διαχωρισμός της εργασίας χαρακτηρίζουν τον ανθρώπινο τρόπο επίλυσης των προβλημάτων και αντιπροσωπεύουν τις πιο ισχυρές προσεγγίσεις που υπάρχουν στον τομέα της επίλυσης σύνθετων (πολυεπίπεδων και κακοδομημένων) προβλημάτων. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό πρέπει η μορφή και το περιεχόμενό των συνεργαζόμενων συστημάτων να επαρκούν για την ανάλυση κάθε προβλήματος που είναι πιθανό να απευθυνθεί στο συγκεκριμένο σύστημα.

Εξ ορισμού, το σύστημα επίλυσης προβλήματος που είναι συνεργαζόμενο δεν αποτελεί μόνο μια δραστηριότητα που εκτελείται από κοινού, αλλά απαιτεί την αποτελεσματική αποσύνθεση και διανομή των προβλημάτων ανάμεσα στους συνεργαζόμενους, ανάλογα με τις αντίστοιχες ικανότητες και εξειδίκευσή τους. Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει την αλληλεπίδραση συνεργασίας ανάμεσα σε ανθρώπους, μηχανές και το πεδίο του προβλήματος.



Σχήμα 4 1: Αλληλεπίδραση Συνεργασίας μεταξύ Ανθρώπων και Μηχανών και το Πεδίο ενός Αποσυνθέσιμου Προβλήματος

Όπως δείχνει το σχήμα, ένα σύνθετο πρόβλημα μπορεί να τυποποιηθεί ως ένα σύνολο υποπροβλημάτων με πιο ειδικό πεδίο. Αυτά τα υποπροβλήματα χαρακτηρίζονται από ποικίλους βαθμούς εξάρτησης αλλά και σημείων που δεν υπάρχει επαφή. Οι πολλαπλοί ανθρώπινοι και μηχανικοί φορείς – καθένας με ιδιαίτερες γνώσεις, στόχους, στρατηγικές και γνωστικό ύφος – αλληλεπιδρούν για την επίλυση αυτών των υποπροβλημάτων και τελικά του προβλήματος.

4.1.1 Τυποποίηση προβλημάτων

Η επίλυση σύνθετων προβλημάτων απαιτεί να αποσυντίθενται τα προβλήματα και να διανέμονται στα διαθέσιμα μέλη συστημάτων ή ομάδων.

Για την τυποποίηση ενός σύνθετου προβλήματος, το όλο ζήτημα είναι η εύρεση μιας μεθόδου αποσύνθεσης του προβλήματος σε απλούστερα υποπροβλήματα κάθε ένα από τα οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί χωριστά. Η τυποποίηση των προβλημάτων απαιτεί τεχνικές και αρχές για τη μοντελοποίηση, τη δόμηση και την αποδόμηση σε υποπροβλήματα, για τη διανομή των υποπροβλημάτων στους διαθέσιμους επιλυτές, και για την ανασύνθεση των λύσεων των υποπροβλημάτων σε μια απάντηση για το αρχικό πρόβλημα.

1. Δόμηση προβλήματος

Η διάκριση ανάμεσα στις αλληλεπιδράσεις εντός του προβλήματος – ο σχηματισμός του – και στις αλληλεπιδράσεις εντός των υποπροβλημάτων – η δομή των υποπροβλημάτων – είναι βασική για την αποδόμηση του προβλήματος. Το πρώτο βήμα για την τυποποίηση ενός κακοδομημένου προβλήματος είναι ο προσδιορισμός των σχέσεων ανάμεσα στα υποπροβλήματα.

Μορφοποίηση Προβλήματος: Κατά τον Simon, η ιεραρχία είναι βασικό σχέδιο δόμησης για την αναπαράσταση μορφοποίησης σύνθετων προβλημάτων. Χρησιμοποιεί τον όρο ιεραρχία με την ευρεία έννοια, αναφερόμενος σε όλα τα σύνθετα προβλήματα που μπορούν να αναλυθούν σε διαδοχικά σύνολα υποσυστημάτων. Κάποια ιεραρχία υπάρχει σε όλα τα συστήματα.

Δόμηση υποπροβλημάτων: Για τον προσδιορισμό των υποπροβλημάτων μια επιθυμητή ιδιότητα είναι αν είναι δυνατόν να ελαχιστοποιείται ο αριθμός και η πολυπλοκότητα των σχέσεων ανάμεσα στα υποπροβλήματα. Για να προσδιοριστούν αυτές οι σχέσεις χρησιμοποιούνται ευρετικές ή άλλες διαδικασίες.

Ο στόχος είναι η μείωση και η απλοποίηση των σχέσεων ανάμεσα στις ενότητες (modules). Η ελαχιστοποίηση των διασυνδέσεων ανάμεσα στις ενότητες (modules) και η μεγιστοποίηση των σχέσεων, των δεσμών μέσα στην ίδια την ενότητα (module), γενικά καλείται «συνοχή». Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι συνοχής που σχετίζονται με την αποδόμηση των προβλημάτων.

1. Διαδοχική (Sequential): Υπάρχει μια σχέση εισόδου- εξόδου (input/ output) ανάμεσα στα στοιχεία προς επεξεργασία. Η έξοδος ενός στοιχείου είναι είσοδος για ένα ή περισσότερα στοιχεία.
2. Λειτουργική (Functional): Διασφαλίζει το ότι όλα τα στοιχεία προς επεξεργασία σχετίζονται με την ολοκλήρωση μιας συνολικής λειτουργίας.
3. Πληροφοριακή (Informational): Αντανακλά την ομαδοποίηση των στοιχείων προς επεξεργασία ανάλογα με τη σχέση τους προς τη δομή ορισμένων σύνθετων δεδομένων.
4. Διανοητική (Intellectual): Αντανακλά τη σκοπιά από την οποία απαιτούνται κάποιες διανοητικές ικανότητες για την επίλυση ενός προβλήματος.

Δύναμη σύνδεσης υποπροβλημάτων: Τις δυνάμεις της σύνδεσης ανάμεσα στα υποπροβλήματα πρέπει να τις λάβουμε σοβαρά υπόψη μας όταν προσδιορίζουμε τη

δομή ενός προβλήματος διότι επηρεάζουν το αποτέλεσμα της επικοινωνίας – επεξεργασίας. Οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα υποπροβλήματα είναι βασικής σημασίας και αποτελούν δεδομένα που μπορούν να περιγραφούν σε μια συνεχή σειρά (continuum) που αρχίζει από ανεξάρτητη (independent) και μπορεί να φτάσει μέχρι ημι-ανεξάρτητη (semi- independent) και εξαρτημένη (dependent) (βλ. παράρτημα 4.1). Οι Simon, Ando και οι Ando, Fischer προσδιορίζουν σημεία σε αυτή τη συνεχή σειρά χρησιμοποιώντας όρους όπως «αποσυνθέσιμα» και «σχεδόν–αποσυνθέσιμα». Οι σχέσεις ανάμεσα στα υποπροβλήματα είναι σχεδόν–αποσυνθέσιμες όταν η αλληλεπίδραση είναι μικρή, αλλά όχι και αμελητέα. Ενώ είναι αποσυνθέσιμες αν ή αλληλεπίδραση είναι αμελητέα. Ένα σύνθετο πρόβλημα είναι εκείνο στο οποίο «το σύνολο είναι κάτι περισσότερο από τη συνεύρεση των μερών του», δηλαδή, εκείνο στο οποίο τα μέρη δεν είναι ανεξάρτητα.

4.1.2 Αποδόμηση προβλήματος

Είναι γνωστό ότι κάποιοι τρόποι αποδόμησης σύνθετων προβλημάτων είναι πιο «φυσικοί» και περιέχουν λιγότερη «βία» προς τη δομή του συνολικού προβλήματος από ότι οι άλλοι τρόποι. Αυτές οι μέθοδοι είναι ευρετικές και το κριτήριο απόδοσής τους είναι ικανοποιητική, αποτελεσματική και πρακτική επιλυσιμότητα. Για να είναι αποτελεσματική η αποδόμηση του προβλήματος, πρέπει να μην έχει απώλειες. Επίσης, απαιτείται από τη συνένωση των υποπροβλημάτων να προκύπτει μια επίλυση με συνοχή, αποτελεσματικότητα και πρακτική εφαρμογή. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται μια στρατηγική επίλυσης προβλημάτων η οποία διαιρεί το όλον με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί τη δομή του συστήματος των υποπροβλημάτων. Επίσης, να διατηρεί τη δυναμική των υποπροβλημάτων (του καθενός χωριστά) και να αναγνωρίζει τη δύναμη των δεσμών ανάμεσα στα υποπροβλήματα.

Από την πλευρά του επεξεργαστή (processor), έχουν προσδιοριστεί τρεις εννοιοποιήσεις της παράλληλης κίνησης (parallelism). Αυτές είναι οι agenda, result και specialist. Αυτές διακρίνονται από τις ικανότητες επεξεργασίας που διαθέτουν και την αλληλεπίδραση των υποπροβλημάτων. Οι ικανότητες επεξεργασίας γενικά θεωρούνται ως διαφοροποιημένες ή αδιαφοροποίητες, ενώ η αλληλεπίδραση των υποπροβλημάτων εκτείνεται από αυστηρώς στη σειρά (serial), έως αυστηρώς παράλληλα. Όταν οι ικανότητες διαφοροποιούνται ανάμεσα στους επεξεργαστές, οι επιλυτές στους οποίους καταλήγουμε είναι εξειδικευμένοι (specialists). Όταν οι ικανότητες είναι ομογενοποιημένες (δηλαδή, αδιαφοροποίητες), οι επιλυτές είναι

γενικευτικοί (generalists). Όταν η αλληλεπίδραση των υποπροβλημάτων είναι παράλληλη, οι επεξεργαστές μπορούν να δουλέψουν πάνω σε διαφορετικά υποπροβλήματα ταυτοχρόνως. Αν η αλληλεπίδραση μεταξύ των υποπροβλημάτων είναι στη σειρά (serial) οι επεξεργαστές πρέπει να ολοκληρώσουν μια εργασία πριν προχωρήσουν στη επόμενη.

Στη παράλληλη κίνηση agenda οι ικανότητες επεξεργασίας είναι αδιαφοροποίητες και οι επεξεργαστές εργάζονται ταυτοχρόνως για το ίδιο υποπρόβλημα. Στην παράλληλη κίνηση specialist, οι ικανότητες επεξεργασίας είναι διαφοροποιημένες και οι επεξεργαστές δουλεύουν πάνω σε διαφορετικά υποπροβλήματα. Στην παράλληλη κίνηση result, οι ικανότητες επεξεργασίας δεν είναι διαφοροποιημένες, είναι αδιαφοροποίητες και οι επεξεργαστές δουλεύουν πάνω σε διαφορετικά υποπροβλήματα.

Ο τέταρτος συνδυασμός, όπου οι ικανότητες επεξεργασίας είναι διαφοροποιημένες και οι επεξεργαστές δουλεύουν ταυτόχρονα πάνω στο ίδιο υποπρόβλημα πριν προχωρήσουν στο επόμενο δεν έχει προσδιοριστεί επαρκώς. Αν οι ικανότητες επεξεργασίας διαφοροποιούνται σε εξειδικεύσεις, είναι δύσκολο να φανεί με ποιο τρόπο ή για ποιο λόγο θα μπορούσαν να δουλέψουν πάνω στο ίδιο υποπρόβλημα. Όπως φαίνεται, οι τρεις τύποι δεν αποκλείουν ο ένας τον άλλο. Επίσης, ως σύνολο δεν είναι και οι μοναδικοί, δεν αποκλείουν την ύπαρξη και άλλων τύπων.

Ένα αποσυνθέσιμο πρόβλημα παράγει μια μορφή αποτελεσμάτων αν η διαίρεσή του σε υποπροβλήματα βασίζεται πάνω σε ένα σύνολα ενδιαμέσων ή υποσυστημάτων (intermediates or subassemblies) που χρειάζονται για να φτάσουμε σε κάποιο επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέτοιου είδους προβλήματα είναι προσανατολισμένα στη δομή των δεδομένων, και κάθε υποπρόβλημα προσδιορίζεται ξεχωριστά από τις δικές του προδιαγραφές εισαγωγής δεδομένων και εξαγωγής αποτελεσμάτων (input/ output). Αν αποσυνθέσουμε το πρόβλημα σε στοιχειώδεις προδιαγραφές δεδομένων τότε θα ανακαλύψουμε ολόκληρη τη δομή του. Επομένως, για προβλήματα αυτής της μορφής μια αποσύνθεση προσανατολισμένη στα δεδομένα είναι η πλέον κατάλληλη. Για παράδειγμα αν το τελικό προϊόν είναι ένας πίνακας δεδομένων, κάθε κελί του πίνακα μπορεί να προσδιοριστεί ως ξεχωριστό υποπρόβλημα. Όταν επιλυθεί κάθε ένα υποπρόβλημα, τα ενδιάμεσα αποτελέσματα μπορούν να συγκεντρωθούν για να παρέχουν μια απάντηση στο πρόβλημα συνολικά.

Οι τρεις πιο κοινές μορφές προβλημάτων είναι η agenda, η specialist και η result. Ένα πρόβλημα παρουσιάζει μορφή agenda αν οι σχέσεις ανάμεσα στα υποπροβλήματα καθορίζονται με βάση την «κληρονομιά». Μια δομή agenda αποτελείται από μερική ταξινόμηση των δραστηριοτήτων έτσι ώστε το αποτέλεσμα του ενός υποπροβλήματος να εισάγεται ως δεδομένο σε ένα άλλο ή άλλα. Λόγω αυτής της σχέσης, η αλληλεπίδραση των υποπροβλημάτων σε μια δομή agenda είναι σε σειρά ή είναι ιεραρχική. Αντίστοιχα, ένα πρόβλημα σειράς ή ιεραρχικό παρουσιάζει δομή agenda.

Ένα πρόβλημα παρουσιάζει μορφή specialist όταν τα υποπροβλήματά του προσδιορίζονται κυρίως από τις ικανότητες, δεξιότητες, δραστηριότητες ή διανοητικό πεδίο που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί η εργασία. Μια δομή specialist απαιτεί αποσύνθεση προσανατολισμένη στη διαδικασία επειδή το πρόβλημα προσδιορίζεται από τις διαδικασίες ή τις λειτουργίες που πρέπει να γίνουν.

Ένα πρόβλημα παρουσιάζει μορφή result όταν τα υποπροβλήματά του προσδιορίζονται από τις προδιαγραφές εισαγωγής δεδομένων/ εξαγωγής συμπερασμάτων. Μια δομή result απαιτεί αποσύνθεση προσανατολισμένη στη δομή των δεδομένων.

Αν η φυσική δομή του συστήματος υποπροβλημάτων ενός προβλήματος είναι σε σειρά ή ιεραρχική, η παραλληλία agenda είναι αυτή που αναμένεται να κάνει την πιο ήπια επέμβαση στην εγγενή δομή του προβλήματος. Αν η φυσική δομή του συστήματος υποπροβλημάτων ενός προβλήματος είναι παράλληλη πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι παραλληλίες result και specialist. Αν το σύστημα των υποπροβλημάτων είναι προσανατολισμένο στη δομή των δεδομένων και κάθε υποπρόβλημα απαιτεί ένα αδιαφοροποίητο συνδυασμό από ικανότητες συστήματος, είναι κατάλληλη η παραλληλία result. Από την άλλη πλευρά, αν το σύστημα των υποπροβλημάτων είναι προσανατολισμένο στη διαδικασία και κάθε υποπρόβλημα χρειάζεται ξεχωριστές ικανότητες, τότε εφαρμόζεται καλύτερα η παραλληλία specialist.

Αναλύοντας όλα αυτά επιλέγεται η κατάλληλη στρατηγική αποσύνθεσης. Ο πίνακας I αποτελεί περίληψη των στρατηγικών αυτών με βάση τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΓΙΑ ΜΟΡΦΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ

Στρατηγική Αποσύνθεσης	Υποπροβλήματα καθορισμένα με βάση	Εστίαση της Αποσύνθεσης	Μορφή Προβλήματος	Τύπος Συνοχής	Ισχύς Δεσμών
Agenda	Κληρονομιά	Διαδικασία	Σε Σειρά ή Ιεραρχική	Διαδοχικός	Ανεξάρτητοι
Result	Προδιαγραφές Εισαγωγής /Εξαγωγής	Δομή Δεδομένων	Παράλληλη	Πληροφοριακός	Εξαρτημένοι
Specialist	Πεδίο Ικανότητας, Δραστηριότητας ή Διανοητικό	Επεξεργασία	Παράλληλη	Διανοητικός	Ημιανεξάρτητοι

4.1.3 Ανάθεση Υποπροβλημάτων

Εξ ορισμού τα συνεργατικά συστήματα είναι συνθέσεις ετερογενών ειδικών που παρέχουν λύσεις σε προβλήματα. Για την αποτελεσματική χρήση των ειδικών, οι ανατιθέμενες εργασίες πρέπει να συμφωνούν με αυτό που είναι οι ειδικοί. Η συνεργασία, ως στρατηγική επίλυσης προβλημάτων, προέρχεται από την ιδέα της αποσύνθεσης specialist, την κατασκευή υποπροβλημάτων που διαφοροποιούνται με βάση το πεδίο της εξειδίκευσης. Το ιδεώδες θα ήταν να συνδυάζονται απόλυτα η εξειδίκευση ενός συνεργατικού συστήματος με τις διανοητικές απαιτήσεις των προβλημάτων. Σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσαν να σχεδιαστούν υποπροβλήματα με συνέπεια διανοητική και να ανατεθούν σε εργάτες που διαθέτουν την εξειδίκευση που χρειάζεται για να ολοκληρώσουν επιτυχώς την εργασία. Ωστόσο, αυτοί οι τέλειοι συνδυασμοί είναι σπάνιοι, πόσο μάλλον για προβλήματα κάποιας δυναμικής. Ευτυχώς, οι τέλειοι συνδυασμοί δεν είναι απαραίτητοι για τα συστήματα στα οποία αναφερόμαστε, ούτε για την παραγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων. Επομένως, στα συνεργατικά συστήματα, το σύστημα πρέπει να δομεί και να αναθέτει υποπροβλήματα τέτοια που να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά τη διαθέσιμη εξειδίκευση, μεγιστοποιώντας την απόδοση του συστήματος.

4.2 Μέθοδος Πίνακα Μετασχηματισμού Εργασίας

Ο μηχανικός σχεδιασμός περιλαμβάνει συχνά ένα πολύ σύνθετο σύνολο σχέσεων μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού συνδεμένων προβλημάτων. Αυτή η σύνθετη σύνδεση οδηγεί στην επανάληψη μεταξύ των διάφορων μηχανικών καθηκόντων σε ένα μεγάλο πρόγραμμα. Το μοντέλο πίνακα μετασχηματισμού εργασίας (work transformation matrix model) είναι μια αποτελεσματική επέκταση των μεθόδων DSM, και μπορεί να προβλέψει την αργή και γρήγορη σύγκλιση της επανάληψης μέσα σε ένα πρόγραμμα, και να προβλέψει τα συνδεμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος σχεδιασμού που θα απαιτήσουν πολλές επαναλήψεις για να καταλήξουν σε μια τεχνική λύση.

4.2.1 Εισαγωγή

Οι κατασκευαστικές εταιρίες αντιμετωπίζουν σήμερα τεράστια πίεση όσον αφορά τη βελτίωση της απόδοσης ανάπτυξης προϊόντων. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στο χρόνο που χρειάζεται για να αναπτυχθεί ένα νέο προϊόν ή για να ξανασχεδιάσει ένα υπάρχον. Μια προσέγγιση για τη βελτίωση της ανάπτυξη προϊόντων είναι να αναγνωριστεί ότι η ανάπτυξη προϊόντων είναι συχνά αρκετά διαδικαστική και επαναλαμβανόμενη. Επομένως η διαδικασία μπορεί να μοντελοποιηθεί με τον ίδιο σχεδόν τρόπο όπως μια διαδικασία κατασκευής που επιθυμείται η βελτίωσή της.

Τα PERT διαγράμματα περιγράφουν τη διαδικασία ως μια πρόοδο των παράλληλων και σε σειρά δραστηριοτήτων. Εντούτοις, οι συνδεμένες και επαναληπτικές διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντων είναι στην πραγματικότητα αρκετά κοινές. Η κατανόηση της επανάληψης σχεδιασμού είναι επομένως θεμελιώδης στην επιτάχυνση και τη βελτίωση των πρακτικών ανάπτυξης προϊόντων.

Υπάρχουν δύο τρόποι να επιταχυνθεί μια επαναληπτική διαδικασία ανάπτυξης: 1) να εκτελεστούν γρηγορότερες επαναλήψεις, ή 2) να διεξαχθούν λιγότερες επαναλήψεις. Και οι δύο προσεγγίσεις είναι σημαντικές. Οι γρηγορότερες επαναλήψεις επιτυγχάνονται με διάφορα μέσα, όπως η χρήση μηχανικών μοντέλων ή τεχνολογίας πληροφοριών. Λιγότερες επαναλήψεις μπορούμε να έχουμε όταν οι συνδεμένες δραστηριότητες ανάπτυξης μπορούν να προβλέπουν η μία τα αποτελέσματα της άλλης, ή όταν αφαιρούνται οι εξωγενείς δραστηριότητες από το επαναληπτικό τμήμα της διαδικασίας.

Τα μοντέλα της επανάληψης σχεδιασμού παρέχουν διορατικότητα όσον αφορά τη διαδικασία επανάληψης. Το μοντέλο παράλληλης επανάληψης που παρουσιάζεται

εδώ παρέχει στους διευθυντές τις πληροφορίες ως προς το ποιες δραστηριότητες σε μια σύνθετη και συνδεμένη διαδικασία συνεισφέρουν περισσότερο στην επαναληπτική διαδικασία ανάπτυξης. Οι λύσεις στο πρόβλημα επανάληψης μπορούν επίσης να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα. Οι λύσεις μπορεί να περιλαμβάνουν την προσθήκη πόρων, την αναδιάρθρωση της διαδικασίας, την παροχή νέων εργαλείων μηχανικής αυτοματοποίησης, τον επαναπροσδιορισμό του προβλήματος, τον περιορισμό του πεδίου προσπάθειας ανάπτυξης, τον επανακαθορισμό στόχων, κ.λπ.

Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια ασχολείται με την «παράλληλη επανάληψη», μια ακραία περίπτωση όπου διάφορες δραστηριότητες ανάπτυξης εξελίσσονται συγχρόνως. Κάθε δραστηριότητα παράγει πληροφορίες που μπορεί να αναγκάσουν τις υπόλοιπες να επαναλάβουν όλο ή κάποιο μέρος της εργασίας τους. Σε αυτήν την κατάσταση, θεωρούμε την επανάληψη των δραστηριοτήτων αιτιοκρατική και ολόκληρο το σύνολο δραστηριοτήτων συγκλίνει στη λύση σχεδιασμού ταυτόχρονα. Είναι εφικτή η ανάλυση μια μεγάλης διαδικασίας μηχανικού σχεδιασμού και ο καθορισμός των υποσύνολων των καθηκόντων που απαιτούν το μεγαλύτερο μέρος της προσπάθειας που καταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επανάληψης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται πως μπορεί να μοντελοποιηθεί η επανάληψη και αναπτύσσεται μια αναλυτική ερμηνεία βασισμένη στην eigenstructure του μοντέλου πίνακα. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε μια διαδικασία ανάπτυξης ενός συστήματος φρένων αυτοκινήτου προκειμένου να διευκρινιστεί η χρησιμότητα του μοντέλου στην περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών μιας πραγματικής διαδικασίας σχεδιασμού. Τέλος συζητείται η χρησιμότητα αυτής της μεθόδου και οι περιορισμοί στην κατανόηση της διαδικασίας μηχανικού σχεδιασμού.

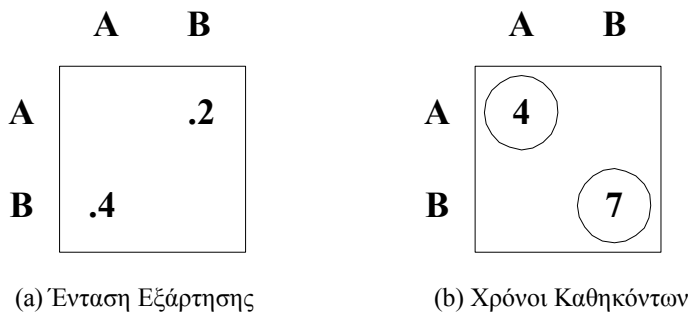
4.2.2 Ανάπτυξη Μοντέλου Επανάληψης Σχεδιασμού

Για τη μοντελοποίηση της επανάληψης σχεδιασμού, χρησιμοποιείται μια εκτεταμένη αριθμητική έκδοση ενός πλήρως συνδεμένου πίνακα δομής σχεδιασμού που ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού εργασίας (work transformation matrix) (WTM). Υπάρχουν δύο τύποι πληροφοριών σε ένα πίνακα μετασχηματισμού εργασίας. Τα στοιχεία εκτός της διαγωνίου (Σχήμα 4.2.a) αντιπροσωπεύουν τη ένταση της εξάρτησης μεταξύ των καθηκόντων, δίνοντας αφορμή για μεταφορά

εργασίας, ή αναθεώρηση, που περιλαμβάνονται στις επαναλήψεις. Τα διαγώνια στοιχεία (Σχήμα 4.2.b) στο WTM αντιπροσωπεύουν το χρόνο που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί κάθε καθήκον κατά τη διάρκεια της πρώτης επανάληψης. Υποτίθεται ότι θα υπάρξουν πολλαπλές επαναλήψεις, και ότι ο χρόνος που απαιτεί ένα καθήκον για κάθε επόμενο στάδιο είναι μια συνάρτηση του χρόνου που ξοδεύεται για εργασία στο προηγούμενο στάδιο σε καθήκοντα που εξασφαλίζουν τα δεδομένα εισόδου του. Επιθυμείται η εύρεση του αθροίσματος των χρόνων όλων των σταδίων.

Υποθέτουμε ότι κάθε καθήκον δημιουργεί ένα αιτιοκρατικό ποσό αναθεώρησης για άλλα καθήκοντα. Η αναθεώρηση είναι η απαιτούμενη επανάληψη ενός καθήκοντος επειδή επιχειρήθηκε αρχικά με ελλιπείς πληροφορίες (υποθέσεις).

Ακολουθούν τρεις παράγραφοι: στην πρώτη περιγράφονται οι βασικές υποθέσεις του μοντέλου, στη δεύτερη περιγράφεται γιατί οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα (βλ. παράρτημα 4.2) του WTM είναι σχετικά με το χρόνο ανάπτυξης και στην τρίτη περιγράφεται πώς ερμηνεύεται η eigenstructure του πίνακα. Μετά την παραγωγή του μοντέλου, επεξηγείτε η αναλυτική διαδικασία χρησιμοποιώντας ένα απλό παράδειγμα, και έπειτα αναλύεται ο WTM για το πρόβλημα σχεδιασμού συστήματος φρένων.



(a) Ένταση Εξάρτησης (b) Χρόνοι Καθηκόντων

Σχήμα 4 2: Πίνακας Μετασχηματισμού Εργασίας

4.2.2.1 Υποθέσεις Μοντέλου Πίνακα Μετασχηματισμού Εργασίας

Το μοντέλο WTM κάνει τρεις συγκεκριμένες γραμμικές υποθέσεις που επιτρέπουν την εκτέλεση γραμμικής αλγεβρικής ανάλυσης του WTM:

- Όλα τα καθήκοντα συντελούνται σε κάθε στάδιο – πλήρως παράλληλη επανάληψη.

- Η αναθεώρηση που διεξάγεται είναι μια συνάρτηση της εργασίας που γίνεται στο προηγούμενο στάδιο επανάληψης.
- Οι παράμετροι μετασχηματισμού εργασίας στον πίνακα δεν μεταβάλλονται με το χρόνο.

Η πρώτη υπόθεση, ότι όλα τα συνδεμένα καθήκοντα επεξεργάζονται σε κάθε στάδιο, είναι εξιδανίκευση μιας παρατήρησης που έχει γίνει που αφορά πολλά προγράμματα σχεδιασμού. Η υπόθεση θα ήταν πιθανό να παραμείνει σε μια κατάσταση όπου υπάρχει μια ομάδα της οποίας το σύνολο των μελών είναι αμετάβλητο, γεωγραφικά κλειστό, και εργάζονται σε ένα σύνολο συσχετιζόμενων θεμάτων σχεδιασμού ταυτόχρονα. Αυτή η κατάσταση συστήνεται συνήθως στην παράλληλη μηχανική. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, ασχολούμαστε με τα στενά συνδεμένα καθήκοντα σχεδιασμού (όχι τα διαδοχικά ή αποσυνδεδεμένα) για τα οποία η υπόθεση πλήρους παράλληλης επανάληψης φαίνεται λογική. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτό το στενά συνδεμένο τμήμα της διαδικασίας ανάπτυξης μπορεί να μην περιλαμβάνει ολόκληρη την διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος, αλλά ένα επαναληπτικό υποσύνολο της διαδικασίας, (όπως στην περίπτωση του παραδείγματος σχεδιασμού συστήματος φρένων που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια). Εάν υπάρχουν οργανωτικά ή χρονικά εμπόδια που δεν επιτρέπουν την παράλληλη εργασία σε στενή συνεργασία, τότε αυτή η υπόθεση πιθανώς δεν θα παραμείνει. Μια λιγότερο αυστηρή υπόθεση από την πλήρως παράλληλη, είναι ένα μοντέλο επανάληψης στο οποίο τα καθήκοντα εκτελούνται σε πολλαπλές φάσεις (Smith και Eppinger 1995).

Η δεύτερη και τρίτη υπόθεση, όπου η αναθεώρηση είναι μια γραμμική συνάρτηση της εργασίας στην προηγούμενη επανάληψη και το μέτρο αναθεώρησης δεν μεταβάλλεται με το χρόνο, είναι κατάλληλες από τη μαθηματική πλευρά αλλά δυσκολότερο να υποστηριχτούν από μια εμπειρική πλευρά. Εντούτοις, έχει παρατηρηθεί ότι το χρονικό διάστημα ανά επανάληψη μειώνεται (Smith και Tjandra 1996). Επιπλέον, εάν ο αριθμός επαναλήψεων είναι σχετικά μικρός (η διαδικασία σχεδιασμού είναι πολύ σταθερή), το μεγαλύτερο μέρος της αναθεώρησης ολοκληρώνεται στις πρώτες επαναλήψεις. Έτσι εάν οι παράμετροι άλλαζαν κατά τη διάρκεια του χρόνου, τότε οι αλλαγές θα είχαν κατά κύριο λόγο επιπτώσεις στο ποσό εργασίας των επαναλήψεων που δεν συμβάλλουν έντονα στο συνολικό χρόνο που απαιτείται.

Για την περιγραφή του μοντέλου, εισάγεται αρχικά η έννοια του διανύσματος εργασίας u_t. Αυτό είναι ένα *n*- διάνυσμα, όπου *n* είναι ο αριθμός συνδεμένων καθηκόντων σχεδιασμού που πρέπει να ολοκληρωθούν. Κάθε στοιχείο του διανύσματος εργασίας περιέχει το ποσό εργασίας που πρέπει να γίνει σε κάθε καθήκον μετά το στάδιο επανάληψης *t*. Το αρχικό διάνυσμα εργασίας u_0 είναι ένα διάνυσμα μονάδων, που δείχνει ότι όλη η εργασία παραμένει να ολοκληρωθεί σε κάθε καθήκον στην αρχή της διαδικασίας επανάληψης.

Κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου επανάληψης, όλη η εργασία ολοκληρώνεται σε όλα τα καθήκοντα σχεδιασμού. Εντούτοις, η εργασία σε κάθε καθήκον θα προκαλέσει κάποια αναθεώρηση για όλα τα άλλα καθήκοντα που εξαρτώνται από την ολοκλήρωση του καθήκοντος για πληροφορίες. Ο πίνακας μετασχηματισμού εργασίας τεκμηριώνει αυτή την εξάρτηση πληροφοριών. Κάθε στάδιο επανάληψης παράγει μια αλλαγή στο διάνυσμα εργασίας σύμφωνα με:

$$u_{t+1} = Au_t$$

όπου κάθε μια από τις καταχωρήσεις α_{ij} στο A συνεπάγεται ότι μια μονάδα εργασίας για το καθήκον σχεδιασμού *j* δημιουργεί α_{ij} μονάδες αναθεώρησης για το καθήκον σχεδιασμού *i*. Ο πίνακας A είναι τότε το τμήμα των εξαρτήσεων του WTM (σχήμα 4.2.a). Η διαγώνιος του A είναι μηδέν. Δεδομένου ότι η διαδικασία είναι επαναληπτική, το διάνυσμα εργασίας u_t μπορεί επίσης να εκφραστεί ως εξής:

$$u_t = A^t u_0$$

Το σύνολο όλων των διανυσμάτων εργασίας είναι το συνολικό διάνυσμα εργασίας U, που αντιπροσωπεύει το συνολικό χρόνο του καθενός από τα καθήκοντα κατά τη διάρκεια του συνόλου M των σταδίων επανάληψης της διαδικασίας σχεδιασμού:

$$U = \sum_{t=0}^{M} u_t = \sum_{t=0}^{M} A^t u_0 = \left(\sum_{t=0}^{M} A^t \right) u_0$$

Το αποτέλεσμα του μοντέλου απόδοσης U είναι επομένως σε μονάδες του αρχικού ποσού εργασίας που γίνεται σε κάθε καθήκον στο πρώτο στάδιο επανάληψης. (Εάν το στοιχείο *i* στο διάνυσμα U είναι 1.6, τότε θα έχει γίνει συνολικά 60% αναθεώρησης στο καθήκον *i* στα επόμενα στάδια.). Μια βασισμένη στο χρόνο ερμηνεία του πίνακα A, παρουσιάζεται στο (βλ. παράρτημα 4.3).

4.2.2.2 Αποσύνθεση Ιδιοτιμών

Εάν ο A έχει γραμμικά ανεξάρτητα ιδιοδιανύσματα (ο πίνακας ιδιοδιανυσμάτων S είναι αντιστρέψιμος) τότε μπορεί να αποσυντεθεί ο A σε:

$$A = S\Lambda S^{-1}$$

όπου Λ είναι ένας διαγώνιος πίνακας των ιδιοτιμών του A, και S είναι ο αντίστοιχος πίνακας ιδιοδιανυσμάτων. (Για να είναι ο S να είναι αντιστρέψιμος είναι αρκετό, αλλά όχι απαραίτητο, καμία από τις ιδιοτιμές να μην επαναλαμβάνεται.) Οι δυνάμεις του A μπορούν να βρεθούν από:

$$A^t = S\Lambda^t S^{-1}$$

Το συνολικό διάνυσμα εργασίας U μπορεί επομένως να εκφραστεί ως εξής:

$$U = S\left(\sum_{t=0}^{M} \Lambda^t\right) S^{-1} u_0$$

Εάν το μέγεθος της μέγιστης ιδιοτιμής είναι μικρότερο από ένα, τότε η διαδικασία σχεδιασμού θα συγκλίνει (δηλαδή όσο αυξάνει το M στο άπειρο το συνολικό διάνυσμα εργασίας U περιορίζεται). Μια ιδιοτιμή μεγαλύτερη από ένα αντιστοιχεί σε μια διαδικασία σχεδιασμού στην οποία η εκτέλεση μιας μονάδας εργασίας σε κάποιο καθήκον κατά τη διάρκεια ενός σταδίου επανάληψης θα δημιουργήσει περισσότερες από μια μονάδες εργασίας για εκείνο το καθήκον σε ένα μελλοντικό στάδιο. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ασταθές και το διάνυσμα U δεν θα συγκλίνει, αντί αυτού θα αυξάνεται χωρίς όριο όσο το M θα αυξάνεται. (Είναι αρκετή, αλλά όχι απαραίτητη, συνθήκη για σταθερότητα ότι οι καταχωρήσεις είτε σε κάθε σειρά είτε σε κάθε στήλη του πίνακα A να αθροίζουν σε λιγότερο από σε ένα.).

Εάν πάρουμε όριο το M να τείνει στο άπειρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

$$\lim_{M\to\infty} \sum_{t=0}^{M} \Lambda^t = (I - \Lambda)^{-1}$$

έτσι

$$U = S(I - \Lambda)^{-1} S^{-1} u_0$$

Μια διαδικασία σχεδιασμού που δεν συγκλίνει θα ήταν μια διαδικασία όπου δεν υπάρχει καμία τεχνικά εφικτή λύση για τις δεδομένες προδιαγραφές, ή μια όπου οι σχεδιαστές δεν είναι πρόθυμοι να συμβιβαστούν για να φθάσουν σε μια λύση. Αυτή η

κατάσταση δεν είναι πιθανό να εμφανιστεί σε περιβάλλοντα σχεδιασμού παράλληλης μηχανικής όπου η συνεργασία ενθαρρύνεται, ή σε συνήθεις διαδικασίες σχεδιασμού όπου μια ομάδα είναι υπεύθυνη να βγάλει σε κυκλοφορία μια νέα παραλλαγή ενός υπάρχοντος προϊόντος. Εάν μια διαδικασία σχεδιασμού δεν συγκλίνει, ίσως πρέπει να εγκαταλειφθεί το πρόγραμμα, ή να γίνει προσαρμογή των προδιαγραφών και αναδόμηση του προβλήματος έτσι ώστε η διαδικασία να γίνει σταθερή.

Ένα άλλο θέμα του μοντέλου πίνακα μετασχηματισμού εργασίας αφορά το πρόβλημα εύρεσης τεχνικής λύσης σε πεπερασμένο χρόνο (δηλαδή όλες οι ιδιοτιμές είναι μικρότερες από ένα). Εάν η μέγιστη ιδιοτιμή δεν είναι πολύ κοντά στο ένα, τότε το όριο προσεγγίζεται σε σχετικά λίγες επαναλήψεις.

4.2.2.3 Ερμηνεία της Eigenstructure

Οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα A καθορίζουν το ποσοστό και τη φύση σύγκλισης της διαδικασίας σχεδιασμού. Με την εξέταση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων μπορούν να ληφθούν πολλές πληροφορίες για το τι ελέγχει την επανάληψη, σε αντιδιαστολή με την εξέταση της ακολουθίας των διανυσμάτων εργασίας.

Χρησιμοποιείται ο όρος *κόμβοι σχεδιασμού* που αναφέρεται σε μια ομάδα καθηκόντων σχεδιασμού που είναι στενά συνδεδεμένα έτσι ώστε η εργασία σε οποιοσδήποτε από αυτά δημιουργεί σημαντική εργασία, άμεσα ή έμμεσα, για κάθε ένα από τα άλλα καθήκοντα μέσα στον κόμβο. Χρησιμοποιούνται οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα A για να προσδιοριστούν οι κόμβοι σχεδιασμού.

Το μέγεθος κάθε ιδιοτιμής του A προσδιορίζει το γεωμετρικό ποσοστό σύγκλισης ενός από τους n κόμβους σχεδιασμού (Strang 1980). Το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί σε κάθε ιδιοτιμή χαρακτηρίζει τη σχετική συμβολή κάθε ενός από τα διάφορα καθήκοντα στο κύριο τμήμα της εργασίας που συγκλίνει, ως ομάδα, στο δεδομένο ποσοστό.

Η ερμηνεία των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων για τα προβλήματα σχεδιασμού είναι παρόμοια με την eigenstructure ανάλυση που χρησιμοποιείται για να εξεταστεί η δυναμική κίνηση ενός φυσικού συστήματος. Στην διακριτού χρόνου περιγραφή των γραμμικών δυναμικών συστημάτων, κάθε ιδιοτιμή αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό σύγκλισης ενός από τους κόμβους του συστήματος (μια φυσική συχνότητα που καθορίζει την αποσύνθεση ή την ταλάντωση του κόμβου). Τα ιδιοδιανύσματα

προσδιορίζουν τις μορφές του κόμβου της φυσικής κίνησης, προσδιορίζοντας την ποσότητα συμμετοχής κάθε μιας από τις σταθερές μεταβλητές σε κάθε κόμβου (Ogata 1967). Η χρήση της eigenstructure ανάλυσης προκειμένου να παρατηρηθεί η αρχική συμπεριφορά ενός σύνθετου συστήματος, χρησιμοποιείται επίσης σε πολλούς άλλους τομείς. Μερικά παραδείγματα είναι από τους τομείς της βοτανικής (Weber και Campbell 1989), της γεωλογίας (Tromp 1993), της ιατρικής (Throne και Olson 1994), της χημείας (Procyk et al. 1992), της χρηματοοικονομικής (Brown 1989) και της βιολογίας (Tirion και ben Avraham 1993).

Με βάση τον καθορισμό του πίνακα μετασχηματισμού εργασίας ξέρουμε ότι ο πίνακας θα είναι συνδεδεμένος και μη αρνητικός. Από το θεώρημα Perron-Frobenius (βλ. παράρτημα 4.4) (ένα θεμελιώδες αποτέλεσμα της θεωρίας πινάκων) ξέρουμε ότι η μεγαλύτερου μεγέθους ιδιοτιμή ενός συνδεμένου μη αρνητικού πίνακα θα είναι πραγματική και θετική (Marcus και Mino 1964). Επίσης, το ιδιοδιάνυσμα που συνδέεται με αυτή την ιδιοτιμή θα έχει θετικά στοιχεία.

Ο πιο αργός κόμβος σχεδιασμού (η μεγαλύτερη ιδιοτιμή) επομένως θα έχει ένα ιδιοδιάνυσμα που είναι αυστηρά θετικό. Επίσης από το θεώρημα Perron-Frobenius, υπάρχει μόνο ένα ιδιοδιάνυσμα που είναι αυστηρά θετικό. Πρέπει επομένως να είμαστε σε θέση να ερμηνεύουμε τους αρνητικούς και σύνθετους αριθμούς στα ιδιοδιανύσματα καθώς επίσης και τις αρνητικές και σύνθετες ιδιοτιμές.

Υπενθυμίζοντας ότι το συνολικό διάνυσμα εργασίας U υπολογίζεται από

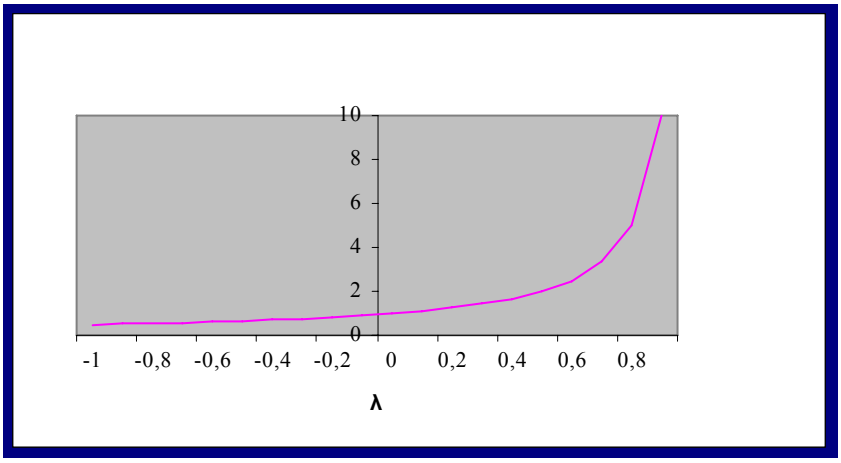
$$U = S(I - \Lambda)^{-1} S^{-1} u_0$$

εξετάζεται ο παραπάνω τύπος του U για να δούμε πώς οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα A μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ερμηνεύσουν τους κόμβους σχεδιασμού.

4.2.3 Ιδιοτιμές

Ο όρος $(I-\Lambda)^{-1}$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας βαρών όπου κάθε καταχώρηση κατά μήκος της διαγώνιου αντιστοιχεί σε μια από τις ιδιοτιμές και έχει τύπο $1/(1-\lambda)$ όπου λ είναι μια ιδιοτιμή. Η συνάρτηση $1/(1-\lambda)$ αυξάνεται αυστηρά στο (-1, 1). Μια γραφική παράσταση αυτής της συνάρτησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Η ερμηνεία αυτής της συνάρτησης δείχνει ότι οι κόμβοι με μεγαλύτερες θετικές ιδιοτιμές έχουν μεγαλύτερη συμβολή στη συνολική εργασία από τους κόμβους με μικρότερες και

αρνητικές ιδιοτιμές. Επομένως, δεδομένου ότι εξετάζουμε ποιοι είναι οι σημαντικότεροι κόμβοι σχεδιασμού, περιοριζόμαστε μεταξύ πραγματικών ιδιοτιμών στις μεγαλύτερες θετικές ιδιοτιμές.



Σχήμα 4 3: Γράφημα Μεγέθους 1/(1-λ) συναρτήσει του λ **για Πραγματικές Ιδιοτιμές**

Για σύνθετες ιδιοτιμές, επιθυμείτε επίσης η εύρεση του μεγέθους του όρου 1/(1-λ). Για μια σύνθετη ιδιοτιμή λ= $\alpha + \beta$i, έχουμε:

$$\left|\frac{1}{1-(\alpha+\beta i)}\right| = \frac{1}{\sqrt{(1-\alpha)^2+\beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-2\alpha+\alpha^2+\beta^2}}$$

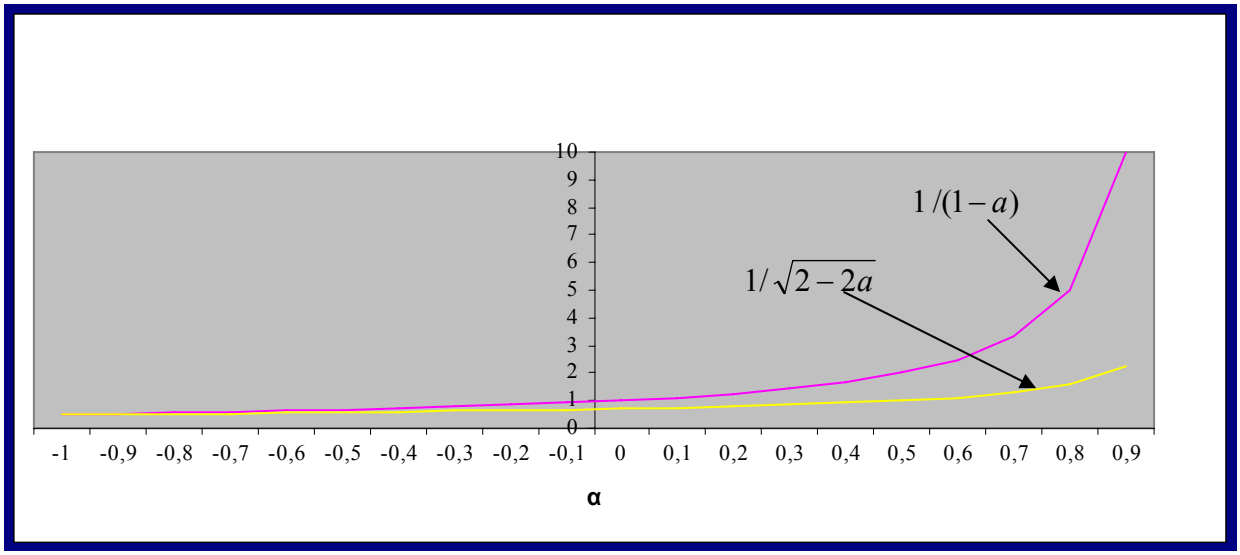
Βρίσκεται ένα ανώτερο όριο χρησιμοποιώντας το γεγονός $\beta \neq 0$:

$$\left|\frac{1}{1-(\alpha+\beta i)}\right| < \frac{1}{1-a}$$

Επίσης, μπορούμε να βρούμε έναν κατώτερο όριο χρησιμοποιώντας το γεγονός $\alpha^2+\beta^2<1$:

$$\left|\frac{1}{1-(\alpha+\beta i)}\right| > \frac{1}{\sqrt{2-2\alpha}}$$

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του ανώτερου και κατώτερου ορίου.



Σχήμα 4 4: Γράφημα Ορίων Μεγέθους του Όρου 1/(1-λ) συναρτήσει του *α* για Σύνθετες Ιδιοτιμές

Βλέπουμε ότι το πραγματικό μέρος των σύνθετων ιδιοτιμών δίνει όρια στο μέγεθος του 1/(1-λ) όρου που αντιστοιχεί σε εκείνη την ιδιοτιμή. Επίσης βλέπουμε ότι οι σύνθετες ιδιοτιμές με αρνητικό πραγματικό μέρος δεν πρόκειται να συμβάλουν σημαντικά στο σύνολο, και επομένως μπορούν να αγνοηθούν. Επομένως χρειάζεται να εξεταστούν μόνο εκείνες οι ιδιοτιμές που έχουν ένα σχετικά μεγάλο θετικό πραγματικό μέρος, είτε είναι πραγματικές ή σύνθετες.

Οι θετικές πραγματικές ιδιοτιμές αντιστοιχούν σε μη ταλαντωτικούς κόμβους σχεδιασμού. Αρνητικές και σύνθετες ιδιοτιμές περιγράφουν μειωμένες ταλαντώσεις. Οι ταλαντωτικοί κόμβοι σχεδιασμού δείχνουν ότι η εργασία δεν μειώνεται για όλα τα καθήκοντα στον κόμβο στο ίδιο ποσοστό, αλλά ότι η εργασία μετατοπίζεται από καθήκον σε καθήκον κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επανάληψης. Το μέγεθος μεταβλητότητας στο ποσό εργασίας μεταξύ των ξεχωριστών διανυσμάτων εργασίας δεν είναι τόσο σημαντικό όσο το συνολικό μέγεθος της εργασίας που ολοκληρώνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή εξετάζονται οι συνολικές πληροφορίες, έτσι η μεμονωμένη μεταβλητότητα είναι λιγότερο σημαντική.

4.2.4 Ιδιοδιανύσματα

Αναλύεται η ερμηνεία της σχετικής σπουδαιότητας κάθε καθήκοντος σε ένα ιδιοδιάνυσμα, δεδομένου ότι είναι γνωστή η ιδιοτιμή που αντιστοιχεί σε εκείνο τον κόμβο σχεδιασμού. Οι τελικοί δύο όροι στον τύπο της συνολικής εργασίας είναι

$S^{-1}u_0$. Αυτοί οι όροι συνδυάζονται σε ένα διάνυσμα, τα στοιχεία του οποίου ορίζουν (μαζί με τον όρο $(I-\Lambda)^{-1}$) άλλο ένα βάρος για κάθε ιδιοδιάνυσμα. Αυτό το βάρος είναι και μέγεθος και κατεύθυνση.

Δεδομένου ότι οι σειρές του S^{-1} που αντιστοιχούν σε πραγματικές ιδιοτιμές είναι πραγματικές, κάθε βάρος για ένα πραγματικό ιδιοδιάνυσμα είναι επίσης πραγματικό. Επομένως, η κατεύθυνσή του είναι είτε θετική είτε αρνητική. Οι σημαντικές ποσότητες σε ένα πραγματικό ιδιοδιάνυσμα είναι επομένως οι μεγάλες θετικές τιμές εάν το βάρος είναι θετικό, και οι μεγάλες αρνητικές τιμές εάν το βάρος είναι αρνητικό.

Οι σύνθετες ιδιοτιμές έχουν σύνθετα ιδιοδιανύσματα και σύνθετα βάρη. Είναι δύσκολο να καθοριστεί η αλληλεπίδραση της κατεύθυνσης του βάρους και της κατεύθυνσης του ιδιοδιανύσματος. Ένας τρόπος να εξεταστεί η αλληλεπίδραση είναι να υπολογιστεί η συμβολή του κόμβου στο συνολικό διάνυσμα εργασίας U και να διαπιστωθεί ποια καθήκοντα συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη συνολική εργασία.

Μπορεί να υπολογιστεί η συμμετοχή του *i*th κόμβου σχεδιασμού με το διάνυσμα

$$S_{\bullet i}\frac{1}{1-\lambda_i}\sum_{j=1}^{n}S_{ij}^{-1}$$

όπου $S_{\bullet i}$ είναι η *i*th στήλη του S. (u_0 είναι ένα διάνυσμα μονάδων). Αυτό το διάνυσμα δείχνει τη συμβολή εργασίας από τον *i*th κόμβο σχεδιασμού στο συνολικό διάνυσμα εργασίας U. Στην πράξη αυτός είναι πιο δύσκολος τρόπος ανάλυσης των κόμβων εξαιτίας της πιθανότητας ο S να είναι κακοδομημένος, όμως αυτό το διάνυσμα είναι χρήσιμο στην ανάλυση σύνθετων ιδιοδιανυσμάτων όταν η ιδιοτιμή έχει μεγάλο θετικό πραγματικό μέρος.

4.2.5 Ταξινόμηση των Κόμβων

Είναι δυνατό να ταξινομηθούν οι κόμβοι χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από παρακάτω τρία μέτρα. Το πρώτο χρησιμοποιεί το μέγεθος των όρων $(I-\Lambda)^{-1}$. Το δεύτερο χρησιμοποιεί τους όρους $(I-\Lambda)^{-1}S^{-1}u_0$. Το τρίτο εξετάζει πόσο συμμετέχει πραγματικά ο κάθε κόμβος στο συνολικό διάνυσμα εργασίας U, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Σε γενικές γραμμές, και οι τρεις αυτές μέθοδοι μπορούν να καθορίσουν την σχετική σημασία κάθε κόμβος σχεδιασμού και κάθε καθήκοντος σχεδιασμού μέσα στους κόμβους σχεδιασμού. Στην πράξη, ακόμα και όταν ο S είναι

αντιστρέψιμος μπορεί να είναι λάθος δομημένος. Η λάθος δομημένη κατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες ερμηνείες των κόμβων που δεν έχουν σημαντική συνεισφορά στο συνολικό διάνυσμα εργασίας U. Για αυτόν τον λόγο προτείνεται η ταξινόμηση των κόμβων σχεδιασμού χρησιμοποιώντας τους όρους 1/(1-Re(λ)) (η πρώτη μέθοδος).

4.2.6 Ένα Αριθμητικό Παράδειγμα

Θεωρούμε τον ακόλουθο 4x4 πίνακα μετασχηματισμού εργασίας. Είναι μια ποσοτική έκδοση του συνδεμένου τμήματος (καθήκοντα **C–F**) του πίνακα σχεδιασμού φωτογραφικής μηχανής του Σχήματος 3.4 του προηγούμενου κεφαλαίου. Το συνδεδεμένο τμήμα φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Τα καθήκοντα σε αυτό τον πίνακα είναι σε σειρά: Design Shutter Mechanism, Design Viewfinder, Design Camera Body, and Design Film Mechanism. Οι αριθμοί ερμηνεύονται ως εξής: εάν το διάφραγμα ξανασχεδιαστεί πλήρως, τότε το 30% της εργασίας επανασχεδιασμού του φακού εστίασης πρέπει να ξαναγίνει (η σειρά 2, στήλη 1 είναι 0.3), και ούτω καθ' εξής:

	C	**D**	**E**	**F**
C Design Shutter Mechanism	X	X	X	X
D Design Viewfinder	X	X	X	X
E Design Camera Body	X	X	X	X
F Design Film Mechanism	X	X	X	X

Σχήμα 4 5: Συνδεδεμένο τμήμα

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 \\ 0.3 & 0 & 0.4 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0 & 0.5 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

Οι πίνακες ιδιοτιμών (Λ) και ιδιοδιανυσμάτων (S) είναι:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0.674 & & & \\ & -0.392 & & \\ & & -0.141+0.060i & \\ & & & -0.141-0.060i \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.410 & -0.067 & 0.657 & 0.657 \\ 0.624 & -0.613 & 0.060-0.570i & 0.060+0.570i \\ 0.580 & 0.758 & -0.395+0.073i & -0.395-0.073i \\ 0.326 & -0.213 & -0.065+0.274i & -0.065-0.274i \end{bmatrix}$$

Τα τέσσερα ιδιοδιανύσματα είναι οι στήλες στον S, και οι σχετικές ιδιοτιμές είναι τα διαγώνια στοιχεία του Λ. Τα ιδιοδιανύσματα (αυθαίρετα) επιμηκύνονται στη μονάδα. Εξετάζοντας τα ιδιοδιανύσματα, παίρνουμε την πληροφορία ότι ο πιο αργής σύγκλισης κόμβος σχεδιασμού (αυτός με τη μεγαλύτερου μεγέθους ιδιοτιμή) περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τα μεσαία δύο καθήκοντα. Υπολογίζοντας τα πρώτα διανύσματα εργασίας, βλέπουμε ότι υποστηρίζουν την παραπάνω ερμηνεία.

$$u_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad u_1 = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.9 \\ 0.9 \\ 0.4 \end{bmatrix}, \quad u_2 = \begin{bmatrix} 0.39 \\ 0.62 \\ 0.53 \\ 0.33 \end{bmatrix}, \quad u_3 = \begin{bmatrix} 0.267 \\ 0.395 \\ 0.390 \\ 0.207 \end{bmatrix}, \quad u_4 = \begin{bmatrix} 0.180 \\ 0.278 \\ 0.249 \\ 0.144 \end{bmatrix}$$

Η εργασία που γίνεται στο πρώτο και το τελευταίο καθήκον είναι λιγότερη από την εργασία για τα μεσαία δύο καθήκοντα κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων επανάληψης. Βλέπουμε ότι το ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής με την πιο αργή σύγκλιση επιβάλλει τη μορφή σύγκλισης των διανυσμάτων εργασίας. Είναι επίσης αλήθεια ότι η σχετική ιδιοτιμή επηρεάζει το γεωμετρικό ποσοστό σύγκλισης.

Μπορούμε να καταλάβουμε ακόμη περισσότερα υπολογίζοντας το συνολικό πόσο εργασίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επανάληψης και με την εξέταση των ενδιάμεσων υπολογισμών. Η εξέταση του όρου $(I-\Lambda)^{-1}$ δείχνει ότι ένα θετικό ιδιοδιάνυσμα συνεισφέρει σημαντικά περισσότερη εργασία στη διαδικασία από ότι οι αρνητικοί και σύνθετοι κόμβοι:

$$(I-\Lambda)^{-1} = \begin{bmatrix} 3.065 & & & \\ & 0.718 & & \\ & & 0.874+0.046i & \\ & & & 0.874-0.046i \end{bmatrix}$$

Το συνολικό βάρος στον πίνακα ιδιοδιανυσμάτων καθορίζει πώς ο κάθε κόμβος συμβάλλει στη συνολική εργασία:

$$(I-\Lambda)^{-1}S^{-1}u_0 = \begin{bmatrix} 6.513 \\ -0.223 \\ 0.093-0.399i \\ 0.093+0.399i \end{bmatrix}$$

Να σημειωθεί ότι το βάρος του πρώτου ιδιοδιανύσματος είναι σημαντικά μεγαλύτερο σε μέγεθος από τα άλλα βάρη. Το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας σε αυτήν την διαδικασία επανάληψης περιγράφεται από αυτόν τον αρχικό κόμβο σχεδιασμού.

Υπολογισμός του συνολικού διανύσματος εργασίας:

$$U = S(I-\Lambda)^{-1}S^{-1}u_0 = \begin{bmatrix} 2.807 \\ 3.755 \\ 3.595 \\ 2.375 \end{bmatrix}$$

Περισσότερη εργασία ολοκληρώνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας από τα δύο μεσαία καθήκοντα, όπως αποδεικνύεται από την προκαταρκτική εξέταση των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων.

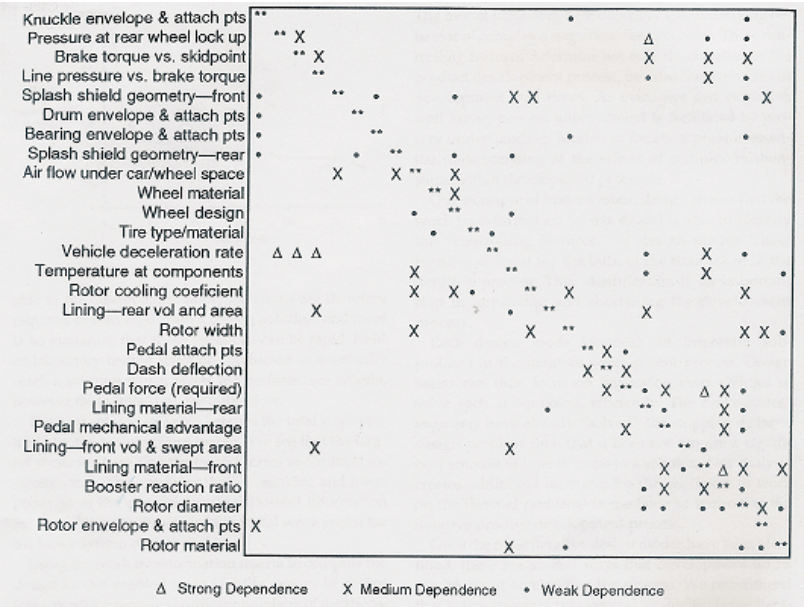
4.2.7 Εφαρμογή στο Σχεδιασμό Συστήματος Φρένων

Προκειμένου να ελεγχθεί η χρησιμότητα της τεχνικής του πίνακα μετασχηματισμού εργασίας, αναλύεται μια πραγματική διαδικασία σχεδιασμού. Σε μια παλαιότερη μελέτη είχε δημιουργηθεί ένας πίνακας δομής σχεδιασμού για το σύστημα φρένων (Black 1990). Η μέθοδος του πίνακα μετασχηματισμού εργασίας εφαρμόστηκε στο επαναληπτικό τμήμα της διαδικασίας σχεδιασμού του συστήματος φρένων. Πριν την ανάλυση του θέματος έγινε κάποια έρευνα η οποία περιελάμβανε άτυπες συζητήσεις με μηχανικούς συστημάτων και συνεντεύξεις με τους μηχανικούς και τους διευθυντές τους. Το σύστημα φρένων είναι μια καλή περίπτωση προς ανάλυση λόγω της φύσης του προβλήματος σχεδιασμού. Το σύστημα σχεδίασης φρένων είναι σταθερό δεδομένου ότι η τεχνολογία και η αγορά είναι ώριμες και ο τύπος του βασικού προϊόντος δεν υποβάλλεται σε ριζικές αλλαγές. Οι μηχανικοί σχεδίασης συστημάτων φρένων έχουν ειδική εμπειρία πάνω στο θέμα και λόγω αυτών των παραγόντων τα δεδομένα που περιλαμβάνονται μέσα στον DSM του συστήματος φρένων δεν αλλάζουν γρήγορα.

Τα βήματα πρέπει να ακολουθηθούν στην κατασκευή του πίνακα μετασχηματισμού εργασίας. Πρέπει πρώτα να καθοριστούν όλα τα διάφορα βήματα ή καθήκοντα στη

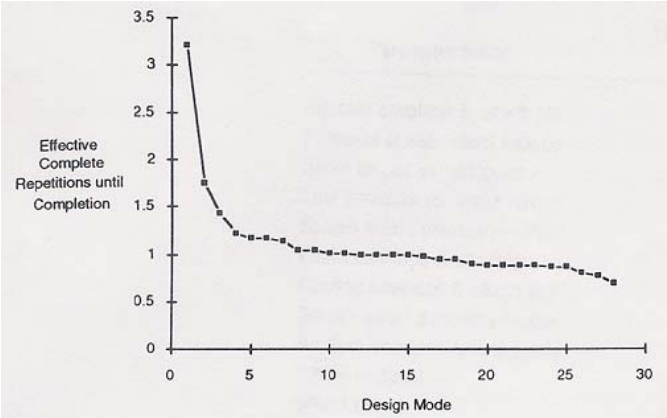
διαδικασία σχεδιασμού. Δεύτερον, πρέπει να καθοριστούν όλες τις ροές πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων καθηκόντων. Τρίτον, πρέπει να καθοριστεί η σχετική σπουδαιότητα κάθε ροής πληροφορίας. Τέταρτον, πρέπει να υπολογιστεί ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί κάθε καθήκον. Το μοντέλο συστήματος φρένων περιλαμβάνει δεδομένα από τα τρία πρώτα βήματα, αλλά δεν περιλαμβάνει σαφή χρονικά δεδομένα. Μπορούν να γίνουν πολλές από τις παρατηρήσεις για τα χαρακτηριστικά ελέγχου της διαδικασίας σχεδιασμού, χωρίς να είναι διαθέσιμα χρονικά δεδομένα. Μπορεί να προσδιοριστεί ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων του κάθε καθήκοντος. Στο κέντρο του DSM πίνακα που δημιουργήθηκε υπήρχε ένα τμήμα σύνθετων, συνδεδεμένων παραμέτρων σχεδιασμού πίνακα.

Ο πελάτης θέλει ένα αυτοκίνητο με ήρεμα, ομαλά φρένα που δεν απαιτούν συχνά service. Για τους μηχανικούς σχεδιασμού αυτό σημαίνει ότι το σύστημα φρένων πρέπει να έχει ελάχιστα ή καθόλου έντονο θόρυβο ή παλμό και ότι τα linings πρέπει να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Τα προβλήματα αυτά είναι γνωστά ως θόρυβος, παλμός και φθορά. Αυτά τα τρία προβλήματα επιλέγονται από του μηχανικούς ως τα «χαρακτηριστικά ελέγχου» των προβλημάτων επανάληψης σχεδιασμού/ δοκιμής/ επανασχεδιασμού. Χρησιμοποιείται ο WTM για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ελέγχου. Αντί για αριθμητικές τιμές στον WTM για το σύστημα φρένων, τα μεμονωμένα κελιά υπολογίστηκαν να είναι αδύναμης, μέτριας και ισχυρής (Σχήμα 4.6). Κάθε τιμή εκτός της διαγωνίου είναι μια εκτίμηση του ποσού εργασίας (ως ποσοστού του χρόνου που χρειάστηκε για τον καθορισμό της παραμέτρου κατά τη διάρκεια της αρχικής επανάληψης) που το upstream καθήκον δημιουργεί στο downstream. Οι μηχανικοί κλήθηκαν να περιγράψουν γιατί κάθε κομμάτι πληροφορίας ήταν απαραίτητο και να δώσουν τη σχετική σπουδαιότητα του καθενός από τα κομμάτια των πληροφοριών εισόδου. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν αριθμητικές τιμές στις εξαρτήσεις που περιγράφηκαν από τους μηχανικούς. Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 0.5, 0.25 και 0.05 για τις ισχυρή, μέτρια και αδύναμη εξάρτηση, αντίστοιχα.



Σχήμα 4 6: Συνδεδεμένο Τμήμα με Εξαρτήσεις

Η εμπειρία έχει δείξει ότι ασήμαντες αλλαγές στις τιμές δεν επηρεάζουν τον προσδιορισμό των κόμβων σχεδιασμού. Οι κόμβοι σχεδιασμού που υπερέχουν στην διαδικασία αντιπροσωπεύονται από τα ιδιοδιανύσματα του WTM που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες ιδιοτιμές. Το Σχήμα 4.7. παρουσιάζει την τιμή της ποσότητας $\frac{1}{1-\mathrm{Re}(\lambda)}$ για κάθε ιδιοτιμή λ. Αυτή η τιμή είναι ένα ανώτερο όριο του μεγέθους του αποτελεσματικού αριθμού των φορών που ο κάθε κόμβος σχεδιασμού θα επαναληφθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επανάληψης.



Σχήμα 4 7: Ιδιοτιμές του Συστήματος Φρένων

Ο πίνακας 1 δείχνει τις τιμές των παραμέτρων στα δύο πρώτα ιδιοδιανύσματα και το συνολικό διάνυσμα εργασίας U. (Παρουσιάζονται μόνο οι δύο πρώτοι κόμβοι σχεδιασμού επειδή είναι επαρκείς για να χαρακτηρίσουν τις μεγαλύτερου μεγέθους παραμέτρους στο συνολικό διάνυσμα εργασίας).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΡΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	1ος ΚΟΜΒΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	2ος ΚΟΜΒΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΑΝΥΣΜΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
Knuckle envelope & attach pts	0.0106	0.0616	1.2764
Pressure at rear wheel lock up	**0.1916**	-0.0290	**3.3924**
Brake torque vs. skidpoint	**0.2271**	0.0090	**3.8290**
Line pressure vs. brake torque	0.1275	0.0094	2.3748
Splash shield geometry - front	0.0875	**0.4519**	**3.2229**
Drum envelope & attach pts	0.0008	0.0070	1.0638
Bearing envelope & attach pts	0.0113	0.0686	1.3402
Splash shield geometry - rear	0.0120	0.0374	1.3300
Air flow under car/wheel space	0.0407	**0.3102**	2.4563
Wheel material	0.0048	0.0330	1.3181
Wheel design	0.0132	0.0582	1.2722
Tire type/material	0.0381	0.0034	1.4245
Vehicle decelaration rate	**0.5225**	-0.0030	**7.1728**
Temperature at components	0.1415	**0.2032**	**2.9880**
Rotor cooling coefficient	0.0751	**0.5172**	**3.3854**
Lining - rear vol and area	0.0970	0.0088	2.2920
Rotor width	0.0739	**0.5216**	3.4214
Pedal attach pts	0.1167	-0.0850	2.0459
Dash deflection	**0.2229**	-0.1240	**2.9961**
Pedal force (required)	**0.4998**	-0.1330	**5.9383**
Lining material - rear	0.1126	-0.0350	2.1957
Pedal mechanical advantage	0.2669	-0.1000	3.3959
Lining - front vol & swept area	0.1201	0.1226	2.5726
Lining material - front	**0.3158**	0.0190	**4.6385**
Booster reaction ratio	**0.2241**	-0.0470	**3.2237**
Rotor diameter	0.0723	0.0219	2.1069
Rotor envelope & attach pts	0.0038	0.0349	1.3191
Rotor material	0.0620	**0.1807**	2.0894

Ο πρώτος κόμβος σχεδιασμού αρχικά αποτελείται από τα Vehicle Deceleration Rate και Pedal Force Required, με μικρότερη συμμετοχή από τα pressure at Rear Wheel Lockup, Brake Torque vs. Skid point, Dash Deflection, Pedal Mechanical Advantage, Front Lining Material και Booster Reaction Ratio. Αυτός ο κόμβος σχεδιασμού προσδιορίζει την ομάδα των παραμέτρων σχεδιασμού που απαιτούν το μέγιστο ποσό εργασίας πριν από τη σύγκλιση στον τελικό αποδεκτό σχεδιασμό. Ερμηνεύεται αυτός ο κόμβος ως «stopping distance problem». Η λύση αυτού του προβλήματος βεβαιώνει ότι το σύστημα φρένων θα σταματήσει το αυτοκίνητο χωρίς να δημιουργηθεί ανεξέλεγκτη ολίσθηση. Αναπτύχθηκε μια προσομοίωση της απόδοσης για αυτό το πρόβλημα και είναι μια καλή πρόβλεψη της πραγματικής απόδοσης. Αυτές οι επαναλήψεις επομένως μπορούν να εμφανιστούν γρήγορα. Η χρήση της προσομοίωσης επιταχύνει αυτές τις επαναλήψεις έτσι ώστε ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων στον πρώτο κόμβο σχεδιασμού δεν επηρεάζει πλέον έντονα το συνολικό χρόνο της διαδικασίας ανάπτυξης. Το πρόβλημα απόδοσης του σταματήματος stopping) είναι το θεμελιώδες χαρακτηριστικό που έχει επιπτώσεις στην επανάληψη σχεδιασμού.

Ο δεύτερος κόμβος σχεδιασμού αποτελείται αρχικά από τα Splash Shield Geometry, Airflow under Car/Wheel Space, Rotor Cooling Coefficient, και Rotor Width, με συμμετοχή από τα Temperature at Components και Rotor Material. Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι τεχνικές παράμετροι που αντιστοιχούν στην υπερθέρμανση και ψύξη του συστήματος φρένων. Ερμηνεύεται αυτός ο δεύτερος κόμβος σχεδιασμού ως «thermal problem» σχετικό με τα προβλήματα ήχου, θορύβου, φθοράς. Για αυτά τα προβλήματα υπάρχουν λίγα εργαλεία προσομοίωσης διαθέσιμα στην ομάδα σχεδιασμού. Πολλές επαναλήψεις απαιτούνται επομένως για να συγκλίνουν στη λύση σχεδιασμού και δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι αυτές οι επαναλήψεις μπορεί να είναι γρήγορες. Οι εργαστηριακές δοκιμές πρέπει να διεξαχθούν για να επιτευχθεί τελικά μια λύση η οποία ικανοποιεί τα κριτήρια απόδοσης, ωστόσο αυτές οι επαναλήψεις είναι αρκετά αργές.

Η τελική στήλη του πίνακα 1 δείχνει το συνολικό διάνυσμα εργασίας U για τον πίνακα συστήματος φρένων. Βλέπουμε ότι οι μεγαλύτεροι όροι του U είναι επίσης οι μεγαλύτεροι όροι των δύο πρώτων ιδιοδιανυσμάτων. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η ταξινόμησης και η ερμηνεία των ιδιοδιανυσμάτων δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για

τον προσδιορισμό της δομής του συνολικού διανύσματος εργασίας για το πρόβλημα σχεδιασμού συστήματος φρένων.

Η χρήση του WTM για τον υπολογισμό των κόμβων σχεδιασμού επιτρέπει τον προσδιορισμό των ομάδων των χαρακτηριστικών σχεδιασμού που απαιτούν σημαντικούς αριθμούς επαναλήψεων. Η ανάλυση που έγινε για το σχεδιασμό συστήματος φρένων ήταν σε θέση να προσδιορίσει τα δύο κυρίαρχα χαρακτηριστικά ελέγχου (stopping distance και thermal problem).

4.2.8 Συμπεράσματα

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε περιγράφει την βασική συμπεριφορά των σύνθετων διαδικασιών επανάληψης σχεδιασμού. Αυτά τα χαρακτηριστικά έλέγχου καθορίζουν όχι μόνο τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος αλλά και τις διακυμάνσεις των χρόνων ανάπτυξης. Η βελτίωση της διαδικασίας διευκολύνεται από την κατανόηση της διαδικασίας. Τα μοντέλα της επανάληψης παρέχουν ουσιαστική κατανόηση των αποτελεσμάτων των σύνθετων σχέσεων στις διαδικασίες ανάπτυξης.

Το παράδειγμα σχεδιασμού του συστήματος φρένων δείχνει ότι το μοντέλο του WTM είναι σε θέση να προσδιορίσει τα «χαρακτηριστικά ελέγχου» ή τους κόμβους σχεδιασμού. Αυτός ο προσδιορισμός είναι ένα σημαντικό βήμα στη βελτίωση και τον περιορισμό της διαδικασίας ανάπτυξης.

Κάθε κόμβος σχεδιασμού προσδιορίζει ένα σημαντικό υποπρόβλημα στην επαναληπτική διαδικασία ανάπτυξης. Οι ομάδες σχεδιασμού μπορούν έπειτα να εστιάσουν στην επίλυση κάθε υποπροβλήματος αποτελεσματικά. Μόλις προσδιοριστούν οι περισσότερο επαναληπτικοί κόμβοι σχεδιασμού, υπάρχουν διάφοροι τρόποι που οι ομάδες ανάπτυξης μπορούν να επιταχύνουν την διαδικασία. Συστήνεται στις ομάδες να εξετάσουν δύο γενικές στρατηγικές: γρηγορότερες επαναλήψεις ή λιγότερες επαναλήψεις.

Οι γρηγορότερες επαναλήψεις μπορούν να επιτευχθούν με διάφορους τρόπους. Αυτό θα μπορούσε να γίνει συμπεριλαμβάνοντας τα εξής:

- CAD συστήματα που επιταχύνουν μερικά από τα μεμονωμένα καθήκοντα σχεδιασμού.
- Εργαλεία όπως τεχνικές προσομοίωσης οι οποίες θα μείωναν την ανάγκη για χρονοβόρα πρωτότυπα/ κύκλους ζωής.

- Πληροφοριακά συστήματα που περιλαμβάνουν βάσεις δεδομένων και λογισμικό δικτύων που διευκολύνουν την γρήγορη ανταλλαγή τεχνικών πληροφοριών μεταξύ της ομάδας σχεδιασμού.
- Απομάκρυνση άσχετων δραστηριοτήτων από την επαναληπτική διαδικασία.

Λιγότερες επαναλήψεις θα μπορούσαν να επιτευχθούν από:

- Βελτιωμένο συντονισμό των ατόμων που υπάρχει εξάρτηση των εργασιών τους.
- Ίδια θέση των μελών ομάδων που είναι αρμόδια για τις στενά συνδεδεμένες δραστηριότητες, αυτό επιτρέπει τις γρηγορότερες και συχνότερες ανταλλαγές πληροφοριών και τις γρηγορότερες αποφάσεις για αντικρουόμενα ζητήματα.
- Ελαχιστοποίηση του μεγέθους ομάδας, το οποίο επιτρέπει σε ένα μικρό σύνολο ατόμων να λειτουργήσει αποτελεσματικότερα.
- Κατάλληλος προσδιορισμός των ανταλλαγών, επιτρέποντας την μειωμένη ανάγκη για αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων της ομάδας στη διαδικασία ανάπτυξης.

Οι βελτιώσεις που δημιουργούν γρήγορες επαναλήψεις αρχικά περιλαμβάνουν μείωση του χρόνου για κάθε καθήκον ή αλλαγή του πίνακα W. Οι βελτιώσεις για την επίτευξη λιγότερων επαναλήψεων περιλαμβάνουν αρχικά την αλλαγή των ποσοτήτων επανάληψης ή την αλλαγή του πίνακα W. Για να εφαρμοστεί οποιαδήποτε μέθοδος είναι χρήσιμο να είναι γνωστό ποια κομμάτια της διαδικασίας είναι πιο στενά συνδεδεμένα).

Υπάρχει μια σημαντική κατηγορία προβλημάτων που είναι καλά κατανοητά και οι μηχανικοί και οι διευθυντές που είναι σχετικοί μπορούν να προσδιορίσουν τις εξαρτήσεις καθηκόντων και πληροφοριών (πληροφορίες απαραίτητες για την κατασκευή του πίνακα), χωρίς να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά έλέγχου του συνολικού προβλήματος. Το θέμα είναι αν είναι δυνατόν να παραχθούν τα απαραίτητα δεδομένα του πίνακα για ένα πρόβλημα με του οποίου την οργάνωση σχεδιασμού υπάρχει μικρότερη εξοικείωση. Η εφαρμογή του μοντέλου σε ένα ασυνήθιστο πρόβλημα θα παρείχε νέα γνώση, επιτρέποντας τον προσδιορισμό σημαντικών ζητημάτων πριν την έναρξη της διαδικασίας σχεδιασμού.

Η μέθοδος WTM είναι ένα αιτιοκρατικό μοντέλο. Σε πραγματικές καταστάσεις δεν είναι προβλέψιμες όλες οι πλευρές της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος. Μια γενικευμένη άποψη του μοντέλου θα μπορούσε να αναπτυχθεί που να περιλαμβάνει στοχαστικούς παράγοντες. Επίσης η τυχαιότητα σε διάφορες διαστάσεις θα μπορούσε να εισαχθεί στο μοντέλο, όπως σε υπάρχει σε άλλα μοντέλα, όπως η διάρκεια καθήκοντος, δείκτες αναθεώρησης, καθυστερήσεις αναμονής, πιθανότητα αποτυχίας προγράμματος και άλλοι παράγοντες.

Ο WTM είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση των συνδεδεμένων προβλημάτων σχεδιασμού. Αυτή η μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε βελτιώσεις της διαδικασίας σχεδιασμού, επικεντρώνοντας την προσοχή στους κόμβους επανάληψης σχεδιασμού που έχουν αργή σύγκλιση. Τέλος ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών ελέγχου παρέχει ένα σημαντικό κομμάτι πληροφοριών, που επιτρέπει σε μια ομάδα σχεδιασμού να διαθέσει καλύτερα τους πόρους προκειμένου να ελαττωθεί ο χρόνος ανάπτυξης.

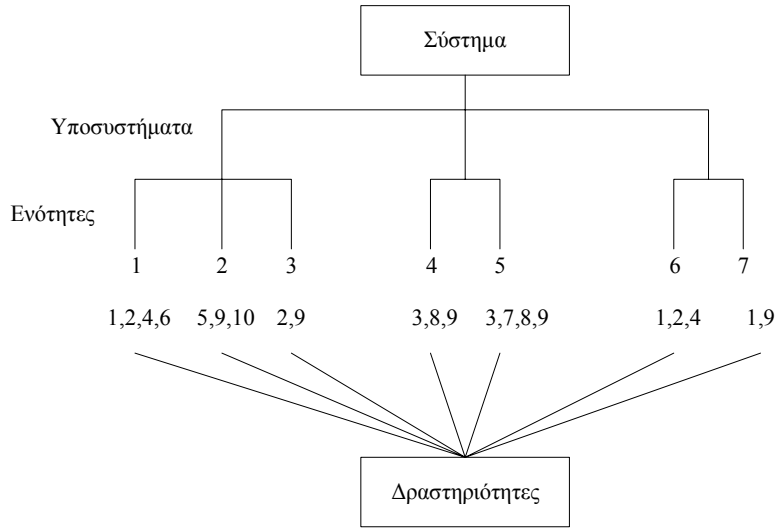
4.3 Αποσύνθεση και σχεδιασμός των δραστηριοτήτων σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός σύνθετων προϊόντων ή συστημάτων μεγάλης κλίμακας περιλαμβάνει εκατοντάδες πόρων (σχεδιαστές, αναλυτές, υπολογιστές, συστήματα λογισμικού, και διαδικασίες) και χιλιάδες δραστηριότητες σχεδιασμού. Στη συνέχεια παρουσιάζεται, μια μεθοδολογία για την αποσύνθεση των καθηκόντων σχεδιασμού σε δραστηριότητες και ενότητες. Η μεθοδολογία βασίζεται στην ομαδοποίηση των δραστηριοτήτων σχεδιασμού σε ομάδες που επιτρέπουν την αποτελεσματική οργάνωση των πόρων που απαιτούνται στη διαδικασία σχεδιασμού. Μια βασισμένη στη γνώση προσέγγιση χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των δραστηριοτήτων σχεδιασμού.

4.3.1 Αποσύνθεση συστημάτων

Ένα προϊόν ή σύστημα μπορεί να αποσυντεθεί σε υποσυστήματα και αυτά στη συνέχεια σε ενότητες. Ο σχεδιασμός κάθε ενότητας περιλαμβάνει ένα σύνολο δραστηριοτήτων σχεδιασμού. Παρόμοιες ή ίδιες δραστηριότητες μπορούν να εκτελεσθούν στο σχεδιασμό των διαφορετικών ενοτήτων.

Για την καλύτερη κατανόηση αυτής της έννοιας, θεωρείται το υποθετικό σύστημα του Σχήματος 4.8. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τρία υποσυστήματα, επτά ενότητες, και δέκα δραστηριότητες. Σε αυτό το παράδειγμα, η δραστηριότητα 2 περιλαμβάνεται στο σχεδιασμό των ενοτήτων 1, 3, και 6.



Σχήμα 4 8: Ιεραρχική Δομή ενός Συστήματος

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ενοτήτων και δραστηριοτήτων του Σχήματος 4.8 μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα πίνακα συνάντησης ενότητας – δραστηριότητας $[\alpha_{ij}]$ (βλ. παράρτημα 4.5) , πίνακας (1):

$$[\alpha_{ij}] = \begin{array}{c} \\ \text{Module} \end{array} \begin{array}{c} \text{Activity} \\ \begin{array}{cc} & \begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & & 1 & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & & 1 & 1 \\ & 1 & & & & & & & 1 & \\ & & 1 & & & & & 1 & 1 & \\ & & 1 & & & & 1 & 1 & 1 & \\ 1 & 1 & & 1 & & & & & & \\ 1 & & & & & & & & 1 & \end{bmatrix} \end{array} \end{array} \quad \textbf{(1)}$$

όπου

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{εάν η δραστηριότητα } j \text{ εμπλέκεται στο σχεδιασμό της ενότητας } i \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Ο πίνακας (1) είναι μη δομημένος, το οποίο σημαίνει ότι δεν έχει κάποιες ειδικές ιδιότητες από την άποψη της σύμπτωσης των δραστηριοτήτων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού. Το πρόβλημα ομαδοποίησης που πρέπει να λυθεί είναι να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των αμοιβαία ευδιαχώριστων ομάδων στον πίνακα συνάντησης ενότητας – δραστηριότητας, που υπόκεινται στους περιορισμούς, π.χ., περιορισμένο μέγεθος μερικών ή όλων των ομάδων και συνυπολογισμό των συγκεκριμένων δραστηριοτήτων σε μερικές ομάδες. Ο μετασχηματισμός του μη δομημένου πίνακα $[\alpha_{ij}]$ σε ένα δομημένο (ενδεχομένως διαγώνιο) πίνακα είναι ένα υπολογιστικά σύνθετο πρόβλημα.

Για την επίλυση του προβλήματος του πίνακα (1) χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ομαδοποίησης των Kusiak και Chow (1987).

4.3.1.1 Αλγόριθμος Προσδιορισμού Ομάδων

Ο αλγόριθμος προσδιορισμού (CI) ομάδων αποσυνθέτει ένα δυαδικό πίνακα συνάντησης, όπου αμοιβαία ευδιαχώριστες ομάδες υπάρχουν στον πίνακα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του αλγορίθμου CI είναι η αποδοτικότητα και η απλότητά του.

Αλγόριθμος CI (Kusiak and Chow 1987)

<u>Βήμα 0.</u> Καθορισμός αριθμού επανάληψης k = 1.

<u>Βήμα 1.</u> Επιλέξτε τη i σειρά του πίνακα συνάντησης $[a_{ij}]^{(k)}$ και τραβήξτε μια οριζόντια γραμμή h_i κατά μήκος αυτής της σειράς ($[a_{ij}]^{(k)}$: ονομάζεται πίνακας $[a_{ij}]$ στην επανάληψη k).

<u>Βήμα 2.</u> Για κάθε καταχώρηση * κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής h_i τραβήξτε μια κάθετη γραμμή v_j .

<u>Βήμα 3.</u> Για κάθε καταχώρηση * που τέμνεται μια φορά από την κάθετη γραμμή v_j τραβήξτε μια οριζόντια γραμμή h_k.

<u>Βήμα 4.</u> Επαναλάβετε τα βήματα 2 και 3 έως ότου να μην υπάρχουν καταχωρήσεις * που να τέμνονται μια φορά (crossed-once) στον $[a_{ij}]^{(k)}$. Όλες οι καταχωρήσεις * που τέμνονται δύο φορές στον $[a_{ij}]^{(k)}$ σχηματίζουν την ομάδα γραμμής (row cluster) RC-k και την ομάδα στήλης (column cluster) CC-k .

<u>Βήμα 5.</u> Μετασχηματίστε τον πίνακα συνάντησης $[a_{ij}]^{(k)}$ σε $[a_{ij}]^{(k+1)}$ μετακινώντας τις στήλες και τις γραμμές που αντιστοιχούν στις οριζόντιες και κάθετες γραμμές που σχεδιάστηκαν στα βήματα 1 έως 4.

<u>Βήμα 6.</u> Εάν ο πίνακας $[a_{ij}]^{(k+1)} = 0$ (όπου 0 δηλώνει ένα πίνακα με όλα τα στοιχεία του κενά), σταματάει η διαδικασία; Αλλιώς ορίζουμε k = k + 1 και πηγαίνουμε στο βήμα 1.

Δύο παραδείγματα εφαρμογής του αλγόριθμου παρουσιάζονται στο παράρτημα 4.6 και 4.7.

Η εφαρμογή του αλγόριθμου ομαδοποίησης στον πίνακα (1), οδηγεί στον πίνακα (2).

$$
\begin{array}{cc}
 & \text{Activity} \\
 & \begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 4 & 6 & 3 & 8 & 5 & 10 & 7 & 9 \end{array} \\
\text{Module} \begin{array}{c} 1 \\ 3 \\ 6 \\ 7 \\ 4 \\ 2 \\ 5 \end{array} &
\left[\begin{array}{cccccccccc}
1 & 1 & 1 & 1 & & & & & & \\
 & 1 & & & & & & & & 1 \\
1 & 1 & 1 & & & & & & & \\
1 & & & & & & & & & 1 \\
 & & & & 1 & 1 & & & & 1 \\
 & & & & & & 1 & 1 & & 1 \\
 & & & & 1 & 1 & & & 1 & 1
\end{array}\right]
\end{array}
\qquad \textbf{(2)}
$$

Δύο ομάδες ενοτήτων GM-1 ={1,3,6,7}, GM-2 ={4,2,5}, και δύο ομάδες δραστηριοτήτων GA-1 ={1,2,4,6}, GA-2 ={3,8,5,10,7} υπάρχουν στον πίνακα (2). Υπάρχει επικάλυψη της δραστηριότητας (9) με τις δύο ενότητες που δημιουργούνται. Μια άλλη λύση που παράγεται από τον αλγόριθμο ανάλυσης ομάδων παρουσιάζεται στον πίνακα (3).

$$
\begin{array}{cc}
 & \text{Activity} \\
 & \begin{array}{cccccccccc} 3 & 7 & 8 & 2 & 4 & 6 & 5 & 10 & 9 & 1 \end{array} \\
\text{Module} & \begin{array}{c} 4 \\ 5 \\ 1 \\ 6 \\ 3 \\ 2 \\ 7 \end{array}
\begin{bmatrix}
1 & & & 1 & & & & & 1 & \\
1 & & & 1 & & & & & 1 & \\
1 & 1 & & 1 & & & & & & \\
 & & & & 1 & 1 & 1 & & & 1 \\
 & & & & 1 & 1 & & & & 1 \\
 & & & & 1 & & & & 1 & \\
 & & & & & & & 1 & 1 \; 1 & \\
 & & & & & & & & 1 & 1
\end{bmatrix}
\end{array}
\qquad \textbf{(3)}
$$

Τρεις ομάδες ενοτήτων GM-1 ={4,5}, GM-2 ={1,6,3}, GM-3 ={2} και τρεις ομάδες δραστηριοτήτων GA-1 ={3,7,8}, GA-2 ={2,4,6}, GA-3 ={5,10} υπάρχουν στον πίνακα (3). Υπάρχει επικάλυψη των δραστηριοτήτων 9 και 1 με τις τρεις ομάδες ενοτήτων. Η εισαγωγή πρόσθετων πόρων για την εκτέλεση των δύο δραστηριοτήτων επιτρέπει την αποσύνθεση του πίνακα (3) σε τρεις αμοιβαία ευδιαχώριστους υπό-πίνακες που παρουσιάζονται στον (4).

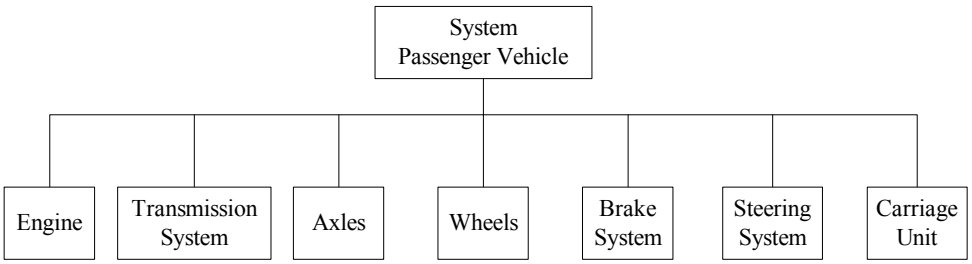
$$
\begin{array}{cc}
 & \text{Activity} \\
 & \begin{array}{ccccccccccccc} 3 & 7 & 8 & 9' & 2 & 4 & 6 & 1' & 9'' & 5 & 10 & 9''' & 1'' \end{array} \\
\text{Module} & \begin{array}{c} 4 \\ 5 \\ 1 \\ 6 \\ 3 \\ 2 \\ 7 \end{array}
\begin{bmatrix}
1 & & 1 & 1 & & & & & & & & & \\
1 & 1 & 1 & 1 & & & & & & & & & \\
 & & & & 1 & 1 & 1 & 1 & & & & & \\
 & & & & 1 & 1 & & 1 & & & & & \\
 & & & & 1 & & & & 1 & & & & \\
 & & & & & & & & & 1 & 1 & 1 & \\
 & & & & & & & & & & & 1 & 1
\end{bmatrix}
\end{array}
\qquad \textbf{(4)}
$$

Όπως φαίνεται στον πίνακα (4), η δραστηριότητα 9 έχει γίνει τρία κομμάτια (δραστηριότητες 9΄, 9΄΄, και 9΄΄΄) ενώ η δραστηριότητα 1 δύο (δραστηριότητα 1΄ και 1΄΄).

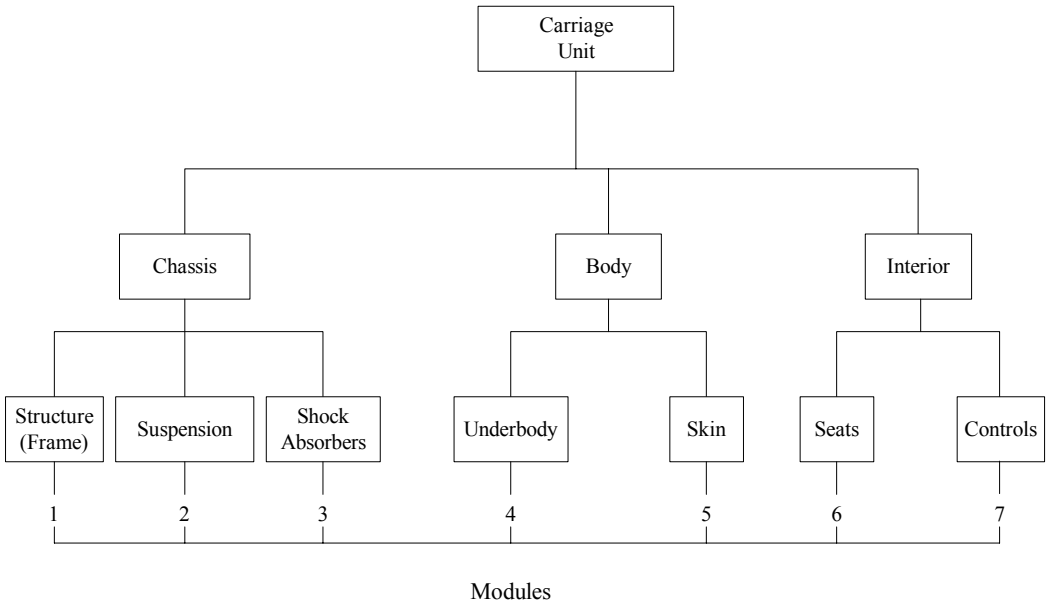
4.3.1.2 Καθορισμός ενοτήτων

Για τον καθορισμό των ενοτήτων, θεωρούμε ένα παράδειγμα ενός μηχανικού οχήματος (σύστημα) που μπορεί να αποσυντεθεί σε υποσυστήματα όπως φαίνεται

στο Σχήμα 4.9. Κάθε υποσύστημα μπορεί να αποσυντεθεί περαιτέρω σε καινούργια υποσυστήματα και ενότητες. Για παράδειγμα, η μονάδα μεταφοράς μπορεί να αποσυντεθεί όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4 9: Μηχανικό Όχημα και Υποσυστήματά του



Σχήμα 4 10: Μονάδα Μεταφοράς και Αποσύνθεσή της και Υποσυστήματα και Ενότητες

4.3.1.3 Καθορισμός των δραστηριοτήτων σχεδιασμού

Στο συνολικό επίπεδο, οι δραστηριότητες και οι διαδικασίες σχεδιασμού που περιλαμβάνονται στη διαδικασία σχεδιασμού μηχανικού οχήματος (Σχήμα 4.9) μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Ανάλυση αξιοπιστίας – προσδιορισμός του μεγέθους και της μορφής των εξαρτημάτων του οχήματος, διαδικασίες δοκιμής, ανάλυση δομής.
- Λειτουργική ανάλυση – άνεση επιβατών, είσοδος και έξοδος επιβατών, ανάλυση ταχύτητας ταξιδιού, ανάλυση ακουστικής και κραδασμών.
- Αισθητική – ανάλυση μορφής και αρμονίας.

- Οικονομική ανάλυση – ανάλυση βάρους, αποδοτικότητα καυσίμων, ανάλυση επιθεώρησης και συντήρησης, ανάλυση δαπανών επισκευής.
- Ανάλυση συναρμολόγησης – επιθεώρηση σε χρήση, ανάλυση συντήρησης και επισκευής, βαρυμετρική ανάλυση.
- Ασφάλεια – ανάλυση σταθερότητας, εργονομική ανάλυση, ανάλυση φωτισμού, επιτάχυνση και ανάλυση ικανότητας φρεναρίσματος, και εκτίμηση κρατικών και βιομηχανικών προτύπων.
- Ανάλυση οδικών παραγόντων – κατανομή βάρους και ανάλυση διαστάσεων, κλίση δρόμου, επιφάνεια, και ανάλυση κυρτότητας.
- Ανάλυση ατυχήματος – ανάλυση σύγκρουσης, ανάλυση ζημιών, ανάλυση αποφυγής ατυχήματος και τραυματισμών.

Φυσικά, κάθε μια από τις προηγούμενες συνολικές δραστηριότητες μπορεί να αποσυντεθεί σε έναν μεγάλο αριθμό λεπτομερών δραστηριοτήτων.

4.3.1.4 Απεικόνιση των δραστηριοτήτων σχεδιασμού

Μια χαρακτηριστική αναπαράσταση των δραστηριοτήτων είναι ένα δίκτυο «δραστηριότητες σε κόμβους» (AON – Activity On Nodes). Το δίκτυο περιέχει δύο εικονικές δραστηριότητες έναρξης και λήξης, κάθε μια με χρόνο επεξεργασίας ίσο με 0. Στην AON αναπαράσταση, οι ομαδοποιημένες δραστηριότητες μπορούν να αντιμετωπισθούν ως ανάλυση ενός αρχικού δικτύου σε διάφορα υποδίκτυα. Κάθε υποδίκτυο έχει συνδεδεμένους κόμβους και τόξα. Τα τόξα που συνδέουν δύο διαφορετικές δραστηριότητες που ανήκουν σε διαφορετικά υποδίκτυα καθορίζουν τις σχέσεις μεταξύ των υποδικτύων.

4.3.1.5 Πλεονεκτήματα της αποσύνθεσης των δραστηριοτήτων σχεδιασμού

Η ομαδοποίηση των δραστηριοτήτων που περιλαμβάνεται στη διαδικασία σχεδιασμού επιτρέπει τον καθορισμό μιας πιθανής ομάδας δραστηριοτήτων που μπορούν να προγραμματιστούν ταυτόχρονα. Ο βαθμός στον οποίο οι δραστηριότητες μπορούν να προγραμματιστούν ταυτόχρονα εξαρτάται από την ποιότητα των ομάδων και τη φύση των περιορισμών προτεραιότητας. Δεδομένου ότι οι ομάδες δραστηριοτήτων στον πίνακα (4) είναι αμοιβαία αποκλειόμενες, ελλείψει περιορισμών προτεραιότητας, οι δραστηριότητες σχεδιασμού που ανήκουν σε αυτές

τις ομάδες θα μπορούσαν να προγραμματιστούν παράλληλα. Οι λεπτομέρειες προγραμματισμού των δραστηριοτήτων σχεδιασμού παρουσιάζονται παρακάτω.

Η ομαδοποίηση των δραστηριοτήτων απλοποιεί τη διαδικασία παραγωγής περιορισμών προτεραιότητας μεταξύ των δραστηριοτήτων και της διάρκειας των δραστηριοτήτων. Δεδομένου ότι για μια δεδομένη ομάδα ο αριθμός δραστηριοτήτων που εξετάζονται από τους ειδικούς σχεδιαστές και αναλυτές είναι σχετικά μικρός, η ποιότητα των δεδομένων που παράγονται βελτιώνεται επίσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα της ομαδοποίησης των δραστηριοτήτων είναι απλοποίηση του προγραμματισμού και της διαχείρισης προγράμματος. Οι δραστηριότητες μέσα σε κάθε ομάδα και η αλληλεπίδρασή τους με τις δραστηριότητες που ανήκουν σε άλλες ομάδες καθορίζονται σαφώς.

Η εφαρμογή της έννοιας αποσύνθεσης στο πρόβλημα σχεδιασμού του πίνακα (1) οδηγεί στα εξής:

1. Χωρισμός του γενικού καθήκοντος σχεδιασμού σε ομάδες ενοτήτων και δραστηριοτήτων.
2. Οι ομάδες ενοτήτων δεν είναι απαραίτητο να αντιστοιχούν στις παραδοσιακές οργανωτικές δομές, για παράδειγμα ομάδα σχεδιασμού κύριου τμήματος του οχήματος, ομάδα σχεδιασμού μεταφοράς, κ.λπ.
3. Εντοπισμός των πιθανών δραστηριοτήτων που μπορούν να εκτελεσθούν ταυτόχρονα.
4. Μείωση της πολυπλοκότητας της διαχείρισης καθήκοντος σχεδιασμού.
5. Μείωση του κύκλου σχεδιασμού.
6. Μείωση του υπολογιστικού χρόνου που συνδέεται με τον προγραμματισμό των δραστηριοτήτων σχεδιασμού. Ο προγραμματισμός ενός αριθμού υποδικτύων με ένα μικρό αριθμό δραστηριοτήτων είναι ευκολότερος από τον προγραμματισμό ολόκληρου του δικτύου.

4.3.2 Βασισμένο στη γνώση σύστημα

Η προσέγγιση που αναλύθηκε παραπάνω επιτρέπει την αποσύνθεση ενός προγράμματος σχεδιασμού σε ομάδες δραστηριοτήτων. Για τον προγραμματισμό και τη διαχείριση των δραστηριοτήτων σχεδιασμού, υιοθετείται μια βασισμένη στη γνώση προσέγγιση. Ένα έμπειρο σύστημα χτίζεται βασισμένο στο πλαίσιο της

αποσύνθεσης ενός προγράμματος μεγάλης κλίμακας. Οι δύο βασικές λειτουργίες του συστήματος είναι ο προγραμματισμός και η ανάλυση δικτύου.

Προκειμένου να αναλυθεί το δίκτυο προγραμματισμού, το σύστημα χρησιμοποιεί ένα σύνολο κανόνων παραγωγής.

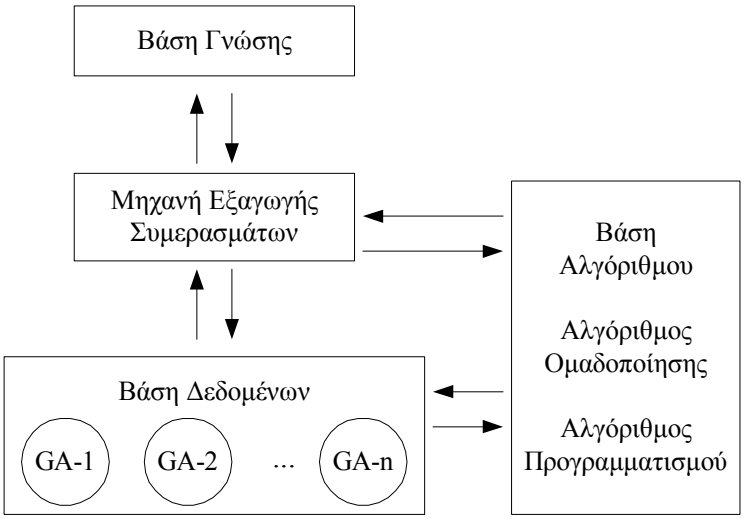
4.3.2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος

Το έμπειρο σύστημα που προτείνεται αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη (Σχήμα 4.11):

- βάση γνώσης
- βάση δεδομένων
- βάση αλγορίθμου
- μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων

Οι βασικές λειτουργίες της μηχανής συμπεράσματος είναι οι ακόλουθες:

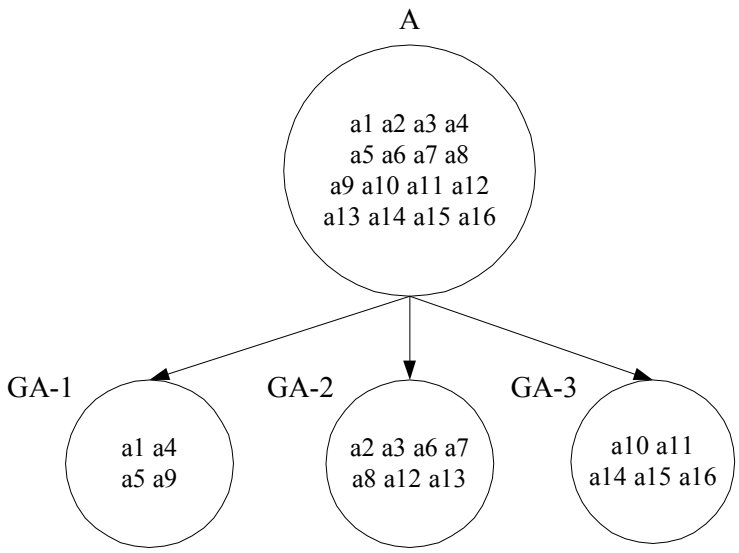
1. Ελέγχει τη ροή του ολόκληρου του προγράμματος.
2. Βοηθά τις ομάδες δραστηριοτήτων να επικοινωνούν μεταξύ τους.
3. Παρέχει τοπική διαχείριση με γενικές πληροφορίες, για παράδειγμα η πρόοδος των δραστηριοτήτων μέσα σε κάθε ομάδα.
4. Λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την κατανομή των πόρων και την γενική ισορροπία της συνολικής απόδοσης.



Σχήμα 4 11: Αρχιτεκτονική Συστήματος Βασισμένη στη Γνώση

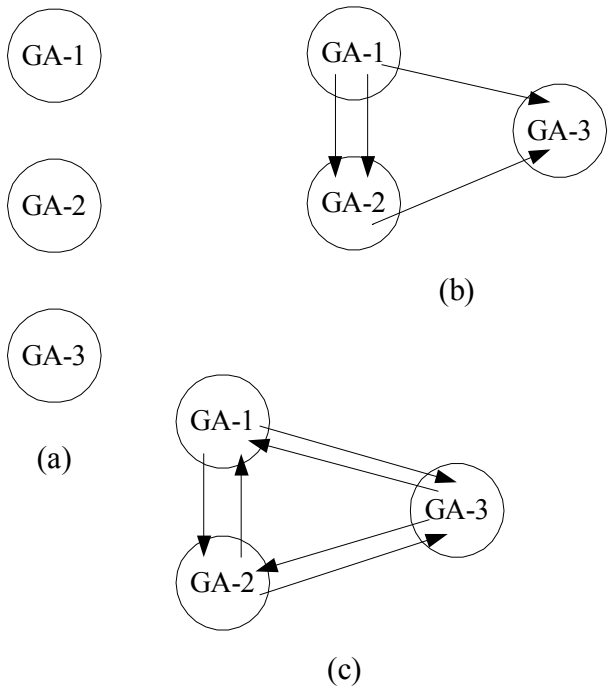
4.3.2.2 Ανάλυση δικτύου

Τύπος αποσύνθεσης δικτύου. Προκειμένου να συζητηθεί η ανάλυση που μπορεί να εκτελεσθεί στο δίκτυο δραστηριοτήτων, θεωρείται ένα δίκτυο που περιλαμβάνει 16 δραστηριότητες. Υποθέτουμε ότι οι δραστηριότητες σχεδιασμού έχουν συγκεντρωθεί σε τρεις ομάδες δραστηριοτήτων, GA-1 = {a1, a4, a5, a9}, GA-2 ={a2, a6, a7, a8, a12, a13}, και GA-3 ={a10, a11, a14, a15, a16} (Σχήμα 4.12). Ως αποτέλεσμα της ομαδοποίησης των δραστηριοτήτων, μπορούν να προσδιοριστούν τρεις διαφορετικοί τύποι αποσύνθεσης δικτύου:



Σχήμα 4 12: Ομαδοποίηση Δραστηριοτήτων σε ένα Πρόγραμμα

1. Ιδανική αποσύνθεση: το αρχικό δίκτυο αποσυντίθεται σε εντελώς ανεξάρτητα υποδίκτυα.
2. Μέτρια αποσύνθεση: το αρχικό δίκτυο αποσυντίθεται σε υποδίκτυα με μέτρια σχέση μεταξύ τους (δηλ. σχετικά χαμηλός αριθμός διαομαδικών συνδέσεων).
3. Περίπλοκη αποσύνθεση: το αρχικό δίκτυο αποσυντίθεται σε υποδίκτυα με ισχυρή σχέση μεταξύ τους (δηλ. ένας μεγάλος αριθμός διαομαδικών συνδέσεων).



Σχήμα 4 13: Τρεις Τύποι Αποσύνθεσης Δικτύου: (a) Ιδανική Αποσύνθεση, (b) Μέτρια Αποσύνθεση, (c) Περίπλοκη Αποσύνθεση

Το Σχήμα 4.13 παρουσιάζει τους τρεις τύπους αποσυνθέσεων δικτύων. Προκειμένου να καθοριστεί ο τύπος αποσύνθεσης δικτύου, χρησιμοποιούνται οι κανόνες παραγωγής. Τρεις κανόνες παραγωγής παρουσιάζονται:

Κανόνας 1

ΕΑΝ δεν υπάρχει καμία σύνδεση μεταξύ οποιουδήποτε ζευγαριού ομάδων

ΤΟΤΕ η αποσύνθεση είναι ιδανική

Κανόνας 2

ΕΑΝ ο αριθμός συνδέσεων μεταξύ των ομάδων GA-*i* και GA-*j* είναι μεγαλύτερος από μηδέν και μικρότερος από την τιμή κατώφλι *t*

ΤΟΤΕ η αποσύνθεση είναι μέτρια

Κανόνας 3

ΕΑΝ ο αριθμός συνδέσεων μεταξύ των ομάδων GA-*i* και GA-*j* είναι μεγαλύτερος ή ίσος με την τιμή κατώφλι *t*

ΤΟΤΕ η αποσύνθεση είναι περίπλοκη

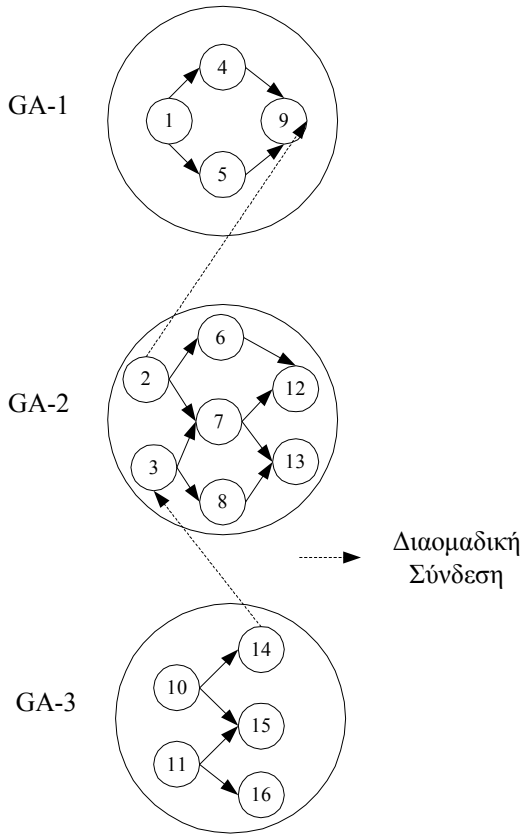
Η τιμή κατώφλι *t* είναι μια συνάρτηση του μεγέθους ομάδας που μετριέται με τον αριθμό δραστηριοτήτων. Το knowledge-based σύστημα θέτει μια προκαθορισμένη τιμή για το *t* που μπορεί να τροποποιηθεί από τον αναλυτή.

Ανάλυση περιορισμών προτεραιότητας μεταξύ των ομάδων δραστηριοτήτων. Για την ιδανική αποσύνθεση ενός δικτύου, κάθε ομάδα είναι απολύτως ανεξάρτητη και δεν απαιτείται καμία ανάλυση της σχέσης μεταξύ των ομάδων. Σε περίπτωση μέτριας και περίπλοκης αποσύνθεσης, απαιτείται η ανάλυση της σχέσης μεταξύ των ομάδων. Δύο τύποι διαομαδικών σχέσεων προσδιορίζονται:

- ασήμαντη σχέση: η αλληλεπίδραση μεταξύ των ομάδων είναι αδύναμη (ασήμαντη σύνδεση)
- επιβλαβής σχέση: η αλληλεπίδραση μεταξύ των ομάδων είναι ισχυρή (επιβλαβής σύνδεση)

Οι δύο διαομαδικές σχέσεις αναλύονται στη συνέχεια.

Υποθέτουμε ότι κάθε μια από τις τρεις ομάδες δραστηριοτήτων, GA-1, GA-2, GA-3, στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζει τη δομή προτεραιότητας του Σχήματος 4.14. Υπάρχουν δύο διαομαδικές συνδέσεις με τις διακεκομμένες γραμμές στο Σχήμα. Η σύνδεση r1 (a2→a9) είναι μια ασήμαντη σχέση επειδή είναι απίθανο η καθυστέρηση της a2 να έχει επιπτώσεις στην εκτέλεση της a9. Η σύνδεση r2 (a14→a3) είναι μια επιβλαβής σχέση επειδή η καθυστέρηση της a14 έχει επίδραση στην a3 και όλες τις διαδοχικές της a7, a8, a12, και a13 της.



Σχήμα 4 14: Τρεις Ομάδες Δραστηριοτήτων GA-1, GA-2, GA-3 και Διαομαδικές Σχέσεις

Οι κανόνες παραγωγής που επιτρέπουν τον καθορισμό του τύπου της διαομαδικής σχέσης είναι οι ακόλουθοι:

Κανόνας 4

ΕΑΝ υπάρχει μια σύνδεση από τη δραστηριότητα k της ομάδας GA-i στη δραστηριότητα l της ομάδας GA-j

ΚΑΙ ο τοπικός χρόνος λήξης της k είναι μεγαλύτερος από τον τοπικό χρόνο έναρξης της l

ΤΟΤΕ η σχέση είναι επιβλαβής

Κανόνας 5

ΕΑΝ υπάρχει μια σύνδεση από τη δραστηριότητα k της ομάδας GA-i στη δραστηριότητα l της ομάδας GA-j

ΚΑΙ ο τοπικός χρόνος λήξης της k είναι μικρότερος ή ίσος με τον τοπικό χρόνο έναρξη της l

ΤΟΤΕ η σχέση είναι ασήμαντη

Το knowledge-based σύστημα παρέχει πληροφορίες σχετικά με ολόκληρο το δίκτυο προγράμματος, δηλαδή:

1. Ο προγραμματισμός που παράγεται από τον αλγόριθμο σχεδιασμού (νωρίτερος χρόνος έναρξης, αργότερος χρόνος έναρξης, νωρίτερος χρόνος λήξης, και χρόνος υστέρησης).
2. Η κατάσταση κάθε δραστηριότητας (έναρξη ή λήξη ή υπό εξέλιξη).
3. Η κανονικότητα κάθε δραστηριότητας (εάν μια δραστηριότητα είναι εντός προγράμματος).
4. Η διαθεσιμότητα των πόρων και η χρήση τους σε μια συγκεκριμένη στιγμή.

Η διαομαδική σχέση καθορίζει τις επικοινωνίες μεταξύ των ομάδων. Για παράδειγμα, η ομάδα δραστηριοτήτων GA-1 πρέπει να επικοινωνεί με την GA-2 για να ελέγχει εάν η δραστηριότητα a2 έχει ολοκληρωθεί προτού να εκτελεσθεί η δραστηριότητα a9. Η ομάδα δραστηριοτήτων GA-2 πρέπει να επικοινωνεί με την GA-3 για να ελέγχει εάν η δραστηριότητα a14 έχει ολοκληρωθεί προκειμένου να εκτελεσθεί η δραστηριότητα a3. Εντούτοις, οι GA-1 και GA-3 δεν είναι απαραίτητο να επικοινωνούν η μια με την άλλη.

Από την ανάλυση των σχέσεων μεταξύ των ομάδων, ταξινομούνται με βάση την επίπτωσή τους στην απόδοση προγραμματισμού. Επίσης, μέσα στην ομάδα, οι δραστηριότητες ταξινομούνται στην ίδια βάση.

Από την άποψη της έντασης των περιορισμών προτεραιότητας, συμπεριλαμβανομένων των διαομαδικών συνδέσεων, δύο τύποι περιορισμών προτεραιότητας μπορούν να προσδιοριστούν:

- ισχυρός περιορισμός: ο περιορισμός προτεραιότητας που πρέπει να εκτελεστεί

- αδύνατος περιορισμός: ο περιορισμός προτεραιότητας που μπορεί να εξαλειφθεί

Στην ανάλυση της διαομαδικής σχέσης, ο τύπος περιορισμών προτεραιότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Προκειμένου να εκτελεσθούν ταυτόχρονα οι ομάδες δραστηριοτήτων, οι διαομαδικές συνδέσεις πρέπει να αποδυναμωθούν. Το τελευταίο πρέπει να εφαρμοστεί ειδικά για τις επιβλαβείς συνδέσεις.

Στη διαδικασία σχεδιασμού, ένας ισχυρός περιορισμός, k→l, πρέπει να ικανοποιηθεί. Ο μόνος τρόπος να «αποδυναμωθεί» ο ισχυρός περιορισμός είναι να επιταχυνθεί η εκτέλεση της δραστηριότητας k με τη διάθεση περισσότερων πόρων για την εκτέλεση αυτής της δραστηριότητας. Οι κανόνες παραγωγής που εξετάζουν αυτές τις πλευρές διατυπώνονται ως εξής:

Κανόνας 6

ΕΑΝ ο περιορισμός προτεραιότητας k→l είναι ισχυρός

ΚΑΙ η σύνδεση είναι επιβλαβής

ΤΟΤΕ μείωση της διάρκειας της δραστηριότητας k

Κανόνας 7

ΕΑΝ η στρατηγική είναι να μειωθεί η διάρκεια της δραστηριότητας k

ΚΑΙ η μη χρησιμοποιούμενη ποσότητα του πόρου r που μπορεί να διατεθεί στη δραστηριότητα k είναι ur

ΤΟΤΕ εκτέλεση της συνάρτησης «μείωση (k, r, ur)»

Στον κανόνα παραγωγής 7, η συνάρτηση «μείωση (k, r, ur)» υπολογίζει τη μείωση της διάρκειας της δραστηριότητας k λόγω της δέσμευσης ποσότητας ur του πόρου r για να εκτελεστεί η δραστηριότητα k.

Ένας αδύναμος περιορισμός είναι ένας περιορισμός προτεραιότητας που μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς. Εάν μια διαομαδική σύνδεση που συνδέει δύο ομάδες είναι αδύναμος περιορισμός, τότε θα ήταν δυνατή η παράλληλη εκτέλεση δύο ομάδων. Ο κανόνας παραγωγής που αναπαριστά αυτό είναι ο εξής:

Κανόνας 8

ΕΑΝ ο περιορισμός k→l προτεραιότητας είναι αδύναμος

ΚΑΙ η σύνδεση είναι επιβλαβής

ΤΟΤΕ παράλληλη εκτέλεση των δραστηριοτήτων k και l (αγνόηση της σύνδεσης k→l)

4.3.3 Αριθμητικό παράδειγμα

Ανάλυση των διαομαδικών σχέσεων μεταξύ των τριών GAs του Σχήματος 4.14, δεδομένων των διαρκειών των δραστηριοτήτων παρουσιάζονται στον Πίνακα Ι. Τα

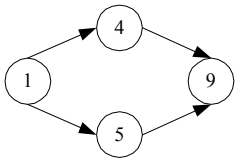
τοπικά προγράμματα που παράγονται από τη CPM (Critical Path Method) συνοψίζονται στα Σχήματα 4.15 – 4.17, και γενικό πρόγραμμα που παράγεται από τη CPM για ολόκληρο το δίκτυο του Σχήματος 4.14 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18.

Να σημειωθεί ότι οι δραστηριότητες στο γενικό πρόγραμμα ανήκουν στις ίδιες ομάδες με τα τοπικά προγράμματα, ενώ οι παράμετροι κάθε τοπικού προγράμματος έχουν αλλάξει.

Πίνακας 4 Ι: Διάρκεια Δραστηριοτήτων

Ομάδα	Δραστηριότητα	Διάρκεια	Ομάδα	Δραστηριότητα	Διάρκεια
GA-1	a1	10	GA-2	a8	10
GA-2	a4	15	GA-2	a12	15
GA-1	a5	10	GA-2	a13	10
GA-1	a9	15	GA-3	a10	15
GA-2	a2	15	GA-3	a11	10
GA-2	a3	10	GA-3	a14	10
GA-2	a6	15	GA-3	a15	15
GA-2	a7	10	GA-3	a16	15

GA-1

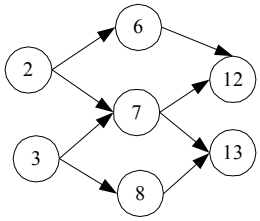


	Δραστηριότητα			
	a1	a4	a5	a9
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	10	10	25
Διάρκεια	10	15	10	15
Χρόνος Τερματισμού	10	25	20	40
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	0	10	15	25
Χρόνος Υστέρησης	0	0	5	0

Διάστημα = 40, **Κρίσιμη Πορεία** $a1 \rightarrow a4 \rightarrow a9$

Σχήμα 4 15: Τοπικό Πρόγραμμα για την GA-1

GA-2

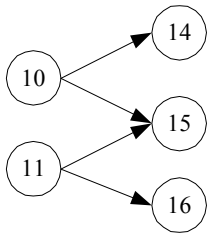


	Δραστηριότητα						
	a2	a3	a6	a7	a8	a12	a13
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	0	15	15	10	30	25
Διάρκεια	15	10	15	10	10	15	10
Χρόνος Τερματισμού	15	10	30	25	20	45	35
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	0	15	15	20	25	30	35
Χρόνος Υστέρησης	0	15	0	5	15	0	10

Διάστημα = 45, **Κρίσιμη Πορεία** $a2 \rightarrow a6 \rightarrow a12$

Σχήμα 4 16: Τοπικό Πρόγραμμα για την GA-2

GA-3



	Δραστηριότητα				
	a10	a11	a14	a15	a16
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	0	15	15	15
Διάρκεια	15	15	10	10	15
Χρόνος Τερματισμού	15	15	25	25	30
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	5	0	20	20	15
Χρόνος Υστέρησης	5	0	5	5	0

Διάστημα = 30, **Κρίσιμη Πορεία** $a11 \rightarrow a16$

Σχήμα 4 17: Τοπικό Πρόγραμμα για την GA-3

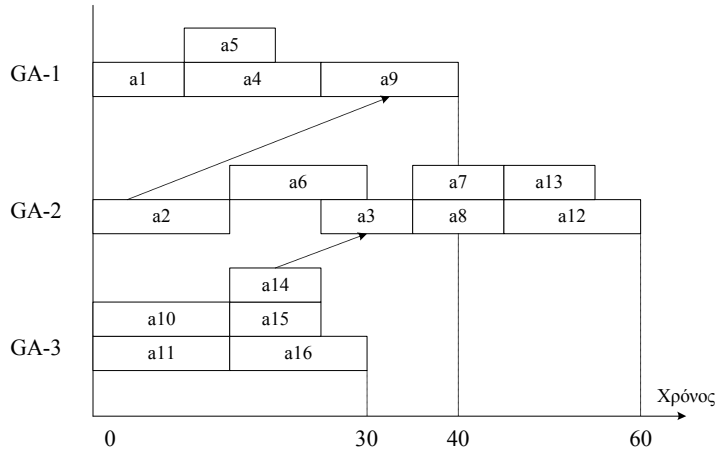
Η κρίσιμη πορεία για το δίκτυο στο Σχήμα 4.14 είναι $a10 \rightarrow a14 \rightarrow a3 \rightarrow a7 \rightarrow a12$ με αντίστοιχο διάστημα 60. Το Σχήμα 4.19 παρουσιάζει το Gantt διάγραμμα του

γενικού προγράμματος. Στο Σχήμα 4.19 οι συνδέσεις $a14 \rightarrow a3$ και $a2 \rightarrow a9$ απαγορεύουν την παράλληλη εκτέλεση των τριών ομάδων δραστηριοτήτων. Από τον κανόνα παραγωγής 4, η σύνδεση $a14 \rightarrow a3$ είναι επιβλαβής επειδή (ο τοπικός χρόνος λήξης της a14 = 25) είναι μεγαλύτερος από (τον τοπικό χρόνος έναρξης της a13 = 0). Από τον κανόνα παραγωγής 5, η σύνδεση $a2 \rightarrow a9$ είναι ασήμαντη σύνδεση επειδή (ο τοπικός χρόνος λήξης της a2=15) είναι μικρότερος από (τον τοπικό χρόνο έναρξης της a9 = 40). Κατά συνέπεια η σύνδεση $a14 \rightarrow a3$ και μόνο θα αναλυθεί στη συνέχεια.

	Δραστηριότητα						
GA - 1	a1	a4	a5	a9			
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	10	10	25			
Διάρκεια	10	15	10	15			
Χρόνος Τερματισμού	10	25	20	40			
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	20	30	35	45			
Χρόνος Υστέρησης	20	20	25	20			
GA - 2	a2	a3	a6	a7	a8	a12	a13
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	25	15	35	35	45	45
Διάρκεια	15	10	15	10	10	15	10
Χρόνος Τερματισμού	15	35	30	45	45	60	55
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	15	25	30	35	40	45	50
Χρόνος Υστέρησης	15	0	15	0	5	0	5
GA - 3	a10	a11	a14	a15	a16		
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	0	15	15	15		
Διάρκεια	15	15	10	10	15		
Χρόνος Τερματισμού	15	15	25	25	30		
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	0	30	15	50	45		
Χρόνος Υστέρησης	0	30	0	35	30		

Διάστημα = 60, **Κρίσιμη Πορεία** $a10 \rightarrow a14 \rightarrow a3 \rightarrow a7 \rightarrow a12$

Σχήμα 4 18: Γενικό Πρόγραμμα για το Δίκτυο του Σχήματος 4.14



Σχήμα 4 19: Διάγραμμα Gantt του Γενικού Προγράμματος του Σχήματος 4.18

	Δραστηριότητα						
GA - 1	a1	a4	a5	a9			
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	10	10	25			
Διάρκεια	10	15	10	15			
Χρόνος Τερματισμού	10	25	20	40			
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	15	25	30	40			
Χρόνος Υστέρησης	15	15	20	15			
GA - 2	a2	a3	a6	a7	a8	a12	a13
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	20	15	30	30	40	40
Διάρκεια	15	10	15	10	10	15	10
Χρόνος Τερματισμού	15	30	30	40	40	55	50
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	10	20	25	30	35	40	45
Χρόνος Υστέρησης	10	0	10	0	5	0	5
GA - 3	a10	a11	a14	a15	a16		
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	0	15	15	15		
Διάρκεια	15	15	5	10	15		
Χρόνος Τερματισμού	15	15	20	25	30		
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	0	25	15	45	40		
Χρόνος Υστέρησης	0	25	0	30	25		

Διάστημα = 55, **Κρίσιμη Πορεία** $a10 \rightarrow a14 \rightarrow a3 \rightarrow a7 \rightarrow a12$

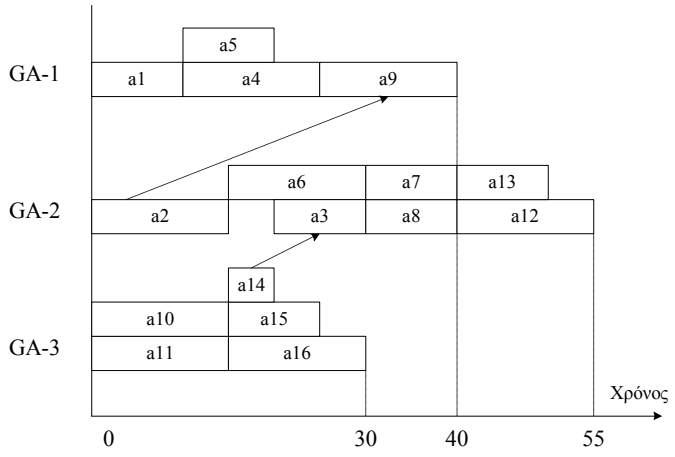
Σχήμα 4 20: Γενικό Πρόγραμμα μετά την εφαρμογή του Κανόνα Παραγωγής 6

Προκειμένου να μειωθεί το διάστημα, οι κανόνες παραγωγής 6 ή 8 θα μπορούν να εφαρμοστούν. Εάν η σύνδεση $a14 \rightarrow a3$ είναι ένας ισχυρός περιορισμός προτεραιότητας, τότε εφαρμόζεται ο κανόνας 6 παραγωγής. Ο κανόνας παραγωγής 6 προτείνει τη μείωση της διάρκειας της δραστηριότητας a14. Ένας τρόπος για να μειωθεί η διάρκεια της a14 είναι να διατεθούν πρόσθετοι πόροι στην a14. Υποθέτουμε ότι η διάρκεια της a14 μειώνεται από 10 σε 5 με τη διάθεση πρόσθετων πόρων. Τότε το διάστημα για το δίκτυο μειώνεται από 60 έως 55. Το Σχήμα 4.20 παρουσιάζει γενικό πρόγραμμα αφότου έχει εφαρμοστεί ο κανόνας παραγωγής 6. Το Gantt διάγραμμα που αντιστοιχεί στο γενικό πρόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21.

Αφ' ετέρου, εάν σύνδεση $a14 \rightarrow a3$ είναι ένας αδύναμος περιορισμός προτεραιότητας, τότε μπορεί να εφαρμοστεί ο κανόνας παραγωγής 8. Ο κανόνας παραγωγής 8 προτείνει την σύνδεση $a14 \rightarrow a3$ να αγνοηθεί. Επιτρέπει στις δραστηριότητες a14 και a3 να εκτελεσθούν παράλληλα. Κατά συνέπεια το διάστημα του δικτύου μειώνεται από 60 σε 45. Το Σχήμα 4.22 παρουσιάζει το γενικό πρόγραμμα αφότου έχει εφαρμοστεί ο κανόνας παραγωγής 8. Το αντίστοιχο Gantt διάγραμμα του γενικού προγράμματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.23.

Η GA-3 αποδεικνύεται η κρισιμότερη ομάδα μεταξύ των τριών ομάδων δραστηριοτήτων. Οι δραστηριότητες a10 και a14 ασκούν σημαντική επίδραση στο διάστημα επειδή η καθυστέρηση τους κρατά την πρόοδο των δραστηριοτήτων της GA-2 και αυξάνει το διάστημα. Αφ' ετέρου, η GA-1 έχει το λιγότερο φορτωμένο πρόγραμμα. Κατά συνέπεια, οι πόροι του GA-1 μπορούν να δανειστούν στις άλλες δύο ομάδες, εάν είναι απαραίτητοι για την επιτάχυνση κάποιων δραστηριοτήτων.

Μπορεί να δοθεί προτεραιότητα στις δραστηριότητες μέσα σε μια ομάδα ανάλογα με την επίπτωσή τους στο μέτρο απόδοσης προγραμματισμού. Στην GA-1, όλες οι δραστηριότητες είναι εξίσου σημαντικές. Στην GA-2 οι δραστηριότητες {a3, a7, a8, a12, a13} ασκούν μεγαλύτερη επίδραση στο διάστημα από τις δραστηριότητες {a2, a6}. Στην GA-3, οι δραστηριότητες {a10, a14} έχουν μεγαλύτερη επίπτωση στο διάστημα από τις δραστηριότητες {a11, a15, a16}.

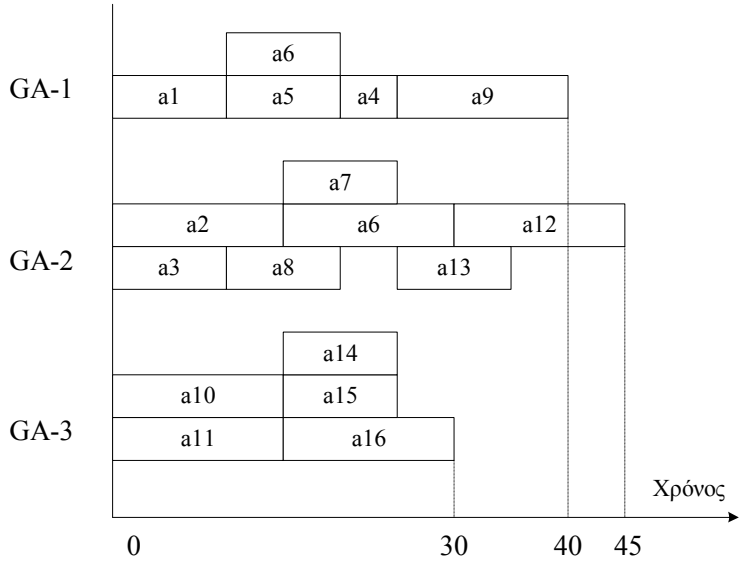


Σχήμα 4 21: Διάγραμμα Gantt του Γενικού Προγράμματος του Σχήματος 4.20

	Δραστηριότητα						
GA - 1	a1	a4	a5	a9			
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	10	10	25			
Διάρκεια	10	15	10	15			
Χρόνος Τερματισμού	10	25	20	40			
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	5	15	20	30			
Χρόνος Υστέρησης	5	5	10	5			
GA - 2	a2	a3	a6	a7	a8	a12	a13
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	0	15	15	10	30	25
Διάρκεια	15	10	15	10	10	15	10
Χρόνος Τερματισμού	15	10	30	25	20	45	35
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	0	15	15	20	25	30	35
Χρόνος Υστέρησης	0	15	0	5	15	0	10
GA - 3	a10	a11	a14	a15	a16		
Νωρίτερος Χρόνος Εκκίνησης	0	0	15	15	15		
Διάρκεια	15	15	10	10	15		
Χρόνος Τερματισμού	15	15	25	25	30		
Αργότερος Χρόνος Εκκίνησης	20	15	35	35	30		
Χρόνος Υστέρησης	20	15	20	20	15		

Διάστημα = 45, **Κρίσιμη Πορεία** $a2 \rightarrow a6 \rightarrow a12$

Σχήμα 4 22: Γενικό Πρόγραμμα μετά την εφαρμογή του Κανόνα Παραγωγής 8



Σχήμα 4 23: Διάγραμμα Gantt του Γενικού Προγράμματος του Σχήματος 4.22

4.3.4 Συμπεράσματα

Στην παράλληλη μηχανική, γίνεται μια προσπάθεια να εξεταστούν οι περιορισμοί σχεδιασμού ταυτόχρονα παρά σε σειρά όπως στην περίπτωση του παραδοσιακού σχεδιασμού. Αυτό οδηγεί σε μείωση της διάρκειας του προγράμματος σχεδιασμού, μείωση του κόστους, και καλύτερη ποιότητας του τελικού σχεδίου. Εντούτοις, ο παράλληλος σχεδιασμός προϊόντων δίνει αφορμή για ένα πρόγραμμα μεγάλης κλίμακας που να είναι πάρα πολύ δύσκολο να διαχειριστεί συνολικά. Ένας τρόπος να μειωθεί η πολυπλοκότητα ενός προγράμματος μεγάλης κλίμακας είναι να αποσυντεθεί σε υποσυστήματα. Τα πλεονεκτήματα της αποσύνθεσης προγράμματος είναι τα ακόλουθα:

1. Η αποσύνθεση προγράμματος επιτρέπει τον καθορισμό μιας πιθανής ομάδας δραστηριοτήτων που μπορεί να προγραμματιστεί ταυτόχρονα.

2. Η ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται είναι τέτοια που οι περιορισμοί προτεραιότητας μεταξύ των δραστηριοτήτων και η διάρκεια των δραστηριοτήτων βελτιώνονται.

3. Ο προγραμματισμός και η διαχείριση του προγράμματος απλοποιούνται επειδή η διαχείριση μιας ομάδας δραστηριοτήτων εστιάζει στα προβλήματα μέσα στην ομάδα.

4. Η αποσύνθεση του προγράμματος δημιουργεί ένα περιβάλλον βελτίωσης της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας του προγράμματος.

Αν και η διαχείριση ολόκληρου του προγράμματος απλοποιείται λόγω της αποσύνθεσης προγράμματος, απαιτείται ένα ενσωματωμένο σύστημα που συντονίζει και αναλύει τις δραστηριότητες μέσα στις ομάδες. Χρησιμοποιήθηκε ένα knowledge-based σύστημα τη διαχείριση του προγράμματος σχεδιασμού. Το σύστημα επιτρέπει την εκτέλεση της ανάλυσης σχετικά με τον τύπο αποσύνθεσης και τους περιορισμούς προτεραιότητας μεταξύ των ομάδων.

5 ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο παράλληλος σχεδιασμός μπορεί να μειώσει το χρόνο που απαιτείται για την ανάπτυξη νέων προϊόντων και να ανασχεδιασμό παλαιών. Σε αντίθεση με τη συμβατική προσέγγιση, στην οποία ο σχεδιασμός προϊόντων (σχεδόν) ολοκληρώνεται προτού να «thrown over the wall» στην ομάδα σχεδιασμού διαδικασίας, ο παράλληλος σχεδιασμός για την παραγωγή, όπως αντιλαμβάνεται εδώ, διεξάγει διάφορες αναθεωρήσεις βελτίωσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού προϊόντων. Οι συχνές αναθεωρήσεις έχουν δύο οφέλη: (1) (Παράλληλη Ανάπτυξη) οι σχεδιαστές διαδικασίας λαμβάνουν ικανοποιητικές πληροφορίες για το σχεδιασμό που τους επιτρέπουν να λειτουργήσουν παράλληλα με τους σχεδιαστές προϊόντων, και (2) (Έλεγχος ποιότητας) τα ελαττώματα στο σχεδιασμό ανακαλύπτονται σύντομα αφότου εμφανιστούν, κερδίζοντας χρόνο και πόρους που απαιτούνται για τον επανασχεδιασμό αργότερα. Το μειονέκτημα των συχνών αναθεωρήσεων είναι ότι κάθε αναθεώρηση απαιτεί χρόνο οργάνωσης (setup)/ penalty που αλλιώς δεν θα απαιτούταν. Η βέλτιστη πολιτική παράγεται για μερικές ειδικές σταθερές περιπτώσεις του μοντέλου. Όταν το όφελος της παράλληλης ανάπτυξης επικρατεί, οι περίοδοι αναθεωρήσεων είτε αυξάνονται είτε μειώνονται σύμφωνα με το ρυθμό με τον οποίο η ομάδα σχεδιασμού προϊόντων δίνει το δικαίωμα για τη διεξαγωγή της χρήσιμης διαδικασίας σχεδιασμού. Όταν ο έλεγχος ποιότητας επικρατεί, οι περίοδοι αναθεωρήσεων ποικίλουν στο βαθμό που οι παράμετροι που έχουν σχέση με την ποιότητα αλλάζουν.

5.1 Εισαγωγή

Είναι πολύ μεγάλη η σημασία ενός σύντομου κύκλου ανάπτυξης προϊόντων. Ο Clark et al (1987) υπολογίζει ότι για την περίπτωση ενός αυτοκινήτου $10.000, η καθυστέρηση κάθε ημέρας στην εισαγωγή ενός νέου μοντέλου στην αγορά αντιστοιχεί σε μια απώλεια κέρδους $1.000.000. Ο Bussey (1988) υποστηρίζει ότι ένας παρατεταμένος κύκλος ανάπτυξης προϊόντος είναι ο βασικός παράγοντας που εξηγεί την έλλειψη ανταγωνιστικότητας των αμερικανών κατασκευαστών με τους Ιάπωνες στις βιομηχανίες όπως φωτοαντιγραφικών μηχανημάτων και αυτοκινήτων. Ο Stalk (1988) υπογραμμίζει τη σημασία της ταχύτητας στην κατασκευή, στις πωλήσεις, τη διανομή, και τη στρατηγική.

Ο σχεδιασμός παραγωγής και συναρμολόγησης (DFMA – Design for Manufacturing Assembling), στο οποίο τα σχέδια προϊόντων αναθεωρούνται για να υπολογίσουν τους προκύπτοντες χρόνους συναρμολόγησης προϊόντων και τα κόστη κατασκευής, είναι επίσης μια σημαντική ιδέα που πολλές αμερικανικές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν για να μειώσουν το κόστος παραγωγής τους και να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων τους. Για παράδειγμα, ένα προϊόν με έναν μεγάλο αριθμό μερών μπορεί να απαιτήσει πολλά βήματα κατασκευής (ως εκ τούτου, να κοστίζει περισσότερο) και να είναι λιγότερο αξιόπιστο (ως εκ τούτου, να έχει χαμηλότερη ποιότητα) από ένα προϊόν με λιγότερα μέρη. Ο Port (1989) αναφέρει ότι η Texas Instruments και η IBM ήταν σε θέση να μειώσουν το χρόνο συναρμολόγησης ορισμένων προϊόντων κατά 85% έως 90% χρησιμοποιώντας αυτήν την ιδέα.

Η παράλληλη μηχανική, στην οποία οι μηχανικές δραστηριότητες διεξάγονται παράλληλα παρά διαδοχικά, μπορεί και χρησιμοποιείται για να συγκεντρώσει τα οφέλη του DFMA και, ταυτόχρονα για να μικραίνει τους χρόνους ανάπτυξης προϊόντων.

Αναλύεται ένας απλουστευμένος σχεδιασμός προϊόντων για ένα πρόγραμμα παραγωγής που απαιτεί και σχεδιασμό προϊόντος και σχεδιασμό διαδικασίας, κάθε ένα απ' τα οποία πραγματοποιείται από χωριστές ομάδες που μπορούν να βρίσκονται σε χωριστές θέσεις και να είναι μέρη διαφορετικών οργανισμών. Ο Spencer (1990) περιγράφει τη συμβατική προσέγγιση «πάνω από τον τοίχο» σε αυτό το πρόβλημα, στο οποίο το προϊόν (σχεδόν) σχεδιάζεται μέχρι τέλους από την πρώτη ομάδα πριν να «thrown over the wall» στην ομάδα σχεδιασμού διαδικασίας. Αντίθετα, αυτό το μοντέλο προβλέπει διάφορες αναθεωρήσεις προόδου που διεξάγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού, στην οποία οι σχεδιαστές προϊόντων και διαδικασίας συγκεντρώνονται για να αξιολογήσουν την κατάσταση του σχεδιασμού του προϊόντος. Ο Blackburn (1991) εξηγεί ότι υπάρχουν δύο κύρια οφέλη κάθε αναθεώρησης προόδου:

«Οι δραστηριότητες που επικαλύπτονται μειώνουν το χρόνο σχεδιασμού με δύο σημαντικούς τρόπους. Πρώτον δραστηριοποιούνται οι παράλληλες δραστηριότητες. Με την πρόωρη διάθεση πληροφορίας, οι μηχανικοί μπορούν να αρχίσουν να εργάζονται στις διαφορετικές φάσεις του προβλήματος ενώ διαμορφώνονται τα τελικά σχέδια. Αυτό όχι μόνο καθιστά εφικτή την παράλληλη μηχανική, αλλά και ενισχύει τις ταυτόχρονες σχεδιασμού–μηχανικές–δοκιμής δραστηριότητες. Η ομάδα

προγράμματος εργάζεται σε μικρότερο βαθμό όπως μια ομάδα σκυταλοδρομίας – που περνά τη σκυτάλη μετά από κάθε γύρο στο επόμενο μέλος της ομάδας – και περισσότερο σαν ομάδα των pit σε έναν αγώνα φόρμουλα 1, όπου όλοι εργάζονται ταυτόχρονα για τον ίδιο στόχο. Δεύτερον, η χρονοβόρα επανάληψη (rework) αποφεύγεται επειδή η πρόωρη διάθεση πληροφοριών προωθεί την έγκαιρη επισήμανση του ότι ο σχεδιασμός προϊόντων ξεφεύγει από τον στόχο. Διορθώσεις στη μέση της διάρκειας σχεδιασμού, αν και επιμηκύνουν τον χρόνο, τείνουν να παράγουν πιο σύντομες συνολικές παρερχόμενες περιόδους. Η εναλλακτική λύση της αναθεώρησης των ολοκληρωμένων σχεδίων (και της εύρεσης τους εκτός στόχου) συνήθως οδηγεί σε διάφορες πλήρεις επαναλήψεις του κύκλου σχεδιασμού και των πιο μακροχρόνιων παρερχόμενων περιόδων.»

Το πρώτο όφελος είναι το όφελος *παράλληλης ανάπτυξης*: μια αναθεώρηση παρέχει πληροφορίες που επιτρέπουν στους σχεδιαστές διαδικασίας να εργαστούν παραγωγικά στα προχωρημένα στάδια του σχεδιασμού διαδικασίας ενώ ο σχεδιασμός του προϊόντος αναπτύσσεται ακόμα. Ο χρόνος ολοκλήρωσης του προγράμματος μπορεί να μειωθεί επειδή ώσπου να ολοκληρώσουν οι σχεδιαστές προϊόντος την εργασία τους, στους σχεδιαστές διαδικασίας μπορεί να έχει απομείνει ελάχιστη εργασία. Χωρίς αναθεωρήσεις προόδου, οι σχεδιαστές διαδικασίας μπορεί να αναγκαστούν να περιμένουν για να εκτελέσουν την εργασία τους στο πρόγραμμα, καθυστερώντας ενδεχομένως το χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος.

Το δεύτερο όφελος είναι το όφελος *ελέγχου ποιότητας*: μια αναθεώρηση προόδου εκτιμά την παραγωγή του τρέχοντος σχεδιασμού και καθορίζει εάν απαιτείται επανασχεδιασμός, πριν η διαδικασία προχωρήσει πάρα πολύ. Μπορεί να μειωθεί η ανάγκη εκτέλεσης διεξοδικού επανασχεδιασμού, επειδή τα ελαττώματα εντοπίζονται νωρίς και οι επανασχεδιασμοί είναι γρηγορότεροι. Ο Blackburn (1991) υπογραμμίζει τη σημασία τέτοιων μειώσεων με τη δήλωση ότι ο επανασχεδιασμός προϊόντων είναι «μια σημαντική αιτία των παρατεταμένων χρόνων υλοποίησης στους κύκλους ανάπτυξης». Οι Dixon et al (1990) αποκαλύπτουν ένα σημαντικό όφελος των πρόωρων αναθεωρήσεων αναφέροντας τον «80/20» κανόνα, ο οποίος λέει ότι 80% του κόστους παραγωγής δεσμεύεται κατά τη διάρκεια του πρώτου 20% της διαδικασίας σχεδιασμού.

Ενώ η «πάνω από τον τοίχο» προσέγγιση μπορεί να απαιτεί εκτέλεση διεξοδικής εργασίας σε ένα σχεδιασμό προϊόντος για να διαπιστωθεί ότι δεν μπορεί να

κατασκευαστεί εύκολα, οι πρόωρες αναθεωρήσεις προόδου μπορούν να εντοπίσουν τις επιθυμητές αλλαγές, οι οποίες εάν προσδιοριστούν πολύ αργότερα στη διαδικασία θα κοστίσει αρκετά η αλλαγή τους. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον Yang (1991), ως αποτέλεσμα της χρήσης της παράλληλης μηχανικής και κάνοντας αναθεωρήσεις προόδου «τουλάχιστον κάθε δύο εβδομάδες», η Boeing ενέργησε πρόσφατα σύμφωνα με τις προτάσεις από τους μηχανικούς παραγωγής της και τροποποίησε την ένωση φτερού-σώματος στο σχέδιο 777, εκμηδενίζοντας τη γωνία στην επιφάνεια των παραδοσιακών αεριωθούμενων αεροπλάνων Boeing όπου η κορυφή του φτερού συναντά την πλευρά της ατράκτου. Το όφελος του ελέγχου ποιότητας μπορεί να βοηθήσει να αποφευχθούν καταστάσεις στις οποίες ο σχεδιασμός ενός προϊόντος καθυστερεί, τόσο ώστε να προωθηθεί στην παραγωγή ένα κατώτερο ποιοτικά προϊόν.

Σκοπός είναι η κατασκευή ενός απλού, δομημένου μοντέλου παράλληλου σχεδιασμού για την παραγωγή, και η απόκτηση ιδεών από την ανάλυσή του. Υποθέτουμε ότι το προϊόν θα σχεδιαστεί, ότι υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες για την αξιολόγηση της παραγωγής του προϊόντος, ότι κανένα ελάττωμα δεν προκύπτει στο σχεδιασμό, και απαιτείται ο συγχρονισμός των αναθεωρήσεων προόδου για την ελαχιστοποίηση του συνολικού αναμενόμενου χρόνου ολοκλήρωσης του προγράμματος.

Σε μερικές τοποθετήσεις, μπορεί να είναι δυνατό να οργανωθούν οι πολυσύνθετες ομάδες σχεδιασμού που εργάζονται μαζί ταυτόχρονα στο σχεδιασμό προϊόντων και διαδικασίας. Σε αυτήν την περίπτωση, οι αναθεωρήσεις μπορεί να αποτελούνται από ανεπίσημη, σχεδόν συνεχή, επικοινωνία μεταξύ των μελών της ομάδας, και όσο περισσότερη αναθεώρηση, τόσο το καλύτερο. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να ξοδεύεται πολύ λίγος χρόνος για έναν μεγάλο αριθμό αναθεωρήσεων. Εντούτοις, το μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια υποθέτει ότι κάθε φορά που πραγματοποιείται μια αναθεώρηση, απαιτείται ένα ορισμένο ποσό χρόνου «οργάνωσης». Αυτός ο χρόνος οργάνωσης αποτελείται από το συνηθισμένο χρόνο οργάνωσης συν το χρόνο ποινής: Ο συνηθισμένος χρόνος οργάνωσης αποτελείται από το χρόνο να οργάνωσης της αναθεώρησης, κατασκευής των πρωτότυπων εάν είναι απαραίτητο, προετοιμασίας έγγραφων και υλικών επικοινωνίας (όπως μακέτες), συντονισμός συνεδριάσεων, ταξίδια, και ερμηνεία της χαμένης παραγωγικότητας λόγω της εκ νέου συγκέντρωσης σε νέα καθήκοντα. Ο χρόνος ποινής αποτελείται τον πρόσθετο χρόνο που απαιτείται για να διεξαχθεί η αναθεώρηση και να διεξαχθεί η

εργασία επανασχεδιασμού, εάν υπάρχει, λόγω διεξαγωγής της αναθεώρησης εκείνη την περίοδο. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι αρκετά γρήγορο να καθοριστεί εάν ένα αρχικό στάδιο στο σχεδιασμό προϊόντος είναι ελαττωματικό, εάν αυτή η εργασία αναθεωρείται αφότου έχει ολοκληρωθεί ένα μεγάλο μέρος της διαδικασία σχεδιασμού του προϊόντος. Η ποινή για την αναθεώρηση αυτής της εργασίας νωρίτερα περιλαμβάνει τον πρόσθετο χρόνο που απαιτείται για την επιτυχή διεξαγωγή αυτής της αναθεώρησης τότε.

5.2 Μοντέλο

Υποθέτουμε ότι η εργασία σχεδιασμού προϊόντων αποτελείται από N ξεχωριστά στάδια, και ότι απαιτούνται t_i ημέρες για την ολοκλήρωσή του σταδίου σχεδιασμού i, και $1 \le i \le N$.

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση ενός σταδίου σχεδιασμού προϊόντος, για παράδειγμα στάδιο k, σημειώνεται το τελευταίο στάδιο σχεδιασμού i στο οποίο μια αναθεώρηση προόδου διεξάγεται, και το ποσό x του παραγωγικού χρόνου που ξοδεύεται μέχρι εκείνη τη στιγμή στην εργασία σχεδιασμού διαδικασίας. Χρησιμοποιώντας δυναμικό προγραμματισμό, είμαστε στο στάδιο k και στην κατάσταση (i, x). Θέτουμε $i = 0$ εάν δεν έχει διεξαχθεί ακόμα καμία αναθεώρηση. Σε αυτό το σημείο, υπάρχουν δύο επιλογές: (1) να αρχίσει αμέσως η εργασία στο επόμενο στάδιο σχεδιασμού, ή (2) να πραγματοποιηθεί μια αναθεώρηση προόδου.

Υποθέτουμε ότι είμαστε στο στάδιο k, στην κατάσταση (i, x), και ότι αποφασίζεται η πραγματοποίηση μιας αναθεώρησης. Υποθέτουμε ότι οι ομάδες σχεδιασμού προϊόντος και διαδικασίας πρέπει να σταματήσουν ότι κάνουν και να δεσμευτούν εξ ολοκλήρου στην αναθεώρηση των σταδίων σχεδιασμού που έχουν ολοκληρωθεί μετά την τελευταία αναθεώρηση (στο στάδιο i) και σε οποιαδήποτε εργασία επανασχεδιασμού απαιτείται.

Η αναθεώρηση αποτελείται από δύο φάσεις. Η φάση οργάνωσης/ ποινής αποτελεί τον αναμενόμενο χρόνο, t_{ik}^{S}. Η φάση επιθεώρησης / ενημέρωσης αποτελείται από τον αναμενόμενο χρόνο που απαιτείται για την επιθεώρηση της προόδου των σταδίων σχεδιασμού που ολοκληρώθηκαν από την τελευταία αναθεώρηση, και για την επαρκή επικοινωνία με τους σχεδιαστές διαδικασίας έτσι ώστε να είναι σε θέση να διεξάγουν την πρόσθετη εργασία σχεδιασμού διαδικασίας. Υποθέτουμε ότι χρειάζονται t_j^I

ημέρες για να πραγματοποιηθεί αυτή η δραστηριότητα επεμβαίνοντας στο στάδιο σχεδιασμού j. Κατά συνέπεια, η αναμενόμενη διάρκεια αυτής της φάσης είναι $\sum_{j=i+1}^{k} t_j^I$ ημέρες σε αυτήν την περίπτωση. (Στο Παράρτημα 5.1 υπάρχει ένα παράδειγμα για το πώς να καθοριστεί το t_{ik}^S για να περιλάβει το χρόνο penalty όταν οι χρόνοι επιθεώρησης/ ενημέρωσης εξαρτώνται από το πότε αναθεωρείται το στάδιο σχεδιασμού προϊόντος).

Υποθέτουμε ότι μια αναθεώρηση πρέπει να πραγματοποιηθεί αφότου έχει ολοκληρωθεί το τελευταίο στάδιο του σχεδιασμού προϊόντων. Το πρόγραμμα θα ολοκληρωθεί αφότου τελειώσουν οι σχεδιαστές διαδικασίας την εργασία τους.

Υποθέτουμε ότι το α_i, (όπου $a_0 \le a_1 \le \ldots \le a_N$) δείχνει το συνολικό χρονικό διάστημα που η ομάδα σχεδιασμού διαδικασίας μπορεί παραγωγικά να ξοδέψει στην εργασία σχεδιασμού της, δεδομένου ότι η αναθεώρηση του σταδίου i έχει ολοκληρωθεί. Κατά συνέπεια, α_N είναι το συνολικό ποσό εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που πρέπει να δαπανηθεί στο πρόγραμμα. Εκτός αν υποθέσουμε ότι κάθε α_i είναι γνωστό με βεβαιότητα, αυτό το πλαίσιο είναι αρκετά γενικό. Για παράδειγμα, α_0 είναι το ποσό εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που μπορεί να γίνει πριν από την πρώτη αναθεώρηση προόδου, το οποίο μπορεί να είναι μηδέν εάν καμία τέτοια εργασία δεν μπορεί να γίνει, ή μπορεί να είναι μεγάλο εάν ένα σημαντικό ποσό εργασίας μπορεί να γίνει.

Υποθέτουμε ότι p_i είναι η πιθανότητα το στάδιο σχεδιασμού i να μην έχει κανένα ελάττωμα, δεδομένου ότι το προηγούμενο στάδιο σχεδιασμού (i-1) δεν έχει κανένα ελάττωμα. Για τεχνική ευκολία, υποθέτουμε ότι το στάδιο σχεδιασμού 0 υπάρχει και δεν έχει κανένα ελάττωμα. Υποθέτουμε ότι μόλις εμφανιστεί ένα ελάττωμα σε ένα στάδιο σχεδιασμού, όλα τα επόμενα στάδια είναι ελαττωματικά, έως ότου πραγματοποιηθεί μια αναθεώρηση, κατά την οποία θα βρεθεί το ελάττωμα και το σχέδιο θα διορθωθεί.

Υποθέτουμε ότι μια αναθεώρηση προόδου είναι τέλεια με τους ακόλουθους δύο τρόπους: (1) μια αναθεώρηση προόδου θα εντοπίσει όλα τα ελαττώματα στο σχεδιασμό προϊόντων μέχρι εκείνη τη στιγμή, και (2) μόλις εντοπιστεί ένα ελάττωμα και ο σχεδιασμός αναθεωρείται, δε μπορεί να εμφανιστεί κανένα νέο ελάττωμα σε αυτό το στάδιο σχεδιασμού ή σε οποιοδήποτε προηγούμενο στάδιο. Υποθέτουμε ότι

μια αναθεώρηση προόδου γίνεται στο στάδιο *k* και στην κατάσταση (*i, x*). Ορίζεται $\phi(i,j) := 1 - p_{i+1}p_{i+2}\cdots p_j$, το οποίο είναι η πιθανότητα να υπάρχει ένα ελάττωμα (στο ενδιάμεσο) στάδιο *j* σχεδιασμού προϊόντος, εφόσον το στάδιο *j* (για $i < j \le k$) θα έχει σίγουρα ένα ελάττωμα εάν υπάρχει ένα ελάττωμα σε οποιαδήποτε από τα στάδια μετά το στάδιο *i*.

Μόλις ολοκληρωθεί η αναθεώρηση, μπορεί να απαιτηθεί χρόνος για τον επανασχεδιασμό (αναθεώρηση (revise)/ επανάληψη (rework)) του προϊόντος ούτως ώστε να διορθωθούν τα ελαττώματα που εντοπίζονται στην πρόσφατα ολοκληρωμένη, αλλά μη αναθεωρημένη, εργασία σχεδιασμού προϊόντος. Εάν ένα ελάττωμα εντοπιστεί στο στάδιο *j* του σχεδιασμού, τότε πρόσθετος χρόνος t_j^R πρέπει να δαπανηθεί, και από τις δύο ομάδες σχεδιασμού, για τον επανασχεδιασμό. Κατά συνέπεια, ο αναμενόμενος χρόνος επανασχεδιασμού για το στάδιο *j* είναι $\phi(i,j)t_j^R$ σε αυτήν την περίπτωση.

Επιδίωξη είναι μια στρατηγική αναθεώρησης προόδου που να ελαχιστοποιεί τον αναμενόμενο χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος. Ορίζεται $T_k(i, x)$ ο ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος που χρειάζεται για την ολοκλήρωση του προγράμματος όταν είναι στο στάδιο *k* και στην κατάσταση (*i, x*). Αυτός ο χρόνος που απομένει είναι το ελάχιστο των υπόλοιπων χρόνων είτε εάν πραγματοποιηθεί μια αναθεώρηση προόδου είτε όχι. Εάν πραγματοποιηθεί μια αναθεώρηση προόδου, τότε ο υπόλοιπος χρόνος είναι ο χρόνος οργάνωσης της αναθεώρησης, το σύνολο χρόνων επιθεώρησης/ αναθεώρησης για κάθε στάδιο που χρειάζεται αναθεώρηση, το σύνολο των αναμενόμενων χρόνων επανασχεδιασμού για κάθε τέτοιο στάδιο, ο χρόνος της εργασίας σχεδιασμού του επόμενου σταδίου (*k*+1), και ο χρόνος μετά το τέλος εκείνου του σταδίου. Εάν δεν γίνει καμία αναθεώρηση, τότε ο υπόλοιπος χρόνος είναι απλά ο χρόνος που απαιτείται μέχρι το επόμενο στάδιο συν τον υπόλοιπο χρόνο από εκεί. Δηλαδή χρησιμοποιώντας τη συμβατική σημείωση $x \wedge y = \min(x,y)$, οι εξισώσεις βελτιστοποίησης μπορούν είναι:

$$T_k(i,x) = \min[t_{ik}^S + \sum_{j=i+1}^{k} t_j^I + \sum_{j=i+1}^{k} \phi(i,j)t_j^R + t_{k+1} + T_{k+1}(k,(x+t_{k+1}) \wedge a_k), \quad t_{k+1} + T_{k+1}(i,(x+t_{k+1}) \wedge a_i)] \qquad \textbf{(1)}$$

και

$$T_N(i,x) = t_{iN}^S + \sum_{j=i+1}^{N} t_j^I + \sum_{j=i+1}^{N} \phi(i,j) t_j^R + a_N - x \qquad \textbf{(2)}$$

Ο ελάχιστος αναμενόμενος χρόνος ολοκλήρωσης του προγράμματος δίνεται από:

$$T = t_1 + T_1(0, \quad t_1 \wedge a_0)$$

ΘΕΩΡΗΜΑ 1. Τα ακόλουθα αποτελέσματα ισχύουν για κάθε δεδομένο στάδιο *k*.

(a) *Εάν ο* t_{ik}^S *είναι ανεξάρτητος από το i, τότε, για κάθε x, το όφελος της διεξαγωγής μιας αναθεώρησης αυξάνεται, καθώς ο αριθμός των σταδίων από την τελευταία αναθεώρηση αυξάνεται. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια βέλτιστη πολιτική κατά την οποία διεξάγεται μια αναθεώρηση εάν και μόνο εάν η τελευταία αναθεώρηση έχει γίνει πριν από ένα κρίσιμο προηγούμενο στάδιο, που εξαρτάται από το k.*

Εάν ο t_{ik}^S *είναι ελαττώνεται ως προς το i, τότε ισχύουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.*

(b) *Για κάθε i, εάν* $x > a_i - t_{k+1}$, *ώστε οι σχεδιαστές διαδικασίας να μείνουν χωρίς εργασία πριν το στάδιο σχεδιασμού k+1 ολοκληρωθεί χωρίς αναθεώρηση προόδου τώρα, τότε το όφελος διεξαγωγής μιας αναθεώρησης προόδου αυξάνει όσο αυξάνει το ποσό παραγωγικής εργασίας που ολοκληρώνεται στο σχεδιασμό διαδικασίας. Κατά συνέπεια, σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει μια βέλτιστη πολιτική που πραγματοποιεί μια αναθεώρηση τώρα εάν και μόνο εάν η παραγωγική εργασία σχεδιασμού διαδικασίας που ολοκληρώνεται μέχρι αυτή τη στιγμή υπερβαίνει κάποια κρίσιμα επίπεδα, που εξαρτώνται από το k και το i.*

(c) *Εάν* $t_{ik}^S < p_{k+1}\phi(i,k)t_{k+1}^R$, *τότε είναι βέλτιστο να γίνει μια αναθεώρηση στο στάδιο (i,x).*

(d) *Εάν* $x \le a_i - t_{k+1}$ *και* $t_{ik}^S \ge t_{i,k+1}^S + p_{k+1}\phi(i,k)t_{k+1}^R$ *τότε είναι βέλτιστη η αναβολή μιας αναθεώρησης στο στάδιο (i, x).* (απόδειξη: βλ. παράρτημα 5.2)

Τα (c) και (d) δίνουν σαφείς συνθήκες ικανές να δώσουν τη βέλτιστη ενέργεια. Ένα άμεσο όφελος της διεξαγωγής μιας αναθεώρησης τώρα είναι η μείωση του αναμενόμενου χρόνου αναθεώρησης για το στάδιο k+1. Αυτό το όφελος υπάρχει εάν και μόνο εάν υπάρχει ήδη ένα σφάλμα στο σχεδιασμό και δεν παρουσιαστεί κανένα νέο σφάλμα στο στάδιο k+1. Αυτό σημαίνει ότι το αναμενόμενο άμεσο όφελος της διεξαγωγής μιας αναθεώρησης τώρα είναι τουλάχιστον $p_{k+1}\phi(i,k)t_{k+1}^R$. (Μπορεί να υπάρξει και επιπλέον όφελος λόγω της αποφυγής έλλειψης εργασίας). Το (c) λέει ότι

εάν το αναμενόμενο όφελος υπερβαίνει τον χρόνο προετοιμασίας για τη διεξαγωγή αυτής της αναθεώρησης, τότε είναι βέλτιστο να πραγματοποιηθεί τώρα.

Εάν $x \le a_i - t_{k+1}$,τότε οι σχεδιαστές διαδικασίας δεν θα έχουν έλλειψη εργασίας εάν μια αναθεώρηση προόδου αναβληθεί για άλλο στάδιο. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει επιλογή μεταξύ του να γίνει μια αναθεώρηση τώρα ή να περιμένει για το επόμενο στάδιο. Το αναμενόμενο όφελος είναι η ποσότητα $p_{k+1}\phi(i,k)t_{k+1}^{R}$ που αναφέρθηκε παραπάνω. (Δεν υπάρχουν οφέλη λόγω της αποφυγής έλλειψης εργασίας). Το αναμενόμενο κόστος είναι η διαφορά των χρόνων προετοιμασίας $t_{ik}^{S} - t_{i,k+1}^{S}$. Το (d) λέει να αναβληθεί η αναθεώρηση τουλάχιστον ένα ακόμα στάδιο εάν αυτό το αναμενόμενο όφελος δεν υπερβαίνει αυτό το αναμενόμενο κόστος.

Καθώς οι σχεδιαστές και του προϊόντος και της διαδικασίας πρέπει να αφιερωθούν στις αναθεωρήσεις και σε οποιαδήποτε εργασία επανασχεδιασμού που ακολουθεί, η βέλτιστη πολιτική αναθεώρησης μπορεί να αναπαρασταθεί ντετερμινιστικά στη μορφή $(Q_1, Q_2, \ldots, Q_n)$, όπου Q_1 είναι ο αριθμός σταδίων σχεδιασμού προϊόντος που ολοκληρώνονται πριν από την πρώτη αναθεώρηση, Q_2 είναι ο αριθμός πρόσθετων σταδίων που ολοκληρώνονται πριν από τη δεύτερη αναθεώρηση, και ούτω καθ' εξής Δηλαδή μόλις διεξαχθεί μια αναθεώρηση και ολοκληρωθεί οποιαδήποτε απαραίτητη εργασία επανασχεδιασμού, η επόμενη απόφαση μπορεί να αντιμετωπισθεί απλά ως πόσα πρόσθετα στάδια σχεδιασμού προϊόντος πρέπει να ολοκληρωθούν πριν από την επόμενη αναθεώρηση.

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για τις φάσεις επιθεώρησης / ενημέρωσης των αναθεωρήσεων προόδου είναι σταθερός, ανεξάρτητος από την πολιτική αναθεώρησης, κατά συνέπεια, αγνοείται αυτός ο χρόνος.

5.3 Ανάλυση μιας σταθερής εκδοχής του προβλήματος

Αναλύεται μια μη ρεαλιστικά ειδικευμένη, σταθερή εκδοχή του προβλήματος. Από αυτή την ανάλυση λαμβάνονται διάφορες ποιοτικές ιδέες οι οποίες μπορούν να είναι χρήσιμες στη βελτίωση της αντίληψης ενός διευθυντή προγράμματος για πόσο συχνά να πραγματοποιεί τις αναθεωρήσεις στην πράξη. Αρχίζοντας από ένα απλό μοντέλο επίσης βοηθά τη διαδικασία εφαρμογής, καθώς τα μεγάλα, περίπλοκα μοντέλα είναι απίθανο να εφαρμοστούν εκτός αν έχουν εξελιχθεί από μια ακολουθία καλά κατανοητών, σταδιακά πιο περίπλοκων μοντέλων. Η απλούστευση του μοντέλου

μειώνει ουσιαστικά τον αριθμό παραμέτρων που πρέπει να υπολογιστούν. Κατά συνέπεια, το μοντέλο παρέχει ένα λογικό σημείο εκκίνησης για μια πρακτική εφαρμογή. Αρχίζοντας από ένα απλό μοντέλο και τη λύση του μπορεί να βοηθήσει τους διευθυντές να καταλάβουν την αλληλεπίδραση των σημαντικών επιδράσεων του μοντέλου.

Υποθέτουμε ότι κάθε ημέρα της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος αντιστοιχεί σε ένα χωριστό στάδιο και ότι το πρόγραμμα θα απαιτήσει πολλές ημέρες για να ολοκληρωθεί. (Η χρήση της «ημέρας» ως χρονική μονάδα για ένα στάδιο είναι αυθαίρετη: εναλλακτικές λύσεις είναι μια ώρα ή μια εβδομάδα) Υποθέτουμε ότι οι χρόνοι οργάνωσης, οι χρόνοι αναθεωρήσεων (revise)/ επανάληψης (rework), και οι πιθανότητες ενός σφάλματος που προκύπτει είναι όλοι ανεξάρτητοι από το στάδιο: $t_{ik}^{S} = t_S$, $t_k^R = t_R$ και $p_k = p$ για όλα τα *k*. Σε αντίθεση με το γενικό μοντέλο – στο οποίο ορισμένα στάδια μπορεί να απαιτούν ειδικές προετοιμασίες για την αναθεώρηση, όπως κατασκευή ενός πρωτοτύπου, συντονισμό μιας συνεδρίασης, κ.λ.π. – αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι υπάρχει ένας σταθερός χρόνος οργάνωσης για κάθε αναθεώρηση που διεξάγεται. Το t_R μπορεί να ερμηνευτεί ως το αναμενόμενο μέρος του εσφαλμένου χρόνου σχεδιασμού που πρέπει να ξοδευτεί στον επανασχεδιασμό προϊόντος μόλις εντοπιστεί το σφάλμα. Για παράδειγμα, αν $t_R = 0.6$, ένα σφάλμα πρωτοεμφανίζεται την ημέρα 30, και η επόμενη αναθεώρηση πραγματοποιείται την ημέρα 40, τότε έχουν περάσει δέκα ημέρες εσφαλμένης εργασίας σχεδιασμού προϊόντος και $10t_R = 6$ πρόσθετες αναμενόμενες ημέρες πρέπει να ξοδευτούν για να αναθεωρηθεί η εσφαλμένη εργασία. Ορίζεται ότι $q := 1 - p$ η πιθανότητα που ένα σφάλμα εμφανίζεται κατά τη διάρκεια μιας ημέρας της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος δεδομένου ότι κανένα σφάλμα δεν υπήρξε στην αρχή αυτής της ημέρας.

Υποθέτουμε ότι το αθροιστικό ποσό της εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που επιβάλλεται οποιαδήποτε στιγμή είναι ανάλογο με το ποσό εργασίας σχεδιασμού προϊόντος που ολοκληρώνεται κατά την διάρκεια της τελευταίας αναθεώρησης προόδου. Για παράδειγμα, εάν μια αναθεώρηση πραγματοποιείται αφότου ολοκληρώνεται ένα δέκατο της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος, τότε μέχρι ένα δέκατο σχεδιασμού διαδικασίας μπορεί να ολοκληρωθεί πριν από την επόμενη αναθεώρηση.

Αναζητείται ο βέλτιστος αριθμός ημερών που πρέπει να μεσολαβήσουν μεταξύ των αναθεωρήσεων προόδου. Ορίζεται T_1 και T_2 οι συνολικοί χρόνοι σχεδιασμού προϊόντος και διαδικασίας που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί το πρόγραμμα, αντίστοιχα, n ο αριθμός αναθεωρήσεων προόδου που διεξάγονται, Q_i, ο αριθμός των ημερών μεταξύ της i–1 και i αναθεώρησης προόδου, x το ποσό εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που ολοκληρώνεται όταν η εργασία σχεδιασμού προϊόντος έχει τελειώσει και, $\alpha := T_2 / T_1$, το ποσό παραγωγικής εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που επιβάλλεται από κάθε ημέρα της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος.

ΛΗΜΜΑ 1. (a) *Ο αναμενόμενος χρόνος ολοκλήρωσης προγράμματος δίνεται από*

$$T_1 + nt_S + (T_2 - x) + t_R \sum_{j=1}^{n} \left\{ Q_j - \frac{p(1-p^{Q_j})}{q} \right\}$$

(b) *Δεδομένου του n, η βέλτιστη πολιτική αναθεώρησης μπορεί να καθοριστεί με την επίλυση του ακόλουθου προγράμματος βελτιστοποίησης (που είναι κυρτό αν οι περίοδοι αναθεώρησης επιτρέπεται να είναι συνεχείς μεταβλητές): Εύρεση του* $x \geq 0$ *και* $Q_i \geq 0$ *για* $1 \leq i \leq n$ *για την*

$$\textit{ελαχιστοποίηση της } -x + t_R \sum_{j=1}^{n} \left(Q_j - \frac{p(1-p^{Q_j})}{q} \right),$$

$$\textit{υπό τους όρους } \sum_{j=1}^{n} Q_j = T_1 ,$$

$$x \leq a \sum_{j=1}^{i-1} Q_j + \sum_{j=i+1}^{n} Q_j , \qquad 1 \leq i \leq n$$

(c) *Εάν οι περίοδοι αναθεώρησης επιτρέπεται να είναι συνεχείς μεταβλητές, και* qQ_i *είναι μικρό για κάθε i, τότε μια πρώτης τάξεως προσέγγιση (first order approximation) της αντικειμενικής συνάρτησης είναι*

$$-x + \frac{qt_R}{2} \sum_{j=1}^{n} Q_j^2$$

και το προκύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα κυρτό τετραγωνικό πρόγραμμα. (απόδειξη: βλ. παράρτημα 5.3)

Οι πρώτοι δύο όροι στο (a) είναι προφανείς. Ο τρίτος όρος είναι το ποσό εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που παραμένει αφότου διεξαχθεί η τελευταία αναθεώρηση προόδου. Ο τέταρτος όρος είναι ο αναμενόμενος χρόνος επανασχεδιασμού.

ΘΕΩΡΗΜΑ 2. *Υποθέτουμε ότι το n είναι δεδομένο και οι περίοδοι αναθεώρησης επιτρέπεται να είναι συνεχείς μεταβλητές στην αναζήτηση μιας βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του λήμματος 1 (b)*

(a) *(Παράλληλη ανάπτυξη μόνο) Εάν q = 0, η βέλτιστη λύση έχει την ακόλουθη μορφή:*

$$Q_i = a^{i-1}Q_1, \quad 1 \le i \le n, \quad \kappa\alpha\iota \quad Q_1 = \frac{a-1}{a^n - 1}T_1$$

(b) *(Έλεγχος ποιότητας μόνο) Εάν* $T_2 = 0$, *τότε οι βέλτιστες περίοδοι αναθεώρησης είναι ίσες.*

(c) *Εάν α > 1, τότε υπάρχει* $k \in \{1,2,\ldots,n\}$, *έτσι ώστε η βέλτιστη λύση έχει τη μορφή:*

$$Q_i = \begin{cases} a^{i-1}Q_1 & \gamma\iota\alpha \quad 1 \le i \le k \\ Q_n & \gamma\iota\alpha \quad k+1 \le i \le n \end{cases}$$

$$\kappa\alpha\iota \qquad a^{k-1}Q_1 \le Q_n \le a^k Q_1$$

(d) *Εάν a<1 τότε ορίζεται* $\beta := 1/a$. *Υπάρχει* $k \in \{1,2,\ldots,n\}$ *έτσι ώστε η βέλτιστη λύση έχει τη μορφή*

$$Q_i = \begin{cases} Q_1 & \gamma\iota\alpha \quad 1 \le i \le n-k \\ \beta^{n-i}Q_n & \gamma\iota\alpha \quad n-k+1 \le i \le n \end{cases}$$

$$\kappa\alpha\iota \qquad \beta^{k-1}Q_n \le Q_1 \le \beta^k Q_n$$

(e) *Εάν α = 1, τότε οι βέλτιστες περίοδοι αναθεώρησης είναι ίσοι.* (απόδειξη: βλ. παράρτημα 5.4)

Το μέρος (b) δείχνει ότι ένα πρόγραμμα που δεν απαιτεί κανέναν χρόνο σχεδιασμού πρέπει να τοποθετήσει κατά διαστήματα τις αναθεωρήσεις ανά ίσα χρονικά διαστήματα στην εργασία σχεδιασμού προϊόντων.

Θεωρούμε ένα πρόγραμμα *εντατικής διαδικασίας (process intensive)*, ένα στο οποίο το T_2 είναι μεγαλύτερο από το T_1, (α>1): Το (a) λέει εάν δεν υπάρχει καμία πιθανότητα οποιοσδήποτε επανασχεδιασμός να απαιτηθεί, είναι σημαντικό να γίνει η

πρώτη αναθεώρηση σχετικά γρήγορα για να επιβάλλει στους σχεδιαστές διαδικασίας να αρχίσουν την εργασία. Κάθε επόμενη αναθεώρηση μπορεί να είναι αναλογικά μεγαλύτερη χωρίς να στερήσει τους σχεδιαστές διαδικασίας από παραγωγική εργασία. Εάν είναι δυνατός ο επανασχεδιασμός ($q > 0$), τότε το (c) λέει ότι οι περίοδοι αναθεώρησης πρέπει να αυξηθούν γεωμετρικά μέχρι ένα ορισμένο σημείο και να γίνουν έπειτα ίσες.

Τώρα θεωρούμε ένα πρόγραμμα *εντατικού προϊόντος (product intensive)*, ένα στο οποίο το T_2 είναι μικρότερο από το T_1, ($\alpha<1$): Το (d) λέει ότι οι περίοδοι αναθεώρησης πρέπει να ξεκινούν ίσες, και να μειώνονται γεωμετρικά στο τέλος. Εάν δεν υπάρχει καμία πιθανότητα οποιοσδήποτε επανασχεδιασμός να απαιτηθεί, τότε το (a) λέει ότι οι περίοδοι αναθεώρησης πρέπει να μειωθούν γεωμετρικά σε όλη τη φάση σχεδιασμού προϊόντων. Κάθε επόμενη περίοδος αναθεώρησης μπορεί να είναι αναλογικά μικρότερη χωρίς τη δημιουργία μιας συγκέντρωσης της εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας. Είναι σημαντικό να γίνει η δεύτερη ως και την τελευταία αναθεώρηση σχετικά κοντά στο τέλος της φάσης σχεδιασμού προϊόντος έτσι ώστε ένα μεγάλο μέρος της εργασία σχεδιασμού διαδικασίας να ολοκληρωθεί ώσπου να ολοκληρωθεί η εργασία σχεδιασμού προϊόντος.

Το ακόλουθο θεώρημα παρέχει μια σαφή βέλτιστη λύση στο τετραγωνικό πρόγραμμα του λήμματος 1 (c), το οποίο παίρνει το n δεδομένο.

ΘΕΩΡΗΜΑ 3. *Για α>1, ορίζεται*

$$r_n^k(a) := \begin{cases} +\infty & \text{εάν} \quad k=0, \\ \dfrac{(a+1)}{(a^k-1)(a^{k+1}-1)}[(a^k-1)+(n-k)(a-1)a^k] & \text{εάν} \quad 1 \le k \le n-1 \\ 0 & \text{εάν} \quad k=n \end{cases}$$

(a) Το $r_n^k(a)$ μειώνεται στο k.

Εάν το n δίνεται, τότε η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του λήμματος 1 (c) είναι η ακόλουθη.

(b) Εάν α>1 και το k ικανοποιεί το $r_n^k(a) \le T_1 q t_R < r_n^{k-1}(a)$, τότε:

$$Q_i = \begin{cases} a^{i-1}Q_1 & \text{για} \quad 1 \le i \le k \\ Q_n & \text{για} \quad k+1 \le i \le n \end{cases},$$

$$Q_1 = \left[T_1 - \frac{(n-k)(a-1)}{(a^k-1)qt_R} \right] \Bigg/ \left[\frac{a^k-1}{a-1} + \frac{(n-k)(a^k+1)}{a+1} \right] \quad \textit{και}$$

$$Q_n = \begin{cases} \dfrac{(a^k+1)}{a+1} Q_1 + \dfrac{a-1}{(a^k-1)qt_R} & \textit{εάν} \quad 1 \le k \le n-1, \\ a^{n-1} Q_1 & \textit{εάν} \quad k = n \end{cases}$$

(c) Εάν α<1 τότε ορίζεται β:=1/α. Εάν το k ικανοποιεί το $r_n^k(\beta) \le \beta T_1 qt_R < r_n^{k-1}(\beta)$, *τότε:*

$$Q_i = \begin{cases} Q_1 & \textit{για} \quad 1 \le i \le n-k \\ \beta^{n-i} Q_n & \textit{για} \quad n-k+1 \le i \le n \end{cases},$$

$$Q_n = \left[T_1 - \frac{(n-k)(1-a)}{(\beta^k-1)qt_R} \right] \Bigg/ \left[\frac{\beta^k-1}{\beta-1} + \frac{(n-k)(\beta^k+1)}{\beta+1} \right] \quad \textit{και}$$

$$Q_1 = \begin{cases} \dfrac{(\beta^k+1)}{\beta+1} Q_n + \dfrac{1-a}{(\beta^k-1)qt_R} & \textit{εάν} \quad 2 \le k \le n, \\ \beta^{n-1} Q_n & \textit{εάν} \quad k = 1 \end{cases}$$.(απόδειξη: βλ. παράρτημα 5.5)

Η ποσότητα $T_1 qt_R$ έχει έναν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό του πότε η βέλτιστη πολιτική εναλλάσσεται μεταξύ μιας γεωμετρικής ακολουθίας αναθεωρήσεων και κατανεμημένων σε ίσα διαστήματα αναθεωρήσεων. Είναι ένα μέτρο σπουδαιότητας του οφέλους ελέγχου ποιότητας: $T_1 qt_R / 2$ είναι ο (κατά προσέγγιση) αναμενόμενος συνολικός χρόνος επανασχεδιασμού προγράμματος εάν πραγματοποιείται καθημερινά μια αναθεώρηση. Για ένα εντατικό πρόγραμμα διαδικασίας, εάν αυτό το μέτρο είναι αρκετά μικρό, τότε $T_1 qt_R < r_n^{n-1}(a)$, η βέλτιστη λύση διαμορφώνει μια γεωμετρικά αυξανόμενη ακολουθία, και το όφελος παράλληλης ανάπτυξης επικρατεί της λύσης. Όσο το μέτρο αυξάνεται, το στάδιο αποκοπής k μειώνεται, έτσι η μετάβαση σε περιόδους αναθεώρησης ίσου χρόνου εμφανίζεται πιο σύντομα. Αν το μέτρο είναι αρκετά μεγάλο, τότε $T_1 qt_R \ge r_n^1(a)$, οι βέλτιστες περίοδοι αναθεώρησης είναι ίσες, και το όφελος ελέγχου ποιότητας υπερισχύει. Ανάλογα σχόλια ισχύουν για ένα εντατικό πρόγραμμα προϊόντων.

Το Θεώρημα 2 (d) δείχνει ότι εάν και οι δύο σχεδιασμοί απαιτούν το ίδιο χρονικό διάστημα να ολοκληρωθούν, τότε οι βέλτιστες περίοδοι αναθεώρησης είναι ίσες. Το επόμενο θεώρημα δείχνει ότι είναι δυνατό να ληφθεί μια σαφής (περίπου) βέλτιστη λύση του προβλήματος εάν υποτεθεί ότι οι περίοδοι αναθεώρησης είναι ίσες.

ΘΕΩΡΗΜΑ 4. *Υποθέτουμε ότι μια αναθεώρηση προόδου διεξάγεται κάθε Q ημέρες εργασίας σχεδιασμού προϊόντος και ότι ο αριθμός αναθεωρήσεων, T_1 /Q, είναι ένας ακέραιος αριθμός.*

(a) *Ο αναμενόμενος χρόνος ολοκλήρωσης προγράμματος είναι*

$$\max(T_1, T_2) + \theta Q + \frac{T_1 t_S}{Q} + t_R T_1 - \frac{t_R T_1 p(1 - p^Q)}{qQ},$$

όπου $\theta := \min(T_2 / T_1, 1)$

(b) *Εάν qQ είναι μικρό, τότε μιας πρώτης τάξεως προσέγγιση του αναμενόμενου χρόνου ολοκλήρωσης του προγράμματος είναι*

$$\max(T_1, T_2) + \theta Q + \frac{T_1 t_S}{Q} + \frac{T_1 q t_R Q}{2}$$

και εάν ο αριθμός αναθεωρήσεων επιτρέπεται να είναι μια συνεχής μεταβλητή, τότε η (περίπου) βέλτιστη περίοδος αναθεώρησης δίνεται από

$$Q^* = \sqrt{\frac{T_1 t_S}{\theta + T_1 q t_R / 2}}.$$ (απόδειξη: βλ. παράρτημα 5.6)

Εδώ αντί του συνόλου του κόστους οργάνωσης (setup) (ανά ημέρα) συν ένα ανάλογο κόστος διεξαγωγής, έχουμε έναν χρόνο οργάνωσης (setup) (ανά πρόγραμμα) και ένα ανάλογο χρόνο ποινής ή επιβάρυνσης: Κάθε ημέρα της περιόδου αναθεώρησης προσθέτει θ ημέρες χαμένου χρόνου παράλληλου σχεδιασμού διαδικασίας και $T_1 q t_R / 2$ μέρες χρόνου επανασχεδιασμού, στο χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος.

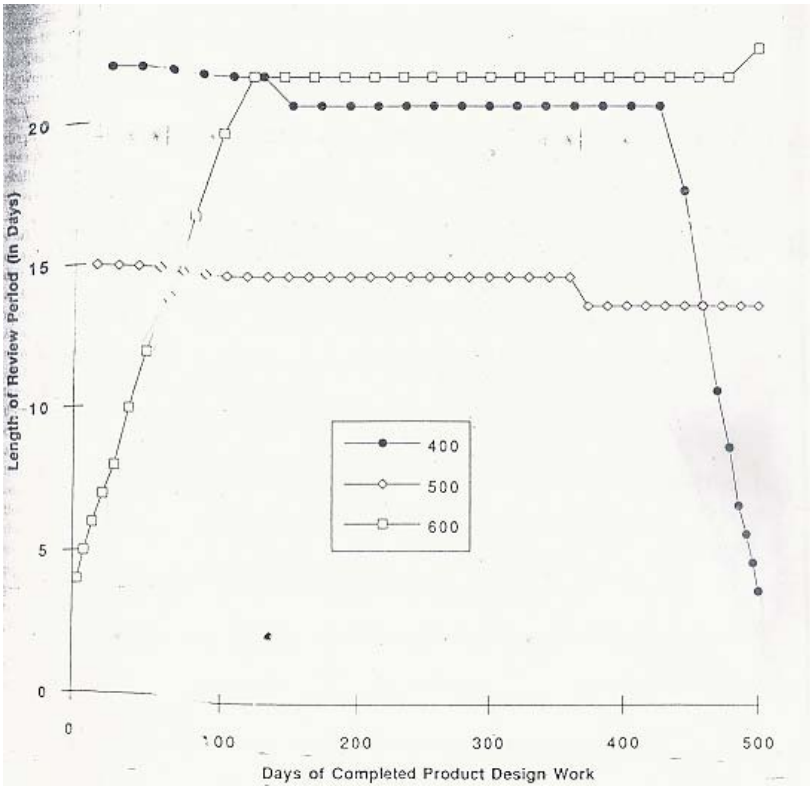
Το Θεώρημα 2 δείχνει ότι όταν υπερισχύει το όφελος ελέγχου ποιότητας της λύσης, οι περίοδοι αναθεώρησης είναι ίσες. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, μπορούμε να υποθέσουμε ότι $\theta = 0$, και το θεώρημα 4 (b) δείχνει ότι η βέλτιστη περίοδος αναθεώρησης είναι (περίπου) διάρκειας $\sqrt{2t_S / qt_R}$, το οποίο είναι ένας απλός οδηγός για το πώς οι περίοδοι αναθεώρησης πρέπει να μεταβάλλονται

μέσα στο διάστημα όπως μεταβάλλονται οι σχετικές με την ποιότητα παράμετροι, t_S, q και t_R. Για παράδειγμα, εάν το q μειωθεί στο ένα τέταρτο της προηγούμενής του τιμής και τα t_S και t_R δεν αλλάξουν, τότε ο τύπος δείχνει ότι οι περίοδοι αναθεώρησης θα διπλασιαστούν σε διάρκεια.

5.4 Αριθμητικό παράδειγμα

Παρουσιάζονται κάποια αριθμητικά παραδείγματα για την κατανόηση της βέλτιστης πολιτικής γενικά . Αρχίζουμε με ένα σταθερό πρόγραμμα που απαιτεί 500 ημέρες χρόνο σχεδιασμού προϊόντος. Ο χρόνος οργάνωσης είναι μια ημέρα, η μισή από οποιαδήποτε εργασία σχεδιασμού προϊόντος που έχει ολοκληρωθεί πρέπει να ξαναγίνει όταν ένα σφάλμα εμφανιστεί, και ένα σφάλμα εμφανίζεται κατά μέσο όρο μία φορά κάθε εκατό παραγωγικές ημέρες σχεδιασμού προϊόντος: $T_1 = 500$, $t_S = 1$, $t_R = 0.5$ και $q= 0.01$,

Το Σχήμα 5.1 παρουσιάζει τη βέλτιστη πολιτική αναθεώρησης για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές του σχεδιασμού διαδικασίας: $T_2 = 400$, $T_2 = 500$ και $T_2 = 600$. Κάθε σημείο (x, y) που σχεδιάζεται σημαίνει ότι μετά από x ημέρες της παραγωγικής εργασίας σχεδιασμού προϊόντος που έχουν ολοκληρωθεί, διεξάγεται μια αναθεώρηση, y ημέρες από την τελευταία αναθεώρηση. Για παράδειγμα, όταν $T_2 = 400$, υπάρχει ένα σημείο (153, 21), το οποίο σημαίνει ότι την ημέρα 153 πραγματοποιείται μια αναθεώρηση μετά από 21 αλλεπάλληλες χωρίς αναθεώρηση ημέρες εργασίας σχεδιασμού προϊόντος. Το Σχήμα 5.1 επιβεβαιώνει ότι είναι βέλτιστο να ξεκινήσει κανείς με μια σταθερή περίοδο αναθεώρησης και να αλλάξει σε μια φθίνουσα γεωμετρική ακολουθία για την εντατική περίπτωση προϊόντος ($T_2 = 400$), να ξεκινήσει κανείς με μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία και να αλλάξει σε μια σταθερή περίοδο αναθεώρησης για την εντατική περίπτωση διαδικασίας ($T_2 = 600$), και να έχουν ουσιαστικά ίσες περιόδους αναθεωρήσεων όταν $T_2=T_1$. (Οι αριθμητικές αποκλίσεις από τη βέλτιστη μορφή προκύπτουν επειδή όταν λύθηκαν τα παραδείγματα αριθμητικά χρησιμοποιώντας δυναμικό προγραμματισμό, απαιτήθηκε όλες οι περίοδοι αναθεώρησης k να είναι ακέραιοι αριθμοί.)



Σχήμα 5 1: Περίοδοι Αναθεώρησης για Σταθερά Παραδείγματα

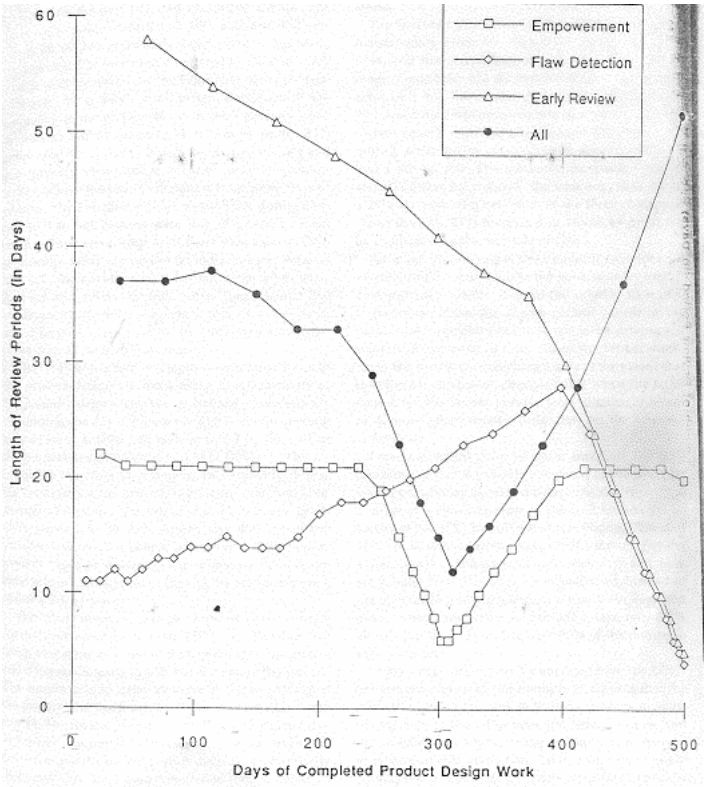
Αυτό το παράδειγμα προτείνει ότι δραματική μείωση του χρόνου μπορεί να εξοικονομηθεί από την παράλληλη μηχανική, έναντι της «πάνω από τον τοίχο» προσέγγισης. Για παράδειγμα, όταν T_2= 400 (έτσι α =T_2/T_1=400/500=0.8) η «πάνω από τον τοίχο» προσέγγιση διαρκεί 500 ημέρες για την εργασία σχεδιασμού προϊόντος, μια ημέρα για την οργάνωση της αναθεώρησης, 204 πρόσθετες αναμενόμενες ημέρες του χρόνου επανασχεδιασμού, και 400 ημέρες για το σχεδιασμό διαδικασίας, ένα σύνολο 1102 ημερών, το οποίο είναι περίπου τέσσερα έτη εργάσιμων ημερών. Η βέλτιστη πολιτική διαρκεί 556 ημέρες, που είναι ο μισός χρόνος, και είναι μόνο 56 ημέρες περισσότερο από τον χρόνο που απαιτείται μόνο για το σχεδιασμό προϊόντων. Από αυτές οι 56 μέρες είναι για προετοιμασίες, οι 24 για επανασχεδιασμούς και 4 για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού διαδικασίας. Μια αναθεώρηση γίνεται κάθε 22 ημέρες μέχρι την ημέρα 426, οπότε η περίοδος αρχίζει να μειώνεται γεωμετρικά, καταλήγοντας στις 4 ημέρες.

Η βέλτιστη περίοδος αναθεώρησης βασισμένη απλώς στο όφελος ελέγχου ποιότητας μπορεί να προσεγγιστεί θέτοντας θ = 0 στο Θεώρημα 4, το οποίο παράγει μια περίοδο 20 ημερών. Εάν η ακριβής αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται, η βέλτιστη

περίοδος αναθεώρησης είναι περίπου 21.5 ημέρες. Δεν υπάρχει κανένας λόγος αναμονής περισσότερο από 21.5 ημέρες μεταξύ των αναθεωρήσεων, δεδομένου ότι το όφελος ελέγχου ποιότητας δικαιολογεί μικρή χρονική περίοδο.

Μόλις ξεκινήσουν οι σχεδιαστές διαδικασίας την εργασία, μπορούν να παραμείνουν δεσμευμένοι στο πρόγραμμα έως ότου ολοκληρωθεί. Εάν $T_2>T_1$, δεν είναι απαραίτητη καμία ρύθμιση. Εάν $T_2\leq T_1$, τότε εάν η εργασία σχεδιασμού διαδικασίας ξεκινήσει αμέσως μετά από οποιαδήποτε από τις πρόωρες αναθεωρήσεις, οι σχεδιαστές διαδικασίας θα μείνουν χωρίς απασχόληση προτού να πραγματοποιηθεί η επόμενη αναθεώρηση. Εντούτοις, είναι δυνατό να καθυστερηθεί η έναρξη της εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας έτσι ώστε μόλις ξεκινήσει αυτή η εργασία, οι σχεδιαστές διαδικασίας να αναπτυχθούν πλήρως στο πρόγραμμα. Κατά τη διάρκεια της πρόωρης αναθεώρησης οι σχεδιαστές διαδικασίας πρέπει να δεσμευθούν στις αναθεωρήσεις προόδου, αλλά δεν αρχίζουν την εργασία σχεδιασμού διαδικασίας έως ότου υπάρχει υπόλοιπο ακόμα T_2 περισσότερες ημέρες του σχεδιασμού προϊόντος.

Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει τις βέλτιστες πολιτικές για τέσσερα μη σταθερά παραδείγματα. Τα πρώτα τρία παραδείγματα κάνουν μια αλλαγή στο σταθερό πρόγραμμα, και το τέταρτο κάνει και τις τρεις αλλαγές.



Σχήμα 5 2: Περίοδοι Αναθεώρησης για μη Σταθερά Παραδείγματα

Το παράδειγμα υποθέτει ότι καμία παραγωγική εργασία σχεδιασμού διαδικασίας δεν μπορεί να επιβάλλεται από τις αναθεωρήσεις στις πρώτες 100 ημέρες της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος, και σταδιακά περισσότερο επιτρέπεται καθώς περισσότερη εργασία σχεδιασμού προϊόντος ολοκληρώνεται. Τα ποσοστά επιβολής είναι 0 για τις πρώτες 100 ημέρες της παραγωγικής εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας, 0.4 για κάθε μια από τις επόμενες 100 ημέρες, 0.8 για τις επόμενες 100 ημέρες, 1.2 για τις επόμενες 100, και 1.6 για τις τελευταίες 100. Για παράδειγμα, οι αναθεωρήσεις τις ημέρες 150, 200, 400 και 450 επιβάλλουν 20, 40, 240 και 320 ημέρες της εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας, αντίστοιχα. Το θέμα, έναντι της σταθερής περίπτωσης, είναι να καθυστερήσουν οι αναθεωρήσεις στην αρχή του προγράμματος. Εντούτοις, το όφελος ελέγχου ποιότητας υπερισχύει στην αρχή του προγράμματος, έτσι, όπως στη σταθερή περίπτωση, οι αναθεωρήσεις διεξάγονται κάθε 21 έως 22 ημέρες. Την ημέρα 232, το όφελος παράλληλης ανάπτυξης αρχίζει να υπερισχύει και οι βέλτιστες περίοδοι αναθεώρησης αρχίζουν να μειώνονται γεωμετρικά, για να κρατήσουν τους σχεδιαστές διαδικασίας από την μη ύπαρξη εργασίας. Αυτό το όφελος συνεχίζει να υπερισχύει κατά τη διάρκεια των ημερών 300 έως 400, αλλά επειδή κάθε ημέρα της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος σε αυτό το διάστημα επιβάλλει περισσότερες από μια ημέρα εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας, η περίοδος αναθεώρησης αυξάνει. Γύρω στην ημέρα 400, το όφελος ελέγχου ποιότητας αναλαμβάνει πάλι, οι εμφανίζονται πάλι σταθερές περίοδοι αναθεώρησης. Ο ελάχιστος (αναμενόμενος) χρόνος ολοκλήρωσης είναι 638.6 ημέρες, περίπου 83 ημέρες περισσότερο από ότι στη σταθερή περίπτωση επιβολής, αύξηση περίπου 15%.

Το παράδειγμα «Ανακάλυψης Σφάλματος» υποθέτει ότι τα σφάλματα στο σχεδιασμό προϊόντος είναι πιθανότερο να εμφανιστούν νωρίς στην εργασία σχεδιασμού προϊόντος. Η πιθανότητα επιτυχούς διεξαγωγής μιας ημέρας σχεδιασμού προϊόντος (χωρίς δημιουργία ενός σφάλματος) ξεκινά από 0.96 και καταλήγει σε 0.999 στο τέλος της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος: $p_i = 0.96\ (1.008)^{0.01i}$. Το κίνητρο επομένως είναι να γίνονται συχνότερες αναθεωρήσεις στην αρχή του προγράμματος, και το Σχήμα 5.2 επιβεβαιώνει αυτήν την σκέψη. Οι περίοδοι αναθεώρησης ξεκινούν από 11 ημέρες και βαθμιαία αυξάνονται σε 28 ημέρες γύρω στην ημέρα 400, όταν αναλαμβάνει το όφελος παράλληλης ανάπτυξης και οι περίοδοι αναθεώρησης αρχίζουν να μειώνονται. Ο ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης είναι περίπου 23 ημέρες περισσότερο από ότι στη σταθερή περίπτωση, αύξηση περίπου 4%.

Το παράδειγμα «Πρώιμη Αναθεώρηση» επιβάλλει ένα χρόνο ποινής για τις πρόωρες αναθεωρήσεις: $t_k^S = t_k + 0.01(500 - k)$. Ο αποτελεσματικός χρόνος οργάνωσης αρχίζει από 6 ημέρες στην αρχή του προγράμματος και μειώνεται γραμμικά σε 1 ημέρα στο τέλος του προγράμματος. Το θέμα είναι να καθυστερήσουν οι αναθεωρήσεις στην αρχή του προγράμματος, και η πρώτη αναθεώρηση δεν πραγματοποιείται μέχρι την ημέρα 58. Οι περίοδοι αναθεώρησης βαθμιαία μειώνονται μέχρι την ημέρα 371 όταν αρχίζει να υπερισχύει το όφελος παράλληλης ανάπτυξης και από τότε οι περίοδοι αναθεώρησης μειώνονται γεωμετρικά. Ο ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης είναι περίπου 35 ημέρες περισσότερο από ότι στη σταθερή περίπτωση, αύξηση περίπου 6%.

Το τελικό παράδειγμα περιλαμβάνει όλες τις αλλαγές των τριών μη σταθερών παραδειγμάτων. Υπάρχουν συγκρουόμενα κίνητρα, και οι περίοδοι αναθεώρησης αρχίζουν στο διάστημα 36-38. Γύρω στην ημέρα 214 το όφελος παράλληλης ανάπτυξης αναλαμβάνει και οι περίοδοι αναθεώρησης μειώνονται μετά από την ημέρα 300, όταν αυξάνεται το ποσοστό επιβολής σε 1.2. Οι περίοδοι αναθεώρησης αυξάνονται έπειτα έως το τέλος του προγράμματος, καθώς το όφελος ελέγχου ποιότητας δεν έχει ξανά υπερισχύοντα ρόλο. Ο ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης είναι περίπου 161 ημέρες περισσότερο από ότι στη σταθερή περίπτωση, δηλαδή μια αύξηση 29%. Η τελική επίδραση των τριών αλλαγών είναι χειρότερη από την αύξηση 27% που θα προβλεπόταν με τη σύνθεση των χωριστών αποτελεσμάτων.

Αν και η ανάλυση της σταθερής περίπτωσης δεν αποκαλύπτει τη βέλτιστη λύση στη μη στατική περίπτωση, βοηθάει στην κατανόηση της ληφθείσας λύσης. Ειδικότερα, είτε το όφελος ελέγχου ποιότητας είτε το όφελος παράλληλης ανάπτυξης είναι ικανά να οδηγήσουν τη λύση σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο. Όταν το πρώτο υπερισχύει, οι περίοδοι αναθεώρησης αλλάζουν στο βαθμό που οι σχετικές παράμετροι αλλάζουν, ενώ όταν το δεύτερο υπερισχύει, οι περίοδοι αναθεώρησης τείνουν είτε να αυξηθούν ή να μειωθούν γεωμετρικά, ανάλογα με το ποσοστό επιβολής.

Από πρακτική άποψη, ένα μεγάλο μέρος συμπίεσης του χρόνου μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή ενός μικρού αριθμού αναθεωρήσεων, λόγω του ότι η αντικειμενική συνάρτηση (του Θεωρήματος 4 (b)) δεν επηρεάζεται από τις αποκλίσεις από τη βέλτιστη λύση. Για παράδειγμα, εάν στο σταθερό παράδειγμα με $T_2 = 400$, γίνονταν μόνο δέκα ίσων διαστημάτων αναθεωρήσεις, αντί των βέλτιστων 28 ανομοιόμορφων

διαστημάτων αναθεωρήσεων, ο αναμενόμενος χρόνος ολοκλήρωσης του προγράμματος θα ήταν 604.5 μέρες, μόνο 8,7% πάνω από το βέλτιστο.

Άλλες χρήσιμες ιδέες μπορούν να ληφθούν από την αντικειμενική συνάρτηση. Για παράδειγμα, προτείνει ότι ο ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης του προγράμματος είναι μια κοίλη αύξουσα συνάρτηση του χρόνου οργάνωσης (setup), των ποσοστών επανασχεδιασμού, και της πιθανότητας να προκύψει σφάλμα. Κατά συνέπεια, κάθε πρόσθετη μικρή μείωση οποιασδήποτε από αυτές τις παραμέτρους θα έχει ένα μεγαλύτερο όφελος στο χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος από οποιαδήποτε προηγούμενη μείωση του ίδιου μεγέθους. Εντούτοις, οδηγώντας μια από τις παραμέτρους στο μηδέν δεν θα οδηγήσει το χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος στο μηδέν. Για παράδειγμα, εάν το q μπορεί να οδηγηθεί στο μηδέν, οπότε δεν προκύπτει ποτέ κανένα σφάλμα, τότε ο χρόνος ολοκλήρωσης του προγράμματος που προβλέπεται θα είναι $\max(T_1, T_2) + 2\sqrt{T_1 t_S \theta}$.

5.5 Συμπεράσματα

Το μοντέλο της παράλληλης μηχανικής που παρουσιάστηκε είναι σκόπιμα απλουστευμένο, έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν οι χρήσιμες ιδέες. Αυτό που αποτελεί ένα σφάλμα και απαιτεί επανασχεδιασμό είναι, στην πραγματικότητα, μια ενδογενής απόφαση, παρά κάτι που προέρχεται από ένα υποτιθέμενο κανόνα που έχει καθοριστεί. Υπάρχει μια ανταλλαγή μεταξύ του συμπληρωματικού χρόνου και του κόστους του επανασχεδιασμού και των προσδοκώμενων οφελών του. Οι επιθυμητές τιμές των ιδιοτήτων του προϊόντος δεν μπορούν να καθοριστούν εκ των προτέρων. Το εάν η ιδέα σχεδιασμού μπορεί να πραγματοποιηθεί μπορεί να είναι ένα θέμα. Μια σημαντική λειτουργία μιας αναθεώρησης προόδου, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, είναι να καθοριστεί εάν θα συνεχιστεί το πρόγραμμα.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους το μοντέλο μπορεί να γίνει ρεαλιστικότερο. Οι σχεδιαστές διαδικασίας μπορούν να υποδείξουν τα ελαττώματα, και μπορεί επίσης να είναι χρήσιμο για τους σχεδιαστές προϊόντος να αναθεωρούν την πρόοδο των σχεδιαστών διαδικασίας. Θα ήταν χρήσιμο να μεγιστοποιηθεί η αναμενόμενη παρούσα αξία των εσόδων με λιγότερες δαπάνες που συνδέονται με ένα πρόγραμμα σχεδιασμού νέου προϊόντος, παρά απλά να ελαχιστοποιηθεί ο αναμενόμενος χρόνος ολοκλήρωσης του προγράμματος. Με αυτό επιτρέπεται η εκτίμηση των συμπληρωματικών δαπανών που συνδέονται με τη συμπίεση του προγράμματος. Οι

αναθεωρήσεις προόδου μπορούν να μην εντοπίσουν τα ελαττώματα απόλυτα. Νέα ελαττώματα μπορεί να εμφανιστούν σε μια παλαιά εργασία που έχει ελεγχθεί. Ο χρόνος επανασχεδιασμού εξαρτάται από τη σοβαρότητα του σφάλματος στο σχεδιασμό προϊόντος. Οι σχεδιαστές προϊόντων μπορούν να εντοπίσουν και να διορθώσουν τα ελαττώματα τους αργότερα χωρίς αναθεώρηση. Οι απαραίτητοι χρόνοι σχεδιασμού είναι απίθανο να υπολογιστούν με βεβαιότητα εκ των προτέρων. Υπάρχουν συνήθως περισσότερες από δύο ομάδες σχεδιασμού. Ο Black et al (1990) επισημαίνει ότι συνήθως υπάρχουν ενεργά διάφορα προγράμματα συγχρόνως ανάπτυξης προϊόντων, καθένα από τα οποία ανταγωνίζεται τα υπόλοιπα για το διαθέσιμο χρόνο των σχεδιαστών. Ο χρόνος που δαπανείται για μια αναθεώρηση προόδου για ένα πρόγραμμα προκαλεί αναπόφευκτα την καθυστέρηση σε άλλα προγράμματα. Οι σχεδιαστές διαδικασίας μπορούν πιθανώς να κάνουν δική τους εργασία κατά τη διάρκεια του επανασχεδιασμού προϊόντος.

Το μόνο μειονέκτημα μιας αναθεώρησης στο μοντέλο είναι ο χρόνος οργάνωσης/ ποινής. Ακόμα κι αν αυτός ο χρόνος αποτελείται μόνο από το συνηθισμένο χρόνο οργάνωσης, για θέματα όπως ο προγραμματισμός των συνεδριάσεων, η κατασκευή ενός πρωτοτύπου, η διάθεση πληροφοριών, και λοιπά, υπάρχουν ιδέες που αποκομίζονται. Ο χρόνος οργάνωσης εκφράζει την αποδοτικότητα της εταιρίας στον τομέα της επικοινωνίας και μεταφοράς πληροφοριών. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος οργάνωσης, τόσο περισσότερες αναθεωρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν, οπότε λιγότερος χρόνος επανασχεδιασμού θα απαιτηθεί, και το πρόγραμμα θα είναι συντομότερο. Με την τοποθέτηση των σχεδιαστικών ομάδων τη μια κοντά στην άλλη μπορεί να μειώσει το χρόνο οργάνωσης. Μπορεί να είναι δυνατό, χρησιμοποιώντας διατμηματική εκπαίδευση, να μειωθεί ο χρόνος οργάνωσης σχεδόν στο μηδέν, δεδομένου ότι οι ίδιοι άνθρωποι και σχεδιάζουν το προϊόν και τη διαδικασία.

Τα εργαλεία υπολογιστών, όπως το CAD, το CAM, ή/ και το CAE, αποφέρουν διάφορα οφέλη. Ο Henderson (1992) αναφέρει τη γρήγορη διαμόρφωση πρωτοτύπου (μείωση οργάνωσης) που είναι δυνατή χρησιμοποιώντας τα συστήματα CAD. Αυτά τα συστήματα μπορούν επίσης να μειώσουν το χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθούν τα διάφορα στάδια σχεδιασμού και να μειωθεί η πιθανότητα δημιουργίας σφάλματος. Το μοντέλο παρέχει έναν τρόπο να αξιολογηθούν αυτές οι ενδεχομένως ουσιαστικές επενδύσεις με τον υπολογισμό της μείωσης του χρόνου ανάπτυξης προϊόντων που μπορεί να προκύψει από τη χρήση τους.

Η καθιέρωση ίσης θέσης μεταξύ των δύο ομάδων σχεδιασμού μπορεί να βελτιώσει το σύστημα με τη βεβαίωση ότι η ομάδα σχεδιασμού προϊόντος (παραδοσιακά η ομάδα με την υψηλότερη θέση) θα αναγνωρίσει τα πλεονεκτήματα των αναθεωρήσεων, θα παρέχει τις πληροφορίες που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτρέψουν στους σχεδιαστές διαδικασίας να εργαστούν παράλληλα, και θα αντιληφθεί τα «σφάλματα» που προσδιορίζονται από τους σχεδιαστές διαδικασίας.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης του προγράμματος είναι σχεδόν ισοδύναμη με την ελαχιστοποίηση του διαστήματος για μια παρτίδα παραγωγής που πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία σε δύο διαδοχικούς σταθμούς εργασίας. Η περίοδος αναθεώρησης αντιστοιχεί στο μέγεθος παρτίδας επιθεώρησης/ μεταφοράς: αφότου επεξεργαστεί αυτός ο αριθμός στοιχείων στον upstream σταθμό, πραγματοποιείται μια επιθεώρηση, οδηγώντας σε πιθανή επανάληψη, και τα στοιχεία μεταφέρονται στον downstream σταθμό για περαιτέρω επεξεργασία. Η μόνη διαφορά είναι ότι το μοντέλο υποθέτει ότι και οι σχεδιαστές προϊόντων και διαδικασίας αφιερώνονται πλήρως στην αναθεώρηση προόδου, ενώ είναι πιθανό ότι τουλάχιστον ένας από τους σταθμούς εργασίας θα ήταν σε θέση να εκτελέσει άλλη εργασία κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης και επανάληψης.

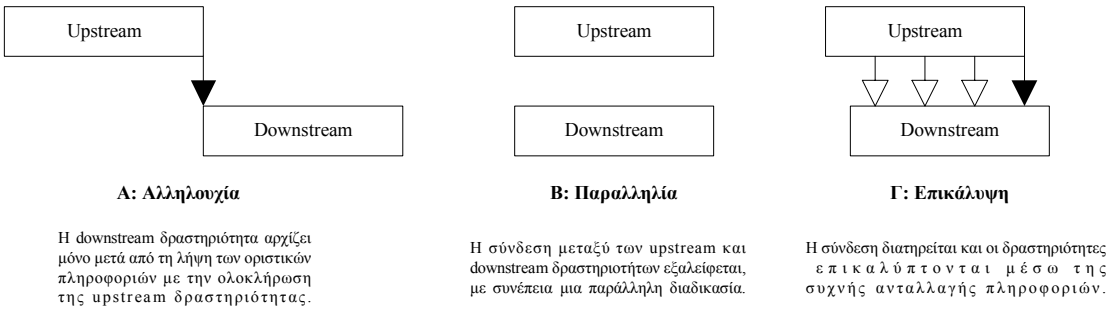
6 ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΤΑΔΙΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Οι μελέτες όσον αφορά τις δομές πολλών διαδικασιών ανάπτυξης βιομηχανικών προϊόντων δείχνουν ότι η ροή πληροφοριών και η διαδικασία εκτέλεσης στην πράξη είναι κατά ένα μεγάλο μέρος διαδοχική, με τις πληροφορίες να παράγονται και να οριστικοποιούνται από τις upstream δραστηριότητες πριν απορροφηθούν από τις downstream δραστηριότητες ανάπτυξης. Το Σχήμα 6.1Α επεξηγεί μια τέτοια διαδοχική διαδικασία όπου μια downstream δραστηριότητα (όπως η διαμόρφωση πρωτοτύπου) λαμβάνει και χρησιμοποιεί τις πληροφορίες σχεδιασμού μόνο αφού οριστικοποιηθούν από την upstream δραστηριότητα (όπως η ανάπτυξη ιδέας). Μια προσέγγιση για να επιταχυνθεί μια τέτοια διαδικασία προϋποθέτει την εξάλειψη της σύνδεσης μεταξύ των δραστηριοτήτων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1Β, με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στις δύο δραστηριότητες να εκτελεσθούν παράλληλα. Εντούτοις, τέτοια αποσύνδεση απαιτεί γενικά έναν βασικό επαναπροσδιορισμό των δραστηριοτήτων ανάπτυξης και /ή την αρχιτεκτονική προϊόντων, το οποίο μπορεί να είναι ανεπιθύμητο ή δύσκολο στην καλύτερη περίπτωση.

Μια εναλλακτική προσέγγιση όσον αφορά την επιτάχυνση είναι η επικάλυψη των δραστηριοτήτων μέσω της συχνότερης ανταλλαγής προκαταρκτικών πληροφοριών (Σχήμα 6.1C). Η επικάλυψη περιγράφεται ως μια «βασική τεχνική για τη μείωση του χρόνου υλοποίησης». Είναι γενικά παραδεκτό ότι η επικάλυψη καθηκόντων μειώνει το χρόνο υλοποίησης, αλλά μπορεί να έχει μεγαλύτερο κόστος από την παραδοσιακή διαδικασία αλληλουχίας. Σε αντίθεση με την μία φορά μεταφορά οριστικοποιημένων πληροφοριών σε μια διαδοχική διαδικασία, η συχνή ανταλλαγή πληροφοριών σχεδιασμού επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση των συνδεδεμένων δραστηριοτήτων σε μια διαδικασία επικάλυψης. Στη διαδοχική διαδικασία του σχήματος 6.1Α, η downstream δραστηριότητα δεν αρχίζει έως ότου είναι διαθέσιμες οι οριστικές πληροφορίες με την ολοκλήρωση της upstream δραστηριότητας. Στην διαδικασία επικάλυψης, η downstream δραστηριότητα αρχίζει νωρίτερα χρησιμοποιώντας προκαταρκτικές πληροφορίες (κενά τόξα). Δεδομένου ότι το upstream καθήκον εξελίσσεται, οι πληροφορίες παραγωγής του εξελίσσονται επίσης στην τελική τους μορφή ενώ γίνεται νέα μεταφορά των προκαταρκτικών πληροφοριών σύμφωνα με

την πολιτική επικοινωνίας της. Το downstream καθήκον μπορεί να επαναλάβει το μέρος της εργασίας του για να προσαρμόσει αυτές τις νέες πληροφορίες. Το ποσό αυτής της πρόσθετης εργασίας είναι μια συνάρτηση της επικάλυψης μεταξύ των σταδίων.



Σχήμα 6 1: Αλληλουχία, Παραλληλία και Επικάλυψη Διαδικασιών

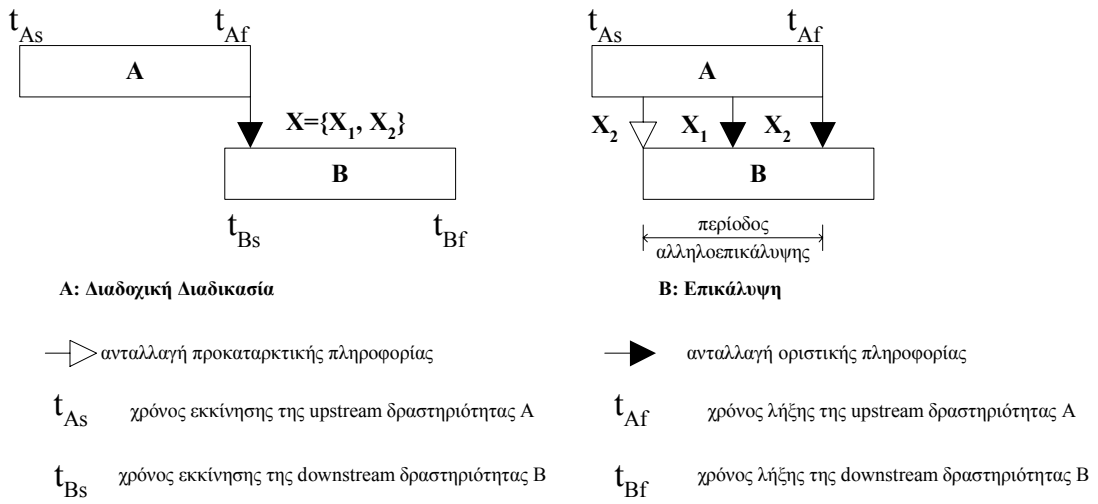
Προκειμένου να υπάρξει επικάλυψη στις ονομαστικά (nominally) διαδοχικές δραστηριότητες, πρέπει να τροποποιηθεί η μορφή ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ τους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, αυτό μπορεί να συνεπάγεται το διαχωρισμό των πληροφοριών X που ανταλλάσσονται στα μέρη X_1 και X_2, και την ανταλλαγή κάποιων μερών (όπως το X_2) πολλές φορές σε μια προκαταρκτική μορφή, και άλλων μερών (όπως το X_1) μόνο μία φορά αλλά σε μια οριστική μορφή κατά ή πριν την ολοκλήρωση της upstream δραστηριότητας. Προκύπτουν κάποια ερωτήματα όσον αφορά αυτή τη διαδικασία που είναι τα εξής:

1. Σε ποια βάση θα πρέπει πληροφορίες που ανταλλάσσονται να αποσυντίθενται σε μέρη όπως το X_1 και το X_2; Ποια μέρη πρέπει να χρησιμοποιούνται από την downstream δραστηριότητα μόνο σε οριστική μορφή, και ποια μέρη μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προκαταρκτική μορφή;
2. Πόσο νωρίς μπορούν μέρη όπως το X_1 να οριστικοποιηθούν και με ποιες συνέπειες; Κάτω από ποιες προϋποθέσεις μπορεί οι προκαταρκτικές πληροφορίες (όπως το X_2) να είναι χρήσιμες για την downstream ενέργεια;
3. Πώς επηρεάζεται η απόδοση ανάπτυξης προϊόντος, σε σχέση με το χρόνο υλοποίησης, το κόστος και την ποιότητα, από την επικάλυψη των δραστηριοτήτων και την τροποποίηση της μορφής ανταλλαγής πληροφοριών;

6.1.1 Οι κίνδυνοι της επικάλυψης

Ενώ ένα σημαντικό όφελος της επικάλυψης είναι η δυνατότητα μείωσης του χρόνου υλοποίησης ανάπτυξης προϊόντος, η μείωση του χρόνου υλοποίησης (ως προς τη διαδοχική διαδικασία) δεν είναι πάντα ίση με τη χρονική διάρκεια της επικάλυψης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2. Αυτό συμβαίνει επειδή η διάρκεια της downstream δραστηριότητας μπορεί να μεταβληθεί κατά τη μετατροπή της διαδοχικής διαδικασίας σε μια διαδικασία επικάλυψης. Όταν οι προκαταρκτικές upstream πληροφορίες χρησιμοποιούνται από την downstream δραστηριότητα πάρα πολύ νωρίς, τότε οι μελλοντικές αλλαγές πρέπει να ενσωματωθούν στις επόμενες χρονοβόρες επαναλήψεις, με συνέπεια *μια αύξηση στην downstream διάρκεια και προσπάθεια*. Από την άλλη πλευρά, όταν οριστικοποιούνται νωρίς τα μέρη των upstream παραγόμενων πληροφοριών, η upstream δραστηριότητα χάνει την ευελιξία να γίνουν μελλοντικές αλλαγές σε αυτές τις διαστάσεις. Αυτή η απώλεια ευελιξίας μπορεί να ερμηνευθεί ως *ποιοτική απώλεια* (QL) για την upstream δραστηριότητα. Οποιεσδήποτε προσπάθειες για επικάλυψη δραστηριοτήτων – με ανταλλαγή προκαταρκτικών πληροφοριών ή με οριστικοποίηση των upstream πληροφοριών νωρίς ή με συνδυασμό και των δύο – πρέπει να εξασφαλίζουν ότι οι αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των προϊόντων και στην προσπάθεια ανάπτυξης είναι ελάχιστες ενώ βελτιώνεται ο χρόνος υλοποίησης.

Τρεις είναι οι διαστάσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη: (i) ότι η επίπτωση της επικάλυψης στην απόδοση ανάπτυξης πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως βάση για το διαχωρισμό των πληροφοριών που ανταλλάσσονται (X στα μέρη X_1 και X_2), (ii) ότι η οριστικοποίηση των upstream πληροφοριών νωρίς μπορεί να προκαλέσει μια ποιοτική απώλεια, γι' αυτό πρόωρη οριστικοποίηση πρέπει να γίνεται μόνο σε εκείνα τα μέρη των οποίων η πρόωρη οριστικοποίηση θα προξενήσει πολύ μικρή ποιοτική απώλεια, και (iii) ότι η upstream πληροφορία (όπως η X_2) που ανταλλάσσεται σε μια προκαταρκτική μορφή πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε οι αλλαγές στο περιεχόμενό της μπορούν να απορροφηθούν χωρίς μια ουσιαστική αύξηση στην downstream προσπάθεια. Λαμβάνοντας υπόψη και αναλύοντας όλα αυτά εξασφαλίζεται η μείωση του χρόνου ανάπτυξης χωρίς σημαντική αρνητική επίπτωση στην ποιότητα των προϊόντων ή στην προσπάθεια ανάπτυξης.



Σχήμα 6 2: Μετατροπή μιας Διαδοχικής Διαδικασίας σε μια Διαδικασία Επικάλυψης

6.2 Σχετική Εργασία

Η επίδραση της επικάλυψης στην καινοτομία προϊόντων και τη μη εμπορική ανάπτυξη προϊόντων έχει ερευνηθεί από διάφορους ερευνητές, συμπεριλαμβανομένων των Mansfield et al. (1971) και Eastman (1980). Με βάση τις μελέτες τους, αυτοί οι ερευνητές παρατήρησαν ότι τα στάδια επικάλυψης οδήγησαν σε μια αύξηση του κόστους ανάπτυξης, το οποίο τονίζει την ανάγκη για προσεκτική επικάλυψη.

Στα πλαίσια βελτίωσης της εμπορικής απόδοσης ανάπτυξης προϊόντων, οι Imai, Takeuchi, and Nonaka (Imai et al. 1985, Takeuchi and Nonaka 1986) παρατήρησαν ότι οι πιο γρήγορες διαδικασίες ανάπτυξης χρησιμοποιούν μια προσέγγιση επικάλυψης. Παρομοίασαν τη διαδοχική διαδικασία με μια σκυταλοδρομία όπου μια ομάδα ειδικών περνά τη σκυτάλη στην επόμενη ομάδα, και τη προσέγγιση επικάλυψης με ένα παιχνίδι ράγκμπι στο οποίο η μπάλα προωθείται από την ομάδα, έτσι γίνεται και με την διατμηματική ομάδα. Οι ερευνητές (i) θεωρούν ότι όλες οι δραστηριότητες στη διαδικασία ανάπτυξης μπορούν να πραγματοποιηθούν παράλληλα, και (ii) δεν δείχνουν *πώς* μπορεί να γίνει επικάλυψη σε μια διαδοχική ή σταδιακή διαδικασία. Απαιτείται προσεκτική εκτίμηση για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος που συνδέεται με την επικάλυψη. Περαιτέρω, η τεχνική πολυπλοκότητα των προϊόντων που αναπτύσσονται επιβάλλει ορισμένες σχέσεις προτεραιότητας μεταξύ των δραστηριοτήτων ανάπτυξης λόγω του ότι δεν μπορούν να γίνουν παράλληλα όλες

οι δραστηριότητες. Για παράδειγμα, κάνοντας σημαντική δέσμευση πόρων για την ανάπτυξη των εργαλείων και εξαρτημάτων ενός αυτοκινήτου, ενώ η ιδέα του οχήματος είναι ακόμα υπό ανάπτυξη, μπορεί να προκαλέσει υπερβολική αύξηση του κόστους – αφού οι αλλαγές στην ιδέα μπορεί να προϋποθέτουν σημαντική επανάληψη. Η τεχνική δομή και η δύναμη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των καθηκόντων πρέπει να γίνουν καλά κατανοητά για την επιτυχή επικάλυψη των δραστηριοτήτων.

Σε μια συγκριτική μελέτη όσον αφορά πρακτικές ανάπτυξης προϊόντων στην παγκόσμια βιομηχανία αυτοκινήτων, οι Clark and Fujimoto (1987b) ανέπτυξαν ένα μέτρο που ονομάζεται «δείκτης επικάλυψης», και έδειξαν ότι στις γρηγορότερες διαδικασίες ανάπτυξης ο βαθμός επικάλυψης είναι μεγαλύτερος. Αναγνώρισαν επίσης τα εμπόδια στην πραγματοποίηση της επικάλυψης όπως το μη ευνοϊκό περιβάλλον, ανεπαρκής επικοινωνία, και έλλειψη συνέπειας και ισορροπίας (Clark and Fujimoto 1989). Για διευκόλυνση της επικάλυψης, σύστησαν τη συχνή, face-to-face, αμφίπλευρη επικοινωνία των αρχικών πληροφοριών αντί της καθυστερημένης διάθεσης ολοκληρωμένων πληροφοριών. (Clark and Fujimoto 1991).

Η προσεκτική εξέταση της ανάπτυξης βιομηχανικών προϊόντων υποδεικνύει ότι δεν είναι ίσες όλες οι ανταλλαγές πληροφοριών. Μερικοί τύποι πληροφοριών προϊόντων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευκολότερα με την αρχική μορφή τους από άλλους λόγω της μικρότερης επίδρασης τους στις downstream δραστηριότητες. Επίσης, κάποιες πληροφορίες προϊόντος μπορούν να οριστικοποιηθούν νωρίς, κάποιες πρέπει να οριστικοποιηθούν νωρίς και μερικές άλλες δεν μπορούν ή δεν πρέπει να οριστικοποιηθούν νωρίς.

Άλλοι ερευνητές, ειδικότερα οι Blackburn (1991) και Smith και Reinertsen (1991), έχουν αναγνωρίσει τα πλεονεκτήματα της επικάλυψης, αλλά δεν παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο η επικάλυψη μπορεί να εφαρμοστεί σε μια συνδεμένη, διαδοχική διαδικασία. Επιπλέον δεν έχουν εξεταστεί οι επιπτώσεις των αλληλεπιδράσεων σχεδιασμού και οι κίνδυνοι που περιλαμβάνονται στην επικάλυψη των έντονα συνδεμένων δραστηριοτήτων.

Οι Ha και Porteus (1995) (Κεφάλαιο 5) μελέτησαν ένα άλλο σημαντικό όφελος, το οποίο περιλαμβάνει τον έγκαιρο εντοπισμό των σφαλμάτων στο σχεδιασμό προϊόντος κατά τη διάρκεια των αναθεωρήσεων σχεδιασμού. Κάθε αναθεώρηση σχεδιασμού

καταναλώνει ένα ορισμένο ποσό χρόνου οργάνωσης, που αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για να συντονιστεί και να διεξαχθεί μια αναθεώρηση. Εάν ο σχεδιασμός προϊόντων αναθεωρείται πάρα πολύ συχνά, τότε πάρα πολύς χρόνος θα αφιερωνόταν στις αναθεωρήσεις που θα μπορούσε να αφιερωθεί στο σχεδιασμό προϊόντος και διαδικασίας. Οι σπάνιες αναθεωρήσεις, εντούτοις, θα αύξαναν τον κίνδυνο μη εντοπισμού των σφαλμάτων σχεδιασμού, οδηγώντας σε εκτενή επανασχεδιασμό (επαναλήψεις). Δεδομένων αυτών επιδιώκεται ο καθορισμός του βέλτιστου συγχρονισμού των αναθεωρήσεων σχεδιασμού που ελαχιστοποιεί τον αναμενόμενο χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος. Με αυτό το πρώτο μοντέλο που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο συμπληρώνεται αυτή η μελέτη των Ha και Porteus, με την εστίαση στις διαδικασίες όπου οι downstream επαναλήψεις είναι πρώτιστα λόγω των αλλαγών στις προκαταρκτικές πληροφορίες παρά λόγω των σφαλμάτων στο σχεδιασμό προϊόντος.

Ο Blackburn et. al (1994) ξεχωρίζει την παραλληλία μεταξύ χρόνου και πληροφοριών. Η παραλληλία χρόνου αναφέρεται στις δραστηριότητες που εκτελούνται παράλληλα από διαφορετικούς ανθρώπους ή ομάδες. Η παραλληλία πληροφοριών αναφέρεται στο βαθμό στον οποίο οι πληροφορίες μοιράζονται μεταξύ των περιλαμβανομένων ομάδων.

Η σημασία της διανομής πληροφοριών υπογραμμίστηκε στις μελέτες των Clark και Fujimoto (1991) και Wheelwright και Clark (1992). Οι πρώτοι παρατήρησαν στις μελέτες τους για την παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία, ότι στις εταιρίες με σύντομους χρόνους ανάπτυξης όχι μόνο υπήρχε επικάλυψη στις δραστηριότητες ανάπτυξής τους, αλλά συμπλήρωσαν την επικάλυψη με τη συχνή διαβίβαση πληροφοριών. Οι Clark και Fujimoto αποκαλούν αυτόν τον συνδυασμό επικάλυψης δραστηριοτήτων και εντατικής επικοινωνίας «ολοκληρωμένη επίλυση προβλήματος».

Η επικάλυψη περιλαμβάνει επίσης σημαντικούς κινδύνους. Οι Eisenhardt και Tabrizi (1995) αναφέρουν ότι μια «εμπειρική προσέγγιση» μπορεί να είναι πιο ελπιδοφόρα από μια «προσέγγιση συμπίεσης» με επικάλυψη εάν η αβεβαιότητα αγοράς («ταχύτητα») είναι υψηλή. Ομοίως, ο Cordero (1991) συστήνει την εφαρμογή παραλληλίας μόνο σε προγράμματα με μέτρια τεχνική αβεβαιότητα. Ως εκ τούτου, προκύπτει η ερώτηση: Σε ποιες περιπτώσεις η παραλληλία επιταχύνει την ανάπτυξη προϊόντων, και πότε όχι;

6.3 Μοντέλα Επικάλυψης και Διαφορές τους

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται δύο μοντέλα που ασχολούνται με την επικάλυψη καθηκόντων. Το πρώτο είναι από τους Krishnan et al. (1997), όπου εισάγουν την έννοια της upstream εξέλιξης και της downstream ευαισθησίας για να συλλάβουν πώς μειώνεται η αβεβαιότητα κατά τη διάρκεια της περιόδου επικάλυψης. Το δεύτερο είναι ένα μοντέλο των Loch και Terwiesch (1998), που μελετούν την επίδραση της upstream εξέλιξης και της downstream εξάρτησης, μια έννοια συγγενής σε αυτή της ευαισθησίας, στη βέλτιστη διάρκεια επικάλυψης. Στο μοντέλο τους, η επιρροή των upstream τροποποιήσεων στην downstream επανάληψη εκφράζεται σε μια συνάρτηση επίδρασης.

Στο πρώτο μοντέλο (Krishnan et. al. (1997)) αναπτύσσεται ένα πλαίσιο για την παραλληλία στην περίπτωση διαδοχικά εξαρτώμενων δραστηριοτήτων. Διαμορφώνονται οι προκαταρκτικές πληροφορίες που περνούν από μια downstream σε μια upstream δραστηριότητα υπό μορφή *διαστήματος*. Μια παράμετρος, π.χ. το βάθος μιας χειρολαβής πόρτας αυτοκινήτου, είναι αρχικά γνωστό μέσα σε ένα διάστημα, το οποίο στενεύει κατά τη διάρκεια του χρόνου καθώς ο σχεδιασμός φτάνει στο τέλος. Σε αυτό το πλαίσιο, δύο έννοιες καθορίζουν την ανταλλαγή επικάλυψης. Η «εξέλιξη» ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία το διάστημα συγκλίνει σε μια τελική upstream λύση. Η «downstream ευαισθησία» ορίζεται ως η διάρκεια μιας downstream επανάληψης για να ενσωματωθούν οι upstream αλλαγές που συνδέονται με το στένεμα του διαστήματος. Εάν οι upstream πληροφορίες είναι παγωμένες (frozen) προτού μειωθεί το διάστημα σε μια τιμή, το αποτέλεσμα είναι ποιοτική απώλεια. Διατυπώνεται το πρόβλημα ως μαθηματικό πρόγραμμα και παρουσιάζεται πότε η επικάλυψη (και έτσι προκαταρκτικές πληροφορίες) πρέπει να χρησιμοποιηθούν, και πότε οι upstream πληροφορίες πρέπει να παγώσουν (frozen) νωρίς. Όσον αφορά το θέμα του βαθμού επικάλυψης, λύνεται ένα αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής και προτείνεται ότι «γενικά, μια γρήγορη εξέλιξη και μια χαμηλή κατάσταση ευαισθησίας είναι ευνοϊκότερες για την επικάλυψη».

Το δεύτερο μοντέλο (Loch και Terwiesch (1998)) είναι ένα αναλυτικό μοντέλο της παράλληλης μηχανικής, όπου ένα upstream και ένα downstream καθήκον επικαλύπτονται για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος κυκλοφορίας στην αγορά. Το κέρδος από την επικάλυψη δραστηριοτήτων πρέπει να συγκριθεί με την καθυστέρηση από την επανάληψη που προκύπτει ως αποτέλεσμα παράλληλης διεργασίας βασισμένης

σε πρώιμες πληροφορίες. Η επικοινωνία μειώνει την αρνητική επίπτωση της επανάληψης στη δαπάνη του χρόνου επικοινωνίας. Παράγονται τα βέλτιστα επίπεδα παραλληλίας σε συνδυασμό με την επικοινωνία, και αναλύεται πώς αυτές οι δύο αποφάσεις αλληλεπιδρούν παρουσία της αβεβαιότητας και της εξάρτησης. Η αβεβαιότητα μοντελοποιείται μέσω του μέσου ποσοστού των μηχανικών αλλαγών, και η μείωσή της μέσω της αλλαγής του ποσοστού τροποποίησης κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επιπλέον, μοντελοποιείται η εξάρτηση από την επίπτωση που επιβάλλουν οι τροποποιήσεις στο downstream καθήκον.

Αυτό το μοντέλο διαφέρει από του Krishnan σε τρία σημαντικά σημεία. Κατ' αρχάς, υπάρχει διαφορετική αντίληψη όσον αφορά τις προκαταρκτικές πληροφορίες, είναι ακριβείς από την αρχή, αλλά στη συνέχεια τροποποιούνται επανειλημμένα όσο εξελίσσεται ο σχεδιασμός. Αυτές οι τροποποιήσεις ενσωματώνονται downstream μέσω μηχανικών αλλαγών (Engineering Changes–ECs), μια έννοια που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία. Μια βασική διάσταση των ECs είναι ότι γίνεται δυσκολότερο να εφαρμοστούν όσο αργότερα εμφανίζονται. Αυτό διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στην απόφαση σχετικά με το ποσοστό επικάλυψης.

Δεύτερον, επεκτείνεται η μελέτη των Krishnan et al, ενσωματώνοντας μια κατάλληλη πολιτική επεξεργασίας κατά ομάδες των πληροφοριών, που εξετάζει το θέμα του συντονισμού των δραστηριοτήτων που επικαλύπτονται. Η επεξεργασία κατά ομάδες των ECs παρατηρείται συχνά στην πράξη.

Τρίτον, ενσωματώνονται και οι δυο διαστάσεις της έννοιας «ολοκληρωμένης επίλυσης προβλήματος» των Clark και Fujimoto, συγκεκριμένα η παραλληλία και ο συντονισμός, και παρουσιάζεται ότι αλληλεπιδρούν με έναν βασικό τρόπο. Δεν μπορούν, επομένως, να ρυθμιστούν χωριστά: ρυθμίζοντας οριακά το ένα, διατηρώντας το άλλο σταθερό, δεν οδηγεί σε ένα γενικό βέλτιστο χρόνο-στην- αγορά.

6.4 Μοντέλο 1

Ο έντονος ανταγωνισμός σε πολλές βιομηχανίες αναγκάζει τις βιομηχανικές εταιρίες να αναπτύσσουν νέα, υψηλότερα ποιοτικά προϊόντα σε έναν όλο και γρηγορότερο ρυθμό. Η επικάλυψη των δραστηριοτήτων ανάπτυξης προϊόντων είναι ένα σημαντικό στοιχείο της παράλληλης ανάπτυξης προϊόντων που μπορεί να βοηθήσει τις εταιρίες να αναπτύσσουν τα προϊόντα γρηγορότερα. Εντούτοις, δεδομένου ότι οι

δραστηριότητες ανάπτυξης προϊόντων μπορούν να συνδεθούν με σύνθετους τρόπους, η επικάλυψη αλληλένδετων δραστηριοτήτων μπορεί να παρουσιάσει πολλές δυσκολίες. Χωρίς προσεκτική διαχείριση της επικάλυψης στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων, η προσπάθεια και το κόστος ανάπτυξης μπορούν να αυξηθούν, και η ποιότητα των προϊόντων μπορεί να χειροτερέψει. Παρουσιάζεται ένα πλαίσιο μοντέλου για τη διαχείριση της επικάλυψης των συνδεμένων δραστηριοτήτων ανάπτυξης προϊόντων. Το μοντέλο και το πλαίσιο προσδιορίζουν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι κατάλληλοι οι διάφοροι τύποι επικάλυψης για ένα ζευγάρι συνδεδεμένων δραστηριοτήτων. Επεξηγείτε το μοντέλο και το πλαίσιο με παραδείγματα από βιομηχανικές εφαρμογές όπως η ανάπτυξη ηλεκτρονικών μπίπερ και πόρτας αυτοκινήτου.

6.4.1 Εξέλιξη και Ευαισθησία

Μελετώντας τον τομέα ανάπτυξης βιομηχανικών προϊόντων, διαπιστώνεται ότι δύο ιδιότητες της διαδικασίας σχεδιασμού, η εξέλιξη και η ευαισθησία, καθορίζουν πώς πρέπει να γίνει η επικάλυψη των δραστηριοτήτων. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται οι έννοιες της εξέλιξης και της ευαισθησίας. Οι έννοιες αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου της διαδικασίας επικάλυψης σχεδιασμού που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο. Στη συνέχεια, συλλαμβάνονται ιδέες από το μοντέλο που χρησιμοποιούνται ως πλαίσιο για τη διαχείριση της διαδικασίας σχεδιασμού.

Στην ανάπτυξη των ιδεών, υιοθετείται η άποψη της «επεξεργασίας πληροφοριών» της ανάπτυξης προϊόντων (Clark and Fujimoto 1987b, Utterback 1982). Από αυτήν την άποψη, η ανάπτυξη προϊόντων θεωρείται διαδικασία μετασχηματισμού των πληροφοριών εισόδου, που αφορούν τις ανάγκες πελατών και τις ευκαιρίες αγοράς, σε πληροφορίες εξόδου που αντιστοιχούν στον κατασκευαστικό σχεδιασμό, και τη λειτουργική σχεδίαση για μαζική παραγωγή. Οι μεμονωμένες δραστηριότητες ανάπτυξης αντιμετωπίζονται ως επεξεργαστές πληροφοριών, που λαμβάνουν τις πληροφορίες εισόδου από τις προηγούμενες δραστηριότητές τους, και τις μετασχηματίζουν σε μια κατάλληλη μορφή για τις επόμενες δραστηριότητες. Η επιλογή χρόνου για αυτή τη διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2, όπου στη διαδοχική περίπτωση, η upstream δραστηριότητα αρχίζει την επεξεργασία πληροφοριών τη χρονική στιγμή t_{As} και συνεχίζει μέχρι τη χρονική στιγμή t_{Af}, που είναι το σημείο που οι πληροφορίες μεταφέρονται στην downstream δραστηριότητα.

Στην πράξη, οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ των δραστηριοτήτων έχουν διάφορες μορφές όπως: προδιαγραφές πελατών, διαστάσεις εξαρτημάτων, πρωτότυπα, κ.λπ. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι πληροφορίες που μπορούν να περιγραφούν ως συλλογή παραμέτρων (όπου καθορίζεται η παράμετρος ως μονοδιάστατο κομμάτι πληροφορίας που μπορεί να αναπαρασταθεί μέσα σε ένα συμπαγές σύνολο). Παραδείγματα των πληροφοριών παραμέτρων είναι οι διαστάσεις εξαρτημάτων και οι προδιαγραφές πελατών. Στην πράξη, οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται στα μηχανικά στάδια ανάπτυξης προϊόντων μπορούν συχνά να απεικονιστούν ως συλλογή παραμέτρων.

6.4.1.1 Εξέλιξη Upstream Πληροφοριών

Η διαδοχική διαδικασία υποθέτει ότι οι upstream πληροφορίες που παράγονται είναι διαθέσιμες για downstream χρήση μόνο με την ολοκλήρωση της upstream δραστηριότητας. Η επικάλυψη μπορεί να διευκολυνθεί συνειδητοποιώντας το γεγονός ότι η upstream δραστηριότητα μπορεί συνεχώς να συμπτύσσει και να βελτιώνει τις παραγόμενες πληροφορίες. Χρησιμοποιείται ο όρος εξέλιξη για την αναφορά στη βελτίωση των upstream παραγόμενων πληροφοριών από μια προκαταρκτική μορφή σε μια τελική αξία. Για τον ακριβέστερο καθορισμό της εξέλιξης, αναπτύσσεται ένα μοντέλο των προκαταρκτικών upstream πληροφοριών.

Οι προκαταρκτικές upstream πληροφορίες σχεδιασμού είναι μια τιμή μέσα σε ένα διάστημα. Στα προκαταρκτικά στάδια η ακριβής τιμή της παραμέτρου X στο t_i ($<t_{Af}$), X_i είναι άγνωστη, αλλά ένα διάστημα $\{a_i, b_i\}$ είναι γνωστό έτσι ώστε $a_i \leq X_i \leq b_i$. Στην αρχή της upstream δραστηριότητας το διάστημα είναι $\{a_{in}, b_{in}\}$, και ονομάζεται αρχικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια της upstream δραστηριότητας, καθώς εκτελείται η ανάπτυξη του προϊόντος, και καθώς λαμβάνονται εξωτερικά δεδομένα εισόδου, η παράμετρος X περιορίζεται βαθμιαία στην τελική τιμή της X_f, ένα σημείο μέσα στο αρχικό διάστημα. Το διάστημα μέσα στο οποίο η παράμετρος είναι γνωστή, αλλάζει συνεχώς έως ότου η παράμετρος φτάσει την τελική τιμή της στο t_{Af} (Σχήμα 6.3).

Εισάγεται η έννοια του βαθμού εξέλιξης (συμβολίζεται με ϵ) για να μετρηθεί πόσο κοντά είναι η μη-οριστική παράμετρος σχεδιασμού στην τελική τιμή της. Όσο μικρότερο είναι το πλάτος του διαστήματος, τόσο πιο κοντά είναι η παράμετρος στην τελική τιμή της. Για απλοποίηση, ο βαθμός εξέλιξης ορίζεται ως μια γραμμική συνάρτηση του πλάτους του διαστήματος σχεδιασμού. Η εξέλιξη είναι *μονοτονική*

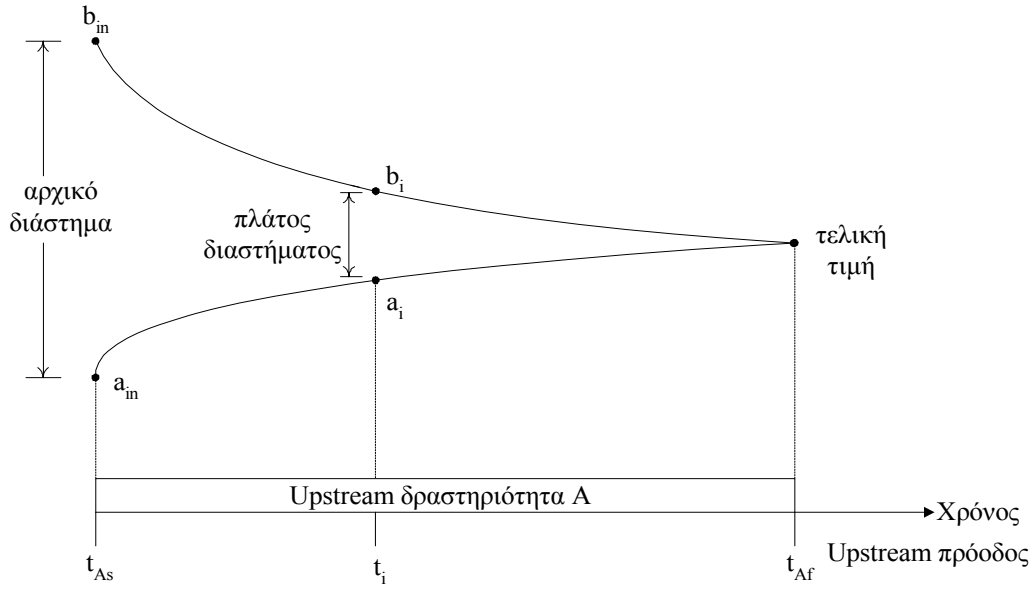
όταν για $t_j > t_i$, το διάστημα $\{a_j, b_j\}$ βρίσκεται μέσα στο διάστημα $\{a_i, b_i\}$. Η παρακάτω διατύπωση καθορίζει το βαθμό εξέλιξης ϵ_i, στο χρόνο t_i, έτσι ώστε $\epsilon_{As}=0$ και $\epsilon_{Af}=1$:

$$\in_i = 1 - \frac{b_i - a_i}{b_{in} - a_{in}}$$

Ένα σχέδιο του ϵ_i ονομάζεται *συνάρτηση εξέλιξης* της παραμέτρου X. Δεδομένου ότι το ϵ_i εξαρτάται από το πλάτος του διαστήματος στο χρόνο t_i, η συνάρτηση εξέλιξης δείχνει πώς (σε ποιο ποσοστό) η upstream δραστηριότητα μικραίνει το πλάτος του διαστήματος της παραμέτρου στο μηδέν. Με τη συνάρτηση εξέλιξης και το αρχικό διάστημα ως δεδομένα εισόδου, είναι δυνατό να καθοριστεί το πλάτος διαστήματος στα διάφορα χρονικά σημεία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού, αλλά όχι τα ακριβή τελικά σημεία του διαστήματος της παραμέτρου X.

6.4.1.2 Downstream Επαναλήψεις και Ευαισθησία της Downstream Επανάληψης

Στη διαδικασία επικάλυψης, η upstream δραστηριότητα μοιράζεται τις διαθέσιμες προκαταρκτικές upstream πληροφορίες με τη μορφή τελικών σημείων διαστήματος με την downstream δραστηριότητα. Σε πολλές πρακτικές καταστάσεις, εντούτοις, οι downstream δραστηριότητες ανάπτυξης (όπως πρωτοτυποποίηση και σχεδίαση εργαλείων) απαιτούν μια τιμή της παραμέτρου X για να εκτελέσουν τις επαναλήψεις. Υποθέτουμε ότι όταν αρχίζει η downstream δραστηριότητα να εκτελεί μια επανάληψη ανάπτυξης στο χρόνο t_i ($<t_{Af}$), χρησιμοποιεί την αναμενόμενη τιμή, x_i, των πληροφοριών X_i που ανταλλάσσονται. Περαιτέρω, οι downstream επαναλήψεις στην διαδικασία επικάλυψης χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν τις αλλαγές των upstream πληροφοριών στην downstream ανάπτυξη. Συγκεκριμένα, η downstream επανάληψη i, που αρχίζει στο χρόνο t_i, περιλαμβάνει την αλλαγή της τιμής της πληροφορίας που ανταλλάσσεται (που χρησιμοποιείται από την downstream δραστηριότητα) από το χρόνο έναρξης της προηγούμενης επανάληψης, t_{i-1}, έως το χρόνο έναρξης της τρέχουσας επανάληψης, t_i. Αυτή η αλλαγή στην τιμή της πληροφορίας που ανταλλάσσεται από t_{i-1} έως t_i συμβολίζεται με $\Delta x(t_{i-1}, t_i)$.



Σχήμα 6 3: Η Upstream Δραστηριότητα Περιορίζει την Παράμετρο που Ανταλλάσσεται σε μια Τελική Τιμή

Ο όρος *downstream ευαισθησία*, σημαίνει τη σχέση μεταξύ της διάρκειας της i downstream επανάληψης, d_i, και του μέγεθος αλλαγής της τιμής της upstream πληροφορίας, $\Delta x(t_{i-1}, t_i)$. Η συνάρτηση που συνδέει τα d_i και $\Delta x(t_{i-1}, t_i)$ ονομάζεται *συνάρτηση ευαισθησίας*, Φ: $d_i = \Phi(\Delta x(t_{i-1}, t_i))$. Εκτός από μερικές ειδικές περιπτώσεις, η συνάρτηση ευαισθησίας για τις διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντων δεν είναι συνήθως φθίνουσα π.χ., μεγαλύτερες αλλαγές στην τιμή των πληροφοριών που ανταλλάσσονται απαιτούν επαναλήψεις μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας για να επεξεργαστούν αυτές τις αλλαγές.

Όταν η downstream δραστηριότητα χρησιμοποιεί την αναμενόμενη τιμή, x_i, για να εκτελέσει τις επαναλήψεις, το μέγεθος $\Delta x(t_{i-1}, t_i)$ ισοδυναμεί με την αλλαγή της αναμενόμενης τιμής από t_{i-1} έως t_i. Αυτή η αλλαγή στην αναμενόμενη τιμή εξαρτάται από το διάστημα σχεδιασμού στο t_{i-1} και στο t_i. Να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν τα τελικά σημεία του διαστήματος σχεδιασμού στα διάφορα χρονικά σημεία στη διαδικασία σχεδιασμού. Η δεδομένη συνάρτηση εξέλιξης προσδιορίζει μόνο το πλάτος του διαστήματος σε αυτές τις χρονικές στιγμές. Είναι, εντούτοις, είναι δυνατή μια συντηρητική εκτίμηση για το Δx όταν η συνάρτηση εξέλιξης είναι μονοτονική. Η μέγιστη αλλαγή στην αναμενόμενη τιμή του X μεταξύ t_{i-1} και t_i δίνεται από:

$$\Delta x(t_{i-1}, t_i) = w_{in}(\in_i - \in_{i-1})$$

όπου $w_{in} = (b_{in} - a_{in})/2$ είναι το μισό του πλάτους του αρχικού διαστήματος του X. Με άλλα λόγια, η αλλαγή στην τιμή των πληροφοριών που ανταλλάσσονται που χρησιμοποιούνται από την downstream δραστηριότητα σε δύο χρονικά σημεία μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά στο βαθμό εξέλιξης σε αυτά τα χρονικά σημεία.

6.4.1.3 Επιπτώσεις της Upstream Εξέλιξης και της Downstream Ευαισθησίας

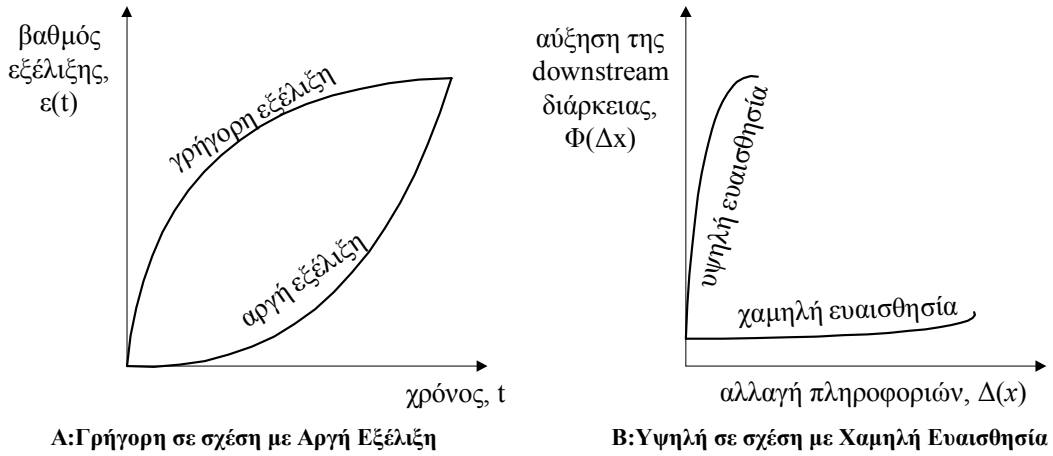
Η upstream εξέλιξη και η downstream ευαισθησία έχουν διάφορες επιπτώσεις στη διαχείριση της διαδικασίας σχεδιασμού. Εάν η εξέλιξη των upstream πληροφοριών είναι τέτοια ώστε οι μεγάλες αλλαγές να συμβούν κοντά στην ολοκλήρωση της upstream δραστηριότητας, τότε είναι δύσκολο να μειωθεί ο χρόνος ολοκλήρωσης με την επικάλυψη – δεδομένου ότι οι επόμενες επαναλήψεις σχεδιασμού θα είναι σημαντικά μεγάλης διάρκειας. Εάν, εντούτοις, η εξέλιξη των πληροφοριών σχεδιασμού είναι τέτοια που σημαντικές αλλαγές εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της αρχικής περιόδου της upstream δραστηριότητας, και μόνο ελάχιστες αλλαγές συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της τελικής περιόδου της upstream δραστηριότητας, τότε η επικάλυψη είναι πιθανότερο να οδηγήσει σε μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης.

Από τον τύπο $\Delta x(t_{i-1}, t_i)$ συμπεραίνεται ότι η αλλαγή της τιμής των πληροφοριών που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο χρονικών σημείων είναι ανάλογη με τη διαφορά των βαθμών εξέλιξης σε αυτά τα χρονικά σημεία. Εάν οι πληροφορίες σχεδιασμού αναπτύσσονται έτσι ώστε όταν η upstream δραστηριότητα εξελίσσεται, η αύξηση του βαθμού εξέλιξης κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος γίνεται σταδιακά μικρότερη, τότε το ποσό αλλαγής μειώνεται.

Αυτό ονομάζεται *γρήγορη εξέλιξη*, όταν σημαντικές αλλαγές συμβαίνουν νωρίς (Σχήμα 6.4Α). Επίσης, σε αυτήν την περίπτωση, οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται παίρνουν γρήγορα την τελική τους μορφή, και είναι δυνατόν να παγώσουν και να διαβιβαστούν downstream νωρίς χωρίς μεγάλη συνέπεια στην ποιότητα για την upstream δραστηριότητα. Όταν η αύξηση στο βαθμό εξέλιξης γίνεται σταδιακά μεγαλύτερη καθώς εξελίσσεται η upstream δραστηριότητα, αυξάνεται επίσης η αλλαγή στις πληροφορίες που ανταλλάσσονται όσο η upstream δραστηριότητα εξελίσσεται, και η εξέλιξη ονομάζεται *αργή* (Σχήμα 6.4Α). Σε αυτήν την περίπτωση, η οριστικοποίηση των upstream πληροφοριών νωρίς στην upstream διαδικασία, είτε θα ήταν αδύνατη είτε θα επέφερε τεράστια συνέπεια στην ποιότητα στην upstream

δραστηριότητα. Για παράδειγμα η εξέλιξη είναι αργή, όταν οι πληροφορίες αφορούν ένα στοιχείο που (i) συνδέεται με διάφορα στοιχεία επιρρεπή σε αλλαγές, (ii) χρειάζεται πληροφορίες οι οποίες παρέχονται από έναν εξωγενή παράγοντα που είναι διαθέσιμος αργά στην upstream διαδικασία, ή (iii) περιλαμβάνει την επίλυση ενός σύνθετου τεχνικού προβλήματος. Η επικάλυψη των δραστηριοτήτων είναι γενικά ευκολότερη όταν η upstream εξέλιξη είναι γρήγορη παρά αργή.

Ομοίως, εξετάζουμε τις δύο ακραίες περιπτώσεις της downstream ευαισθησίας, *χαμηλή και υψηλή ευαισθησία*. Η χαμηλή ευαισθησία περιγράφει την περίπτωση όπου οι ουσιαστικές αλλαγές (στην τιμή των πληροφοριών που ανταλλάσσονται που χρησιμοποιούνται από την downstream δραστηριότητα) μπορούν να προσαρμοστούν γρήγορα από την downstream δραστηριότητα (Σχήμα 6.4Β). Η downstream ευαισθησία λέγεται ότι είναι υψηλή όταν ακόμη και οι μικρές αλλαγές απαιτούν μεγάλου μεγέθους επαναλήψεις σχεδιασμού.



Α:Γρήγορη σε σχέση με Αργή Εξέλιξη **Β:Υψηλή σε σχέση με Χαμηλή Ευαισθησία**

Σχήμα 6 4: Ακραίες Τιμές Εξέλιξης και Ευαισθησίας

6.4.1.4 Μέτρηση και Τροποποίηση Εξέλιξης και Ευαισθησίας

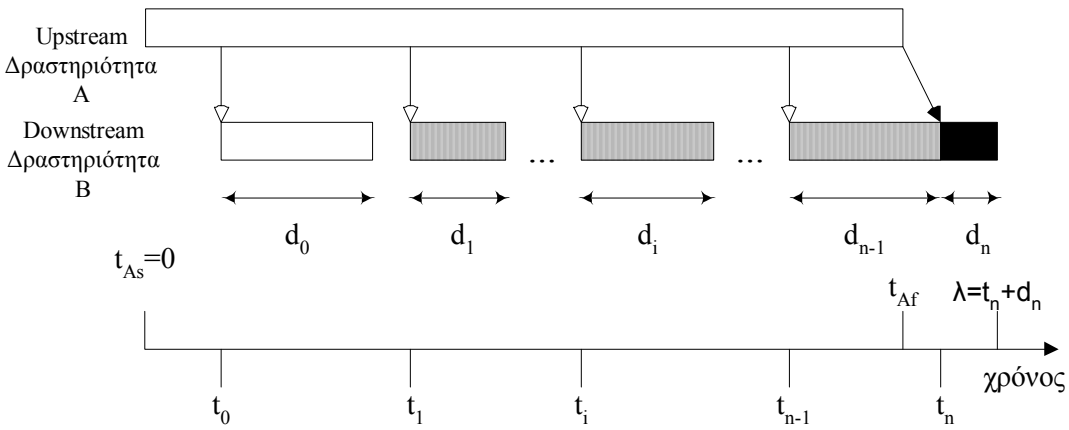
Στην πράξη, οι συναρτήσεις εξέλιξης και ευαισθησίας πρέπει να ληφθούν ως δεδομένα εισόδου από τους ειδικούς στην ανάπτυξη προϊόντων με βάση την εμπειρία τους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα ξανασχεδιασμένα προϊόντα, τα οποία διαμορφώνουν μια σημαντική μερίδα προϊόντων που σχεδιάζονται σε πολλές επιχειρήσεις (McGrath et al. 1992, Whitney 1990). Η συνάρτηση εξέλιξης μπορεί να κατασκευαστεί με βάση το πόσο τα ενδιάμεσα upstream καθήκοντα βοηθούν στη βελτίωση των παραμέτρων σχεδιασμού που ανταλλάσσονται. Η συνάρτηση

ευαισθησίας κατασκευάζεται εξετάζοντας την επίπτωση των upstream αλλαγών σχεδιασμού στην downstream δραστηριότητα. Ειδικοί έχουν παρατηρήσει ότι η διαδικασία σχεδιασμού ενός νέου προϊόντος συχνά δεν είναι ριζικά διαφορετική από τη διαδικασία ενός προϊόντος προηγούμενης παραγωγής (Albano and Keska 1989, McGrath et al. 1992). Σε τέτοιες περιπτώσεις, η τεκμηρίωση και η κατανόηση της καθιερωμένης διαδικασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή των συναρτήσεων εξέλιξης και ευαισθησίας. Εάν η αλλαγή στη διαδικασία ανάπτυξης είναι σημαντική ή το προϊόν είναι εξ' ολοκλήρου νέο, τότε προβλέψεις όσον αφορά την εξέλιξη και την ευαισθησία πρέπει να γίνουν με βάση την συγκεκριμένη ιδέα σχεδιασμού, την αρχιτεκτονική προϊόντος, και τις βασικές τεχνολογίες. Για καταστάσεις, όπου η εξέλιξη και η ευαισθησία είναι δύσκολο να εκτιμηθούν, αναπτύσσεται ένα εννοιολογικό πλαίσιο που χρησιμοποιεί ποιοτικές πληροφορίες εξέλιξης και ευαισθησίας για να καθορίσει την επικάλυψη των δραστηριοτήτων.

Η εξέλιξη και η ευαισθησία μπορούν ως ένα ορισμένο βαθμό να αλλάξουν από καλύτερα συστήματα επικοινωνίας και τεχνολογία πληροφοριών. Παραδείγματα έχουν δείξει ότι η βελτιωμένη επικοινωνία μεταξύ των upstream και downstream δραστηριοτήτων μειώνει την downstream ευαισθησία. Επίσης, τα εργαλεία στον υπολογιστή μπορούν να βοηθήσουν να εξασφαλιστεί ότι ο upstream σχεδιασμός εξελίσσεται γρηγορότερα και οι αλλαγές απορροφώνται από την downstream δραστηριότητα ευκολότερα.

6.4.2 Μοντέλο Διαδικασίας Επικάλυψης

Χρησιμοποιείται η εξέλιξη και η ευαισθησία για τη διατύπωση ενός μοντέλου διαδικασίας επικάλυψης. Το Σχήμα 6.5 επεξηγεί τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της διαδικασίας που μοντελοποιείται.



Σχήμα 6 5: Μοντέλο Αλληλεπίδρασης στην Επικάλυψη

Τα διαγραμμισμένα τετράγωνα δείχνουν τις σε εξέλιξη στις επόμενες downstream επαναλήψεις. Το κενό διάστημα μεταξύ των διαγραμμισμένων τετραγώνων δείχνει το χρόνο αναμονής μεταξύ των επαναλήψεων. Οι τελείες μεταξύ των τετραγώνων (…) δείχνουν μια σειρά επαναλήψεων που δεν παρουσιάζονται λεπτομερώς. Τα βέλη δείχνουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ της προηγούμενες upstream και downstream δραστηριότητας.

t_i = χρόνος εκκίνησης της i επανάληψης (μεταβλητή απόφασης) i = 0, 1, 2, …, n

d_i = διάρκεια της i επανάληψης (μεταβλητή) i = 0, 1, 2, …, n

d_0 = διάρκεια προγραμματισμένης επανάληψης (δεδομένο εισόδου),

t_{As} = χρόνος εκκίνησης της upstream δραστηριότητας (λαμβάνεται ως αρχή του χρονικού διαστήματος),

t_{Af} = χρόνος τέλους της upstream δραστηριότητας (δεδομένο εισόδου),

t_F = χρόνος παύσης (μεταβλητή απόφασης, δεν παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5),

n = αριθμός επαναλήψεων στη συνέχεια της προγραμματισμένης επανάληψης (μεταβλητή απόφασης), και

λ = χρόνος υλοποίησης ανάπτυξης προϊόντων (output measure)

Η upstream δραστηριότητα *A* ξεκινά σε χρόνο t_{As} να παράγει τις πληροφορίες σχεδιασμού *X* που θα χρησιμοποιηθούν από την downstream δραστηριότητα *B* (t_{As}=0 εκτός αν οριστεί διαφορετικά). Η downstream δραστηριότητα ξεκινά με μια προγραμματισμένη downstream επανάληψη δεδομένης διάρκειας d_0, που είναι ο

χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της downstream δραστηριότητας χωρίς αλλαγές του upstream σχεδιασμού.

Στη διαδοχική διαδικασία, οι upstream παραγόμενες πληροφορίες X δεν είναι οριστικές μέχρι το χρόνο t_{Af}. Η downstream δραστηριότητα B αρχίζει την προγραμματισμένη επανάληψη με την παραλαβή των οριστικών πληροφοριών από την Α στο χρόνο t_{Af}, με αποτέλεσμα ένα χρόνο υλοποίησης $t_{Af} + d_0$. Σε αυτήν την προσέγγιση δεν υπάρχει καμία επόμενη downstream επανάληψη, δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία αλλαγή στην τιμή των πληροφοριών που ανταλλάσσονται (n=0 και t_F=t_{Af}). Οποιεσδήποτε εσωτερικές downstream επαναλήψεις θεωρείται ότι περιλαμβάνονται στην προγραμματισμένη επανάληψη.

Στην διαδικασία επικάλυψης, υπάρχουν δύο σημαντικές διαφορές: (i) οι upstream πληροφορίες μπορούν να οριστικοποιηθούν νωρίς επιτρέποντας την νωρίτερη πρόσβαση στις τελικές πληροφορίες για την downstream δραστηριότητα, και (ii) η downstream δραστηριότητα μπορεί επίσης να αρχίσει με τις προκαταρκτικές upstream πληροφορίες (ενσωματώνοντας τις αλλαγές στις επόμενες επαναλήψεις). Το μοντέλο βοηθά να ληφθεί η απόφαση για το πόσες downstream επαναλήψεις να εκτελεστούν, πότε να αρχίσουν αυτές οι επαναλήψεις, και πόσο νωρίς οι upstream πληροφορίες πρέπει να οριστικοποιηθούν.

Στην περίπτωση όπου η upstream παραγόμενη πληροφορία δεν εξελίσσεται μέχρι το χρονικό σημείο t_{Af}, οριστικοποιείται σε ένα προηγούμενο, t_F ($\leq t_{Af}$). Ο χρόνος αυτός επιλέγεται από την ομάδα σχεδιασμού.

Στην περίπτωση όπου η upstream δραστηριότητα A ανταλλάσσει μη οριστικές πληροφορίες, οι αλλαγές στις πληροφορίες που ανταλλάσσονται πρέπει να ενσωματωθούν στις *επόμενες* downstream επαναλήψεις οι οποίες καταχωρούνται από 1 έως n. Η downstream δραστηριότητα άλλη μια φορά αρχίζει με μια προγραμματισμένη επανάληψη διάρκειας d_0, στο χρόνο t_0, η οποία θεωρείται ότι αρχίζει όχι νωρίτερα από την upstream δραστηριότητα, $t_0 \geq t_{As}$.

Κάθε επόμενη downstream επανάληψη i, έχει διάρκεια d_i, ξεκινάει στο t_i, εκτελείται με την αναμενόμενη τιμή της παραμέτρου σχεδιασμού στο χρόνο t_i, και ενσωματώνει την αλλαγή στην τιμή των πληροφοριών που ανταλλάσσονται, $\Delta x(t_{i-1}, t_i)$. Για διευκόλυνση της εκμάθησης από τις επαναλήψεις, όλες οι αλλαγές που συμβαίνουν

κατά τη διάρκεια μιας downstream επανάληψης συγκεντρώνονται και ενσωματώνονται στην επόμενη downstream επανάληψη.

Επειδή οι αλλεπάλληλες επαναλήψεις εκτελούνται από την ίδια downstream δραστηριότητα, δεν γίνεται επικάλυψη δύο downstream επαναλήψεων. Έτσι προκύπτει ο περιορισμός: $t_i \geq t_{i-1} + d_{i-1}$. Εάν στον περιορισμό δεν ισχύει η ισότητα, σημαίνει ότι υπάρχει κάποιος κενός χρόνος μεταξύ των επαναλήψεων.

Επειδή η τιμή του X οριστικοποιείται στο t_F, ακριβώς μια downstream επανάληψη απαιτείται μετά το πάγωμα (frozen) των πληροφοριών για να ενσωματώσει την τελική αλλαγή που συνέβη από την προηγούμενη επανάληψη ($t_n \geq t_F$). Όλες οι επαναλήψεις, εκτός από την τελευταία, ξεκινούν πριν από το χρόνο t_F; ως εκ τούτου, $t_{n-1} < t_F$.

Συγκεντρώνοντας αυτούς τους περιορισμούς και διαμορφώνοντας τις προϋποθέσεις, έχουμε:

$t_F \leq t_{Af}$ (οι πληροφορίες μπορεί να παγώσουν πριν το t_{Af}), **(1)**

$t_i \geq t_{i-1} + d_{i-1}, i = 1,2,...,n$

(ο κενός χρόνος μεταξύ των επαναλήψεων μπορεί να μην είναι 0), **(2)**

$t_0 \geq t_{As} = 0$ (η προγραμματισμένη επανάληψη ξεκινά μετά το t_{As}), **(3)**

$t_{n-1} < t_F$ (όλες οι επαναλήψεις, εκτός από την τελευταία, ξεκινούν πριν το t_F), **(4)**

$t_n \geq t_F$ (η τελευταία επανάληψη δεν μπορεί να ξεκινήσει πριν το t_F), **(5)**

$\lambda = t_n + d_n$ (λ είναι ο χρόνος υλοποίησης της ανάπτυξης), **(6)**

$\Delta x(t_{i-1}, t_i) = w_{in}(\in_i - \in_{i-1})$ (το ποσό αλλαγής που σχετίζεται με την εξέλιξη), **(7)**

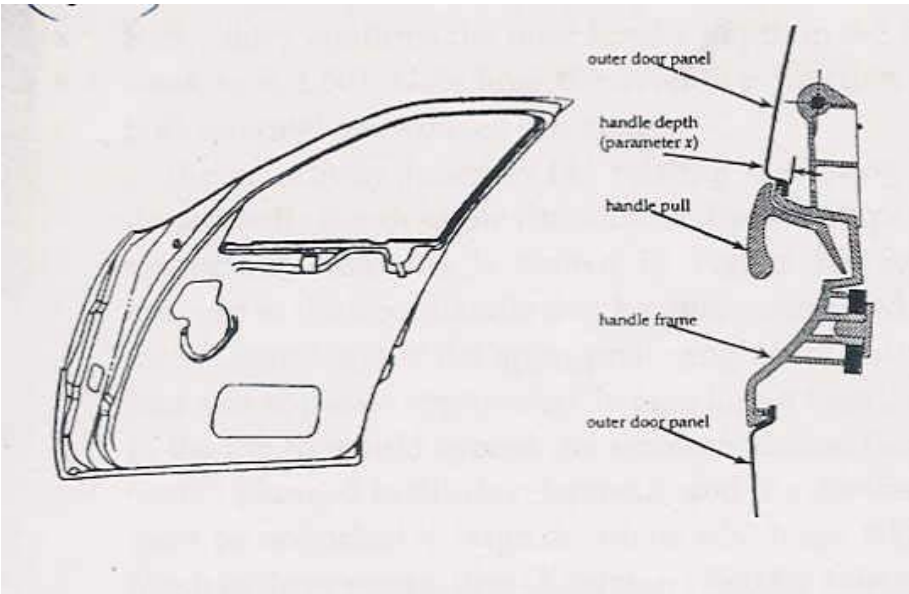
$d_i = \Phi(\Delta x(t_{i-1}, t_i))$ (η διάρκεια των επαναλήψεων είναι συνάρτηση της αλλαγής). **(8)**

Στο παραπάνω μοντέλο, οι μεταβλητές απόφασης είναι ο αριθμός επαναλήψεων, n, και ο χρόνος έναρξης των επαναλήψεων, t_0, t_1,…, t_n. Ο αριθμός περιορισμών επομένως εξαρτάται από την μεταβλητή απόφασης n. Προκειμένου να καταστεί σαφής η εξάρτηση του μοντέλου από το n, αποσυντίθεται το παραπάνω μοντέλο σε δύο υπό-προβλήματα. Το πρώτο υπό- πρόβλημα $P(n)$, καθορίζει τους χρόνους εκκίνησης της επανάληψης για μια δεδομένη τιμή του n. Το δεύτερο υπό- πρόβλημα

καθορίζει την τιμή του *n* για τη βέλτιστη στρατηγική επικάλυψης. Αυτή η αποσύνθεση επεξήγεται στη συνέχεια στο παράδειγμα. Εναλλακτικά, το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί με δυναμικό προγραμματισμό.

6.4.3 Παράδειγμα Μοντέλου Επικάλυψης: Διαδικασία Ανάπτυξης Εξωτερικού Πλαισίου Πόρτας

Επεξηγείτε το μοντέλο με μια εφαρμογή στη διαδικασία σχεδιασμού μιας πόρτας αυτοκινήτου (Σχήμα 6.6). Εστιάζουμε συγκεκριμένα σε μια από τις μακροχρόνιες φάσεις της διαδικασίας σχεδιασμού: πρωτοτυποποίηση του σχεδίου του καλουπιού του πλαισίου της πόρτας (εξωτερικά). Τα πρωτότυπα των καλουπιών του πλαισίου της πόρτας κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας φθηνό μαλακό χάλυβα για να ελεγχθεί η μορφή και η λειτουργία, πριν υποβληθούν σε επεξεργασία με ακριβό σκληρό χάλυβα. Η διαδικασία πρωτοτυποποίησης, στην εταιρία που γίνεται η μελέτη, καθυστερεί συχνά λόγω έλλειψης πληροφοριών σχεδιασμού της χειρολαβής της πόρτας. Εστιάζεται η προσοχή στην επικάλυψη του μηχανικού σχεδιασμού της χειρολαβής της πόρτας (upstream δραστηριότητα *A*) και της ανάπτυξης πρωτοτύπου καλουπιού (downstream δραστηριότητα *B*) που ανταλλάσσουν πληροφορίες σχεδιασμού της χειρολαβής της πόρτας.

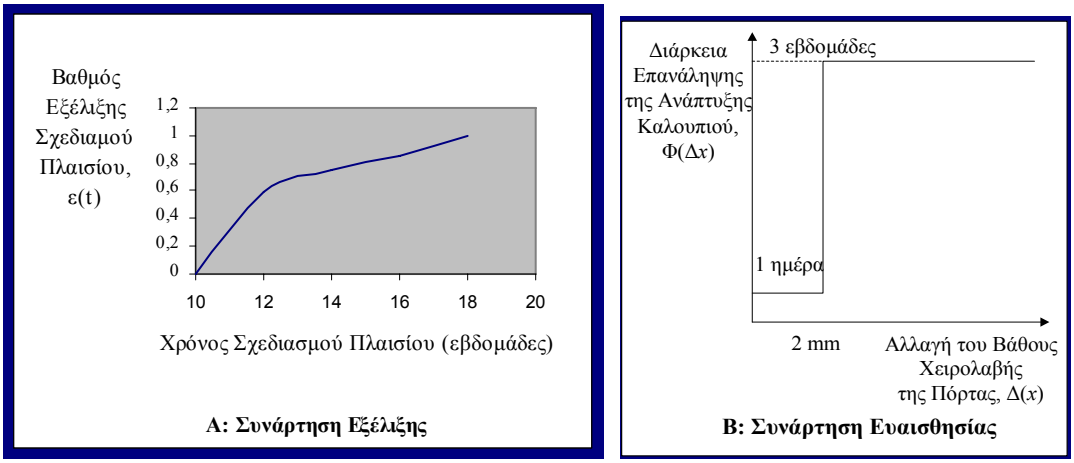


Σχήμα 6 6: Πλαίσιο Πόρτας Αυτοκινήτου και Χειρολαβή Πόρτας

Το Σχήμα 6.6 επίσης δείχνει την τοποθέτηση της χειρολαβής της πόρτας στο εξωτερικό πλαίσιο της πόρτας. Οι συνεντεύξεις με τους σχεδιαστές της πόρτας

υποδεικνύουν ότι το πρόωρο πάγωμα (freeze) του σχεδιασμού της χειρολαβής της πόρτας μπορεί να συνεπάγεται μια μεγάλη απώλεια ποιότητας δεδομένου ότι η χειρολαβή της πόρτας μπορεί να μην ανταποκρίνεται επαρκώς στις προδιαγραφές των πελατών. Επίσης, ένα σχέδιο χειρολαβής που έχει παγώσει πάρα πολύ νωρίς μπορεί να έχει κοινά γνωρίσματα με κάποιο πρόσφατα εισαχθέν προϊόν ανταγωνιστών, και επειδή οι χειρολαβές της πόρτας είναι πολύ ορατά μέρη ενός αυτοκινήτου, η διαφοροποίηση είναι σημαντική. Το βάθος της χειρολαβής (x) στο εξωτερικό πλαίσιο είναι μια σημαντική παράμετρος που χρησιμοποιείται στη διαδικασία ανάπτυξης του καλουπιού, και οι καθυστερήσεις στις αποφάσεις σχεδιασμού της χειρολαβής της πόρτας τείνουν να καθυστερήσουν τη διαδικασία ανάπτυξης του καλουπιού (και ως ένα ορισμένο βαθμό ολόκληρη τη διαδικασία ανάπτυξης της πόρτας).

Η εξέλιξη ($\in$) του βάθους χειρολαβής της πόρτας που υπολογίζεται από τους σχεδιαστές στην εταιρία που γίνεται η μελέτη δίνεται στο Σχήμα 6.7Α. Η διαδικασία σχεδιασμού (με $t_{As} = 10$, και $t_{Af} = 18$) περιλαμβάνει διάφορα ενδιάμεσα καθήκοντα, αναλύσεις, και συσκέψεις που συντελούνται σε διαστήματα περίπου 2 εβδομάδων, τα οποία βοηθούν στη βελτίωση και οριστικοποίηση του βάθους της χειρολαβής της πόρτας. Μέχρι τη 10η εβδομάδα, η ιδέα της χειρολαβής δεν είναι γνωστή, έτσι καθορίζεται η εξέλιξη στο μηδέν ($\in = 0.0$). Οι μηχανικοί που ασχολούνται με τη μορφή παρέχουν δεδομένα εισόδου τη 12η εβδομάδα ($\in = 0.60$). Η ανάλυση στοιχείων γίνεται τη 14η εβδομάδα ($\in = 0.75$). Η ανατροφοδότηση προμηθευτών είναι διαθέσιμη τη 16η εβδομάδα ($\in = 0.85$). Τελικά οι μηχανικοί αποτύπωσης του σχεδίου παρέχουν την ανατροφοδότηση, η οποία επιβεβαιώνει το βάθος της χειρολαβής της πόρτας τη 18η εβδομάδα ($\in = 1.00$). Η συνάρτηση εξέλιξης έχει και κοίλα και κυρτά τμήματα.



Σχήμα 6 7: Συναρτήσεις Ευαισθησίας και Εξέλιξης για τις Πληροφορίες του Βάθους της Χειρολαβής της Πόρτας

Η συνάρτηση ευαισθησίας (Φ) είναι η σχέση μεταξύ της αλλαγή του βάθους της χειρολαβής της πόρτας και της διάρκειας των επαναλήψεων ανάπτυξης του πρωτότυπου καλουπιού και παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7Β. Οι μικρές αλλαγές στο βάθος της χειρολαβής της πόρτας απαιτούν απλές ενημερώσεις (μικρές επαναλήψεις) των κατάλληλων μηχανικών σχεδίων και των απαιτούμενων εγκρίσεων. Αλλαγές μεγαλύτερες από 2mm σε βάθος θα υπερέβαιναν τα όρια (συντελεστής ασφάλειας) στην ανάπτυξη καλουπιού, και το σχέδιο του καλουπιού θα πρέπει να ξαναγίνει με μεγάλες επαναλήψεις που μπορούν να διαρκέσουν τουλάχιστον τρεις εβδομάδες.

Με την ύπαρξη επικάλυψης στο σχεδιασμό πλαισίου και την ανάπτυξη καλουπιού με επικάλυψη, το πάγωμα της χειρολαβής της πόρτας προτού να είναι διαθέσιμη όλη η εξωτερική ανατροφοδότηση, μπορεί να οδηγήσει σε μια μεγάλη ποιοτική απώλεια. Επειδή η ποιότητα είναι ύψιστης σημασίας στην εταιρία που γίνεται η μελέτη, αποκλείεται η δυνατότητα πρόωρου παγώματος του σχεδιασμού της χειρολαβής της πόρτας (ως εκ τούτου $t_F = t_{Af}$), και εξετάζεται η δυνατότητα επικάλυψης με την ανταλλαγή των προκαταρκτικών πληροφοριών για το βάθος της χειρολαβής. Η εταιρία που γίνεται η μελέτη χρησιμοποιεί ειδικές ομάδες πλατφόρμων για την ανάπτυξη οχημάτων, έτσι μπορεί να μην υπάρξει οποιοδήποτε προστιθέμενο κόστος για τη δέσμευση των downstream πόρων (μηχανικών) νωρίς. Για να τηρηθεί ο προϋπολογισμός ανάπτυξης καλουπιού, όχι περισσότερες από δύο μεγάλες επαναλήψεις μπορούν να γίνουν μετά από την προγραμματισμένη επανάληψη.

Η κανονική διάρκεια για ανάπτυξη του μοντέλου του καλουπιού υπολογίζεται από τους μηχανικούς τέσσερις εβδομάδες $(d_0 = 4)$. Το αρχικό διάστημα σχεδιασμού για το βάθος $\{a_{in}, b_{in}\}$, είναι ίσο {2, 12} mm, με βάση προηγούμενη εμπειρία στο σχεδιασμό χειρολαβής πόρτας, έτσι $w_{in} = 5$ mm.

Ο κυρίαρχος όρος απόδοσης είναι σε αυτήν την περίπτωση ο χρόνος υλοποίησης της ανάπτυξης, λ. Το οριακό κόστος του χρόνου υλοποίησης της ανάπτυξης για ένα πλήρες αυτοκίνητο υπολογίζεται να είναι τουλάχιστον $1 εκατομμύριο ανά ημέρα (Clark et al. 1987a). Ίσως, το κόστος καθυστέρησης του χρόνου ανάπτυξης του πλαισίου της πόρτας δεν θα ήταν τόσο υψηλό, αλλά είναι ουσιαστικό επειδή η ανάπτυξη του μεταλλικού πλαισίου βρίσκεται γενικά στην κρίσιμη πορεία.

Διατύπωση. Ο αριθμός περιορισμών στο μοντέλο είναι μια συνάρτηση της μεταβλητής απόφασης, *n*, έτσι διατυπώνεται το μοντέλο ως πρόβλημα δύο σταδίων. Το πρώτο στάδιο, *P*(*n*), είναι ένα μη γραμμικό πρόγραμμα όπως δίνεται παρακάτω.

$P(n)$ Ελαχιστοποίηση $\lambda = t_n + d_n$ υπό τους όρους

$$t_i \geq t_{i-1} + d_{i-1}, \qquad i = 1,2,\ldots,n, \tag{9}$$

$$t_0 \geq t_{As} = 10, \tag{10}$$

$$10 < t_i < t_F, \qquad i = 1,2,\ldots,n-1, \tag{11}$$

$$t_n \geq t_F = t_{Af} = 18, \tag{12}$$

$$\Delta x(t_{i-1}, t_i) = w_{in}(\in_i - \in_{i-1}), \tag{13}$$

$$d_i = \Phi(\Delta x(t_{i-1}, t_i)), \qquad i = 1,2,\ldots,n. \tag{14}$$

Η εύρεση της γενικής βέλτιστης στρατηγικής επιτυγχάνεται με την επίλυση του *P*(*n*) για όλες τις ρεαλιστικές τιμές του *n* και την επιλογή της μικρότερης τιμής του *n* που οδηγεί στο μικρότερο χρόνο υλοποίησης. Η μελέτη όσον αφορά τη διαδικασία ανάπτυξης βιομηχανικών προϊόντων προτείνει ότι ο αριθμός επαναλήψεων δεν είναι στην πράξη πολύ μεγάλος (συνήθως *n*<10), έτσι η παραπάνω προσέγγιση παραμένει υπολογιστικά εφικτή. Επίσης, μπορούν συχνά να προσδιοριστούν μικρότερα όρια του χρόνου υλοποίησης που απλοποιούν πολύ τη διαδικασία επίλυσης όπως παρουσιάζεται παρακάτω για το παράδειγμα χειρολαβής πόρτας.

Έστω $d_{\min}$ είναι ο χρόνος που καταναλώνεται από την επανάληψη με τη μικρότερη διάρκεια $(d_i \geq d_{\min})$. Για τη χειρολαβή πόρτας, $d_{\min} = 1$ ημέρα (Σχήμα 6.7Β). Από τους παραπάνω περιορισμούς, φαίνεται ότι το χαμηλότερο όριο του χρόνου υλοποίησης δίνεται από το $\lambda = t_n + d_n \geq t_{Af} + d_{\min}$. Χρησιμοποιώντας τις τιμές για τη διαδικασία χειρολαβής πόρτας, έχουμε $\lambda \geq 18 + 1/7$ εβδομάδες.

Για *n*=0, η διαδικασία είναι διαδοχική με χρόνο υλοποίησης $= t_{Af} + d_0 = 22$ εβδομάδες.

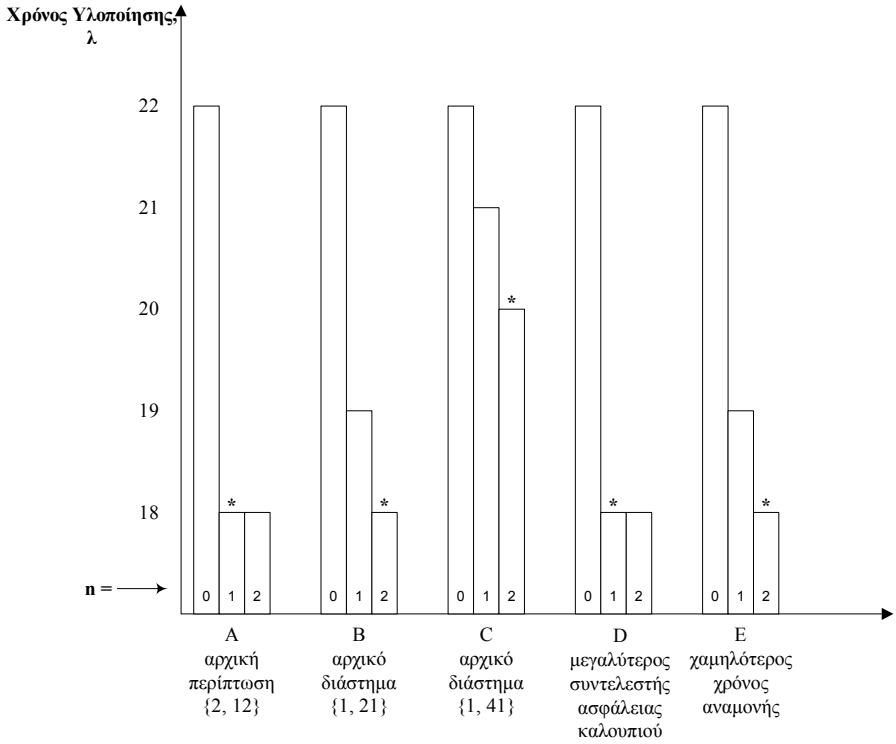
Για *n*=1, η λύση είναι $t_0 = 14$, $d_1 = 1/7$, $t_1 = 18$, $\lambda = 18 + 1/7$ εβδομάδες. (Υπάρχουν πολλαπλά βέλτιστα που παράγουν τον ίδιο χρόνο υλοποίησης, παρουσιάζεται μόνο ένα).

Δεδομένου ότι η βέλτιστη λύση με *n*=1 είναι ίση με το χαμηλότερο όριο, δεν χρειάζεται να εξεταστούν μεγαλύτερες τιμές του *n*. Κατά συνέπεια, οι δραστηριότητες με επικάλυψη με την ανταλλαγή προκαταρκτικών πληροφοριών βοηθούν στη μείωση του χρόνου υλοποίησης της ανάπτυξης από 22 εβδομάδες (για τη διαδοχική διαδικασία) σε 18 και ένα-έβδομο εβδομάδες για την διαδικασία με επικάλυψη.

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου (συνάρτηση εξέλιξης, συνάρτηση ευαισθησίας, αρχικό διάστημα, και διάρκεια προγραμματισμένης επανάληψης) είναι εκτιμήσεις. Εξετάζεται η επίδραση των μεταβολών αυτών των δεδομένων εισόδου στο όφελος του χρόνου υλοποίησης που επιτυγχάνεται με την επικάλυψη. Συγκεκριμένα, αναλύεται πως ο χρόνος υλοποίησης της ανάπτυξης ποικίλλει με τις αλλαγές σε ένα από τα δεδομένα εισόδου, αρχικό πλάτος διαστήματος. Υποθέτουμε ότι το πλάτος της χειρολαβής δεν είναι στο διάστημα 2mm και 12mm, αλλά σε ένα διπλάσιο διάστημα 1mm έως 21mm. Το Σχήμα 6.8Β δείχνει ότι για αυτήν την περίπτωση, ο βέλτιστος χρόνος υλοποίησης (παρουσιάζεται με *) είναι ξανά $18 + 1/7$ εβδομάδες, αλλά απαιτεί δύο επόμενες επαναλήψεις. (Με μια επανάληψη, ο χρόνος υλοποίησης είναι $19 + 1/7$ εβδομάδες). Εάν το αρχικό βάθος βρίσκεται σε ένα ευρύτερο διάστημα, {1, 41} mm, η προκύπτουσα πολιτική παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8C. Σε αυτήν την περίπτωση, δύο επόμενες επαναλήψεις μπορούν να μειώσουν το χρόνο υλοποίησης μόνο σε 20 εβδομάδες. Όσο ότι ο σχεδιασμός γίνεται πιο απρόβλεπτος, το όφελος του χρόνου υλοποίησης που επιτυγχάνεται από την επικάλυψη μειώνεται.

Το θέμα που προκύπτει είναι τι μπορεί να γίνει για να επιταχυνθεί η διαδικασία. Στο Σχήμα 6.8D φαίνεται ότι (για αρχικό διάστημα βάθους {1,41}) μια βελτίωση στον συντελεστή ασφάλειας ανάπτυξης καλουπιού σε 5mm (έτσι ώστε όλες οι αλλαγές στο Σχήμα 6.7B πάνω από 5mm βάθος μπορούν να προσαρμοστούν σε μικρές επαναλήψεις) μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του βέλτιστου χρόνου υλοποίησης σε $18+1/7$ εβδομάδες. Ομοίως όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8E, για το ίδιο αρχικό διάστημα βάθους {1,41}, μια μείωση στο συγχρονισμό των μεγάλων επαναλήψεων στη μια εβδομάδα (με μείωση του χρόνου αναμονής ή του χρόνου επεξεργασίας του τμήματος καλουπιού) μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του βέλτιστου χρόνου ανάπτυξης σε $18+1/7$ εβδομάδες. Η βελτίωση του συντελεστή ασφάλειας ανάπτυξης καλουπιού είναι μια αποτελεσματικότερη στρατηγική, δεδομένου ότι επιτυγχάνει το βέλτιστο χρόνο υλοποίησης με λιγότερες επαναλήψεις.

Οι παραπάνω υπολογισμοί δείχνουν ότι όταν αυξάνεται το πλάτος του αρχικού διαστήματος, ο χρόνος ανάπτυξης αυξάνεται, αλλά σε σχετικά μικρότερο βαθμό. Για μια διπλή αύξηση στο πλάτος του αρχικού διαστήματος, ο βέλτιστος χρόνος ανάπτυξης δεν αλλάζει, και για μια τετραπλή αύξηση στο πλάτος του αρχικού διαστήματος, ο βέλτιστος χρόνος ανάπτυξης αυξάνει και το όφελος στο χρόνο υλοποίησης είναι δύο εβδομάδες.



Σχήμα 6 8: Επίδραση των Δεδομένων Εισόδου στην Πολιτική Επικάλυψης

6.4.4 Εννοιολογικό πλαίσιο για Δραστηριότητες που Επικαλύπτονται

Το μοντέλο χρησιμοποιεί λεπτομερή δεδομένα εισόδου που μπορεί να είναι δύσκολο να ληφθούν στην πράξη. Για παράδειγμα, ελλείψει καλής κατανόησης της διαδικασίας σχεδιασμού, μπορεί να είναι δύσκολο να συλλεχθούν λεπτομερή και ακριβή δεδομένα εξέλιξης και ευαισθησίας. Σε αυτό το κεφάλαιο, δίνεται ένα εννοιολογικό πλαίσιο που παρέχει διοικητικές ιδέες (managerial insights) χρησιμοποιώντας ποιοτικά δεδομένα εισόδου εξέλιξης και ευαισθησίας. Το πλαίσιο εξετάζει ακραίες τιμές εξέλιξης και ευαισθησίας και προσφέρει ιδέες όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι συνδεμένες δραστηριότητες ανάπτυξης προϊόντων μπορούν να επικαλυφθούν.

6.4.4.1 Πλαίσιο Ευαισθησίας – Εξέλιξης

Στις δραστηριότητες ανάπτυξης προϊόντων που επικαλύπτονται, προκύπτουν οι ίδιες ερωτήσεις που οδήγησαν στην ανάπτυξη του μοντέλου: Πότε πρέπει οι downstream πληροφορίες να δράσουν στις upstream; Πώς πρέπει οι δραστηριότητες να επικαλυφθούν όταν δεν μπορεί η downstream δραστηριότητα να λειτουργήσει με προκαταρκτικές πληροφορίες; Πότε είναι καλύτερα να παγώσουν οι upstream πληροφορίες παρά να μεταφερθούν με μια προκαταρκτική μορφή στην downstream δραστηριότητα; Ο συνδυασμός των ακραίων τιμών εξέλιξης και ευαισθησίας δίνει τις απαντήσεις σε αυτές τις ερωτήσεις. Το Σχήμα 6.9, παρουσιάζει τέσσερις ακραίες καταστάσεις που μπορεί να προκύψουν – όταν η upstream εξέλιξη είναι γρήγορη ή αργή σε συνδυασμό με το αν η downstream ευαισθησία είναι υψηλή ή χαμηλή. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη (ανταλλαγή προκαταρκτικών πληροφοριών /έγκαιρη οριστικοποίηση) διαφέρουν για κάθε συνδυασμό εξέλιξης και ευαισθησίας.

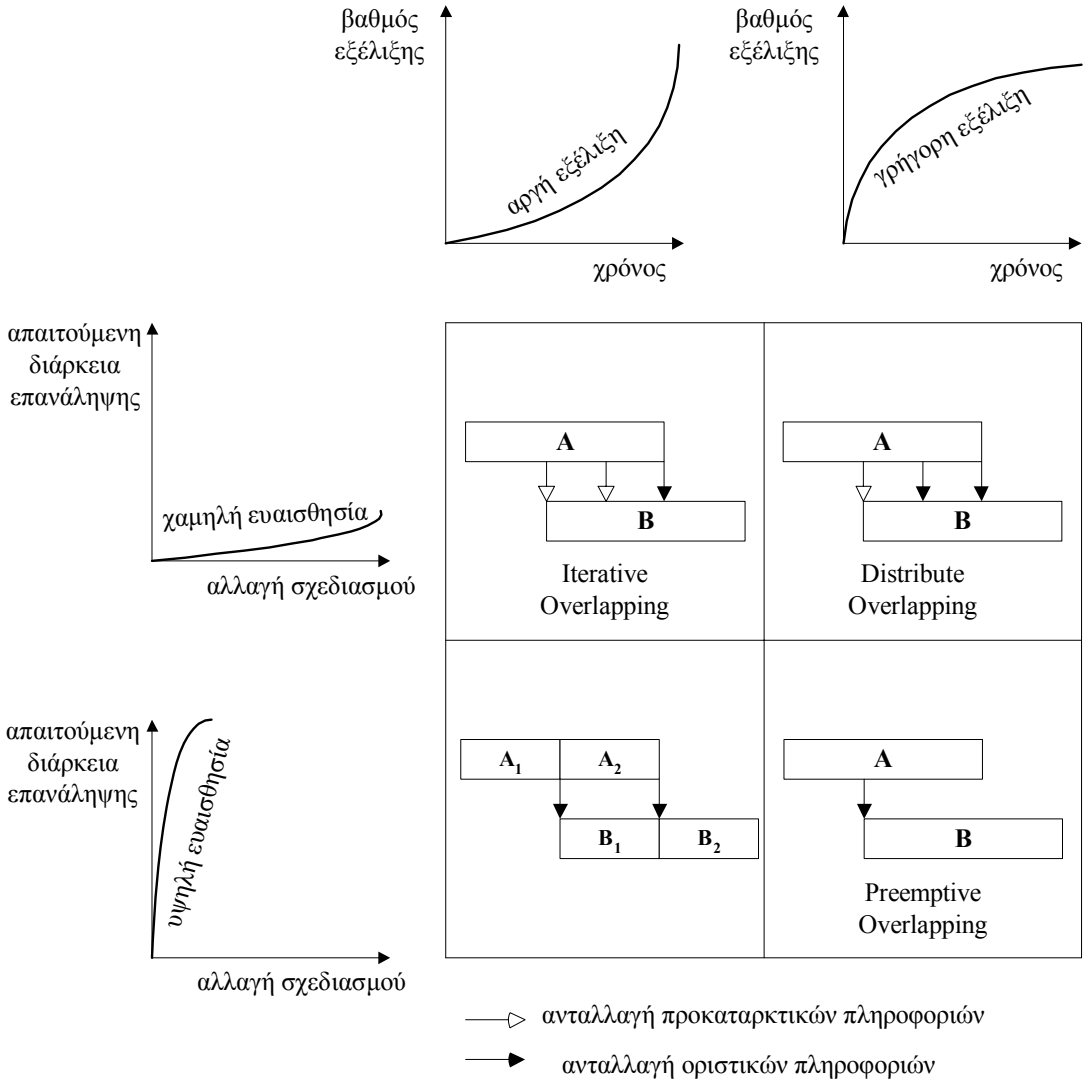
<u>Περίπτωση 1</u>: Όταν η ευαισθησία είναι *χαμηλή*, είναι δυνατό να δεσμευθούν οι downstream πόροι με βάση τις προκαταρκτικές upstream πληροφορίες. Σε αυτήν την περίπτωση, ακόμα κι αν οι αλλαγές στις πληροφορίες που ανταλλάσσονται είναι μεγάλες, τα αποτελέσματά τους στην downstream δραστηριότητα δεν είναι. Επιπλέον, όταν η upstream εξέλιξη είναι *αργή* – συμβαίνουν σημαντικές αλλαγές έως αργά στην upstream διαδικασία, πριν τις οποίες οι πληροφορίες δεν μπορούν να οριστικοποιηθούν – η επικάλυψη είναι *επαναληπτική*. Σε αυτήν την περίπτωση, οι δραστηριότητες επικαλύπτονται ξεκινώντας την downstream δραστηριότητα με

προκαταρκτικές πληροφορίες, και ενσωματώνοντας τις αλλαγές σχεδιασμού στις επόμενες downstream επαναλήψεις (n>0). Οι πληροφορίες σχεδιασμού δεν οριστικοποιούνται μέχρι την ολοκλήρωση της upstream δραστηριότητας, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια μεγάλη ποιοτική συνέπεια για την upstream δραστηριότητα λόγω της αργής εξέλιξης ($t_F = t_{Af}$).

Περίπτωση 2: Η αντίθετη περίπτωση είναι όταν η downstream ευαισθησία είναι *υψηλή*, αλλά η upstream εξέλιξη πληροφοριών είναι *γρήγορη* (οι πληροφορίες μπορούν να οριστικοποιηθούν νωρίς στην upstream δραστηριότητα χωρίς μεγάλη ποιοτική απώλεια). Σε αυτή την περίπτωση, οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται λαμβάνουν την τελική τιμή/ μορφή τους σε ένα νωρίτερο χρονικό σημείο. Με άλλα λόγια, επιταχύνεται η upstream επίλυση προβλήματος και οι πληροφορίες παγώνουν πριν τον κανονικό χρόνο ($t_F < t_{Af}$). Αυτό καλείται *πρόωρη* επικάλυψη και θα βοηθούσε στη μείωση του χρόνου ανάπτυξης αρχίζοντας την downstream δραστηριότητα νωρίτερα – αλλά με *οριστικοποιημένες* upstream πληροφορίες. Να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει καμία επόμενη downstream επανάληψη (n=0). Μπορεί να οδηγήσει σε κάποια ποιοτική απώλεια στην upstream δραστηριότητα επειδή η upstream δραστηριότητα χάνει την ευκαιρία να κάνει αλλαγή μέχρι τον αρχικό χρόνο ολοκλήρωσής της.

Περίπτωση 3: Η downstream ευαισθησία είναι *υψηλή* και η upstream εξέλιξη είναι *αργή*. Εδώ δεν είναι επιθυμητό να αρχίσει η downstream δραστηριότητα με προκαταρκτικές πληροφορίες ούτε εφικτό να preempt τις περαιτέρω αλλαγές στις πληροφορίες που ανταλλάσσονται σε ένα νωρίτερο χρονικό σημείο ($t_F = t_{Af}$; n=0). Σε αυτή την περίπτωση, οι πληροφορίες που ανταλλάσσονται διαχωρίζονται σε μέρη για να διαπιστωθεί εάν κάποιο από τα μέρη εξελίσσεται γρηγορότερα ή εάν είναι πρακτική η μεταφορά κάποιου από τα μέρη με την προκαταρκτική του μορφή στην downstream δραστηριότητα. Συχνά η εξέλιξη και η ευαισθησία των μερών μπορεί να είναι διαφορετικές από ότι της συνολικής πληροφορίας (Krishnan 1996). Επειδή ο διαχωρισμός βασίζεται σε φυσικό ή λειτουργικό διαχωρισμό των upstream και downstream δραστηριοτήτων, αυτή η προσέγγιση ονομάζεται διασπαστική (divisive) επικάλυψη. Εάν δεν εξελίσσεται γρήγορα καμία πληροφορία, και ούτε είναι χρήσιμη στην downstream δραστηριότητα με προκαταρκτική μορφή, τότε δεν συνιστάται καμία επικάλυψη με την υπάρχουσα εξέλιξη και ευαισθησία.

Περίπτωση 4: Το τελευταίο σενάριο εμφανίζεται όταν εξελίσσονται *γρήγορα* οι upstream πληροφορίες και η downstream ευαισθησία είναι *χαμηλή*. Σε αυτή την περίπτωση, είναι δυνατό και να αρχίσει η downstream δραστηριότητα με πρώιμες πληροφορίες και να προλαμβάνει επόμενη ανταλλαγή πληροφοριών ($t_F < t_{Af}$; n>0). Επειδή η επίπτωση της επικάλυψης διανέμεται μεταξύ των upstream και downstream δραστηριοτήτων, αυτή η κατάσταση ονομάζεται *κατανεμημένη* επικάλυψη.



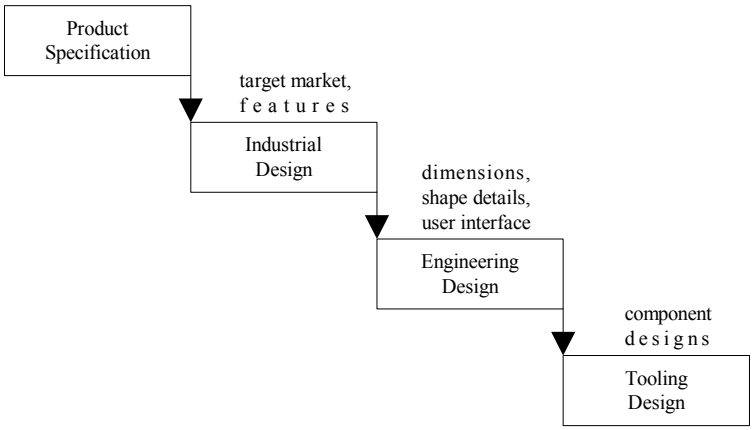
Σχήμα 6 9: Τύποι Επικάλυψης με βάση την Εξέλιξη και την Ευαισθησία

Είναι αξιοσημείωτο ότι οι διαφορετικοί τύποι επικάλυψης καταλήγουν σε διαφορετικές ανταλλαγές μεταξύ των παραμέτρων απόδοσης. Επίσης, ενώ το παραπάνω πλαίσιο παρουσιάζει τους μηχανισμούς επικάλυψης για τους διαφορετικούς συνδυασμούς εξέλιξης και ευαισθησίας, δεν κάνει τις γενικεύσεις για

το ποσό ή το βαθμό επικάλυψης για τον ακόλουθο λόγο. Μια κατάσταση γρήγορης εξέλιξης, χαμηλής ευαισθησίας είναι ευνοϊκή για την επικάλυψη (και μια διαδικασία υψηλής ευαισθησίας, αργής εξέλιξης είναι λιγότερο ευνοϊκή). Η πολύ χαμηλή ευαισθησία, εντούτοις, μπορεί να είναι ευνοϊκότερη σε μια αργή διαδικασία εξέλιξης για να περιλάβει μεγαλύτερη επικάλυψη από μια γρηγορότερη διαδικασία εξέλιξης. Αυτό οφείλεται στη μη γραμμική μορφή του μοντέλου, και μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι ένα μικρό ποσό αναμονής (κατά τη διάρκεια του αρχικού μέρους της upstream δραστηριότητας) μπορεί να βοηθήσει την downstream δραστηριότητα να αποφύγει μια περίοδο έντονης αλλαγής στη περίπτωση γρήγορης εξέλιξης, ενώ το ίδιο πράγμα δεν ισχύει για την αργή περίπτωση εξέλιξης.

6.4.4.2 Παράδειγμα του Εννοιολογικού Πλαισίου: Ανάπτυξη Μπίπερ στη Motorola

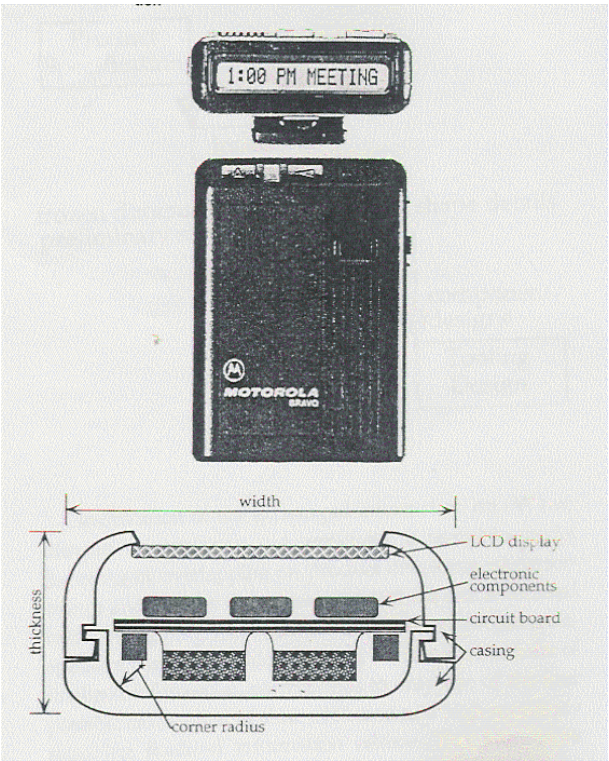
Επεξηγείτε το παραπάνω πλαίσιο με την εφαρμογή στη διαδικασία ανάπτυξης ενός ηλεκτρονικού μπίπερ Motorola Inc. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10, η διαδικασία ανάπτυξης ενός μπίπερ περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: προδιαγραφές προϊόντος, βιομηχανικός σχεδιασμός (διαμόρφωση), μηχανικός σχεδιασμός, και σχεδιασμό εργαλείων. Κατά τη διάρκεια του σταδίου προδιαγραφών του προϊόντος καθορίζονται η αγορά σκοπός, η γεωμετρική μορφή του μπίπερ και ο τρόπος διακίνησης. Κατά τη διάρκεια του σταδίου βιομηχανικού σχεδιασμού καθορίζονται οι εξωτερικές διαστάσεις, οι λεπτομέρειες μορφής και η επικοινωνία με το χρήστη. Το στάδιο μηχανικού σχεδιασμού περιλαμβάνει το σχεδιασμό των μηχανικών εξαρτημάτων και των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Τέλος, ο σχεδιασμός εργαλείων περιλαμβάνει την ανάπτυξη των φορμών, τη σχεδίαση των ιδιαίτερων γνωρισμάτων, εργαλεία συναρμολόγησης, και δοκιμή των χαρακτηριστικών.



Σχήμα 6 10: Φάσεις Διαδικασίας Ανάπτυξης Μπίπερ

Εστιάζουμε στην επικάλυψη των φάσεων μηχανικού σχεδιασμού και βιομηχανικού σχεδιασμού, δεδομένου σε σύνολο καταναλώνουν ένα μεγάλο μέρος του συνολικού χρόνου ανάπτυξης. Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό μπίπερ και μια τομή του.

Ο μηχανικός σχεδιασμός του μπίπερ απαιτεί ορισμένα σημαντικά δεδομένα εισόδου από τους βιομηχανικούς σχεδιαστές, συμπεριλαμβανομένων των εξωτερικών διαστάσεων του μπίπερ και τις λεπτομέρειες μορφής. Η εμπειρία στο σχεδιασμό μπίπερ δείχνει ότι οι διαστάσεις του μπίπερ εξελίσσονται γρήγορα. Αυτές οι διαστάσεις επιβάλλονται από τον ανταγωνισμό, η αγορά σκοπός και την τεχνολογία, και συμπεριλαμβάνονται στις προδιαγραφές προϊόντος. Για παράδειγμα, εάν το μπίπερ προορίζεται για να χωράει σε μια τσέπη πουκαμίσου, οι διαστάσεις του περιορίζονται αμέσως από τα καθιερωμένα μεγέθη τσέπης και από τα μεγέθη των ανταγωνιστικών προϊόντων. Αφ' ετέρου, η εξέλιξη των λεπτομερειών μορφής είναι πολύ πιο αργή δεδομένου ότι οι βιομηχανικοί σχεδιαστές αλλάζουν τις πληροφορίες μορφής για να εξασφαλίσουν συνέπεια της μορφής με τις λεπτομέρειες των άλλων χαρακτηριστικών.

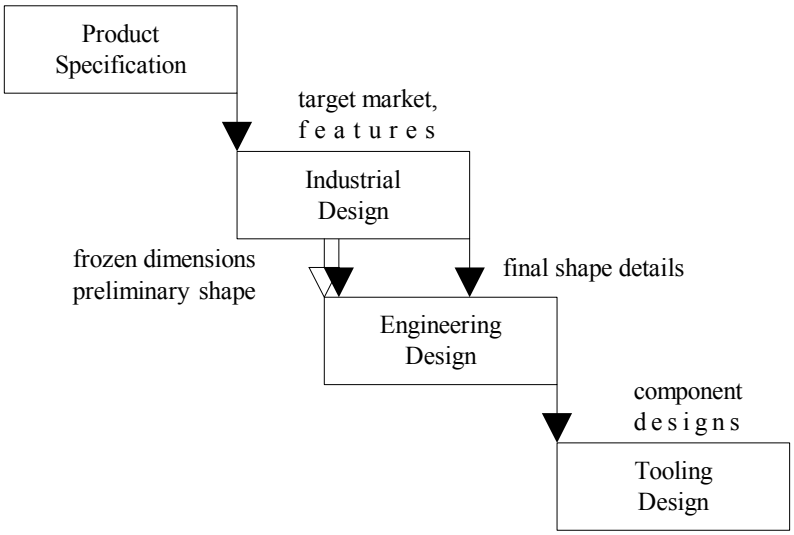


Σχήμα 6 11: Αντιπροσωπευτικό Μπίπερ

Η μηχανική δραστηριότητα είναι πολύ ευαίσθητη στις αλλαγές διαστάσεων προϊόντων. Επηρεάζεται όχι μόνο η διάταξη των εξαρτημάτων αλλά και οι επιλογές των εξαρτημάτων, καθώς μικρότερα εξαρτήματα (που κατασκευάζονται με πιο πρόσφατη ή όχι ακόμα διαθέσιμη τεχνολογία) μπορεί να απαιτηθούν για να διευκολύνουν μια μείωση του μεγέθους. Οι αλλαγές στη μορφή είναι κάπως διαφορετικές. Αλλαγές στις ακτίνες γωνιών μπορούν πράγματι να έχουν επιπτώσεις στη διάταξη των εξαρτημάτων δεδομένου ότι το εξωτερικό πλαίσιο μπορεί να παρεμποδίσει μερικά εξαρτήματα. Εντούτοις, για αυτή τη διαδικασία, η αποτελεσματική επικοινωνία μέσα στην ομάδα επέτρεψε στους μηχανικούς να προλάβουν τις πιθανές αλλαγές στις ακτίνες και να τοποθετήσουν τα μεγαλύτερα ηλεκτρονικά εξαρτήματα κοντά στο κέντρο του κυκλώματος. Δεδομένου ότι οι αλλαγές στις ακτίνες γωνιών δεν έχουν επιπτώσεις στο κέντρο του κυκλώματος, μειώθηκε η ευαισθησία του μηχανικού σχεδιασμού στις αλλαγές των λεπτομερειών μορφής.

Κατά συνέπεια η μηχανική απαιτεί δύο τύπους πληροφοριών από το βιομηχανικό σχεδιασμό: διαστάσεις του μπίπερ (γρήγορη εξέλιξη, υψηλή ευαισθησία), και λεπτομέρειες μορφής (αργή εξέλιξη, χαμηλή ευαισθησία). Για την επικάλυψη των

λειτουργιών μηχανικού και βιομηχανικού σχεδιασμού, ο μηχανικός σχεδιασμός μπορεί να ξεκινήσει με την προκαταρκτική μορφή πληροφοριών, αλλά με παγωμένες (frozen) τιμές των διαστάσεων του μπίπερ (Σχήμα 6.12).



Σχήμα 6 12: Επικάλυψη Μηχανικού Σχεδιασμού και Βιομηχανικού Σχεδιασμού

6.4.5 Συμπεράσματα

Το πλαίσιο που παρουσιάστηκε παραπάνω βοηθά να καθοριστεί ο τρόπος αποσύνθεσης των πληροφοριών σχεδιασμού και επικάλυψης των διαδοχικών σταδίων μιας διαδικασίας ανάπτυξης βασισμένης στις (εξέλιξη και ευαισθησία) ιδιότητες των πληροφοριών που ανταλλάσσονται μεταξύ αυτών των σταδίων.

Η ταξινόμηση των πληροφοριών που ανταλλάσσονται στις δύο διαστάσεις, εξέλιξη και ευαισθησία, είναι χρήσιμη για τη διαμόρφωση της επίδρασης της επικάλυψης στην απόδοση της ανάπτυξης προϊόντων και επιτρέπει τη διαχείριση του κινδύνου που συνδέεται με την επικάλυψη. Το συμβατικό παράδειγμα διαχείρισης προγράμματος, που υποθέτει την μιας φοράς μεταφορά των οριστικοποιημένων πληροφοριών, αντιστοιχεί μόνο σε μια από τις τέσσερις πιθανές περιπτώσεις – αυτή της αργής εξέλιξης και της υψηλής ευαισθησίας που απαιτεί κυκλοφορία οριστικών πληροφοριών. Το πλαίσιο που παρουσιάστηκε επεκτείνει τον τομέα της διαχείρισης του προγράμματος με την εξέταση τριών άλλων συνδυασμών εξέλιξης και ευαισθησίας. Στην ανάπτυξη του μοντέλου και του πλαισίου, έχει γίνει προσπάθεια να συντηρηθεί η απλότητα και να εστιαστεί η προσοχή στα ζητήματα σχεδιασμού που παρατηρούνται στην πράξη. Συγκεκριμένα, το κόστος μεταφοράς των πληροφοριών

στην downstream δραστηριότητα δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο, λόγω του ότι η τεχνολογία πληροφοριών καθιστά αυτό το καθήκον ανέξοδο.

Διάφορες πλευρές του μοντέλου και του πλαισίου χρειάζονται περαιτέρω εξέταση. Κατ' αρχάς, η επέκταση του μοντέλου σε διαδικασίες με πολλαπλές δραστηριότητες σχεδιασμού χρειάζεται προσοχή. Αυτό μπορεί ίσως να επιτευχθεί με την προσθήκη περισσότερων μεταβλητών που να αντιστοιχούν στις ανταλλαγές πληροφοριών μεταξύ κάθε ζευγαριού δραστηριοτήτων. Δεύτερον, το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί για να περιλάβει τον εντοπισμό των προηγούμενων upstream ανέφικτων από τις downstream δραστηριότητες. Αυτό θα περιελάμβανε την πιθανότητα της downstream ανατροφοδότησης που έχει ως αποτέλεσμα τις upstream επαναλήψεις. Επίσης, οι αναθεωρήσεις που εκτελούνται για να εντοπίσουν τα σφάλματα μπορούν να καλύπτουν ουσιαστικό χρόνο, έτσι πρέπει να συμπεριληφθεί το κόστος αυτών των αναθεωρήσεων (Ha and Porteus 1995). Μια τρίτη κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα είναι να μελετηθεί το πρόβλημα επικάλυψης όταν οι upstream και downstream δραστηριότητες περιλαμβάνουν εσωτερικές επαναλήψεις (Smith και Eppinger 1995).

6.5 Μοντέλο 2

6.5.1 Εισαγωγή

Σε πολλές βιομηχανίες ο χρόνος κυκλοφορίας προέκυψε σαν η βασική πηγή ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος στις αρχές της δεκαετίας του '90. Πολλά εργαλεία έχουν προταθεί από τότε για να επιταχύνουν τη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων, μεταξύ των οποίων διακρίνεται η έννοια της παράλληλης μηχανικής. Παρά τη δημοτικότητά της, υπάρχουν πρόσφατα εμπειρικά στοιχεία ότι η παραλληλία δεν εφαρμόζεται σε όλα τα προγράμματα ανάπτυξης προϊόντων.

Αυτά τα συγκρουόμενα στοιχεία προτρέπουν την έρευνα σε βάθος της δυνατότητας εφαρμογής της παραλληλίας. Αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο που εξετάζει δύο θέματα (1) *το βαθμό επικάλυψης* των δραστηριοτήτων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά προγράμματος, και (2) *το συντονισμό* των παράλληλων δραστηριοτήτων.

Το μοντέλο παράγει τρία κύρια αποτελέσματα. Κατ' αρχάς, παρουσιάζεται ένας κανόνας δυναμικής απόφασης για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προγράμματος συνεδριάσεων. Η βέλτιστη συχνότητα συνεδρίασης ακολουθεί τη συχνότητα των

μηχανικών αλλαγών (μείωση αβεβαιότητας) κατά τη διάρκεια του χρόνου, και αυξάνεται με τα επίπεδα αβεβαιότητας και εξάρτησης. Δεύτερον, παράγεται η βέλτιστη παραλληλία μεταξύ των δραστηριοτήτων όταν ακολουθεί η επικοινωνία τη βέλτιστη δομή που περιγράφεται από τον κανόνα απόφασης. Η αβεβαιότητα και η εξάρτηση καθιστούν την παραλληλία λιγότερο ελκυστική, μειώνοντας τη βέλτιστη επικάλυψη. Εντούτοις η ταχύτητα μείωσης της αβεβαιότητας μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει τη βέλτιστη επικάλυψη. Τρίτον, η αλληλεπίδραση της επικοινωνίας και ο συγχρονισμός μπορούν να δημιουργήσουν τα τοπικά βέλτιστα στο πρόβλημα εύρεσης του επίπεδου αλληλοεπικάλυψης που ελαχιστοποιεί τον χρόνο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μια οργάνωση θα πρέπει να αναλάβει έναν σημαντικό επανασχεδιασμό της διαδικασίας για να επωφεληθεί από την παραλληλία. Η οριακή βελτίωση, ακόμα κι αν στοχεύει προς το ολικό βέλτιστο, μπορεί να αυξήσει παρά να μειώσει το χρόνο ανάπτυξης.

Στο κεφάλαιο 6.5.2 εισάγεται το γενικό μαθηματικό μοντέλο. Στο κεφάλαιο 6.5.3 παράγεται η βέλτιστη δυναμική πολιτική επικοινωνίας, και στο κεφάλαιο 6.5.4 το βέλτιστο επίπεδο συγχρονισμού με τη βέλτιστη επικοινωνία. Στο κεφάλαιο 6.5.5 αναλύεται ο συντονισμός πριν από την έναρξη του προγράμματος και η επίδρασή του στο συγχρονισμό. Στο κεφάλαιο 6.5.6 παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα για το μοντέλο.

6.5.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Εξετάζεται η διάρκεια ενός προγράμματος με δύο καθήκοντα διάρκειας T_1 και T_2, αντίστοιχα. Στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων, θεωρούμε ότι ο T_1 είναι ο χρόνος σχεδιασμού προϊόντος και T_2 ο χρόνος σχεδιασμού της διαδικασίας. Ονομάζεται η πρώτη δραστηριότητα upstream και η δεύτερη downstream. Στην προσέγγιση «over the wall», ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης είναι $T_1 + T_2$. Στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης. Υποθέτουμε ότι κάποιο τμήμα λ από το T_2 μπορεί να διεξαχθεί παράλληλα με το T_1. Εάν $T_2 \geq T_1$, δεν μπορεί να γίνει περισσότερο από το T_1 / T_2 παράλληλα. Ορίζεται $\Lambda = [0, \lambda_{\max}]$, όπου $\lambda_{\max} = \min\{1, T_1 / T_2\}$, είναι το διάστημα όλων των πιθανών επιπέδων επικάλυψης. Το λ παρέχει ένα συνεχές μέτρο παραλληλίας. Χωρίς να λάβουμε υπόψη οποιαδήποτε μειονεκτήματα της παραλληλίας, ο χρόνος Τ ολοκλήρωσης του προγράμματος έχει όφελος από την επικάλυψη:

$$T = T_1 + (1-\lambda)T_2 \qquad \textbf{(1)}$$

Αν και η επικάλυψη δημιουργεί ένα άμεσο χρονικό πλεονέκτημα, δεν είναι χωρίς μειονεκτήματα. Σε μια πλήρως διαδοχική διαδικασία, downstream ξεκινά με οριστικές πληροφορίες από την upstream, ενώ σε μια διαδικασία επικάλυψης θα πρέπει να στηριχθούμε σε προκαταρκτικές πληροφορίες. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι ριψοκίνδυνη εάν οι upstream πληροφορίες αλλάξουν σημαντικά ή εάν υπάρχει μια ισχυρή εξάρτηση μεταξύ των δραστηριοτήτων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι μηχανικές αλλαγές (των upstream πληροφοριών) μπορεί να προκαλέσουν downstream επανάληψη καθυστερώντας ολόκληρο το πρόγραμμα (Eastman 1980), δημιουργώντας μια ανταλλαγή μεταξύ του χρόνου που κερδίζεται από την επικάλυψη και του χρόνου καθυστέρησης της επανάληψης.

6.5.2.1 Αβεβαιότητα και εξέλιξη

Οι μηχανικές αλλαγές φθάνουν upstream σύμφωνα με μια στοχαστική διαδικασία με έναν χρονικά εξαρτημένο μέσο. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τις αρχικές πληροφορίες βάσει των οποίων έχει ξεκινήσει η εργασία downstream. Υποθέτουμε ότι αυτές οι αλλαγές ακολουθούν μια μη σταθερή διαδικασία Poisson με ρυθμό $\mu_\alpha(t^{up})$, που ορίζεται στη προηγούμενη διάρκεια του σταδίου $t^{up} \in [0, T_1]$.

Εξετάζουμε μια κατάσταση *διαδοχικής* εξάρτησης, δηλαδή η downstream πρέπει να ξαναρυθμίσει την εργασία της εάν η upstream αλλάξει το σχεδιασμό της με έναν μη αναμενόμενο τρόπο. Αυτό αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου οι downstream μηχανικοί πρέπει να συμπεριλάβουν τις τελικές upstream πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων όλων των τροποποιήσεων, ακόμα κι αν διαβιβαστούν μετά από την έναρξη της downstream.

Η *αμοιβαία* εξάρτηση επιβάλλει από τη φύση της την επικάλυψη και κοινή επίλυση προβλημάτων επειδή κανένα καθήκον δεν μπορεί να προχωρήσει χωρίς το άλλο. Μοντελοποιείται η *διαδοχική* εξάρτηση επειδή εφαρμόζεται συνήθως ακόμη και για τις δραστηριότητες που είναι λογικά διαδοχικές, προκειμένου να συμπιέσει τον κύκλο ανάπτυξης. Για τις διαδοχικά εξαρτώμενες δραστηριότητες, η επικάλυψη είναι από τη φύση της επικίνδυνη. Το μοντέλο δείχνει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες οι κίνδυνοι μπορούν να δικαιολογηθούν από το όφελος χρονικής συμπίεσης.

Το συνολικό επίπεδο αβεβαιότητας δίνεται από το μ_α, το μέσο ρυθμό των upstream αλλαγών που επηρεάζουν την downstream εργασία. Αυτή η ολική αβεβαιότητα μπορεί να μειωθεί μέσω του συντονισμού πριν από την έναρξη της upstream δραστηριότητας. Ο Adler (1995) περιγράφει πώς μια τέτοια προ-επικοινωνία[1] μπορεί να ικανοποιήσει τη συνολική απαίτηση συντονισμού μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής, εάν το πρόβλημα σχεδιασμού είναι συνηθισμένο και μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας προηγούμενες λύσεις. Έστω ότι α είναι ο συνολικός αριθμός συνεδριάσεων συντονισμού προτού αρχίσει η εργασία ανάπτυξης. Ο ρυθμός αλλαγών παρουσιάζει μειούμενη τάση:

$$\mu_\alpha = \mu_0 \exp\{-B\alpha\} \qquad \textbf{(2)}$$

Το μ_0 αντιπροσωπεύει την έμφυτη τεχνική αβεβαιότητα του προγράμματος, ή το ρυθμό τροποποιήσεων ελλείψει προγραμματισμού ή συντονισμού. Η παράμετρος B αντιπροσωπεύει την ικανότητα της οργάνωσης να μειώσει την αβεβαιότητα κατά τη διάρκεια της φάσης προ-επικοινωνίας: όσο υψηλότερο είναι το B, τόσο καλύτερο είναι το αποτέλεσμα μείωσης που επιτυγχάνεται με μια δεδομένη ένταση επικοινωνίας. Αυτή η παράμετρος απεικονίζει το βαθμό συνεργασίας και ολοκλήρωσης, π.χ. η αποτελεσματικότητα με την οποία οι downstream μηχανικοί όχι μόνο βλέπουν τα πρόωρα κύρια σημεία του σχεδιασμού, αλλά μπορεί ακόμη και να τα επηρεάσουν για να καταστήσουν το καθήκον τους ευκολότερο. Η προ-επικοινωνία έχει ένα κόστος. Υποθέτουμε ένα γραμμικό κόστος $\tau_T \alpha$, το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί ως ο μέσος συνολικός χρόνος συνεδρίασης που απαιτείται για την εκ των προτέρων *ολοκλήρωση*.

Η ανομοιογένεια του $\mu_\alpha(t^{up})$ αντιπροσωπεύει την πρόοδο (μείωση αβεβαιότητας) του upstream καθήκοντος. Εάν η εξέλιξη σε ένα σταθερό σχεδιασμό είναι γρήγορη, τότε το $\mu_\alpha(t^{up})$ είναι υψηλό στην αρχή και μειώνεται καθώς επέρχεται η σταθερότητα. Εάν, αντίθετα, η upstream σύγκλιση σε μια λύση σχεδιασμού είναι αργή, τότε το $\mu_\alpha(t^{up})$ ξεκινά χαμηλό και αυξάνει καθώς η έννοια σχεδιασμού εξελίσσεται στο τέλος. Διαμορφώνεται το $\mu_\alpha(t^{up})$ ως μια *γραμμική* συνάρτηση:

[1] precommunication

$$\mu_\alpha(t^{up}) = \mu_\alpha\left[1 + e\left(2\frac{t^{up}}{\mathrm{T}_1} - 1\right)\right] \qquad \textbf{(3)}$$

Το ολοκλήρωμα των τροποποιήσεων αντιστοιχεί με τη συνάρτηση εξέλιξης του προηγούμενου μοντέλου: Εάν το e είναι αρνητικό (ο αρχικός ρυθμός αλλαγών είναι υψηλός), τότε αρκετή πρόοδος εμφανίζεται νωρίς στην upstream δραστηριότητα. Η παράμετρος $e \in [-1,1]$ είναι μια παράμετρος συμμετοχής για το $\mu_\alpha(t^{up})$. Ονομάζεται *παράμετρος εξέλιξης*. Όταν το $\varepsilon > 0$, τότε το $\mu_\alpha(t^{up})$ αυξάνεται με το t^{up}, που αντιστοιχεί σε αργή εξέλιξη. Όταν το $\varepsilon < 0$, τότε το $\mu_\alpha(t^{up})$ μειώνεται, που αντιστοιχεί σε γρήγορη εξέλιξη. Όταν $\varepsilon = 0$, τότε οι τροποποιήσεις παράγονται ως μια ομοιογενής διαδικασία Poisson ($\mu_\alpha(t^{up})=\mu_\alpha$). Και στις τρεις περιπτώσεις, ο συνολικός αναμενόμενος αριθμός αλλαγών που παράγονται κατά τη διάρκεια του χρόνου του καθήκοντος 1 είναι ο ίδιος, $\mu_\alpha T_1$. Κατά συνέπεια, το e αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της αβεβαιότητας κατά τη διάρκεια του χρόνου, ενώ το μ_α αντιπροσωπεύει το επίπεδο αβεβαιότητας μετά την προ-επικοινωνία, και το μ_0 το έμφυτο επίπεδο αβεβαιότητας πριν την προ- επικοινωνία.

6.5.2.2 Downstream ευαισθησία

Η downstream επανάληψη που δημιουργείται από μια τροποποίηση εξαρτάται από πόσο έχει προχωρήσει η downstream δραστηριότητα στην επίλυση προβλήματός της. Ορίζεται η συνάρτηση επίδρασης $f(t)$ στην downstream διάρκεια, ως ο χρόνος που χρειάζεται για την αλλαγή της προηγούμενης downstream εργασίας, εάν μια τροποποίηση διαβιβαστεί σε $t \in [0, \mathrm{T}_2]$ μονάδες του downstream χρόνου. Αυτός ο χρόνος καθυστέρησης προστίθεται στο χρόνο ολοκλήρωσης προγράμματος. Αυτό βασίζεται στην έννοια της downstream ευαισθησίας, που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο μοντέλο. Οι αλλαγές στις προκαταρκτικές πληροφορίες που έχουν ληφθεί μέχρι τώρα θα καθυστερήσουν την downstream δραστηριότητα. Όσο περισσότερο μια downstream δραστηριότητα έχει προχωρήσει στην εργασία της, τόσο περισσότερη εργασία πρέπει να τροποποιηθεί. Ως εκ τούτου η $f(t)$ είναι αύξουσα.

Στο μοντέλο, $\mu_\alpha(t^{up})$ είναι ο ρυθμός αποκλίσεων από αυτές τις προκαταρκτικές πληροφορίες και έτσι αντιστοιχεί στην κατάλληλη καινοτομία, την πιο πρόσφατη της λύσης σχεδιασμού που επιλέγεται upstream. Η downstream εξάρτηση, που

μοντελοποιείται από τη συνάρτηση επίδρασης $f(t)$, συλλαμβάνει την ιδέα της κατάλληλης ανάλυσης, που καθορίζεται από τον Adler ως ο χρόνος που χρειάζεται για την επίλυση ενός δεδομένου προβλήματος. Νωρίς στην downstream πρόοδο, οι ενότητες που επηρεάζονται από μια τροποποίηση μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα και να αλλάξουν. Οι αλλαγές γίνονται δυσκολότερες όσο αυξάνεται το μέγεθος του προϊόντος ή του συστήματος που έχει αναπτυχθεί.

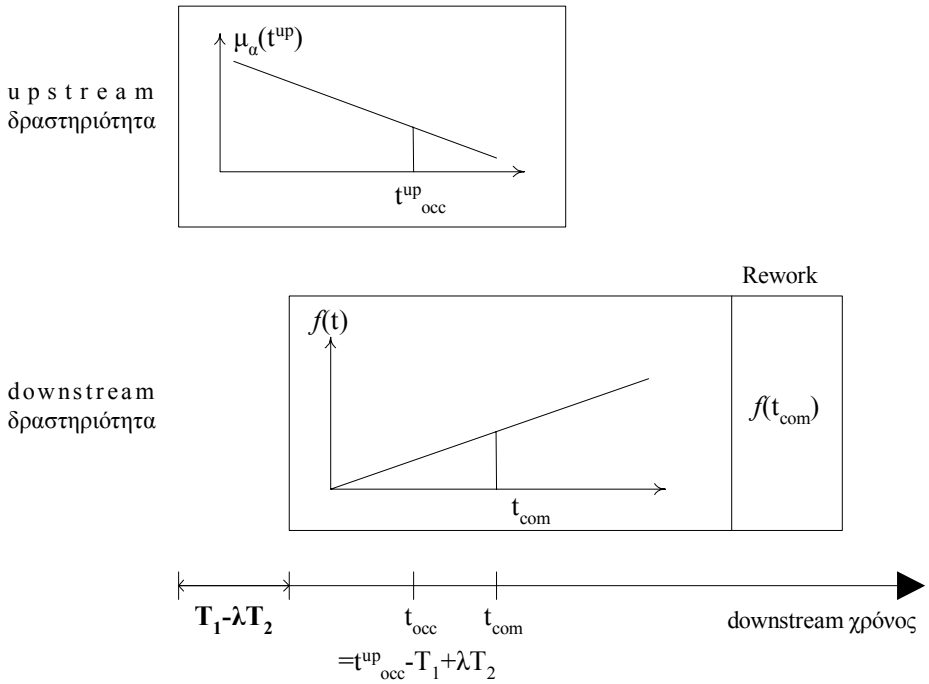
Στο μοντέλο που ακολουθεί, εστιάζεται η προσοχή στις γραμμικές συναρτήσεις επίδρασης $(f(t) = kt)$. Στην πράξη, η συνάρτηση επίδρασης μπορεί να είναι κοίλη ή κυρτή.

6.5.2.3 Παράλληλη Επικοινωνία και Επανάληψη

Κατά τη διάρκεια της φάσης επικάλυψης, η επικοινωνία εμφανίζεται σύμφωνα με μια πολιτική επικοινωνίας $\ell(t)$ με $t \in [0, \lambda T_2]$. Όταν οι μηχανικοί προϊόντων και διαδικασίας συναντώνται σε μια δια-τμηματική συνεδρίαση των ομάδων στο χρόνο *t*, συζητούν τις πιο πρόσφατες αλλαγές στο σχεδιασμό προϊόντων για downstream ενσωμάτωση, και θέτουν έναν κανόνα για την επόμενη συνεδρίαση. Η downstream δεν θα είναι ενήμερη για οποιεσδήποτε νέες μηχανικές αλλαγές μέχρι την επόμενη συνεδρίαση. Κατά συνέπεια, οι συχνότερες συνεδριάσεις μειώνουν την καθυστέρηση διαβίβασης των τροποποιήσεων. Εάν η επικοινωνία ήταν ανέξοδη, τότε η ομάδα θα επικοινωνούσε βέλτιστα και θα ενσωμάτωνε κάθε τροποποίηση αμέσως.

Το Σχήμα 6.13 παρουσιάζει το όφελος επικοινωνίας. Εάν συμβεί μια τροποποίηση στον t_{occ}^{up} upstream χρόνο σύμφωνα με τη χρονικά εξαρτημένη διαδικασία Poisson, διαβιβάζεται κατά την διάρκεια της επόμενης συνεδρίασης, t_{com} στον downstream χρόνο. Όσο μεγαλύτερη η καθυστέρηση μέχρι τη συνεδρίαση, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η επίδραση $f(t_{com})$ της τροποποίησης.

Ενώ η επικοινωνία μειώνει τις καθυστερήσεις, έχει επίσης ένα κόστος. Οι συνεδριάσεις της ομάδας απαιτούν πολύτιμο μηχανικό χρόνο που μπορεί ενδεχομένως να καθυστερήσει το χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος (Σχήμα 6.13).



Σχήμα 6 13: Επικοινωνία και Εξάρτηση για μια Τροποποίηση

Η επικοινωνία αντιστοιχεί σε ένα κόστος οργάνωσης, και έτσι αυτός είναι ένας λόγος για την επεξεργασία κατά ομάδες των ECs (engineering changes – μηχανικών αλλαγών). Το κόστος οργάνωσης καθιστά ευκολότερη την εκτέλεση δύο ECs σε μια ομάδα παρά την εκτέλεσή τους χωριστά. Με τ_2 συμβολίζεται ο σταθερός χρόνος οργάνωσης ανά ομάδα. Ονομάζονται τ_2 τα κόστη επικοινωνίας.

Ο συνολικός χρόνος οργάνωσης των ομάδων πληροφοριών συγκεντρώνεται με αναμενόμενο ρυθμό $\beta(t)\tau_2$, όπου $\beta(t)$ είναι ο αναμενόμενος ρυθμός επικοινωνίας που προκύπτει από την πολιτική $\ell(t)$.

6.5.2.4 Περίληψη Παραμέτρων και Υποθέσεων του Μοντέλου

Έχουν καθοριστεί τώρα όλα τα στοιχεία του μοντέλου και μπορεί να οριστεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης του χρόνου κυκλοφορίας:

$$\min_{\alpha,\ell(t),\lambda} : E\mathrm{T} = \mathrm{T}_1 + (1-\lambda)\mathrm{T}_2 + \alpha\tau_1 + EC(\alpha,\ell(t),\lambda) + ER(\alpha,\ell(t),\lambda) \quad \textbf{(4)}$$

υπό τους όρους: Εξισώσεις (3) και (2)

$$0 \le \alpha; \quad \lambda \in \Lambda \quad \textbf{(5)}$$

$\ell(t)$ εξαρτάται μόνο από τις τροποποιήσεις μέχρι το χρόνο t. **(6)**

$ER(\alpha, \ell(t), \lambda)$ είναι η αναμενόμενη επανάληψη που προκύπτει από το συνδυασμό επικάλυψης λ, έντασης προ-επικοινωνίας α, και της πολιτικής παράλληλης επικοινωνίας $\ell(t)$. $EC(\alpha, \ell(t), \lambda)$ είναι η καθυστέρηση που προκαλείται από τις συνεδριάσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου επικάλυψης. Η βέλτιστη πολιτική επικοινωνίας και ο προκύπτον αναμενόμενος ρυθμός επικοινωνίας $\beta(t)$ παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο. Όλες οι μεταβλητές συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

τ_1	Communication cost for precommunication (time per meeeting)
τ_2	Communication cost for concurrent communication (time per batch)
T_1	Upstream task time
T_2	Downstream task time
μ_0	Basic rate of modifications without precommunication
μ_α	Basic rate of modifications, depending on level of precommunication
$\mu_\alpha(t)$	Time-dependent rate of the Poisson process of generation of modifications by the upstream task team
B	Precommunication capability parameter: reduction in the rate of modifications from one unit of additional communication
k	Impact of a modification (time units per engineering change)
e	Evolution parameter: if -1, fast evolution; if +1, slow evolution
	Decision Variables:
α	Precommunication intensity
β(t)	Expected communication frequency resulting from the concurrent communication policy (time-dependent during the overlap period)
λ	Overlap, % of downstream task length

Το μοντέλο εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού αναμενόμενου χρόνου ολοκλήρωσης του προγράμματος (χρόνος κυκλοφορίας). Δεν συμπεριλαμβάνεται η ποιότητα σχεδιασμού που προκύπτει από το πρόγραμμα. Γίνεται η υπόθεση ότι οι ομάδες προγράμματος πρέπει να εργαστούν έως ότου φτάσουν σε κάποια ορισμένα απαιτούμενα ποιοτικά επίπεδα, και η μόνη ερώτηση είναι εάν μπορούν να οργανωθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί αυτή η ποιότητα όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Δεν συμπεριλαμβάνεται ούτε το κόστος του προγράμματος. Εάν το κόστος του προγράμματος είναι γραμμικό για τους διάφορους τύπους

δραστηριοτήτων, είναι ισοδύναμο με ένα σύνολο βαρών στους χρόνους ολοκλήρωσης των διαφορετικών καθηκόντων.

Η σημαντική υπόθεση που οδηγεί τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι η διαδοχική εξάρτηση του downstream καθήκοντος. Οι άλλες υποθέσεις στο μοντέλο είναι καθαρά υπολογιστικές: η παραγωγή τροποποιήσεων σύμφωνα με μια διαδικασία Poisson με ένα γραμμικό ρυθμό, η γραμμική συνάρτηση επίδρασης, και τα γραμμικά κόστη συνεδριάσεων επικοινωνίας. Το ίδιο ισχύει για την υπόθεση ότι οι βασικοί χρόνοι καθηκόντων T_1 και T_2 είναι αιτιοκρατικοί – η πηγή αβεβαιότητας στο μοντέλο είναι καθαρά η παραγωγή αλλαγών. Το μοντέλο επιλύεται επίσης και για γενικότερες συναρτήσεις και για τυχαίους χρόνους καθηκόντων. Τέλος, οι μηχανικές αλλαγές μοντελοποιούνται ως εισερχόμενα «πακέτα» ίσου μεγέθους (μέσω της παραμέτρου k).

6.5.3 Βέλτιστη Παράλληλη Επικοινωνία

Το ολικό βέλτιστο του προβλήματος απόφασης (4) θα επιτευχθεί με τη βελτιστοποίηση των α και λ, που προβλέπουν τη βέλτιστη παράλληλη επικοινωνία. Αποδίδεται στη συνέχεια η βέλτιστη πολιτική δυναμικής παράλληλης επικοινωνίας για οποιοδήποτε δεδομένο επίπεδο των α και λ. Υποθέτουμε ότι η περίοδος επικάλυψης είναι μεγάλη σε σύγκριση με το χρόνο μεταξύ δύο γεγονότων τροποποίησης. Το αποτέλεσμα διατυπώνεται στο Θεώρημα 1.

<u>ΘΕΩΡΗΜΑ 1.</u> *Η βέλτιστη πολιτική δυναμικής επικοινωνίας $\ell(t)$ χαρακτηρίζεται ως εξής.*

1. *Οποιαδήποτε συνεδρίαση επικοινωνίας πραγματοποιείται αμέσως μετά την εμφάνιση μιας τροποποίησης.*

2. *Μετά από την εμφάνιση μιας τροποποίησης στο χρόνο s, πραγματοποιείται μια συνεδρίαση εάν ο αριθμός n των τροποποιήσεων που εκκρεμούν (έχουν εμφανιστεί αλλά δεν έχουν ακόμα διαβιβαστεί) είναι τουλάχιστον τόσο μεγάλος όσο μια κρίσιμη τιμή $n^*(s)$, και αλλιώς δεν πραγματοποιείται καμία συνεδρίαση. Επιπλέον,*

$$n^*(s) = \sqrt{\frac{2\tau_2 \mu_\alpha(s)}{k}} \qquad \textbf{(7)}$$

3. *Η αναμενόμενη συχνότητα επικοινωνίας που προκύπτει είναι*

$$\beta^*(s) = \sqrt{\frac{k\mu_\alpha(s)}{2\tau_2}} \qquad \textbf{(8)}$$

4. *Η τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει, δεδομένων των α και λ, είναι*

$$E\mathrm{T}(\alpha,\lambda) = \mathrm{T}_1 + (1-\lambda)\mathrm{T}_2 + \alpha\tau_1 + \int_0^{\lambda\mathrm{T}_2} kt\mu_\alpha(t+\mathrm{T}_1-\lambda\mathrm{T}_2)dt + \int_0^{\lambda\mathrm{T}_2}\sqrt{2k\tau_2\mu_\alpha(t+\mathrm{T}_1-\lambda\mathrm{T}_2)} - \frac{k}{2}dt \qquad \textbf{(9)}$$

Το Θεώρημα 1 περιγράφει την ακόλουθη δομή (απόδειξη: βλ. παράρτημα 6.1). Η μεταφορά πληροφοριών εμφανίζεται μόνο αμέσως μετά από τις τροποποιήσεις, επειδή αλλιώς η επανάληψη μπορούσε να αποτραπεί εάν είχαμε προηγούμενα μια συνάντηση, χωρίς οποιεσδήποτε άλλες αλλαγές. Η upstream ομάδα, που ενημερώνεται για το ρυθμό τροποποιήσεων, $\mu_\alpha(t)$, και για το ρυθμό k επανάληψης, ξεκινά μια μεταφορά πληροφοριών όταν έχει συγκεντρωθεί ένας κρίσιμος αριθμός τροποποιήσεων. Κατά συνέπεια προσπαθεί να ισορροπήσει το κόστος επικοινωνίας με την πρόσθετη επανάληψη.

Η Εξίσωση (7) δείχνει ότι ο κρίσιμος αριθμός τροποποιήσεων που προκαλούν μια συνεδρίαση, $n^*(t)$, αλλάζει κατά τη διάρκεια του χρόνου όσο αλλάζει ο ρυθμός των τροποποιήσεων. Εάν η εξέλιξη είναι αργή, δηλαδή το $\mu_\alpha(t)$ αυξάνεται με το χρόνο $(e>0)$, η βέλτιστη συχνότητα επικοινωνίας που προκύπτει $\beta^*(t)$ αυξάνεται με το χρόνο, και εάν η εξέλιξη είναι γρήγορη $(e<0)$, η συχνότητα επικοινωνίας μειώνεται με το χρόνο. Όταν το e είναι μηδέν, η βέλτιστη ένταση επικοινωνίας μένει σταθερή. Η βέλτιστη προσαρμογή της επικοινωνίας στο e και κατά τη διάρκεια του χρόνου t εμφανίζεται σε ένα μειωμένο ρυθμό, δηλαδή με τετραγωνική ρίζα.

Επιπλέον, υψηλότερη ολική αβεβαιότητα μ_0 και downstream εξάρτηση k αυξάνουν τη βέλτιστη συχνότητα επικοινωνίας καθ' όλη τη διάρκεια. Ένα μικρότερο κόστος επικοινωνίας τ_2 επίσης οδηγεί σε υψηλότερη βέλτιστη επικοινωνία, που αντιστοιχεί σε μια υψηλότερη «ικανότητα επικοινωνίας» των δύο ομάδων του προγράμματος.

Τέλος, η αντικειμενική συνάρτηση χρόνου κυκλοφορίας που προκύπτει στην εξίσωση (9) χωρίζεται σε τρία μέρη: τα πρώτα δύο αθροίσματα αντιπροσωπεύουν την άμεση ωφέλεια χρόνου από την επικάλυψη. Το πρώτο ολοκλήρωμα περιγράφει την

αναμενόμενη «ελάχιστη» επανάληψη που προκύπτει από την παράλληλη ανάπτυξη όταν η επικοινωνία είναι στιγμιαία. Το δεύτερο ολοκλήρωμα αντιπροσωπεύει τον πρόσθετο χρόνο επικοινωνίας και επανάληψης από τις καθυστερήσεις. Αυτό το δεύτερο ολοκλήρωμα απαλείφεται εάν το κόστος επικοινωνίας είναι μηδέν και έτσι καμία καθυστέρηση δεν είναι απαραίτητη.

Οι εξισώσεις (7) και (9) είναι προσεγγίσεις, οι οποίες είναι ακριβείς εφ' όσον το $\mu_\alpha(t^{up})$ δεν αλλάζει πολύ από τη μια μεταφορά πληροφοριών στην επόμενη. (βλ. παράρτημα 6.2)

6.5.4 Παράλληλη επικοινωνία και επικάλυψη

Υποθέτουμε ότι η ένταση προ-επικοινωνίας α καθορίζεται εξωγενώς. Εστιάζουμε έτσι στην αλληλεπίδραση μεταξύ παράλληλης επικοινωνίας και επικάλυψης, λαμβάνοντας υπόψη ένα μέσο ρυθμό μηχανικών αλλαγών μ_α. Το απλουστευμένο πρόβλημα χρόνου κυκλοφορίας που προκύπτει μπορεί να γραφτεί ως μια βελτιστοποίηση του λ, προσδοκώντας τη βέλτιστη πολιτική επικοινωνίας και την επανάληψη που προκύπτει όπως στο Θεώρημα 1.

$$\min_{\lambda\in\Lambda} : E\mathrm{T} = \mathrm{T}_1 + (1-\lambda)\mathrm{T}_2 + \int_{\mathrm{T}-\lambda\mathrm{T}_{21}}^{\mathrm{T}_1} k(t-\mathrm{T}_1+\lambda\mathrm{T}_2)\mu_\alpha(t)dt + \int_{\mathrm{T}-\lambda\mathrm{T}_2}^{\mathrm{T}_1} \sqrt{2\tau_2\mu_\alpha(t)k} - \frac{k}{2}dt \qquad \textbf{(10)}$$

Ο χρόνος κυκλοφορίας έχει τα ίδια μέρη όπως στο γενικό πρόβλημα: όφελος επικάλυψης, αναπόφευκτη επανάληψη και καθυστέρηση επικοινωνίας. Πριν τον υπολογισμό του βέλτιστου επιπέδου επικάλυψης λ πρέπει να οριστεί ένας ειδικός χαρακτηρισμός της μορφής της αντικειμενικής συνάρτησης ανάλογα με το e. Αυτό το ειδικό αποτέλεσμα, είναι ενδιαφέρον και αποκαλύπτει τη δομή της ανταλλαγής:

<u>ΠΡΟΤΑΣΗ 1</u>: *Υπάρχουν* $0 < \underline{e} < \bar{e}$, *με* $\underline{e} < 1$, *έτσι ώστε*

1. *Εάν* $e \le \underline{e}$ *τότε η ET είναι κυρτή συναρτήσει του λ*
2. *Εάν* $\underline{e} \le e \le \bar{e}$ *τότε η ET είναι κυρτή-κοίλη συναρτήσει του λ, και*
3. *Εάν* $e > \bar{e}$ *τότε η ET είναι κοίλη συναρτήσει του λ.* (απόδειξη: βλ. παράρτημα 6.3)

Η Πρόταση 1 εξηγεί την επίπτωση της εξέλιξης στο χρόνο κυκλοφορίας. Εάν το e είναι αρνητικό, οι περισσότερες τροποποιήσεις προκύπτουν νωρίς κατά τη διάρκεια του καθήκοντος 1. Εάν στο καθήκον 2 υπάρχει επικάλυψη σε μικρό βαθμό επηρεάζεται μόνο από μερικές αλλαγές που πρέπει να γίνουν. Όσο η επικάλυψη αυξάνεται, όχι μόνο αυξάνει το χρονικό διάστημα στο οποίο προκύπτουν τροποποιήσεις, αλλά αυξάνει και το ρυθμό τροποποιήσεων και η αντίστοιχη επίπτωσή τους. Επομένως, αυξάνεται η επανάληψη σε ένα αυξανόμενο ρυθμό με την επικάλυψη, η οποία οδηγεί σε κυρτότητα της *ET*.

Εάν, αφ' ετέρου, το e είναι μεγάλο και θετικό, οι περισσότερες από τις τροποποιήσεις προκύπτουν στο τέλος του καθήκοντος 1. Ενώ η αναπόφευκτη επανάληψη είναι ακόμα κυρτή συναρτήσει του λ, αυτό δεν ισχύει για την καθυστέρηση επικοινωνίας. Δεδομένου ότι για μεγάλο e η συχνότητα συνεδρίασης αυξάνεται προς το τέλος του προγράμματος, ένα πρόσθετο ποσοστό επικάλυψης θα επεκτείνει την περίοδο επικάλυψης προς τα πίσω, με λιγότερες αλλαγές στο τμήμα των πρώτων σταδίων. Κατά συνέπεια, για μεγάλο e, η καθυστέρηση επικοινωνίας είναι κοίλη, και κατά συνέπεια η γενική αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή-κοίλη.

Αυτή η κατάσταση παρουσιάζεται στο αριθμητικό παράδειγμα του Σχήματος 6.14. Για μικρές τιμές του e, η *ET* είναι κυρτή συναρτήσει του λ. Με την αύξηση του e, αυτή η κυρτότητα αλλάζει σε κυρτή-κοίλη όπως απεικονίζεται στις δύο πάνω καμπύλες. Αυτή η μορφή *ET* είναι σημαντική από μια διοικητική προοπτική. Θεωρούμε μια οργάνωση που προσπαθεί να βελτιώσει τον χρόνο κυκλοφορίας με δεδομένες παραμέτρους k, μ_α και e σε παρόμοια προγράμματα. Εάν η *ET* είναι κυρτή, οποιαδήποτε αλλαγή στην επικάλυψη που μειώνει το χρόνο ολοκλήρωσης του προγράμματος είναι ένα βήμα προς το συνολικά γενικό βέλτιστο επίπεδο παραλληλίας. Εάν το e είναι μεγάλο και η *ET* είναι κυρτή-κοίλη, μια αυξητική βελτίωση πολιτική μπορεί να παγιδέψει την οργάνωση σε ένα τοπικό βέλτιστο (π.χ. λ=0,5 στην πιο πάνω καμπύλη του Σχήματος 6.14). Υπό αυτούς τους όρους μόνο μια μεγάλη αλλαγή στην επικάλυψη θα επιτρέψει μια περαιτέρω μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης του προγράμματος (π.χ. λ=1). Αντιθέτως, τα προγράμματα με ελαφρώς διαφορετικές παραμέτρους μπορούν να απαιτήσουν σημαντικά διαφορετικά επίπεδα επικάλυψης.

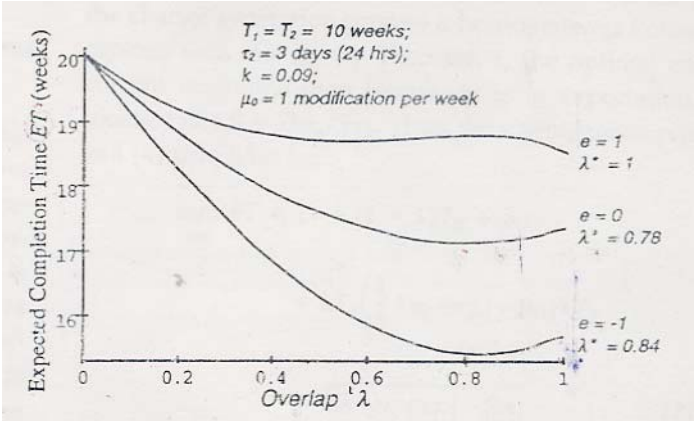
Το αποτέλεσμα είναι ότι *η υψηλότερη αβεβαιότητα καθώς επίσης και η υψηλότερη βέλτιστη εξάρτηση μειώνουν το βέλτιστο ποσό επικάλυψης, αλλά η πιο αργή εξέλιξη μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει τη βέλτιστη επικάλυψη.*

<u>ΘΕΩΡΗΜΑ 2.</u> *Υψηλότερη επίπτωση k, ή ένα υψηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας* μ_α *κάθε ένα χωριστά μειώνει το βέλτιστο βαθμό επικάλυψης,* λ^*. *Αυτή η μείωση είναι συνεχής όταν* $e < \underline{e}$ *και ασυνεχής (από* $\lambda_{\max}$ *έως 0) όταν* $e > \bar{e}$.

Πιο αργή εξέλιξη (αυξανόμενο e*) μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει τη βέλτιστη επικάλυψη.*

1. *Εάν* $e < \bar{e}$*, τότε υπάρχει ένα* $\bar{\lambda}$ *έτσι ώστε: Εάν η λύση στο FOC (first order condition – πρώτης τάξης όρος)* λ_{FOC} *βρίσκεται αριστερά του* $\bar{\lambda}$*, μειώνεται με το* e*. Εάν το* λ_{FOC} *βρίσκεται δεξιά του* $\bar{\lambda}$*, αυξάνεται με το* e.
2. *Όταν το* $\bar{e} < e$ *τότε το* λ^* *μειώνεται με μια ασυνεχή μείωση ως προς το* e *όπως και με τα* k *και* μ_α. (απόδειξη: βλ. παράρτημα 6.4)

Η υψηλότερη αβεβαιότητα και η επίπτωση μειώνουν τη βέλτιστη επικάλυψη. Εντούτοις, η επίδραση της εξέλιξης είναι πιο περίπλοκη. Σε πολλές περιπτώσεις, η πιο αργή εξέλιξη θα μειώσει τη βέλτιστη επικάλυψη, αλλά όχι πάντα. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.14. Η *ET* είναι κυρτή για μικρό e και αυστηρά αυξάνεται όπου αυξάνεται το e. Αλλά όσο η καμπύλη κινείται προς κοίλη επιφάνεια, αυξάνεται περισσότερο στο «κέντρο» $\bar{\lambda}$ (απόδειξη: παράρτημα) παρά σε μία από τις δύο ακραίες περιοχές. Κατά συνέπεια, εάν η βέλτιστη επικάλυψη είναι στα δεξιά αυτού του κέντρου, μετακινείται περισσότερο προς τα δεξιά. Επιπλέον, μπορεί να αυξηθεί απότομα στο 1 εάν η καμπύλη μειωθεί στο $\lambda = \lambda_{\max}$. Το Σχήμα 6.14 επίσης επεξηγεί την ευαισθησία του χρόνου ολοκλήρωσης του προγράμματος $ET(\lambda^*)$ όσον αφορά τις αλλαγές στο e. Μια πιο αργή εξέλιξη οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια του προγράμματος και λιγότερα οφέλη από την επικάλυψη.



Σχήμα 6 14: Επίδραση Εξέλιξης στον Χρόνο Κυκλοφορίας: Αριθμητικό Παράδειγμα

Το Πόρισμα 1 περιγράφει την ειδική περίπτωση του προβλήματος του χρόνου κυκλοφορίας χωρίς καθυστερήσεις επικοινωνίας.

<u>Πόρισμα 1.</u> *Εάν το κόστος επικοινωνίας* $\tau_2 = 0$*, είναι βέλτιστο να μεταδίδεται η κάθε μηχανική αλλαγή αμέσως. Σε αυτή την περίπτωση, η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή συναρτήσει του λ για όλα τα e, και εάν η βέλτιστη επικάλυψη είναι εσωτερική, μειώνεται αυστηρά με τα e, k, και* μ_α.

Κατά συνέπεια, η εισαγωγή της επικοινωνίας στο βέλτιστο πρόβλημα επικάλυψης καθιστά την επίπτωση της μείωσης αβεβαιότητας πιο περίπλοκη. Η γρηγορότερη εξέλιξη μπορεί να δηλώνει ένα *χαμηλότερο* βέλτιστο επίπεδο επικάλυψης αντί ενός υψηλότερου.

6.5.5 Προ-επικοινωνία και επικάλυψη

Σε αυτή την παράγραφο ερευνάτε η αλληλεπίδραση μεταξύ της επικάλυψης και της προ-επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη παράλληλη επικοινωνία μόλις τεθεί η επικάλυψη. Επομένως, εξετάζεται μια εξειδικευμένη έκδοση του γενικού μοντέλου (4) θέτοντας την παράμετρο της εξέλιξης $e = 0$. Αυτό κάνει τη διαδικασία παραγωγής αλλαγών μια ομοιογενή διαδικασία Poisson με ρυθμό μ_α. Από το Θεώρημα 1, η βέλτιστη συχνότητα παράλληλης επικοινωνίας είναι ένας σταθερός ρυθμός $\beta = \sqrt{k\mu_\alpha / 2\tau_2}$. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης (4) απλοποιείται:

$$\min_{\alpha,\lambda} : E\mathrm{T} = \mathrm{T}_1 + (1-\lambda)\mathrm{T}_2 + \alpha\tau_1 + \lambda\mathrm{T}_2\left(\frac{1}{2}k\mu_0 \exp\{-\mathrm{B}\alpha\}\lambda\mathrm{T}_2 + \sqrt{2k\tau_2\mu_0 \exp\{-\mathrm{B}\alpha\}} - \frac{k}{2}\right) \quad \textbf{(11)}$$

υπό τους περιορισμούς: $\lambda \in \Lambda; \quad 0 \le \alpha$

Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από τα ίδια μέρη: χρόνος επικάλυψης, χρόνος προ-επικοινωνίας, αναπόφευκτη επανάληψη κατά τη διάρκεια της περιόδου επικάλυψης, και χρόνος επικοινωνίας και επανάληψης από τις καθυστερήσεις.

<u>ΠΡΟΤΑΣΗ 2.</u> *Στην εσωτερική περιοχή του προβλήματος ελαχιστοποίησης (11), ο Hessian πίνακας του (11) είναι κυρτός στις κατευθύνσεις του λ και α ξεχωριστά, αλλά απροσδιόριστος γενικά. Ορίζεται λ_{FOC} η λύση του όρου πρώτης τάξης του λ. Τότε η αντικειμενική συνάρτηση στην διεύθυνση (α , δεδομένου λ_{FOC}) είναι αυστηρά κοίλη στην εσωτερική περιοχή.* (απόδειξη: βλ. παράρτημα 6.5)

Η Πρόταση 2 επεξηγεί τη δομή του προβλήματος. Κατ' αρχήν, η δεύτερη θετική παράγωγος ως προς λ δείχνει ότι εάν η προ-επικοινωνία καθορίζεται εξωγενώς, το πρόβλημα απόφασης για την επικάλυψη είναι κυρτό, και η λύση δίνεται από τον πρώτης τάξης όρο (FOC), ή από το κοντινότερο όριο εάν η λύση στο FOC είναι ανέφικτη.

Δεύτερον, η αλληλεπίδραση μεταξύ της προ-επικοινωνίας και της επικάλυψης εισάγει ένα σαγματικό σημείο στο πρόβλημα. Ειδικότερα, η αντικειμενική συνάρτηση είναι κοίλη στην διεύθυνση του α δεδομένου του λ_{FOC}. Δηλαδή το βέλτιστο επίπεδο προ-επικοινωνίας, και έτσι η βέλτιστη επικάλυψη, πρέπει να είναι μια ακραία λύση σε ένα από τα όρια.

Το θέμα είναι από πού αυτή η κοίλη συνάρτηση. Η τιμή της προ-επικοινωνίας βρίσκεται σε ένα προηγούμενο συντονισμό των δύο ομάδων καθήκοντος, μειώνοντας το μ_α, το βασικό ρυθμό των upstream τροποποιήσεων και έτσι την επανάληψη. Η προ-επικοινωνία παρουσιάζει μειωμένη απόδοση: σε υψηλά επίπεδα του α, μια περαιτέρω αύξηση θα μειώσει την επανάληψη μόνο πολύ λίγο. Εάν το επίπεδο επικάλυψης καθορίζεται εξωγενώς, αυτό οδηγεί σε μια κυρτή αντικειμενική συνάρτηση, όπου η βέλτιστη λύση ισορροπεί την οριακή μείωση επανάληψης από την προ-επικοινωνία, με το ασήμαντο κόστος επικοινωνίας. Εάν, εντούτοις, η

επικάλυψη ρυθμίζεται βέλτιστα, υπεραναπληρώνει. Η επανάληψη αυξάνεται ελαφρώς με την προ-επικοινωνία επειδή η μείωση του ρυθμού αλλαγής αντισταθμίζεται περισσότερο από μεγαλύτερη περίοδο συγχρονισμού κατά τη διάρκεια της οποίας εμφανίζονται οι αλλαγές. Αυτή η υπεραναπλήρωση, της επίδρασης της βέλτιστης επικάλυψης, αναγκάζει το πρόβλημα να γίνει κοίλο.

Κατά συνέπεια, η προ-επικοινωνία είτε έχει αρκετό όφελος για να ωθήσει την επικάλυψη καθ' όλη τη διάρκεια, ή δεν αξίζει καθόλου. Αυτό γίνεται ακριβές στο Θεώρημα 3, το τελικό κύριο αποτέλεσμα του μοντέλου.

<u>ΘΕΩΡΗΜΑ 3.</u> *Η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα (11) είναι είτε η εκτεταμένη προ-επικοινωνία (frontload) και μετά πλήρης επικάλυψη, είτε να μην υπάρχει προ-επικοινωνία και στη συνέχεια διαδοχική πρόοδος. Όταν* $\lambda_{\max} = 1$*, οι λύσεις είναι (η περίπτωση* $\lambda_{\max} = \mathrm{T}_1 / \mathrm{T}_2$ *είναι ανάλογη):* (απόδειξη: βλ. παράρτημα 6.6)

<u>Λύση 1 (διαδοχικά):</u>

$$\lambda_{sequ} = \begin{cases} 0 \quad \varepsilon\acute{\alpha}\nu \quad \mu_0 \geq \dfrac{(1+k/2)^2}{2k\tau_2} \\ \min\left\{1, \dfrac{1}{k\mu_0}(1-\sqrt{2k\mu_0\tau_2})\right\} \quad \varepsilon\acute{\alpha}\nu \quad \mu_0 < \dfrac{(1+k/2)^2}{2k\tau_2}; \end{cases}$$

$$\alpha_{sequ} = 0; \quad \acute{\alpha}\rho\alpha \quad \mu_1 = \mu_0;$$

$$ET_{sequ} = \mathrm{T}_1 + \mathrm{T}_2. \qquad \textbf{(12)}$$

<u>Λύση 2 (παράλληλα):</u>

$$\lambda_{paral} = 1; \quad \alpha_{paral} = \frac{1}{\mathrm{B}} \ln\left(\frac{\mu_0}{\mu_{paral}}\right);$$

$$\mu_{paral} = \frac{1}{k\mathrm{T}_2} \min\left\{ \begin{array}{l} 1 + \dfrac{k}{2} + \dfrac{\tau_2}{\mathrm{T}_2} - \sqrt{\left(1 + \dfrac{k}{2} + \dfrac{\tau_2}{\mathrm{T}_2}\right)^2 - \left(1 + \dfrac{k}{2}\right)^2} \\ \dfrac{\tau_1}{\mathrm{BT}_2} + \dfrac{k\tau_2}{2\mathrm{T}_2} - \sqrt{\left(\dfrac{\tau_1}{\mathrm{BT}_2} + \dfrac{k\tau_2}{2\mathrm{T}_2}\right)^2 - \left(\dfrac{2\tau_1}{\mathrm{BT}_2}\right)^2}; \end{array} \right\}$$

$$ET_{paral} = \mathrm{T}_1 + \frac{1}{2} k\mathrm{T}_2^2 \mu_{paral} + \tau_1 \alpha_{paral} + \mathrm{T}_2 \left(\sqrt{2k\tau_2\mu_{paral}} - \frac{k}{2}\right). \qquad \textbf{(13)}$$

Ποια από τις δύο λύσεις είναι η βέλτιστη εξαρτάται από τις παραμέτρους. Εξετάζοντας τις παραμέτρους ET_{paral} και μ_{paral} παρατηρείται ότι η λύση της πλήρους παραλληλίας προτιμάται εάν: πρώτον, οι καθυστερήσεις επικοινωνίας τ_1 και τ_2 είναι χαμηλές, σε αντιστοιχία με την υψηλή ικανότητα επικοινωνίας, δεύτερον, εάν η ικανότητα προ-επικοινωνίας, B, είναι υψηλή και τρίτον, εάν η παράμετρος επίπτωσης k είναι χαμηλή, σε αντιστοιχία με τη χαμηλή downstream εξάρτηση. Στη «διαδοχική» λύση, μπορεί να εμφανιστεί μια θετική επικάλυψη εάν η βασική αβεβαιότητα του προγράμματος μ_0 είναι τόσο χαμηλή (Εξίσωση 12), που η επικάλυψη μπορεί να ξεπεράσει σε σπουδαιότητα την επανάληψη που προκύπτει, ακόμη και χωρίς προ-επικοινωνία. Αυτό αντιστοιχεί σε ένα πρόγραμμα με πολύ μικρή πολυπλοκότητα όπου η επικάλυψη μπορεί να αναληφθεί με βάση την προηγούμενη εμπειρία. Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση, η παράλληλη επικοινωνία απαιτείται στη βέλτιστη λύση.

6.5.6 Συζήτηση και συμπέρασμα

Το μοντέλο της παράλληλης μηχανικής συνδυάζει τις αποφάσεις της επικάλυψης και της επικοινωνίας (πριν και κατά τη διάρκεια της φάσης επικάλυψης) παρουσία αβεβαιότητας και εξάρτησης μεταξύ των καθηκόντων, με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου κυκλοφορίας. Στον καθορισμό της βέλτιστης επικάλυψης, το όφελος από την επικάλυψη των δραστηριοτήτων πρέπει να συγκριθεί με την καθυστέρηση της επανάληψης που προκύπτει από τη χρήση προκαταρκτικών πληροφοριών από το downstream καθήκον. Η επικοινωνία μειώνει την αρνητική επίπτωση της επανάληψης εις βάρος των χρόνων οργάνωσης ανά ομάδα πληροφοριών.

Μοντελοποιείται η αβεβαιότητα ως ο βασικός ρυθμός τροποποιήσεων, και η μείωση αβεβαιότητας ως η αλλαγή του ποσοστού τροποποίησης κατά τη διάρκεια του χρόνου. Επιπλέον, μοντελοποιείται η εξάρτηση από την επίπτωση καθυστέρησης που επιβάλλεται από τις upstream τροποποιήσεις στο downstream καθήκον.

Αναπτύχθηκαν τρία διοικητικά αποτελέσματα για την αλληλεπίδραση μεταξύ επικοινωνίας και επικάλυψης και τη σύνδεσή τους με την αβεβαιότητα και εξάρτηση. Κατ' αρχήν, χαρακτηρίζεται η βέλτιστη πολιτική παράλληλης επικοινωνίας, που οδηγεί σε μια αναμενόμενη συχνότητα επικοινωνίας που αυξάνεται κατά τη διάρκεια του χρόνου εάν η εξέλιξη είναι αργή, και μειώνεται εάν η εξέλιξη είναι γρήγορη.

Επιπλέον, το μέσο επίπεδο επικοινωνίας αυξάνεται με την αβεβαιότητα και την εξάρτηση.

Δεύτερον, και η αβεβαιότητα και η εξάρτηση καθιστούν την παραλληλία λιγότερο ελκυστική, μειώνοντας κατά συνέπεια τη βέλτιστη επικάλυψη. Εντούτοις, η ταχύτητα μείωσης της αβεβαιότητας (εξέλιξη) έχει μια πιο περίπλοκη επίδραση: μια υψηλή βέλτιστη επικάλυψη θα αυξηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό από την πιο αργή εξέλιξη, και μια χαμηλή βέλτιστη επικάλυψη θα μειωθεί σε μεγαλύτερο βαθμό. Το συμπέρασμα ότι η πιο αργή μείωση αβεβαιότητας μειώνει το βέλτιστο επίπεδο επικάλυψης είναι σωστό, μόνο στην ειδική περίπτωση στιγμιαίας επικοινωνίας.

Τρίτον, η αλληλεπίδραση επικοινωνίας και παραλληλίας μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά βέλτιστα στο πρόβλημα εύρεσης του επιπέδου επικάλυψης που ελαχιστοποιεί το χρόνο. Όταν η ανάλυση αβεβαιότητας είναι αργή, η βέλτιστη επικάλυψη που συνδυάζεται με την παράλληλη επικοινωνία μπορεί να έχουν σημαντική αύξηση όταν αλλάζουν οι παράμετροι προβλήματος. Ομοίως, η προ-επικοινωνία είτε μειώνει την αβεβαιότητα αρκετά για να φέρει την επικάλυψη σε ένα υψηλό επίπεδο, ή δεν αξίζει καθόλου (και έτσι προτιμάται η διαδοχική εκτέλεση των καθηκόντων). Η προσέγγιση της βέλτιστης παραλληλίας μέσω μικρών βημάτων δοκιμής–και–λάθους μπορεί να οδηγήσει σε παγίδευση σε ένα τοπικό βέλτιστο και μπορεί να απαιτηθεί μια δραστική αλλαγή βημάτων. Αντιθέτως, μια μικρή αλλαγή στις παραμέτρους του προβλήματος μπορεί να απαιτήσει μια σημαντική αλλαγή στην επικάλυψη και την επικοινωνία για να ελαχιστοποιηθεί πάλι ο χρόνος κυκλοφορίας. Το μοντέλο επεξηγεί πώς μια βελτίωση των παραμέτρων του προβλήματος (αβεβαιότητα, εξέλιξη και εξάρτηση, και ικανότητα επικοινωνίας) μπορεί να βελτιώσει τη βέλτιστη απόδοση (χρόνος κυκλοφορίας).

Μια άλλη επίπτωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ επικοινωνίας και παραλληλίας είναι ότι δεν πρέπει να επιλεχθούν τα επίπεδα επικοινωνίας και επικάλυψης με ένα αποκεντρωτικό τρόπο. Για παράδειγμα, θεωρούμε μια κατάσταση όπου η μηχανική ομάδα αποφασίζει την προ-επικοινωνία, και η ομάδα διαχείρισης προγράμματος αποφασίζει χωριστά την επικάλυψη και την παράλληλη επικοινωνία. Έχει αποδειχθεί ότι ακόμα κι αν η κάθε μια προβλέπει τη συμπεριφορά της άλλης (υποθέτει τη βέλτιστη απόφαση της άλλης ομάδας), δεν μπορεί να επιτευχθεί το ολικό βέλτιστο. Κατά συνέπεια, πρέπει να υπάρχει συντονισμός στην επιλογή επικοινωνίας και επικάλυψης, και έτσι μπορεί να περιοριστεί η αυτονομία των ομάδων.

Το μοντέλο είναι όσο το δυνατόν πιο απλό. Βελτιώσεις του μοντέλου είναι δυνατές σε διάφορες κατευθύνσεις. Κατ' αρχήν, η επιρροή της επικάλυψης και επικοινωνίας στους χρόνους καθηκόντων πρέπει να ερευνηθούν περαιτέρω. Δεύτερον, το μοντέλο εστιάζει στο χρόνο κυκλοφορίας, αλλά οι ανταλλαγές μεταξύ χρόνου κυκλοφορίας, κόστος προγράμματος, και ποιότητα σχεδιασμού χρειάζεται περισσότερη προσοχή. Τέλος, το μοντέλο μπορεί επίσης να αναλυθεί αριθμητικά σε πιο περίπλοκες και ρεαλιστικές εφαρμογές σε πραγματικές περιπτώσεις.

7 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε το θέμα της Μοντελοποίησης της Διαδικασίας Ανάπτυξης Προϊόντων Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή η διάρθρωση της συγκεκριμένης εργασίας περιλαμβάνει έξι κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 1 προτείνεται ένα σύνολο κριτηρίων με τα οποία αξιολογούνται τα μοντέλα διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα υπάρχοντα μοντέλα ανάπτυξης προϊόντος και αξιολογούνται με βάση τα κριτήρια του κεφαλαίου 1. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα της κατάστασης της μοντελοποίησης διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος, και στα κεφάλαια 4, 5 και 6 παρουσιάζονται αναλυτικά κάποια από τα μοντέλα που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2. Το κεφάλαιο 7 συμπεράσματα και συζήτηση πάνω στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν σε αυτή την εργασία.

Σε καμία περίπτωση δεν θεωρείται ότι τα υπάρχοντα μοντέλα είναι ικανοποιητικά και δεν μπορούν να αντικατασταθούν. Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν να προσδιοριστεί η ικανότητα της μοντελοποίησης και να προτείνει μέτρα με τα οποία οι προσπάθειες μοντελοποίησης μπορούν να εκτιμηθούν. Μελλοντικός στόχος είναι να βρεθούν εκείνα τα μοντέλα που θα εκπληρώνουν καλύτερα τις ανάγκες σπουδαιότητας, ακρίβειας, ευπείθειας, και δυνατότητας εφαρμογής.

Όλα τα μοντέλα που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία εστιάζουν στο χρόνο υλοποίησης της ανάπτυξης, το κόστος ανάπτυξης, τις προδιαγραφές προϊόντων, και άλλα κριτήρια, τα οποία έχουν μεγάλη σημασία αναμφισβήτητα στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων.

Όλα τα πρότυπα ικανοποιούν το κριτήριο της ακρίβειας. Αυτά τα μοντέλα αναπτύσσονται σε ένα ακαδημαϊκό περιβάλλον. Η διαδικασία μοντελοποίησης επομένως έχει δώσει έμφαση στην ακρίβεια (με πιθανή απώλεια δυνατότητας εφαρμογής).

Ένα άλλο κριτήριο είναι κατά πόσο το μοντέλο είναι υπολογιστικά εύχρηστο. Αυτό δεν είναι δύσκολο εμπόδιο για αυτές τις προσπάθειες μοντελοποίησης. Συχνά αυτό δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό θέμα, επειδή το μέγεθος των έγκυρων συνόλων δεδομένων συχνά δεν είναι τόσο μεγάλο, και η δύναμη κάθε υπολογιστή γραφείου επιτρέπει τη χρήση και τη δυνατότητα εφαρμογής αυτών που τις προηγούμενες δεκαετίες θεωρούνταν σχετικά σύνθετα μοντέλα. Εάν αυτά τα μοντέλα αποτύχουν να

είναι χρήσιμα για τα μεγάλης κλίμακας συστήματα, είναι χαρακτηριστικά λόγω της έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων παρά λόγω του ότι δεν είναι υπολογιστικά εύχρηστα.

Η δυνατότητα εφαρμογής είναι ενδεχομένως το σημαντικότερο κριτήριο. Υπάρχουν διάφορες συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα μοντέλο μπορεί αποτύχει να εφαρμοστεί. Ένα πρότυπο θα αποτύχει να εφαρμοστεί εάν στηρίζεται στη διαθεσιμότητα πληροφοριών που δεν είναι εύκολα διαθέσιμες. Ένα μοντέλο θα αποτύχει να εφαρμοστεί εάν οι απαραίτητες υποθέσεις και απλοποιήσεις για την κατασκευή του δεν ταιριάζουν με τη βιομηχανική εφαρμογή στην πράξη. Κάθε ένα από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν αποτυγχάνουν σε κάποιο βαθμό στο κριτήριο της δυνατότητας εφαρμογής. Αυτό είναι μια περιοχή που οι μελλοντικές προσπάθειες μοντελοποίησης πρέπει να δώσουν τη μεγαλύτερη προσοχή για να έχουν πρακτική σημασία.

Η μοντελοποίηση της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντων είναι σε ένα προηγούμενο στάδιο ανάπτυξης, από ότι η μοντελοποίηση σε άλλους τομείς της διοίκησης. Η ανάπτυξη προϊόντων είναι δυσκολότερο να μοντελοποιηθεί από ότι οι διαδικασίες παραγωγής. Λόγω της διαφορετικότητας στην πράξη στο μηχανικό τομέα, λόγω του χαμηλότερου αριθμού επαναλήψεων, και λόγω του υψηλού επιπέδου ανθρώπινης παρέμβασης, είναι δύσκολο να φανταστούμε ότι η μοντελοποίηση της ανάπτυξης προϊόντων θα φθάσει στο επίπεδο εξέλιξης και εφαρμογής που μπορεί να επιτευχθεί στην παραγωγή.

Παρά αυτήν την ανεπάρκεια, υπάρχει η δυνατότητα για μεγάλη χρησιμότητα στις προσπάθειες μοντελοποίησης της ανάπτυξης προϊόντων. Λόγω της τεράστιας επίπτωσης των αποφάσεων σχεδιασμού, οποιαδήποτε προσπάθεια να βελτιωθεί η λήψη απόφασης θα έχει μεγάλο όφελος για τις εταιρίες που είναι επιτυχημένες.

Οι προσπάθειες που έχουν καταβληθεί έχουν δημιουργήσει μερικά ενδεχομένως χρήσιμα πλαίσια μοντελοποίησης. Επειδή η διαδικασία κάθε μοντέλου είναι συγκεκριμένη, δεν υπάρχει μια έκδοση οποιουδήποτε μοντέλου διαδικασίας που να ισχύει για όλες τις διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντων. Οι μέθοδοι μοντελοποίησης, εντούτοις, είναι αρκετά γενικές ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν σε μια ευρύ πεδίο βιομηχανικών καταστάσεων.

Οι μέθοδοι που περιγράφονται σε αυτή την εργασία συνδέονται με τεχνικές που έχουν σχέση με μαθηματικούς αλγόριθμους και βελτιστοποίηση. Δεδομένου ότι αυτά τα μοντέλα αναπτύχθηκαν για ακαδημαϊκούς λόγους δεν διατίθεται στην αγορά

κανένα λογισμικό για τα περισσότερα από τα μοντέλα, και αυτό που υπάρχει δεν έχει επεξεργαστεί και δεν είναι φιλικό προς το χρήστη.

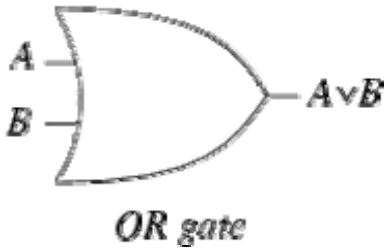
Ο τομέας της μοντελοποίησης της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντων προσεγγίζει έναν μεγαλύτερο βαθμό ωριμότητας. Τα διάφορα που υπάρχουν μοντέλα εστιάζουν σε πολλά ενδιαφέροντα και σημαντικά ζητήματα της διαδικασίας όπως ο χρόνος υλοποίησης, ο προγραμματισμός καθηκόντων και η αποσύνθεση των προγραμμάτων, όμως χρειάζεται ακόμα αρκετή εμπειρική και αναλυτική εργασία.

Οι κανόνες για την επιτυχή μοντελοποίηση πρέπει να περιλαμβάνουν στοιχεία και από τον ακαδημαϊκό και από τον πρακτικό τομέα. Χωρίς την επίτευξη των ακαδημαϊκών κανόνων που έχουν να κάνουν με την αναλυτικής ακρίβεια, θα υπάρξει μια γενική απροθυμία στην αποδοχή αυτών των μοντέλων. Χωρίς την επίτευξη των κανόνων του πρακτικού τομέα που έχουν να κάνουν με την ευκολία της χρήσης και της διαθεσιμότητας των δεδομένων, δεν θα είναι δυνατή η εφαρμογή αυτών των μοντέλων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

1. OR

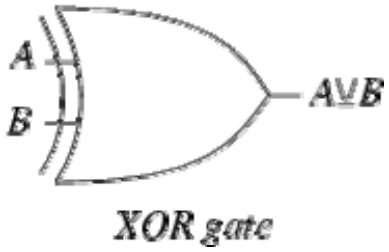


Ένα συνδετικό (μια συνάρτηση που αντιστοιχεί στα 'and', 'or', 'not' κ.λ.π. που λαμβάνει μία ή περισσότερες truth τιμές ως δεδομένα εισόδου και επιστρέφει μία τιμή truth ως αποτέλεσμα) το οποίο αποδίδει true εάν οποιαδήποτε από τις συνθήκες μιας ακολουθίας είναι true, και false εάν *όλες* οι συνθήκες είναι false. Το *A* OR *B* συμβολίζεται $A \cup B$.

Ο truth πίνακας είναι:

A	B	$A \cup B$
T	T	T
T	F	T
F	T	T
F	F	F

2. XOR



Ένα συνδετικό γνωστό ως «exclusive or». Αποδίδει true εάν ακριβώς μία (αλλά όχι και οι δύο) από τις συνθήκες είναι true. Το XOR δεν έχει ένα επίσημο συμβολισμό αλλά μερικές φορές συμβολίζεται $A \veebar B$ ή $A \oplus B$.

Ο truth πίνακας είναι:

A	B	$A \veebar B$
T	T	F
T	F	T
F	T	T
F	F	F

3. **Downstream Δραστηριότητες Σχεδιασμού:** Design processes create mappings between three different entities: the world, specifications and implementations. Downstream design activities are the translations between specifications and implementations.

4. **Upstream Δραστηριότητες σχεδιασμού:** Design processes create mappings between three different entities: the world, specifications and implementations. Upstream design activities are the translations between the world and the specifications.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

1. Ανεξάρτητα – Ημιανεξάρτητα – Εξαρτημένα Υποπροβλήματα

Μαθηματικά οι όροι ανεξάρτητα, ημιανεξάρτητα και εξαρτημένα υποπροβλήματα διακρίνονται ως εξής. Σε ένα κλειστό σύστημα για ένα πρόβλημα που αποτελείται από n υποπροβλήματα, το σύνολο των όρων αλληλεπίδρασης είναι ένας nxn πίνακας. Εάν τα υποπροβλήματα είναι ανεξάρτητα, όλα τα εκτός της διαγωνίου στοιχεία του πίνακα – οι συντελεστές αλληλεπίδρασης – είναι μηδέν. Εάν τα υποπροβλήματα είναι ημιανεξάρτητα, οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε τα διαγώνια στοιχεία αποτελούνται από τετραγωνικούς υποπίνακες των βραχυπρόθεσμων αλληλεπιδράσεων, ενώ τα εκτός της διαγωνίου στοιχεία αναπαριστούν τις μακροπρόθεσμες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποπινάκων.

2. Ιδιοτιμές – Ιδιοδιανύσματα

Οι ιδιοτιμές είναι ένα ειδικό σύνολο αριθμών που συνδέονται με ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων. Κάθε ιδιοτιμή είναι συνδυασμένη με ένα αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα (ή γενικά, ένα αντίστοιχο δεξί ιδιοδιάνυσμα και ένα αντίστοιχο αριστερό ιδιοδιάνυσμα). Η αποσύνθεση ενός τετραγωνικού πίνακα Α σε ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα είναι γνωστή ως eigen αποσύνθεση. Θεωρούμε ότι A είναι ένας γραμμικός μετασχηματισμός που αναπαριστάται από τον πίνακα Α. Εάν υπάρχει ένα διάνυσμα $X \in \Re^n \neq 0$ έτσι ώστε $AX = \lambda X$ **(1)** για κάποιο αριθμό λ, τότε η λ ονομάζεται ιδιοτιμή του Α με αντίστοιχο δεξί ιδιοδιάνυσμα **X**. Αν ο Α είναι ένας k x k τετραγωνικός πίνακας με ιδιοτιμή λ, τότε τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα ικανοποιούν το

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k1} & \dots & a_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2)},$$

το οποίο είναι ισοδύναμο με το ομογενές σύστημα

$$\begin{bmatrix} a_{11}-\lambda & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k1} & \dots & a_{kk}-\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3)}.$$

Η εξίσωση (4) μπορεί να γίνει συνεπώς $(A-\lambda I)X=0$ **(4)**, Οι λύσεις της εξίσωσης (4) δίνονται από την εξίσωση $\det(A-\lambda I)=0$ **(5)**. Αυτή είναι γνωστή ως χαρακτηριστική εξίσωση του Α, και το αριστερό μέρος είναι γνωστό ως χαρακτηριστικό πολυώνυμο. Το σύνολο των ιδιοτιμών μιας γραφικής παράστασης ονομάζεται graph spectrum.

3. Επέκταση του μοντέλου

Μια επέκταση του μοντέλου χρησιμοποιεί το χρόνο πιο αναλυτικά. Χρησιμοποιείται το διάνυσμα u^t ως διάνυσμα χρόνου εργασίας.

$$u^t_{t+1} = A^t u^t_t$$

Το αρχικό διάνυσμα χρόνου εργασίας είναι το αρχικό διάνυσμα εργασίας πολλαπλασιασμένο με ένα πίνακα:

$$u^t_0 = W u_0$$

όπου W είναι ένας διαγώνιος πίνακας των χρόνων καθηκόντων w_i. Κάθε στοιχείο του πίνακα μετασχηματισμού εργασίας A^t είναι το ποσό του χρόνου εργασίας που δημιουργεί μια ώρα καθήκοντος του j στο καθήκον i, ή

$$\alpha^t_{ij} = (w_i/ w_j)\, \alpha_{ij}$$

Ο νέος πίνακας μετασχηματισμού εργασίας είναι:

$$A^t = W A W^{-1}$$

Επαναλαμβάνοντας την ίδια ανάλυση που έγινε στο αρχικό σύστημα, το συνολικό διάνυσμα χρόνου εργασίας είναι:

$$U^t = W S (I-\Lambda)^{-1} S^{-1} W^{-1} u^t_0$$

Αντικαθιστώντας το αρχικό διάνυσμα χρόνου εργασίας,

$$\mathbf{U^t} = W S (I-\Lambda)^{-1} S^{-1} W^{-1} W u_0 = \mathbf{WU}$$

4. Θεώρημα Perron-Frobenius για μη αρνητικούς πίνακες

Υποθέτουμε ότι $A \in R^{nxn}$ και $A \geq 0$ τότε

- Υπάρχει μια ιδιοτιμή λ_{PF} του Α που είναι πραγματική και μη αρνητική, με σχετικά μη αρνητικά αριστερά και δεξιά ιδιοδιανύσματα
- Για κάθε άλλη ιδιοτιμή λ του Α, έχουμε $|\lambda| \leq \lambda_{PF}$

Η λ_{PF} ονομάζεται Perron-Frobenius (PF) ιδιοτιμή του A

Τα σχετικά θετικά (δεξιά και αριστερά) ιδιοδιανύσματα ονομάζονται (δεξιά και αριστερά) PF ιδιοδιανύσματα.

5. Πίνακας Συνάντησης

Ο πίνακας συνάντησης ενός γραφήματος είναι ένας (0,1) πίνακας, ο οποίος έχει μια σειρά για κάθε κορυφή και μία στήλη για κάθε ακμή, και $(\upsilon, e) = 1$ εάν η κορυφή υ αποτελεί τμήμα της ακμής e.

6. Παράδειγμα 1 Αλγόριθμου Ομαδοποίησης

Θεωρούμε τον πίνακα (1) με επτά δραστηριότητες (γραμμές) και οκτώ ενότητες (στήλες).

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{array} \\ \begin{bmatrix} & * & * & & * & & & \\ * & & & & & * & & \\ & & & * & & & * & \\ * & & & & & * & & \\ & & * & & * & & & \\ & & & * & & & & \\ & * & * & & * & & & * \end{bmatrix} \end{array} \qquad \textbf{(1)}$$

<u>Βήμα 0.</u> Καθορισμός αριθμού επανάληψης k = 1.

<u>Βήμα 1.</u> Η γραμμή 1 του πίνακα (1) επιλέγεται και σχεδιάζεται η οριζόντια γραμμή h_1. τα αποτελέσματα των βημάτων 1 και 2 παρουσιάζονται στον πίνακα (2).

<u>Βήμα 2.</u> Τρεις κάθετες γραμμές v_2, v_3, και v_5 σχεδιάζονται.

$$
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{array} \\
\begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{array}
\begin{bmatrix}
- & - & * & * & - & - & * & - & - & - & - \\
 & * & & & & & & * & & & \\
 & & & & * & & & & * & & \\
 & * & & & & & & * & & & \\
 & & & * & & & * & & & * & \\
 & & & & * & & & & & & \\
 & & * & * & & & * & & & * &
\end{bmatrix}
\begin{array}{c} h1 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \\
\begin{array}{cccccccc} & v2 & v3 & & v5 & & & \end{array}
\end{array}
\qquad \textbf{(2)}
$$

Ως αποτέλεσμα του σχεδιασμού αυτών των τριών κάθετων γραμμών, δημιουργούνται πέντε καινούργιες καταχωρήσεις * που τέμνονται μια φορά στον πίνακα (2), δηλαδή οι καταχωρήσεις (5, 3), (5, 5), (7, 2), (7, 3), και (7, 5).

<u>Βήμα 3.</u> Δύο οριζόντιες γραμμές h_5 και h_7 σχεδιάζονται κατά μήκος όλων των μη κενών καταχωρήσεων που τέμνονται μια φορά του πίνακα (2), όπως φαίνονται στον πίνακα (2).

$$
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{array} \\
\begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{array}
\begin{bmatrix}
- & - & * & * & - & - & * & - & - & - & - \\
 & * & & & & & & * & & & \\
 & & & & * & & & & * & & \\
 & * & & & & & & * & & & \\
- & - & - & * & - & - & * & - & - & * & - \\
 & & & & * & & & & & & \\
 & & * & * & & & * & & & * &
\end{bmatrix}
\begin{array}{c} h1 \\ \\ \\ \\ h5 \\ \\ h7 \end{array} \\
\begin{array}{cccccccc} & v2 & v3 & & v5 & & & \end{array}
\end{array}
\qquad \textbf{(3)}
$$

<u>Βήμα 4.</u> Εφόσον η καταχωρήσεις (5, 8) και (7, 8) του πίνακα (3) τέμνονται μια φορά, σχεδιάζεται η κάθετη γραμμή v_8, όπως φαίνεται στον πίνακα (4).

$$
\begin{array}{c|cccccccc|c}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & \\
\hline
1 & - & - & * & - & - & * & - & - & h1 \\
2 & * & & & & & * & & & \\
3 & & & & * & & & * & & \\
4 & * & & & & & * & & & \\
5 & - & - & * & - & - & * & - & - & h5 \\
6 & & & & * & & & & & \\
7 & & * & * & & * & & & * & h7 \\
\hline
 & & v2 & v3 & & v5 & & & v8 &
\end{array}
\qquad \textbf{(4)}
$$

Εφόσον δεν υπάρχουν άλλες μη κενές καταχωρήσεις που να τέμνονται μια φορά, όλες οι καταχωρήσεις * που τέμνονται δύο φορές του πίνακα (4) σχηματίζουν

- Ομάδα Γραμμής RC-1 = {1, 5, 7}, και
- Ομάδα Στήλης CC-1 = {2, 3, 5, 8}.

<u>Βήμα 5.</u> Ο πίνακας (4) μετασχηματίζεται στον πίνακα (5).

$$
\begin{array}{c|cccc}
 & 1 & 4 & 6 & 7 \\
\hline
2 & * & & * & \\
3 & & * & & * \\
4 & * & & * & \\
6 & & * & &
\end{array}
\qquad \textbf{(5)}
$$

Στην δεύτερη επανάληψη (k = 2), τα βήματα 1 έως 4 εκτελούνται στον πίνακα (5). Αυτή η επανάληψη έχει ως αποτέλεσμα τον πίνακα συνάντησης (6).

$$
\begin{array}{c|cccc|c}
 & 1 & 4 & 6 & 7 & \\
\hline
2 & - & * & - & * & - \; - \; h2 \\
3 & & * & & * & \\
4 & - & * & - & * & - \; - \; h4 \\
6 & & * & & & \\
\hline
 & v1 & & v6 & &
\end{array}
\qquad \textbf{(6)}
$$

Επίσης λαμβάνονται τα:

- Ομάδα Γραμμής RC-2 = {2, 4}, και
- Ομάδα Στήλης CC-2 = {1, 6}.

Στην Τρίτη επανάληψη (k = 3), δημιουργείται ο πίνακας (7).

	4	7	
3	*	*	h3
6	*		h6
	v4	v7	

(7)

Για αυτό τον πίνακα δημιουργούνται τα RC-3 ={3, 6} και CC-3 ={4, 7}. Το τελικό αποτέλεσμα της αποσύνθεσης παρουσιάζεται στον πίνακα (8).

		CC-1				CC-2		CC-3	
		2	3	5	8	1	6	4	7
RC-1	1	*	*	*					
	5		*	*	*				
	7	*	*	*	*				
RC-2	2					*	*		
	4					*	*		
RC-3	3							*	*
	6							*	

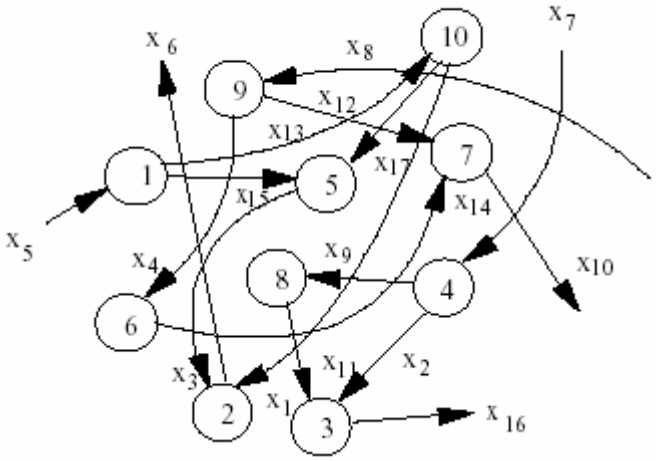
(8)

Τρεις αμοιβαία ξεχωριστές υπο-διαδικασίες RC-1, RC-2, και RC-3 και οι αντίστοιχες ενότητες CC-1, CC-2, και CC-3 παρουσιάζονται στον πίνακα (8).

7. Παράδειγμα 2 Αλγόριθμου Ομαδοποίησης

Στο παράδειγμα 2 ο αλγόριθμος προσδιορισμού ομάδων εφαρμόζεται σε μια διαδικασία που απεικονίζεται σε ένα γράφημα.

Το γράφημα αναπαριστά μια διαδικασία που περιλαμβάνει δέκα δραστηριότητες και δεκαεπτά παραμέτρους. Για παράδειγμα, x_5 είναι το δεδομένο εισόδου και x_{15} και x_{13} είναι τα αποτελέσματα της δραστηριότητας 1.



Ο πίνακας συνάντησης δραστηριότητας – παραμέτρου (9) αντιστοιχεί στο γράφημα του Σχήματος 1.

Activity	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
1					*								*		*		
2	*		*			*											
3		*									*					*	
4		*					*		*								
5			*												*		*
6				*										*			
7										*		*		*			
8									*		*						
9				*				*				*					
10	*												*				*

(9)

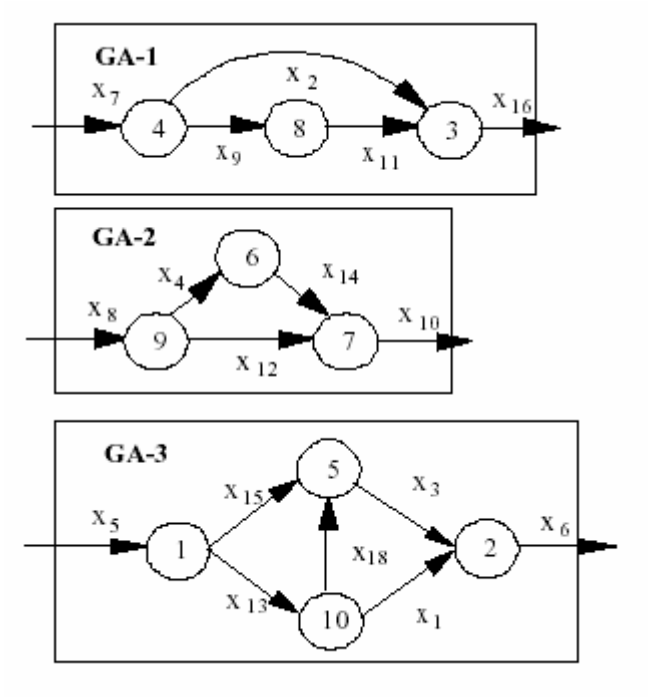
Ο πίνακας (9) είναι μη δομημένος και είναι δύσκολο να αναγνωριστεί οποιαδήποτε ομαδοποίηση μεταξύ των δραστηριοτήτων και των παραμέτρων.

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο προσδιορισμού ομάδων (CI) στον πίνακα (9) οδηγεί στον πίνακα (10):

		Parameter																
		G-1							G-2				G-3					
		x_{13}	x_1	x_6	x_5	x_{15}	x_3	x_{17}	x_2	x_{16}	x_9	x_{11}	x_7	x_4	x_{14}	x_{12}	x_{10}	x_8
GA-1	1	*	*	*														
	2					*	*	*										
	5				*		*		*									
	10		*			*		*										
Activity GA-2	3								*	*	*							
	4								*			*	*					
	8									*			*					
GA-3	6													*	*			
	7														*	*	*	
	9													*			*	*

(10)

Τρεις ξεχωριστές ομάδες δραστηριοτήτων GA-1 = {1, 2, 5, 10}, GA-2 = {3, 4, 8}, GA-3 = {6, 7, 9} και τρεις ομάδες παραμέτρων G-1 = {1, 3, 5, 6, 13, 15, }, G-2 = {2, 7, 9, 11, 16}, G-3 = {4, 8, 10, 12,14 }, παρουσιάζονται στον πίνακα (10). Με βάση τον ομαδοποιημένο πίνακα (10), είναι σαφές ότι οι τρεις ομάδες δραστηριοτήτων μπορούν να εκτελεσθούν ταυτόχρονα (Σχήμα 3).


GA-1
x7
x2
x16
4
8
3
x9
x11
GA-2
6
x4
x14
x8
9
7
x10
x12
GA-3
5
x15
x3
x5
1
2
x6
x18
x13
10
x1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

1. Παράδειγμα Επαναπροσδιορισμένων Χρόνων Οργάνωσης

Υποθέτουμε ότι οι χρόνοι ενημέρωσης/ επιθεώρησης δίνονται από το τ_{jk}^{I} έτσι εξαρτώνται όχι μόνο από το στάδιο *j* της εργασίας που αναθεωρείται, αλλά το στάδιο *k* στο οποίο η αναθεώρηση γίνεται, και ότι οι χρόνοι επανασχεδιασμών δίνονται από το τ_{ijk}^{R}, έτσι εξαρτώνται όχι μόνο από το στάδιο σχεδιασμού *j* που πρέπει να επαναληφθεί, αλλά και από το στάδιο *i* στο οποίο διεξάχθηκε η τελευταία αναθεώρηση και από το στάδιο *k* στο οποίο διεξάγεται η τρέχουσα αναθεώρηση. Σε αυτήν την περίπτωση, με τ_{ik}^{S} ορίζεται ο χρόνος οργάνωσης που συνδέεται με τη διεξαγωγή μιας αναθεώρησης στο στάδιο *k* της εργασίας σχεδιασμού προϊόντος που έχει γίνει μετά από την τελευταία αναθεώρηση στο στάδιο *i*. Θα δειχθεί πώς πρέπει να καθοριστεί ο t_{ik}^{S} ώστε να περιλαμβάνει το χρόνο penalty έτσι ώστε να συνεχίσει να ισχύει η εξίσωση (1).

$$t_j^I := \min_{\{k\,/\,j\le k\}} \tau_{jk}^I \text{, και}$$

$$t_j^R := \min_{\{i,k\,/\,i\le j\le k\}} \tau_{ijk}^R \text{, και}$$

$$t_{ik}^S := \tau_{ik}^S + \sum_{j=i+1}^{k}(\tau_{jk}^{\mathrm{I}} - \tau_j^I) + \sum_{j=i+1}^{k}\phi(i,j)(\tau_{ijk}^R - \tau_j^R)\,.$$

όποιος αποτελείται από το χρόνο οργάνωσης συν το χρόνο penalty λόγω της διεξαγωγής αναθεωρήσεων σε μη βέλτιστα στάδια. Η άμεση αντικατάσταση δείχνει ότι ο αναμενόμενος χρόνος που απαιτείται για την οργάνωση, ενημέρωση/ επιθεώρηση, και επανασχεδιασμό, δηλαδή

$$\tau_{ik}^S + \sum_{j=i+1}^{k}\tau_{jk}^{\mathrm{I}} + \sum_{j=i+1}^{k}\phi(i,j)\tau_{ijk}^R\,.$$

είναι στη μορφή που δίνεται από την (1).

2. Θεώρημα 1

Η απόδειξη του Θεωρήματος 1 απλοποιείται εάν γίνει αρχικά ο ακόλουθος μετασχηματισμός των συναρτήσεων βέλτιστης απόδοσης. Για *k* = 1,2…,N,

$$f_k(i,x) := T_k(i,x) - \sum_{j=i+1}^{N} t_j^I - \sum_{j=i+1}^{k-1} \phi(i,j) t_j^R - \sum_{j=k+1}^{N} t_j \qquad \textbf{(3)}$$

Από σύμβαση, ένα ποσό χάνεται εάν ο πάνω δείκτης (του αθροίσματος) είναι μικρότερος από τον κάτω δείκτη. Η συνάρτηση $f_k(i,x)$ μπορεί να ερμηνευθεί ως βέλτιστος υπόλοιπος χρόνος $T_k(i,x)$ μείον το τμήμα που δεν εξαρτάται από τις αποφάσεις αναθεώρησης προόδου από το στάδιο k και έπειτα. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός απλοποιεί τις εξισώσεις βελτιστοποίησης χωρίς να επηρεάζει το ρόλο τους στον καθορισμό των βέλτιστων πολιτικών. Από τις (3), (1) και (2) έχουμε

$$f_k(i,x) = \phi(i,k) t_k^R + \min[t_{ik}^S + f_{k+1}(k, \gamma_{kk}(x)), f_{k+1}(i, \gamma_{ik}(x))] \qquad \textbf{(4)}$$

για k=1,2,…,N-1, και

$$f_N(i,x) = t_{iN}^S + \phi(i,N) t_N^R + a_N - x \text{, όπου}$$

$$\gamma_{ik}(x) := (x + t_{k+1}) \wedge a_i$$

είναι το ποσό εργασίας της διαδικασίας σχεδιασμού που θα ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος του επόμενου σταδίου σχεδιασμού προϊόντος (k + 1), ξεκινώντας από το στάδιο k και την κατάσταση (i,x), και χωρίς πραγματοποίηση καμίας αναθεώρησης έπειτα.

<u>ΛΗΜΜΑ 2.</u>

a) Για κάθε j, η φ(i,j) είναι φθίνουσα στο i.

b) γ_{ik} (x) είναι αύξουσα στο i και x.

Εάν το t_{ik}^S μειώνεται σε σχέση με το i για κάθε k, τότε ισχύουν τα ακόλουθα:

c) Η $f_k(i,x)$ είναι φθίνουσα στα i και x.

d) $f_k(i,x) - f_k(j,x) \geq [\phi(i,k) - \phi(j,k)] t_k^R \qquad \gamma\iota\alpha \quad i \leq j \leq k-1$

e) $f_k(i,x) - f_k(j,x) \leq t_{ik}^S + [\phi(i,k) - \phi(j,k)] t_k^R \qquad \gamma\iota\alpha \quad i \leq j \leq 1$

ΑΠΟΔΕΙΞΗ

Για το (a),

$$\phi(i+1,j) - \phi(i,j) = (-1 + p_{i+1})(p_{i+2} \ldots p_j) < 0$$

Το (d) ισχύει επειδή το ελάχιστο μιας σταθεράς και μιας αύξουσας συνάρτησης, είναι μια ποσότητα αύξουσα. Χρησιμοποιείται προς τα πίσω επαγωγή για το (c). Από το

(a), τα αποτελέσματα ισχύουν σαφώς για k = N. Υποθέτουμε ότι ισχύουν για k= m+1. Από την επαγωγική υπόθεση και το (b), η $f_{m+1}(i,\gamma_{ik}(x))$ είναι φθίνουσα στο i, ως εκ τούτου η $f_m(i,x)$ είναι φθίνουσα στο i, επειδή είναι το άθροισμα μιας φθίνουσας συνάρτησης συν το ελάχιστο δύο συναρτήσεων που είναι φθίνουσες στο i. Η $f_m(i,x)$ είναι όμοια φθίνουσα στο x. Για ευκολία

$$g_k(i,x) := \min[t_{ik}^S + f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)), f_{k+1}(i,\gamma_{ik}(x))].$$

Το (d) από το (4) και το γεγονός ότι $g_k(\cdot,x)$ είναι το ελάχιστο δύο συναρτήσεων που είναι φθίνουσες, από (b) και (c), φθίνει. Γιατί το (e), υποθέτουμε $i \le j \le k-1$. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις:

Περίπτωση 1: $t_{jk}^S + f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) \le f_{k+1}(j,\gamma_{jk}(x))]$. Σε αυτή την περίπτωση

$$g_k(i,x) \le t_{ik}^S + f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) = t_{ik}^S - t_{jk}^S + g_k(j,x) \le t_{ik}^S + g_k(j,x) \qquad (t_{jk}^S \ge 0).$$

Περίπτωση 2: $t_{jk}^S + f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) > f_{k+1}(j,\gamma_{jk}(x))]$. Σε αυτή την περίπτωση και με βάση τα (b) και (c)

$$g_k(i,x) \le t_{ik}^S + f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) \le t_{ik}^S + f_{k+1}(j,\gamma_{jk}(x)) \le t_{ik}^S + g_k(j,x).$$

<u>ΑΠΟΔΕΙΞΗ ΘΕΩΡΗΜΑΤΟΣ 1.</u> (a) Σε αυτή την περίπτωση, $t_{ik}^S = t_k^S$ και το όφελος διεξαγωγής μιας αναθεώρησης αυτή τη στιγμή είναι

$$\underline{f_{k+1}(i,(x+t_{k+1}) \wedge a_i) - f_{k+1}(k,(x+t_{k+1}) \wedge a_k) - t_k^S},$$

το οποίο από το Λήμμα 2 (c), αυξάνει όσο μειώνεται το i.

(b) $$f_{k+1}(i,\gamma_{ik}(x)) - f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) = \begin{cases} f_{k+1}(i,x+t_{k+1}) - f_{k+1}(k,x+t_{k+1}) & \text{έαν} \quad 0 \le x \le a_i - t_{k+1}, \\ f_{k+1}(i,a_i) - f_{k+1}(k,x+t_{k+1}) & \text{έαν} \quad a_i - t_{k+1} \le x \le a_k - t_{k+1}, \\ f_{k+1}(i,a_i) - f_{k+1}(k,a_k) & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

(c) Σε αυτή την περίπτωση,

$$\begin{aligned} & f_{k+1}(i,\gamma_{ik}(x)) - f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) \ge f_{k+1}(i,\gamma_{kk}(x)) - f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) \qquad \text{Λήμμα} \quad 2(b,c) \\ & \ge [\phi(i,k+1) - \phi(k,k+1)]t_{k+1}^R \qquad \text{Λήμμα} \quad 2(d) \\ & = p_{k+1}\phi(i,k)t_{k+1}^R > t_{ik}^S \end{aligned}$$

(d) Σε αυτή την περίπτωση,

$$f_{k+1}(i,\gamma_{ik}(x)) - f_{k+1}(k,\gamma_{kk}(x)) = f_{k+1}(i,x+t_{k+1}) - f_{k+1}(k,x+t_{k+1}) \qquad (x+t_{k+1} \le a_i \le a_k)$$
$$\le t^S_{i,k+1} + [\phi(i,k+1) - \phi(k,k+1)\}t^R_{k+1} \qquad \Lambda\acute{\eta}\mu\mu\alpha \quad 2(e)$$
$$= t^S_{i,k+1} + p_{k+1}(\phi(i,k))t^R_{k+1} \le t^S_{ik}$$

---

3. Λήμμα 1

Ορίζεται x_i το συνολικό ποσό παραγωγικής εργασίας της διαδικασίας σχεδιασμού που ολοκληρώνεται μέχρι την i αναθεώρηση προόδου, και x_n, το ποσό εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που ολοκληρώνεται όταν η εργασία σχεδιασμού προϊόντος τελειώσει.

ΛΗΜΜΑ 3

$$x := x_n = \min_{1\le i\le n}\left\{ a\sum_{j=1}^{i-1} Q_j + \sum_{j=i+1}^{n} Q_j \right\}$$

ΑΠΟΔΕΙΞΗ. Μέχρι την i+1 αναθεώρηση προόδου, το συνολικό ποσό εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που ολοκληρώνεται είναι το ελάχιστο του (a) της εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που ολοκληρώνεται μέχρι την i αναθεώρηση προόδου συν το χρόνο που οι σχεδιαστές διαδικασίας επιτρέπεται να εργάζονται, το οποίο είναι Q_{i+1}, και (b) το ποσό εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που επιτρέπεται από την εργασία σχεδιασμού προϊόντος που ολοκληρώνεται κατά την διάρκεια της τελευταίας αναθεώρησης προόδου, το οποίο είναι $a\sum_{j=1}^{i} Q_j$. Κατά συνέπεια ξεκινώντας από x_1=0, έχουμε για $i \ge 1$:

$$x_{i+1} = (x_i + Q_{i+1}) \wedge \left(a\sum_{j=1}^{i} Q_j \right)$$

Με προς τα πίσω επαγωγή έχουμε

$$x = \left(x_k + \sum_{j=k+1}^{n} Q_j \right) \wedge \min_{k+1\le i\le n}\left\{ a\sum_{j=1}^{i-1} Q_j + \sum_{j=i+1}^{n} Q_j \right\},$$

Για $1 \le k \le n-1$. Το Λήμμα 3 αποτελείται από την περίπτωση όταν k=1.

ΑΠΟΔΕΙΞΗ ΛΗΜΜΑΤΟΣ 1. (a): από Porteus (1986) και Rosenblatt και Lee (1986), ο αναμενόμενος αριθμός σταδίων που πρέπει να γίνει επανασχεδιασμός εξαιτίας μιας περιόδου αναθεώρησης Q σταδίων είναι το $Q - p(1-p^Q)/q$. Το (b) προκύπτει from dropping extraneous terms from (a), με την εφαρμογή του λήμματος 3, και, για

convexity, direct differentiation. Το (c) προκύπτει ομοίως με προσέγγιση πρώτης τάξης

$$Q - \frac{p(1-p^Q)}{q} \cong \frac{qQ^2}{2},$$

για την περίπτωση που το qQ είναι μικρό.

4. ΘΕΩΡΗΜΑ 2

Θα αποδειχθούν πρώτα τα (c), (d), και (e) πριν από τα (a) και (b)

(c) Καθορισμός του n και a>1, και υπόθεση ότι έχουμε μια βέλτιστη λύση. Αρχικά δείχνουμε ότι εάν ένας από τους n περιορισμούς του x στο Λήμμα 2 (b) είναι υποχρεωτικός, τότε οι προηγούμενοι περιορισμοί πρέπει επίσης να είναι υποχρεωτικοί: Υποθέτουμε ο k είναι υποχρεωτικός και ο k–1 δεν είναι. Τότε έχουμε $x = a\sum_{j=1}^{k-1} Q_j + \sum_{j=k+1}^{n} Q_j$ και $x < a\sum_{j=1}^{k-2} Q_j + \sum_{j=k}^{n} Q_j$. Με αντικατάσταση του x στη δεύτερη σχέση μας δίνει $aQ_{k-1} < Q_k$. Θεωρούμε αύξηση του Q_{k-1} από το δ και μια μείωση του Q_k ίδιου ποσού. Η λύση παραμένει εφικτή, όταν όλος ο χρόνος T_1 είναι ακόμα διαθέσιμος, ο περιορισμός k γίνεται μη υποχρεωτικός, και περιορισμός k–1 παραμένει μη υποχρεωτικός εφόσον το δ είναι αρκετά μικρό. Επειδή η αντικειμενική συνάρτηση είναι το σύνολο όμοιων ξεχωριστών αυστηρά κυρτών συναρτήσεων του κάθε Q_j, και $Q_{k-1} < Q_k / a < Q_k$, η αντικειμενική συνάρτηση μειώνεται αυστηρά, έτσι ώστε η αρχική λύση δεν μπορεί να είναι βέλτιστη, οπότε ο ισχυρισμός μας είναι αληθής. Ορίζεται k ο highest numbered υποχρεωτικός περιορισμός. Κατά συνέπεια, $Q_i = a^{i-1}Q_1 \quad \gamma\iota\alpha \quad 1 \le i \le k$ και $Q_{k+1} < a^k Q_1$. Οπότε $a^{k-1}Q_1 \le Q_{k+1}$.

Στη συνέχεια θα αποδειχθεί ότι εάν δύο διαδοχικοί περιορισμοί είναι μη υποχρεωτικοί, τότε οι αντίστοιχες περίοδοι αναθεώρησης πρέπει να είναι ίσες. Υποθέτουμε ότι οι περιορισμοί k και k+1 είναι μη υποχρεωτικοί και $Q_k \ne Q_{k+1}$. Adjusting each by δ in the direction of their average retains feasibility, provided δ is sufficient small, and decreases the objective function. Κατά συνέπεια, ο ισχυρισμός πρέπει να είναι αληθής. Το (d) ακολουθεί όμοια, και το μέρος (e) είναι μια ειδική περίπτωση των (c) και (d)

(a) Υποθέτουμε ότι a>1. Εφόσον q=0, ο στόχος είναι απλά να μεγιστοποιηθεί το x. Υποθέτουμε ότι ο περιορισμός n στο x είναι μη υποχρεωτικός σε μια βέλτιστη λύση.

Τότε $x < a\sum_{j=1}^{n-1} Q_j$. Το Q_{n-1} μπορεί να μειωθεί και το Q_n να αυξηθεί κατά το ίδιο ποσό, το οποίο παράγει μια μείωση στο x, το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τη βέλτιστη λύση. Κατά συνέπεια, ο περιορισμός *n* πρέπει να είναι υποχρεωτικός, και, από το (c), όλοι οι άλλοι πρέπει να είναι επίσης υποχρεωτικοί. Η γεωμετρική λύση ακολουθεί έπειτα. Η περίπτωση α<1 ακολουθεί ομοίως. Η περίπτωση α=1 προκύπτει άμεσα από το (e).

(b) Με T_2=0, αναζητούμε ουσιαστικά τις περιόδους επιθεώρησης για να ελαχιστοποιηθεί το διάστημα για μια ομάδα που πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία σε έναν μοναδικό σταθμό εργασίας. Οι Rosenblatt και Lee (1986) δείχνουν ότι οι βέλτιστοι χρόνοι μεταξύ των επιθεωρήσεων είναι ίσοι όταν ο στόχος είναι ελάχιστο κόστος ανά ημέρα. Παρόμοια λογική ισχύει εδώ.

5. ΘΕΩΡΗΜΑ 3

Ο άμεσος υπολογισμός δείχνει ότι το (a) ισχύει.

(b) Χρήση πολλαπλασιαστών Lagrange $\lambda_i, \quad 0 \le i \le n$, οι Kuch-Tucker συνθήκες για το τετραγωνικό πρόγραμμα, από το Λήμμα 1 (c) είναι:

$$Q_i \ge 0, \quad 1 \le i \le n \tag{6}$$

$$x \ge 0 \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^{n} Q_j = T_1 \tag{8}$$

$$x \le a\sum_{j=1}^{i-1} Q_j + \sum_{j=i+1}^{n} Q_j, \quad 1 \le i \le n \tag{9}$$

$$\lambda_i \ge 0, \quad 1 \le i \le n \tag{10}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1 \tag{11}$$

$$\lambda_0 - \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j - \alpha \sum_{j=i+1}^{n} \lambda_j + qt_R Q_i = 0, \quad 1 \le i \le n \tag{12}$$

$$\lambda_i \left(x - a\sum_{j=1}^{i-1} Q_j - \sum_{j=i+1}^{n} Q_j \right) = 0, \quad 1 \le i \le n \tag{13}$$

Να σημειωθεί ότι στις (9), (12), και (13), ισχύει ότι ένα άθροισμα χάνεται εάν ο πάνω δείκτης (του αθροίσματος) είναι μικρότερος από τον κάτω δείκτη.

Θεωρείται η ακόλουθη λύση για $1 \le k \le n$:

$$x = \sum_{j=2}^{n} Q_j \,,$$

$$Q_1 = \left[\mathrm{T}_1 - \frac{(n-k)(a-1)}{(a^k-1)qt_R} \right] \Bigg/ \left[\frac{a^k-1}{a-1} + \frac{(n-k)(a^k+1)}{a+1} \right],$$

$$Q_i = \begin{cases} a^{i-1} Q_1 & \gamma\iota\alpha \quad 1 \le i \le k \\ \dfrac{(a^k+1)Q_1}{a+1} + \dfrac{a-1}{(a^k-1)qt_R} & \gamma\iota\alpha \quad k+1 \le i \le n \end{cases},$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 - \dfrac{(a^k+1)qt_R Q_1}{a+1} - \dfrac{a-1}{a^k-1} & \varepsilon\acute{\alpha}\nu \quad i = 0 \\ a^{k-i}\left[\dfrac{a-1}{a^k-1} - \dfrac{(a^{k-1}-1)qt_R Q_1}{a+1} \right] + \dfrac{a^{i-1}(a^{2k-2i}-1)qt_R Q_1}{a+1} & \varepsilon\acute{\alpha}\nu \quad 1 \le i \le k \\ 0 \quad \varepsilon\acute{\alpha}\nu \quad k+1 \le i \le n & \end{cases}.$$

Αυτή η λύση κατασκευάζεται με την πρόθεση ότι, από τους n περιορισμούς που καθορίζονται από την (9), οι πρώτοι k είναι υποχρεωτικοί και οι υπόλοιποι είναι μη υποχρεωτικοί. Κατά συνέπεια, οι πρώτοι k πολλαπλασιαστές Lagrange για την (9) είναι θετικοί και οι υπόλοιποι τίθενται ίσοι με μηδέν.

Ο άμεσος υπολογισμός δείχνει ότι η (8), οι πρώτοι k περιορισμοί των (9), (11), (12) και (13) ικανοποιούνται από αυτήν την λύση. Οι συνθήκες (6) και (7) γίνονται $Q_1 \ge 0$.Για να βεβαιωθεί το γεγονός ότι οι υπόλοιποι περιορισμοί της (9) είναι μη υποχρεωτικοί, παρατηρούμε ότι ο tightest θα είναι για i=k+1. Με λίγη άλγεβρα, επομένως απαιτείται

$$Q_n \le a^k Q_1 \,, \qquad \textbf{(9΄)}$$

το οποίο περιλαμβάνει τη συνθήκη $Q_1 \ge 0$, και, μετά από αντικατάσταση

$$\mathrm{T}_1 qt_R \ge r_n^k(a) \,.$$

Για να βεβαιωθεί το γεγονός ότι οι πολλαπλασιαστές για τους k πρώτους περιορισμούς της (9) είναι πραγματικά θετικοί, διαπιστώνεται ότι ο μικρότερος πολλαπλασιαστής είναι λ_k. Κατά συνέπεια, η (10) ισχύει εάν

$$Q_1 < \frac{a-1}{(a^{k-1}-1)(a^k-1)qt_R} \qquad \textbf{(10΄)}$$

όποιος, μετά από αντικατάσταση, γίνεται $\mathrm{T}_1 qt_R < r_n^{k-1}(a)$. Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη για την περίπτωση όπου $k \neq n$.

Η περίπτωση όταν $k = n$ είναι απλούστερη: δεδομένου ότι όλοι οι περιορισμοί της (9) είναι υποχρεωτικοί, η **(9')** γίνεται $Q_1 \geq 0$, το οποίο ικανοποιείται. Η συνθήκη **(10')** ισχύει όταν $\mathrm{T}_1 qt_R < r_n^{n-1}(a)$.

(c) Ορίζονται $x' = \beta^2 x$, $Q_i' = \beta Q_{n+1-i}$ και $\mathrm{T}_1' = \beta \mathrm{T}_1$. Το τετραγωνικό πρόγραμμα τότε μπορεί να διατυπωθεί ως: Να βρεθεί το $x' \geq 0$, και $Q_i' \geq 0$ για $1 \leq i \leq n$ ούτως ώστε να

ελαχιστοποιείται το $$-x' + \frac{qt_R}{2}\sum_{j=1}^{n} Q_j'^2$$

υπό του περιορισμούς $$\sum_{j=1}^{n} Q_i' = \mathrm{T}_1',$$

$$x' \leq \beta \sum_{j=1}^{i-1} Q_j' + \sum_{j=i+1}^{n} Q_j', \qquad 1 \leq i \leq n,$$

το οποίο είναι της μορφής που λύθηκε στο (a). Τα αποτέλεσμα λαμβάνεται με την εφαρμογή του (a) στο μετασχηματισμένο πρόβλημα.

6. ΘΕΩΡΗΜΑ 4

Το αποτέλεσμα προκύπτει από το Λήμμα 1 με την εξέταση των περιπτώσεων $\mathrm{T}_2 > \mathrm{T}_1$ και $\mathrm{T}_2 \leq \mathrm{T}_1$ χωριστά. Η παρακάτω απόδειξη είναι πιο διαισθητική. Υποθέτουμε αρχικά ότι $\mathrm{T}_1 > \mathrm{T}_2$, έτσι ώστε $\theta = \mathrm{T}_2 / \mathrm{T}_1$. Τότε, μετά από κάθε αναθεώρηση προόδου, πρόσθετες θQ ημέρες παραγωγικής εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας μπορούν να ολοκληρωθούν. Όταν σχεδιαστεί το προϊόν, θα υπάρξει ένα τελευταίο τμήμα θQ ημερών παραγωγικής εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που θα απαιτούνται, δύο πρώτοι όροι. Ο τρίτος όρος δίνει τον αριθμό των ημερών οργάνωσης που απαιτούνται για το πρόγραμμα. Ο τέταρτος όρος δίνει τον αναμενόμενο συνολικό χρόνο

επανασχεδιασμών. Ανεπίσημα, εάν ένα ελάττωμα εμφανιστεί σε έναν κύκλο αναθεώρησης που διαρκεί Q ημέρες, ένας μέσος όρος περίπου $Q/2$ ημερών πρέπει να είναι ξαναδιατεθεί, απαιτώντας $t_R Q/2$ πρόσθετες ημέρες. Η πιθανότητα ένα ελάττωμα να εμφανιστεί σε έναν κύκλο είναι $1-p^Q$, η οποία, σε μια πρώτης τάξης προσέγγιση, είναι ίση με qQ. Ο πολλαπλασιασμός με τον αριθμό αναθεωρήσεων του προγράμματος καταλήγει στον όρο στη μορφή που δίνεται.

Τώρα υποθέστε το $T_1 \leq T_2$, έτσι ώστε $\theta = 1$. Ο σχεδιασμός διαδικασίας δεν ξεκινά μέχρι την ημέρα Q, όπου διεξάγεται η πρώτη αναθεώρηση προόδου. Υπάρχουν έπειτα T_1 ημέρες παραγωγικής εργασίας σχεδιασμού διαδικασίας που απαιτούνται, εφόσον η υπόλοιπη εργασία σχεδιασμού προϊόντος μπορεί να διεξαχθεί παράλληλα, ο οποίο αποτελεί τους πρώτους δύο όρους. Οι τελευταίοι δύο όροι είναι αμετάβλητοι.

Η περίπου βέλτιστη συχνότητα αναθεώρησης προκύπτει από το κλασσικό EOQ μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

1. ΘΕΩΡΗΜΑ 1

Υποθέτουμε ένα άπειρο ορίζοντα και μ(t) σταθερό μεταξύ δύο συνεδριάσεων (που αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων υπολογίζουν μόνο το ποσοστό τροποποίησης όταν συναντιούνται). Ακολουθούν τρία Λήμματα.

ΛΗΜΜΑ 1. Βέλτιστη πραγματοποίηση συνεδριάσεων αμέσως αφού εμφανιστούν οι τροποποιήσεις.

ΑΠΟΔΕΙΞΗ. Θεωρούμε μια συνεδρίαση κάθε Δt μονάδες χρόνου για μικρό Δt. Με ανεξάρτητους χρόνους μεταξύ των αφίξεων, μπορεί να καθοριστεί μια Markov διαδικασία απόφασης από τα n, ο αριθμός τροποποιήσεων που εκκρεμούν, t, ο downstream χρόνος, και t_l ο χρόνος της τελευταίας τροποποίησης. Τότε η εκτέλεση του δυναμικού προγράμματος γίνεται, με την πρώτη σειρά να αντιστοιχεί στην ενέργεια «συνάντηση» και η δεύτερη «καμία συνάντηση» (Heyman and Sobel 1984):

$$V(n,t,t_l) = \min\begin{cases} \tau_2 + p(t,t_l)V(1,t+\Delta t,t_l) + (1-p(t,t_l)V(0,t+\Delta t,t_l) \\ kn\Delta t + p(t,t_l)V(n+1,t+\Delta t,t_l) + (1-p(t,t_l)V(n,t+\Delta t,t_l) \end{cases} \quad \textbf{(14)}$$

όπου $p(t,t_l)$ είναι η πιθανότητα μιας άφιξης μέσα στο επόμενο διάστημα Δt. Η εκτέλεση δείχνει ότι καμία συνεδρίαση δεν πρέπει να πραγματοποιηθεί όταν n =0. Κατά συνέπεια, υπάρχει το πολύ μια συνεδρίαση μεταξύ δύο διαδοχικών τροποποιήσεων.

Κατά την διάρκεια της τελευταίας τροποποίησης, η συνάρτηση, δεδομένου ότι μια συνεδρίαση θα πραγματοποιηθεί σε κάποιο χρόνο t πριν από την επόμενη άφιξη τροποποίησης στο χρόνο s (τυχαία μεταβλητή), είναι: $V(n,t_l / \mu\iota\alpha \;\; \sigma\upsilon\nu\varepsilon\delta\rho\acute{\iota}\alpha\sigma\eta \;\; \sigma\tau o \;\; \chi\rho\acute{o}\nu o \;\; t) = kn(t,t_l) + \tau_2 + EV(1,s)$ Ελαχιστοποιείται για $t=t_l$. Κατά συνέπεια, μια συνεδρίαση πρέπει να πραγματοποιηθεί στο t_l, αμέσως μετά από την τελευταία τροποποίηση.

ΛΗΜΜΑ 2. Μια πολιτική «κρίσιμης τιμής» είναι βέλτιστη: Υπάρχει ένα n(t) έτσι ώστε είναι βέλτιστο να υπάρξει συνάντηση εάν και μόνο εάν ο αριθμός των

τροποποιήσεων που εκκρεμούν (έχουν εμφανιστεί αλλά δεν έχουν διαβιβαστεί) είναι μεγαλύτερος από n(t).

ΑΠΟΔΕΙΞΗ. Με βάση το Λήμμα 1, μπορεί να γίνει επαναδιατύπωση του δυναμικού προγράμματος για το t, ο χρόνος άφιξης μιας τροποποίησης:

$$V(n,t) = \min \begin{cases} \tau_2 + V\left(1, t + \dfrac{1}{\mu_a(t + \mathrm{T}_1 - \lambda \mathrm{T}_2)}\right) & \textit{συνεδρίαση} \\ \dfrac{kn}{\mu_a(t + \mathrm{T}_1 - \lambda \mathrm{T}_2)} + V\left((n+1, t + \dfrac{1}{\mu_a(t + \mathrm{T}_1 - \lambda \mathrm{T}_2)}\right) & \textit{όχι συνεδρίαση} \end{cases} \quad \textbf{(15)}$$

Εδώ η έκφραση $1/(\mu_a(t + \mathrm{T}_1 - \lambda \mathrm{T}_2))$ είναι ο αναμενόμενος χρόνος έως την εμφάνιση της επόμενης τροποποίησης (the time argument of μ is shifted επειδή οι τροποποιήσεις παράγονται σύμφωνα με τον upstream χρόνο). Το κόστος είναι ανεξάρτητο από το n για την ενέργεια «συνάντηση», ενώ αντίθετα αυξάνει στο n για την ενέργεια «καμία συνάντηση». Επομένως, πρέπει να υπάρξει μια κρίσιμη τιμή n(t).

ΛΗΜΜΑ 3. Εάν μια κρίσιμη πολιτική τιμής n(t) χρησιμοποιείται, ο αναμενόμενος ρυθμός κόστους στο χρόνο t είναι

$$\frac{\mu_\alpha(t)}{n(t)}\tau_2 + \frac{k(n(t)-1)}{2} \quad \textbf{(16)}$$

ΑΠΟΔΕΙΞΗ. Οι τροποποιήσεις φθάνουν με ρυθμό $\mu_\alpha(t)$. Σε ένα τυχαίο χρόνο t, μία από τις n(t) τροποποιήσεις θα προκαλέσει μια συνεδρίαση, η οποία οδηγεί σε ένα αναμενόμενο ρυθμό κόστους επικοινωνίας $\tau_2 \mu_\alpha(t)/n(t)$. Οι αφίξεις μεταξύ δύο συνεδριάσεων ακολουθούν μια ομοιογενή διαδικασία Poison και έτσι ομοιόμορφα κατανεμημένη. Επομένως, ο αναμενόμενος αριθμός τροποποιήσεων που εκκρεμούν σε έναν τυχαίο χρόνο μεταξύ δύο συνεδριάσεων είναι $(n(t)-1)/2$ (εφόσον το πολύ n(t)-1 τροποποιήσεις είναι πάντα στην αναμονή). Κατά συνέπεια ο αναμενόμενος «holding cost» ρυθμός είναι $k(n(t)-1)/2$.

Μόνο ο σχετικός με την επικοινωνία ρυθμός κόστους στην (16) εξαρτάται από την πολιτική επικοινωνίας. Μπορεί να ελαχιστοποιηθεί για κάθε σημείο στο χρόνο t χωριστά και είναι κυρτός, με βέλτιστη κρίσιμη τιμή $n^*(t)$ στην (7). Η αναμενόμενη συχνότητα επικοινωνίας που προκύπτει υπολογίζεται μέσω του $\mu_\alpha(t)/n(t)$. Βάζοντας

το $n^*(t)$ στην (16) και ο συνδυασμός αυτού με την αναπόφευκτη επανάληψη παράγουν το αποτέλεσμα.

2. ΠΡΟΤΑΣΗ 3

Θεωρούμε ότι EC(t) είναι ο αναμενόμενο ρυθμός κόστους λόγω της καθυστέρησης επικοινωνίας μόνο, όπως καθορίζεται στη (16). Θεωρούμε την κρίσιμη τιμή της πολιτικής επικοινωνίας, n(t), να είναι μια συνεχής συνάρτηση του $\mu_\alpha(t)$. Η πρότασης 3 δείχνει ότι αυτός ο ρυθμός κόστους, και έτσι το Λήμμα 3, ισχύουν περίπου όταν το $\mu_\alpha(t)$ αλλάζει λίγο μεταξύ δύο διαδοχικών συνεδριάσεων.

ΠΡΟΤΑΣΗ 3. Εάν οι τροποποιήσεις ακολουθούν μια μη σταθερή διαδικασία Poison ρυθμού $\mu_\alpha(t)$, τότε όσο $|\mu_\alpha(t)-\mu_\alpha(s)| \to 0 \forall t,s$ στο ίδιο διάστημα μεταξύ δύο συνεδριάσεων,

$$\left| EC(t) - \frac{\mu_\alpha(t)}{n(t)}\tau_2 - \frac{k(n(t)-1)}{2} \right| \to 0 .$$

ΑΠΟΔΕΙΞΗ. Οι τροποποιήσεις φθάνουν με ρυθμό $\mu_\alpha(t)$. Σε μια τυχαία τροποποίηση, για παράδειγμα, στο χρόνο t, μία από τις n(t) τροποποιήσεις θα προκαλέσει μια συνεδρίαση και μια σχετική καθυστέρηση τ_2. Αυτό παράγει ένα αναμενόμενο ρυθμό κόστους επικοινωνίας $\tau_2\mu_\alpha(t)/n(t)$.

Απομένει το «holding cost». Επιλέγουμε ένα χρόνο s τυχαία. Θεωρούμε το χρόνο της τελευταίας συνεδρίασης t_l και το χρόνο της ακόλουθης συνεδρίασης t_f. Εάν το s επιλέγεται τυχαία, τότε $\mathrm{E}[\mathrm{s\ given}\, t_l, t_f] = (t_l + t_f)/2$. Ο αριθμός τροποποιήσεων που εκκρεμούν στο χρόνο s πρέπει να είναι $\in \{0,1,\ldots,n(t_f)-1\}$, επειδή μετά από την $n(t_f)$ άφιξη, μια νέα συνεδρίαση πραγματοποιείται αμέσως. Επιδιώκεται ο υπολογισμός του EI, του αναμενόμενου αριθμού αφίξεων μέχρι το χρόνο s δεδομένου ότι υπάρχουν $n(t_f)$ αφίξεις κατά την περίοδο της επόμενης συνεδρίασης. Με το μετασχηματισμό της ανομοιογενούς διαδικασίας Poison σε μια ομοιογενή ((Taylor and Karlin 1984), η πρόβλεψη (conditional expectation) των αφίξεων μέχρι το χρόνο s, λαμβάνοντας υπόψη το t_f, είναι

$$E(I(s)\ \text{δεδομένου}\ n(t_f)) = (n(t_f)-1)\frac{\int_{t_l}^{s}\mu_\alpha(u)du}{\int_{t_l}^{t_f}\mu_\alpha(u)du}.$$

Τώρα, χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι το $\mu_\alpha(u) = a + bu$ έχει μια γραμμική μορφή, μπορούν να υπολογιστούν τα ολοκληρώματα ως: E(I(s)) δεδομένου

$$n(t_f) = E_s\left[\frac{a(s-t_l) = \frac{1}{2}b(2st_l - t_l^2)}{a(t_f - t_l) = \frac{1}{2}b(2t_f t_l - t_l^2)}\right](n(t_f)-1).$$

Δεδομένου ότι το s είναι ανεξάρτητο των t_f, t_l, the expectation can be pulled into the brackets. Όσο το μ_α συγκλίνει σε μια σταθερά, $b \to 0$ και $n(t_f) \to n(s)$ από υπόθεση. Κατά συνέπεια, $\lim_{b\to 0}(EI) = (n(s)-1)/2$ για όλα τα t_f, t_l.

3. ΠΡΟΤΑΣΗ 1

Η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της (10) ως προς λ είναι

$$\frac{\partial \mathrm{ET}}{\partial \lambda} = -\mathrm{T}_2 + \mathrm{T}_2\left[\sqrt{2k\mu_\alpha\tau_2\left(1+e-2e\lambda\frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}\right)} - \frac{k}{2}\right] + \mathrm{T}_2^2\lambda k\mu_\alpha\left(1+e-\frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}\lambda e\right), \quad \textbf{(17)}$$

$$\frac{\partial^2 \mathrm{ET}}{\partial \lambda^2} = -\frac{2e}{\mathrm{T}_1}\frac{\mathrm{T}_2^2}{2}\frac{\sqrt{2k\mu_\alpha\tau_2}}{\sqrt{1+e-2e\lambda\frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}}} + k\mu_\alpha\mathrm{T}_2^2\left[1+e-2e\lambda\frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}\right]. \quad \textbf{(18)}$$

Ο πρώτος όρος στην (18) αντιπροσωπεύει τα κόστη καθυστέρησης επικοινωνίας. Είναι αρνητικός (κοίλος στην αντικειμενική συνάρτηση) για e>0 και θετικός (κυρτός) για e<0. Ο δεύτερος όρος προέρχεται από την κυρτή αναπόφευκτη επανάληψη και είναι πάντα θετικός.

Για e<0, η δεύτερη παράγωγος είναι θετική για όλα τα εφικτά λ, και μειώνεται αυστηρά με το λ. Επομένως, εάν $\partial^2\mathrm{ET}/\partial\lambda^2 > 0$ στη μέγιστη τιμή του λ, η δεύτερη παράγωγος πρέπει να είναι θετική σε όλο το εφικτό σύνολο του λ. Εάν $\partial^2\mathrm{ET}/\partial\lambda^2 < 0$ στο λ = 0, τότε η δεύτερη παράγωγος πρέπει να είναι αρνητική σε όλο το εφικτό σύνολο του λ. Στο ενδιάμεσο, η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή-κοίλη, επειδή η δεύτερη παράγωγος μειώνεται.

Επομένως, θέτοντας τη (18) μηδέν για λ=0 και λ=min {1,T_1/T_2} παράγονται οι τιμές $\underline{e}$ και $\bar{e}$:

$$\frac{\underline{e}}{\left(1+\underline{e}\left[1-2\lambda_{\max}\frac{T_2}{T_1}\right]\right)^{3/2}}=T_1\sqrt{\frac{k\mu_\alpha}{2\tau_2}};\frac{\bar{e}}{(1+\bar{e})^{3/2}}=T_1\sqrt{\frac{k\mu_\alpha}{2\tau_2}}\ .$$

Να σημειωθεί ότι όταν $T_2>T_1$ (το downstream καθήκον είναι μεγάλης χρονικής διάρκειας) τότε $\lambda_{max}=T_1/T_2$. Εάν το downstream καθήκον είναι σύντομο, τότε $\lambda_{max}=1$. Κατά συνέπεια, η τιμή του $\underline{e}$ διαφέρει μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Όταν το δεξί μέρος των παραπάνω συνθηκών είναι >1 (δηλαδή $\lambda T_2\beta^*>1$), τότε $e>\bar{e}$ είναι αδύνατο, επειδή $e/(1+e)^{3/2}<1$.

4. ΘΕΩΡΗΜΑ 2

Θεωρούμε τα *k* και μ_α πρώτα. Δεδομένου ότι ο ρυθμός κόστους στο ολοκλήρωμα της αντικειμενικής συνάρτησης είναι θετικός και αυξανόμενος στο *k*, έχουμε ότι $\forall t\in[T_1-\lambda T_2,T_1]: k(t-T_1+\lambda T_2)\mu(t)+\sqrt{2k\tau_2\mu_\alpha(t)}-k/2>0$ και αυξάνεται με το *k*. Αντικαθιστώντας κατά συνέπεια $t=T_1+\lambda T_2$ έχουμε $\sqrt{2k\mu_\alpha\tau_2(1+e-2e\lambda(T_2/T_1))}>0$ και αυξάνεται με το *k*. Χρησιμοποιώντας αυτό το αποτέλεσμα, βλέπουμε ότι η (17) αυξάνεται με το *k*, και η $\partial^2 ET/\partial\lambda\partial k$ είναι θετική.

Όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή στο λ (in the first region of e), τότε η βέλτιστη επικάλυψη είναι είτε λ_{FOC} (η λύση στο FOC) είτε σε ένα όριο του Λ. By the implicit function theorem

$$\partial\lambda_{FOC}/\partial k=\left.-\frac{\partial^2 ET}{\partial\lambda\partial k}\right|_{\lambda_{FOC}}\Big/\left.\frac{\partial^2 ET}{\partial\lambda^2}\right|_{\lambda_{FOC}}\ .$$

Αυτή η διατύπωση είναι αρνητική, υπονοώντας ότι η βέλτιστη επικάλυψη μειώνεται με το *k* (αυστηρά εάν το λ_{FOC} είναι βέλτιστο). Με εξέταση της (17) βλέπουμε ότι το ίδιο ισχύει για μ_α.

Εξετάζουμε τώρα την περίπτωση όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι κοίλη. Πρέπει να συγκρίνουμε την αντικειμενική συνάρτηση (10) για τις δύο πιθανές λύσεις $\lambda^*=0$ και $\lambda^*=\lambda_{\max}$. Για $\lambda^*=0$, η αντικειμενική συνάρτηση είναι $ET=T_1+T_2$,

ανεξάρτητη από τα e, k ή μ_α. Για $\lambda > 0$, εντούτοις, η ET αυξάνεται αυστηρά με το $k\mu_\alpha$, όπως δείχνει η αντικειμενική συνάρτηση (10). Επομένως, η βέλτιστη λύση μπορεί μόνο να μειωθεί από λ_{max} σε 0 καθώς το $k\mu_\alpha$ αυξάνει, αλλά ποτέ το αντίθετο.

Τέλος, όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή-κοίλη, τα υποψήφια για βέλτιστη επικάλυψη είναι 0, λ_{max}, ή λ_{FOC}. Δεδομένου ότι το mixed partial της ET ως προς λ και k (ή μ_α) είναι θετικό, η αντικειμενική συνάρτηση αυξάνεται περισσότερο με το k (ή μ_α) στην πλήρη επικάλυψη στο λ_{FOC}. Κατά συνέπεια, πάλι, η λύση μπορεί μόνο να μειωθεί από την πλήρη επικάλυψη στο λ_{FOC} σε μηδέν επικάλυψη, αλλά ποτέ το αντίθετο.

Επιστρέφουμε στην επιρροή του e στη βέλτιστη επικάλυψη. Πρέπει να αξιολογηθεί το mixed partial (η (10) δείχνει ότι $\partial \mathrm{ET} / \partial e > 0$):

$$\frac{\partial^2 \mathrm{ET}}{\partial \lambda \partial e} = \mathrm{T}_2 \left[\lambda \mathrm{T}_2 k \mu_\alpha \left(1 - \lambda \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1} \right) + \sqrt{2k\mu_\alpha \tau_2} \frac{1 - 2\lambda \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}}{2\sqrt{1 + e\left(1 - \lambda \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}\right)}} \right] \qquad \textbf{(19)}$$

Αυτή η έκφραση είναι θετική όποτε $(1 - 2\lambda \mathrm{T}_2 / \mathrm{T}_1) \geq 0$ (δηλαδή, όταν η επικάλυψη είναι λιγότερο από 50% του λ_{max}). Επιπλέον, η (19) μειώνεται αυστηρά στο λ όταν $(1 - 2\lambda \mathrm{T}_2 / \mathrm{T}_1) < 0$, έτσι έχει το πολύ ένα μηδέν στο Λ. Επομένως, υπάρχει το πολύ ένα $\bar{\lambda}$ έτσι ώστε το mixed partial να είναι θετικό αριστερά του και αρνητικό δεξιά του. Το implicit function theorem χρησιμοποιούμενο όπως παραπάνω υπονοεί ότι το λ_{FOC} μετατοπίζεται αριστερά όσο αυξάνεται το e εάν $\lambda_{FOC} \leq \bar{\lambda}$, και μετατοπίζεται δεξιά εάν βρίσκεται δεξιά του $\bar{\lambda}$ (Σχήμα 6.13). Επιπλέον, όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή-κοίλη, το ET(λ_{max}) μπορεί να αυξηθεί λιγότερο με το e από ότι το ET(λ_{FOC}), έτσι η λύση μπορεί να μετακινηθεί, σε πλήρη επικάλυψη, καθώς η μείωση της αβεβαιότητας γίνεται πιο αργή. Ήδη έχει παρατηρηθεί ότι η (19) μειώνεται αυστηρά στο $\bar{\lambda}$. Επιπλέον,

$$\frac{\partial^3 \mathrm{ET}}{\partial \lambda^2 \partial e} = \mathrm{T}_2 k \mu_\alpha \left(1 - 2\lambda \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1} \right) + \sqrt{2k\mu_\alpha \tau_2} \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + e\left(1 - 2\lambda \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}\right)}} + \frac{1 - 2\lambda \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}}{2\left(1 + e\left(1 - 2\lambda \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}\right)\right)} \right] > 0$$

Επομένως, από το implicit function theorem $\partial\overline{\lambda}/\partial e < 0$.

Όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι πλήρως κοίλη (το e είναι στο 3 της πρότασης 1), τότε το ίδιο επιχείρημα ισχύει όπως για το $k\mu_\alpha$: το βέλτιστο της (10) μπορεί μόνο να μειωθεί από την πλήρη επικάλυψη σε μηδέν, αλλά όχι από μηδέν στην πλήρη επικάλυψη. Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη.

5. ΠΡΟΤΑΣΗ 2

Οι πρώτες παράγωγοι της (11) ως προς τις μεταβλητές απόφασης είναι:

$$\frac{\partial \mathrm{ET}}{\partial \lambda} = \mathrm{T}_2\left(-1 + k\mu_\alpha \lambda \mathrm{T}_2 + \sqrt{2k\tau_2\mu_\alpha} - \frac{k}{2}\right)$$

$$\frac{\partial \mathrm{ET}}{\partial \alpha} = \tau_1 - \frac{1}{2}\lambda \mathrm{T}_2 \mathrm{B}\left[k\lambda \mathrm{T}_2 \mu_\alpha + \sqrt{2k\tau_2\mu_\alpha}\right]. \qquad \textbf{(20)}$$

Ο πίνακας H της εξίσωσης (11) γίνεται:

$$\mathrm{H}(\lambda,\mu) = \begin{bmatrix} k\mu \mathrm{T}_2^2 & -\mathrm{T}_2\mathrm{B}\left[k\lambda \mathrm{T}_2\mu_\alpha + \sqrt{\frac{k\tau_2\mu_\alpha}{2}}\right] \\ -\mathrm{T}_2\mathrm{B}\left[k\lambda \mathrm{T}_2\mu_\alpha + \sqrt{\frac{k\tau_2\mu_\alpha}{2}}\right] & \frac{\lambda \mathrm{T}_2 \mathrm{B}^2}{2}\left[k\lambda \mathrm{T}_2\mu_\alpha + \sqrt{\frac{k\tau_2\mu_\alpha}{2}}\right] \end{bmatrix}. \qquad \textbf{(21)}$$

Αυτός ο πίνακας είναι κυρτός στις κατευθύνσεις του λ και α χωριστά, αλλά μη καθορισμένος γενικά, εφόσον $H_{11}>0$ και det(H)<0. Ειδικότερα, η αντικειμενική συνάρτηση (11) είναι κοίλη στην κατεύθυνση του α δεδομένου του λ_{FOC} (η λύση του FOC για λ):

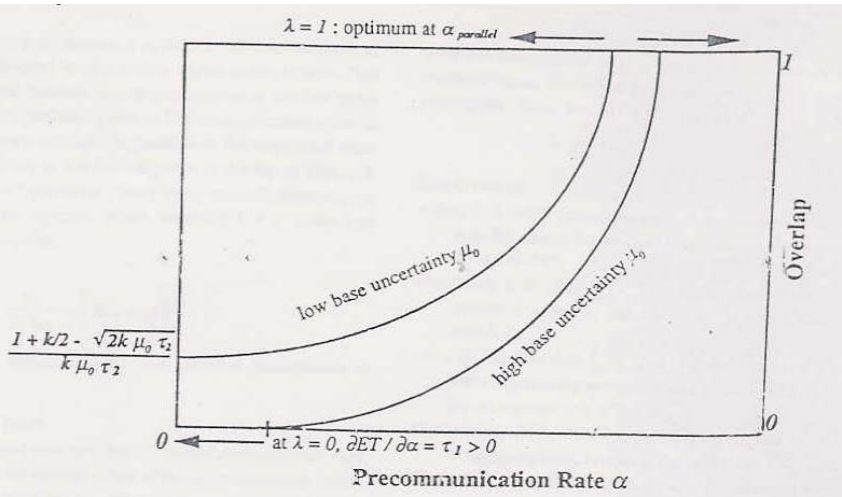
$$\lambda_{FOC} = \frac{1 + k/2 - \sqrt{2k\mu_\alpha\tau_2}}{k\mu_\alpha \mathrm{T}_2}. \qquad \textbf{(22)}$$

H projected one-dimensional αντικειμενική συνάρτηση στο α είναι:

$$\mathrm{ET}(\alpha) = \mathrm{T}_1 + \mathrm{T}_2 + \alpha\tau_1 - \frac{(1 + k/2 - \sqrt{2k\mu_\alpha\tau_2})^2}{2k\mu_\alpha} \qquad \textbf{(23)}$$

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη δισδιάστατη μορφή αυτό το μονοδιάστατο τμήμα διαστήματος. Το λ_{FOC} παρουσιάζεται ως συνάρτηση του α. Η μορφή της καμπύλης είναι κυρτή, το οποίο μπορεί να φανεί παίρνοντας τις παραγώγους της (22). Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του α για τις οποίες η προκύπτουσα επικάλυψη λ παραμένει εφικτή, είναι εκεί που η καμπύλη συναντά τα όρια. Δύο περιπτώσεις

παρουσιάζονται: Η βέλτιστη επικάλυψη μπορεί να είναι μηδέν για μικρό α, αλλά εάν ο μέγιστος ρυθμός αλλαγής μ_0 είναι πολύ μικρός, το λ_{FOC} παραμένει θετικό ακόμη και για α = 0 ($\mu_\alpha = \mu_0$). Δίνεται προσοχή στην περίπτωση όπου $T_2 \leq T_1$, έτσι $\lambda_{max}=1$ (η άλλη περίπτωση είναι ανάλογη).



Σχήμα 24: Σαγματική Καμπύλη $\lambda_{FOC}(\alpha)$

Θα δειχθεί ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι κοίλη στην κατεύθυνση της καμπύλης στο παραπάνω σχήμα. Παίρνουμε τις παραγώγους της εξίσωσης (23) ως προς α:

$$\frac{\partial \mathrm{ET}(\alpha)}{\partial \alpha} = -\tau_1 + \frac{\mathrm{B}(1+k/2)}{2k\mu_\alpha}\left(1+k/2-\sqrt{2k\mu_\alpha\tau_2}\right) \qquad \textbf{(24)}$$

$$\frac{\partial^2 \mathrm{ET}(\alpha)}{\partial \alpha^2} = -\frac{\mathrm{B}^2(1+k/2)}{2k}\left[\sqrt{\frac{k\tau_2}{2\mu_\alpha}} + \frac{1+k/2-\sqrt{2k\mu_\alpha\tau_2}}{\mu_\alpha}\right] < 0\,. \qquad \textbf{(25)}$$

Κατά συνέπεια, η αντικειμενική συνάρτηση είναι αυστηρά κοίλη στο α για ένα εσωτερικό λ.

6. ΘΕΩΡΗΜΑ 3

Εφόσον η αντικειμενική συνάρτηση (11) είναι κοίλη στην κατεύθυνση ($\alpha,\lambda_{FOC}(\alpha)$), η βέλτιστη λύση πρέπει να βρίσκεται στα όρια της εσωτερικής περιοχής. Υπάρχουν τρία πιθανά οριακά σημεία, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η πρώτη πιθανότητα, $\lambda_{FOC}=0$, δεν είναι βέλτιστη: η πρώτη παράγωγος (20), με λ=0, είναι αρνητική. Κατά συνέπεια, η βέλτιστη λύση βρίσκεται στο όριο λ=0 έως προεπικοινωνία μηδέν, ή α=0. Αυτό αντιστοιχεί στη διαδοχική λύση στο Θεώρημα 3.

Η δεύτερη πιθανότητα είναι σχετική εάν μ_0 είναι τόσο μικρό που η καμπύλη στο σχήμα συναντά το δεξί όριο προτού το λ να φτάσει στο μηδέν. Αυτό το οριακό σημείο είναι βέλτιστο, επειδή λ_{FOC} είναι η λύση του πρώτης τάξης όρου στο κυρτό πρόβλημα δεδομένου του α. Η προεπικοινωνία α είναι ακόμα μηδέν. Κατά συνέπεια, μια «ελάχιστη επικάλυψη» είναι δυνατή στη διαδοχική λύση. Η τρίτη πιθανότητα είναι οριακό σημείο στην κορυφή του σχήματος, όπου η πλήρης επικάλυψη λ=1 αποτρέπει το α να αυξηθεί παραπάνω. Πάλι, αυτό το οριακό σημείο δεν είναι βέλτιστο. Θέτοντας λ=1 στην πρώτη παράγωγο, το FOC απαιτεί

$$\frac{\tau_1}{\mathrm{T}_2\mathrm{B}\mu_\alpha} = \frac{1}{2}k\mathrm{T}_2 + \sqrt{\frac{k\tau_2}{2\mu_\alpha}},$$

παράγοντας μια τετραγωνική εξίσωση του μ_α. Η λύση αντιστοιχεί στο α_{paral}.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “Product Design and Development” Karl T. Ulrich, Steven D Eppinger
2. “The Art of Systems Architecting” Mark W. Maier and Eberhardt Rechtin, CRC Press, Boca Raton (1997)
3. “Product Development Process Modelling” Robert P Smith, Jeffrey A Morrow, Industrial Engineering, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA
4. “Problem Formalization Techniques for Collaborative Systems” Bird, S D, Kasper, G M IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Vol 25 No 2 (1995), pp 231-242
5. “Identifying controlling features of Engineering Design Iteration” Smith, R P, Eppinger, S D, Management Science, Vol 43 No 3 (1997), pp 276-293
6. “Concurrent engineering: decomposition and scheduling of design activities” Kusiak, A and Park, K, International Journal of Production Research, Vol 28 No 10 (1990), pp 1883-1900
7. “A Hypergraph Framework for Optimal Model-based Decomposition of Design Problems” Michelena, N F, Papalambros, P Y, Computational Optimization and Applications, Vol 8 No 2 (1997), pp 173-196
8. “Optimal Timing of Reviews in Concurrent Design for Manufacturability” Ha, A Y and Porteus, E L, Management Science, Vol 41 No 9 (1995), pp 1431-1447
9. “A model-based Framework to Overlap Product Development Activities” KrishnanHa, V and Eppinger, S D and Whitney, D E, Management Science, Vol 43 No 4 (1997), pp 437-451
10. “Communication and Uncertainty in Concurrent Engineering” Loch, C H, Terwiesch, C Management Science
11. “Engineering Design: Products, Processes, and Systems” A. Kusiak, Academic Press, San Diego, CA, 1999.
12. “Managing Complex System Development Projects”, Prof. Steven D. Eppinger Massachusetts Institute of TechnologyMIT, Design Structure Matrix Web Site
13. “Design Synthesis Preliminary Design”, Kujawski E. 1999, DSMC Chapter 6
14. “System Architecture”, Edward F. Crawley, Olivier L. de Weck, Fall 2001

15. TEXAS A&M UNIVERSITY Dwight Look College of Engineering ELEN 405 Electrical Design Laboratory Fall 2003 Design Structure Matrices

16. "Characteristics and Models of Iteration in Engineering Design", Robert P. Smith, Steven D. Eppinger

17. "Software Process Management Software Process Management", Dr Valentina Plekhanova, University of Sunderland, UK University of Sunderland, UK

18. http://www.npd-solutions.com

19. http://www.pdma.org/library

20. http://www.cs.colorado.edu/~l3d/jargon.html#MS

21. http://home.eunet.cz/berka/o/English/networks/node11.html

22. http://en.wikipedia.org

23. http://web.mit.edu/dsm

24. http://www.tedi.uq.ed.au/mag/4_Development/Development01_Prototyping.html

25. http://planetmath.org

26. http://functions.wolfram.com