



## **‘Χρονικός Προγραμματισμός στη Διοίκηση Έργων με τη χρήση δικτύων Petri’**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Οργάνωσης Παραγωγής

Υπεύθυνος Καθηγητής: Λεώπουλος Βρασίδης, Επίκουρος Καθηγητής Σχολής  
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Εκπόνηση: Δημάδης Χρήστος

## ***Ευχαριστίες***

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Κωνσταντίνο Κηρυττόπουλο και Βίκτωρα Διαμάντα για τη βοήθειά τους στην εκπόνηση αυτής της εργασίας*

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	2
<b>0 ΈΠΟΨΗ</b> .....	6
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	7
<b>2 ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ PETRI (PETRI NETS)</b> .....	8
2.1.1 Χρήση δικτύων Petri στην επιστήμη των υπολογιστών .....	10
2.2.2 Χρήση δικτύων Petri στη Διοίκηση (Management).....	12
2.2.3 Χρήση των δικτύων Petri στη Διοίκηση Έργου (Project Management).....	13
2.2 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI .....	17
2.2.1 Τόπος (Place) .....	18
2.2.2 Στίγμα (Token).....	18
2.2.3 Μετάβαση (Transition).....	18
2.2.4 Βέλος.....	18
2.2.5 Εισαγωγικός και Εξαγωγικός Τόπος – Εισαγωγική και Εξαγωγική Μετάβαση .....	18
2.3 ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΕΚΠΥΡΣΟΚΡΟΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΠΥΡΣΟΚΡΟΤΗΣΗ ΜΙΑΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ .....	19
2.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI .....	19
2.4.1 Ορισμός δικτύου Petri 1.....	19
2.4.2 Ορισμός δικτύου Petri 2.....	20
2.4.3 Ορισμός δικτύου Petri 3.....	21
2.4.4 Ορισμός μαρκαρίσματος δικτύου Petri .....	21
2.4.5 Ορισμός ενεργοποίησης μετάβασης.....	21
2.4.6 Ορισμός εκπυρσοκρότησης μετάβασης.....	21
2.4.7 Παράδειγμα.....	22
2.5 ΚΥΡΙΑ ΚΥΤΤΑΡΑ (CELLS) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI .....	26
2.5.1 Διαδοχικότητα ή απιώδης εξάρτηση .....	26
2.5.2 Σύγκρουση.....	27
2.5.3 Παραλληλισμός .....	28
2.5.4 Συγχρονισμός.....	28
2.5.5 Αμοιβαίος αποκλεισμός .....	29
2.5.6 Αδιέξοδο .....	30
2.5.7 Έλλειψη φράγματος.....	30
2.6 ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI .....	31
2.6.1 Μαρκαρισμένοι Γράφοι (marked graphs – MG) .....	31
2.6.2 Κατάσταση μηχανής (state machine-SM) .....	31
2.6.3 Δίκτυα ελεύθερης επιλογής (free choice nets – FCN) .....	32
2.6.4 Επεκτάσεις δικτύων ελεύθερης επιλογής (extensions to free choice net) .....	34
2.6.5 Απλά δίκτυα (simple nets – SN).....	34
2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI .....	38

---

2.7.1 Προσβασιμότητα.....	38
2.7.2 Φράξιμο.....	38
2.7.3 Βιωσιμότητα.....	39
2.7.4 Αναστρεψιμότητα.....	39
2.7.5 Συντηρητικότητα.....	39
2.7.6 Καλυψιμότητα.....	40
2.7.7 Επαναληπτικότητα.....	40
2.7.8 Συνοχή.....	40
2.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ PETRI.....	40
2.8.1 Γράφοι προσβασιμότητας και καλυψιμότητας.....	41
2.8.2 Μήτρα πρόσπτωσης.....	46
2.8.3 Μετασχηματισμοί.....	49
2.8.4 Προσομοίωση.....	50
2.9 ΧΡΟΝΙΣΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ PETRI.....	51
2.9.1 Χρόνος και μεταβάσεις.....	51
2.9.2 Χρόνος και τόποι.....	51
2.10 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΧΡΟΝΙΣΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ PETRI.....	51
2.11 ΕΓΧΡΩΜΑ ΔΙΚΤΥΑ PETRI (COLOURED PETRI NETS).....	52
2.12 ΔΙΚΤΥΑ PETRI ΥΨΗΛΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ (HIGH LEVEL PETRI NETS).....	52
<b>3 ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΈΡΓΩΝ.....</b>	<b>54</b>
3.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΕΡΓΟ.....	54
3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΈΡΓΟΥ.....	54
3.2.1 Προσωρινό.....	54
3.2.2 Μοναδικότητα του Αποτελέσματος.....	55
3.2.3 Προοδευτική Επεξεργασία ( <i>Progressive Elaboration</i> ).....	55
3.2.4 Εμπλεκόμενοι στο έργο.....	55
3.3 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ.....	56
3.4 ΤΟΜΕΙΣ ΓΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΈΡΓΩΝ.....	58
3.4.1 Ολική διοίκηση έργων ( <i>Project Integration Management</i> ).....	59
3.4.2 Στοχοθέτηση ( <i>Project Scope Management</i> ).....	59
3.4.3 Διαχείριση Χρονοδιαγράμματος ( <i>Project Time Management</i> ).....	59
3.4.4 Διαχείριση Κόστους ( <i>Project Cost Management</i> ).....	60
3.4.5 Διαχείριση ποιότητας ( <i>Project Quality Management</i> ).....	60
3.4.6 Διαχείριση Ανθρωπίνων Πόρων ( <i>Project Human Resource Management</i> ).....	61
3.4.7 Διαχείριση Επικοινωνίας – Πληροφόρησης ( <i>Project Communication Management</i> ).....	61
3.4.8 Διαχείριση κινδύνων έργου ( <i>Project Risk Management</i> ).....	62

---



3.4.9	Διαχείριση προμηθειών ( <i>Project Procurement Management</i> ).....	63
3.5	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ (PROJECT TIME MANAGEMENT) .....	63
3.5.1	Δομή Ανάλυση Έργου ( <i>Work Breakdown Structure, WBS</i> ).....	64
3.5.2	Διάγραμμα Δικτύου.....	65
3.5.3	Σχέσεις και εξαρτήσεις μεταξύ δραστηριοτήτων.....	65
3.5.4	Χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων .....	66
3.6	ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΈΡΓΩΝ.....	67
3.6.1	Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής <i>CPM – PERT</i> .....	67
3.6.2	Μέθοδος προσομοίωσης <i>Monte Carlo (Monte Carlo Simulation, MCS)</i> .....	72
<b>4</b>	<b>ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ PETRI.....</b>	<b>75</b>
4.1	ΈΡΓΟ.....	75
4.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	81
4.2.1	Πρώτη φάση κατασκευής.....	81
4.2.1	Δεύτερη φάση κατασκευής.....	83
4.2.2	Τρίτη φάση κατασκευής.....	84
4.3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	92
<b>5</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>95</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ.....</b>	<b>97</b>
6.1	ΑΝΩΤΑΤΟ ΙΕΡΑΡΧΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ (TOP LEVEL).....	97
6.2	ΔΕΥΤΕΡΟ ΙΕΡΑΡΧΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	98
6.3	ΤΡΙΤΟ ΙΕΡΑΡΧΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	110
<b>7</b>	<b>ARTIFEX.....</b>	<b>159</b>
7.1	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΙΕΡΑΡΧΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ.....	159
A.	Τάξη ( <i>Class</i> ).....	160
B.	Αντικείμενο ( <i>Object</i> ).....	160
Γ.	Υποδίκτυο ( <i>Subnet</i> ).....	160
Δ.	Σελίδα ( <i>Page</i> ) .....	161
7.2	ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ.....	161
7.2.1	Παρουσίαση των στοιχείων σχεδιασμού των γράφων.....	163
7.2.2	Παρουσίαση του δέντρου του αντικειμένου.....	169
7.3	ΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	173
7.3.1	Το περιβάλλον της προσομοίωσης .....	174
<b>8</b>	<b>ΚΩΔΙΚΑΣ C.....</b>	<b>179</b>

## 0 Έποψη

Ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι να αναδείξει τις δυνατότητες που έχει η προσομοίωση έργων με τα δίκτυα Petri και ειδικότερα σε σύγκριση με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo.

Αρχικά ήταν απαραίτητη η εκμάθηση των δικτύων Petri και αφού αποφασίστηκε ποιο θα είναι το έργο που θα μοντελοποιηθεί, ακολούθησε η δημιουργία του δικτύου στο πρόγραμμα Artifex σε υπολογιστή που παρείχε το Τμήμα Οργάνωσης Παραγωγής και Βιομηχανικής Διοίκησης του Τμήματος Μηχανολογικών Μηχανικών.

Στην εργασία παρουσιάζονται η θεωρία και τα πλεονεκτήματα των δικτύων Petri, σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, οι έννοιες της Διοίκησης Έργων και της Διαχείρισης Χρονοδιαγράμματος καθώς και οι μέθοδοι με τις οποίες αντιμετωπίζονται τα προβλήματα της Διαχείρισης Χρονοδιαγράμματος. Γίνεται σύγκριση της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo με την προσομοίωση με δίκτυα Petri και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα.

## 1 Εισαγωγή

Ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι μέσω της σύγκρισης της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo και της προσομοίωσης με δίκτυα Petri να αναδείξει τις δυνατότητες που έχουν τα τελευταία όταν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πόροι στο έργο ή στο σύστημά που εξετάζεται.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η θεωρία των δικτύων Petri, το μαθηματικό τους υπόβαθρο και οι ιδιότητές τους.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η έννοια της Διοίκησης Έργων στο σύγχρονο κόσμο, οι τομείς στους οποίους αναλύεται, η Διαχείριση Χρονοδιαγράμματος και εργαλεία που είναι απαραίτητα στη διαχείρισή της.

Στο κεφάλαιο 4 υπάρχει αναλυτική περιγραφή της δημιουργίας του δικτύου του έργου στο περιβάλλον του Artifex, παρουσίαση όλης της πορείας μέχρι και την χρησιμοποίηση των πόρων και παρουσίαση του πως καθυστερεί το έργο όταν οι πόροι δεν είναι αρκετοί. Το δίκτυο παρουσιάζεται ολοκληρωμένο στο Παράρτημα I (κεφάλαιο 6), αλλά οι διευκρινίσεις για το πως λειτουργεί δίνονται στο κεφάλαιο 4.

Όπως αναφέρθηκε στο Παράρτημα I παρουσιάζεται όλο το δίκτυο με εικόνες από κάθε δραστηριότητα που μοντελοποιήθηκε. Η παρουσίαση γίνεται ιεραρχικά, από το υψηλότερο επίπεδο έως το χαμηλότερο (που είναι οι δραστηριότητες).

Στο Παράρτημα II (κεφάλαιο 7) παρουσιάζεται το σχεδιαστικό περιβάλλον του Artifex, όπως αυτό βρίσκεται πλέον ενσωματωμένο στο Faber 2.1 της Faber Software. Παρουσιάζονται τα διάφορα εργαλεία και παρουσιάζεται ο τρόπος σχεδίασης και προσομοίωσης.

Στο παράρτημα III (κεφάλαιο 8) δίνεται ο απλός κώδικας της γλώσσας C που χρησιμοποιήθηκε για την τριγωνική κατανομή.

## 2 Τα Δίκτυα Petri (Petri Nets)

Το 1962 ο Carl Adam Petri στη διδακτορική του διατριβή εισήγαγε την θεωρία δικτύων που έκτοτε φέρουν το όνομά του, Petri Nets, προκείμενου να αναλύσει συστήματα επικοινωνίας. Η απλότητα, η πληρότητα και η ευελιξία των δικτύων Petri οδήγησε στην περαιτέρω διερεύνηση τους και τελικά τα καθιέρωσε σαν ένα σπουδαίο εργαλείο ανάλυσης συστημάτων. Ο ίδιος ο Petri του οποίου τα ενδιαφέροντα κυρίως βρίσκονται στο πεδίο του θεωρητικού προγραμματισμού συνεχίζει ως και σήμερα να εξελίσσει το δημιούργημα του, όσον αφορά τις εφαρμογές και τις ιδιότητες του.

Η πρωταρχική δουλειά για τα χρονισμένα Petri Nets έγινε από τους Merlin και Faber και από τους Noe και Nutt τη δεκαετία του 70 (Balbo 2001, σελ 1).

Η ανάλυση συστημάτων έχει δυο εξ' ίσου απαραίτητες συνιστώσες: την απεικόνιση οργανικών συσχετίσεων, και την μοντελοποίηση-αξιολόγηση. Οι δυο αυτές δραστηριότητες εμφανίζονται συνήθως ανεξάρτητες όσον αφορά τα εργαλεία ανάλυσης. Για παράδειγμα τα διαγράμματα ροής δεδομένων (DFD - Data Flow Diagrams) ή τα διαγράμματα IDEFO παρέχουν μια ακριβή λειτουργική απεικόνιση ενός συστήματος αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτική αξιολόγηση του συστήματος. Η αξιολόγηση μπορεί να γίνει είτε με τεχνικές προσομοίωσης είτε με μαθηματικές μεθόδους. Η προσομοίωση συνήθως γίνεται χρησιμοποιώντας κάποια γλώσσα προγραμματισμού, η δε μαθηματική προσέγγιση χρησιμοποιεί μαθηματικές τεχνικές της επιχειρησιακής ερευνάς όπως η θεωρία αναμονής. Καμία όμως από αυτές τις τεχνικές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν (τουλάχιστον όχι χωρίς αρκετή προσπάθεια) για να περιγράψουν το προς ανάλυση σύστημα. Τα δίκτυα Petri συνεισφέρουν στην ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του ζητήματος της ανάλυσης συστημάτων, μιας και παρέχουν δυνατότητες απεικόνισης και μοντελοποίησης. Ιδιαίτερα σε ένα αρχικό επίπεδο ανάλυσης και σχεδιασμού η αποφυγή διαχωρισμού των προαναφερθεισών δραστηριοτήτων είναι χρήσιμη και διευκολυντική. Τα δίκτυα Petri απεικονίζουν με ένα δίκτυο ένα σύστημα, το δε δίκτυο δίδει στο σύστημα μια μαθηματική αναπαράσταση που καθιστά δυνατή την μοντελοποίηση του.

Τα στοχαστικά δίκτυα Petri μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση πολύπλοκων μοντέλων Δυναμικών Συστημάτων Ξεχωριστών Γεγονότων - ΔΣΞΓ

---

(Discrete Event Dynamic Systems – ΔΣΞΓ) και για την εκτίμηση της απόδοσής τους και της αξιοπιστίας τους. Τα ΔΣΞΓ είναι συστήματα με μία ξεχωριστή κατάσταση (έχουν έναν μετρήσιμο αριθμό καταστάσεων) και των οποίων η εξέλιξη δεν οφείλεται αποκλειστικά στο περασμένο χρόνο αλλά και στην εμφάνιση γεγονότων.

Ως ΔΣΞΓ μπορούν να χαρακτηριστούν πολλά πραγματικά συστήματα όχι επειδή των εσωτερικών χαρακτηριστικών τους αλλά από την πλευρά της συμπεριφοράς τους που θέλουμε να αναλυθεί. Για παράδειγμα, ένα απόθεμα νερού που περιέχει μια συνεχώς διαφοροποιούμενη ποσότητα νερού, μπορεί να θεωρηθεί ΔΣΞΓ αν η προσοχή μας περιοριστεί στο γεγονός ότι το νερό υπερβαίνει η όχι ένα προκαθορισμένο επίπεδο ασφάλειας. Σε αυτήν την περίπτωση το απόθεμα έχει 2 μόνο καταστάσεις (ασφαλής και μη ασφαλής) και τα γεγονότα που ίσως προκαλέσουν αλλαγή κατάστασης θα οφείλονται σε μια πιθανή καταιγίδα η σε άνοιγμα του φράγματος.

Τα συστήματα ΔΣΞΓ μπορούν να βρεθούν μέσα σε αρκετά διαφορετικούς τομείς εφαρμογών. Σε συστήματα κατασκευών, η κατάσταση του συστήματος μπορεί να αναπαρασταθεί με τον αριθμό των μερών που είναι παρόντα μπροστά στις εργαλειομηχανές και τα γεγονότα μπορούν να αντιστοιχούν στην ολοκλήρωση των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται από τις εργαλειομηχανές για την ολοκλήρωση ενός αγαθού ή για την άφιξη νέων εξαρτημάτων.

Στην επιστήμη των υπολογιστών, η κατάσταση του συστήματος μπορεί να αντιστοιχεί στον αριθμό των εργασιών που επεξεργάζονται κάποια συγκεκριμένη στιγμή καθώς και σε αυτές που περιμένουν για την ολοκλήρωση κάποιων εργασιών Εισόδου/Εξόδου.

Στις Επικοινωνίες, η κατάσταση μπορεί να αντιστοιχεί στον αριθμό των πακέτων που βρίσκονται αποθηκευμένα προσωρινά (σε buffer) και τα γεγονότα σε παραδόσεις μηνυμάτων.

Στην κίνηση στους αυτοκινητοδρόμους, η κατάσταση ενός συστήματος μπορεί να αντιστοιχεί στον αριθμό των αμαξιών που περιμένουν σε ένα χώρο στάθμευσης ή σε ένα σταυροδρόμι ή σε ένα φανάρι ενώ τα γεγονότα μπορεί να αντιστοιχούν στην άφιξη και στην αναχώρηση των αμαξιών ή στην αλλαγή χρώματος στον σηματοδότη.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, ανεξάρτητα από την πραγματική έννοια των διαφόρων συνιστωσών, το να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά αυτών των συστημάτων είναι συνήθως δύσκολο λόγω της εσωτερικής πολύπλοκότητας των συστημάτων (πχ. Ο αριθμός των εργαλειομηχανών στα συστήματα κατασκευών μπορεί να αυξηθεί σε εκατομμύρια καταστάσεων που ίσως είναι δύσκολο να προβλεφτούν και να ελεγχθούν), λόγω των ευαίσθητων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συνιστωσών ενός συστήματος (πχ στο σύστημα της κίνησης αμαξιών η ύπαρξη «στενωμάτων» (bottlenecks) , που είναι προσωρινά «κρυμμένη» από την παρουσία άλλων σημείων συνωστισμού που και αυτά προκαλούν μεγάλη συμφόρηση, ίσως οδηγήσει στο κενό τις αναμενόμενες βελτιώσεις στην κίνηση λόγω της αφαίρεσης τέτοιων λόγων καθυστέρησης (δλδ και να εξαλειφθούν κάποιες φανερές αιτίες, κάποιες που επικαλύπτονται από αυτές να παραμείνουν ως πρόβλημα) και την παράδοση σχέση μεταξύ των λειτουργιών κάποιων συνιστωσών (πχ σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας υπολογιστή (ΚΜΕ), το να αυξηθεί το επίπεδο πολύπρογραμματισμού μπορεί να σε μείωση της χρήσης της ΚΜΕ ).

Τα δίκτυα Petri όπως έχει αναφερθεί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό, την αναπαράσταση και τη προσομοίωση των ΔΣΞΓ.

Αυτό που αρχικά φαινόταν ως μειονέκτημα είναι τώρα αποδεκτό και έχει εκτιμηθεί λόγω της δυνατότητας να περιγράψουν με ακρίβεια πολύπλοκα φαινόμενα που είναι τυπικά χαρακτηριστικά κατανεμημένων και παράλληλων συστημάτων. Επιπροσθέτως η πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο και για ποιοτική ανάλυση και για εκτίμηση αποδοτικότητας και αξιοπιστίας. Είναι κοινή πεποίθηση ότι αυτή η προσέγγιση πρέπει να εκμεταλλευτεί περαιτέρω και ότι πιο δυνατά και πιο φιλικά προς στο χρήστη εργαλεία λογισμικού των δικτύων Petri πρέπει να αναπτυχθούν για να καταφέρει η δημιουργία των δικτύων Petri να γίνει εύκολη και συνήθης εργασία στους σχεδιαστές συστημάτων (Balbo 2001, σελ 87-89, σελ 148).

## **2.1 Χρήσεις Δικτύων Petri**

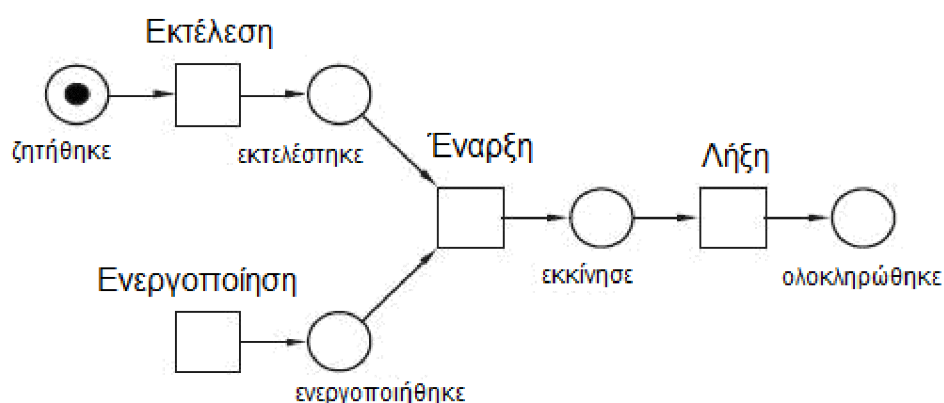
### **2.1.1 Χρήση δικτύων Petri στην επιστήμη των υπολογιστών**

Τα δίκτυα Petri μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε off-line αναλύσεις εφαρμογών και συστημάτων πραγματικού χρόνου (real-time systems) που συνθέτονται από περιοδική, σύγχρονη και ασύγχρονη προτεραιότητα και από εργασίες με περιορισμένους πόρους που λαμβάνουν χώρα σε έναν κεντρικό επεξεργαστή ενός υπολογιστή. Αυτό δίνει την δυνατότητα στο να βρεθεί ο βέλτιστος

---

προγραμματισμός για αυτές τις εργασίες και να λυθούν προβλήματα που προκύπτουν από τον περιορισμό των πόρων του συστήματος (Grolleau και Choquet-Geniet, 2002).

Εκτός από τη βελτίωση του υλικού μέρους των υπολογιστών, τα δίκτυα Petri μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη του λογισμικού (Software Project Management), κυρίως όταν αναπαριστούν σχέδια συντονισμού (McChesney 1998, σελ 5). Τα Σχέδια συντονισμού (Coordination Plans - CoPlans) είναι ένας απλός φορμαλισμός για τη μοντελοποίηση δραστηριότητας πολλών ατόμων ή ομάδων ατόμων στην διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού. Πρώτον χρησιμοποιεί την έννοια των πράξεων διαλόγου για να περιγράψει την επικοινωνιακή δραστηριότητα σε μια διαδικασία. Αυτό παρέχει μία διεπαφή ανάμεσα στο φορμαλισμό σχεδιασμού και στις καθημερινές συσκευές γλώσσας (προφορικές, γραπτές, ηλεκτρονικές). Δεύτερον βασίζεται πάνω στις ιδέες του PERT/CPM για την αρχική αναπαράσταση των δραστηριοτήτων της διαδικασίας, άρα μπορεί να αναπαρασταθεί από τα δίκτυα Petri.



**Σχήμα 2.1 Σχέδιο συντονισμού**

Τα Σχέδια συντονισμού περιγράφουν τις εξαρτήσεις των εργασιών και διεργασιών μιας διαδικασίας. Μοντελοποιούν τη διαδικασία λογισμικού από μια προοπτική επικοινωνίας/δράσης μέσω της ενσωμάτωσης των πράξεων διαλόγου που ενυπάρχουν στις δραστηριότητες πολλών ομάδων ατόμων και στις οργανικές δραστηριότητες της διαδικασίας. Οι δραστηριότητες περιγράφονται με ένα σύνολο από καταστάσεις δραστηριοτήτων και από λεκτικές πράξεις που προκαλούν μετάβαση μεταξύ των των τύπων.

Ένα δίκτυο Petri μπορεί εύκολα να αναπαραστήσει τη διαδικασία ενός σχεδίου συντονισμού όπως φαίνεται στο σχήμα (McChesney 1998, σελ 4). Οι τόποι

αναπαριστούν καταστάσεις δραστηριοτήτων ενώ οι μεταβάσεις αναπαριστούν πράξεις διαλόγου. Η αναπαράσταση αυτή ενός Σχεδίου συντονισμού επιτρέπει την ανάλυση και την προσομοίωση μοντέλων χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες ανάλυσης των δικτύων Petri, συμπεριλαμβανομένων της ανάλυσης προσβασιμότητας (reachability), δοκιμής για βιωσιμότητα (liveness).

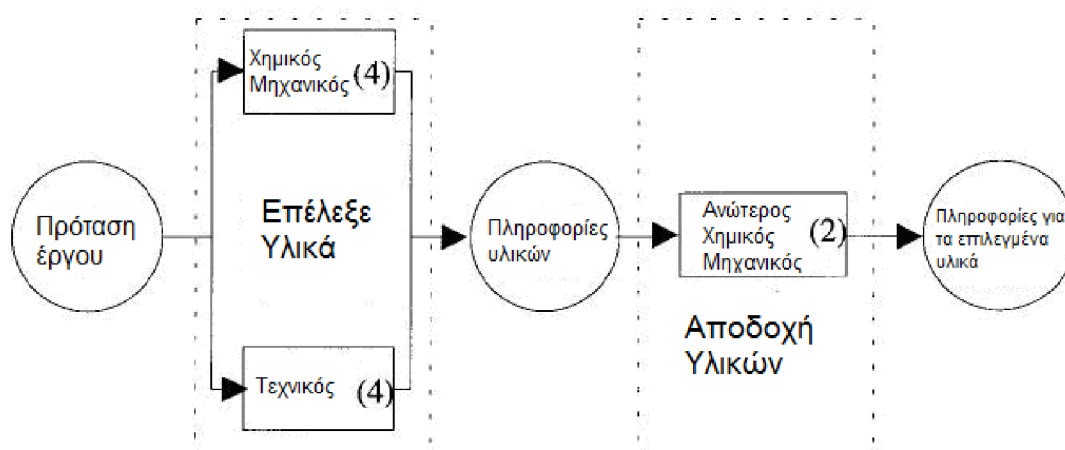
Με τα δίκτυα Petri και τις τεχνικές τους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή των διαδικασιών ενός λογισμικού και σε εργασίες που αφορούν στη βελτίωση κάποιας διαδικασίας λογισμικού. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί προσομοιωθεί το έργο από τις εξής πλευρές: του κόστους ανάπτυξης, της διάρκειας του έργου και των λαθών που παραμένουν στη διαδικασία και είναι κατάλληλα για να χειριστούν σωστά την αβεβαιότητα και τον συγχρονισμό των διαδικασιών στην επιστήμη ανάπτυξης λογισμικού (Mizuno 2001, σελ 4).

Τέλος ένα μικρό κομμάτι των δικτύων Petri, τα δίκτυα Petri Εγγράφων (Documentary Petri Nets), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση δυναμικών διαδικασιών ηλεκτρονικού εμπορίου όπως συναλλαγές, ανταλλαγές εγγράφων και χρημάτων (Lee 1999, σελ 2).

### **2.2.2 Χρήση δικτύων Petri στη Διοίκηση (Management)**

Μια προέκταση των δικτύων Petri έχει προταθεί από πολλούς ερευνητές για το σχεδιασμό και τη προσομοίωση συστημάτων διαχείρισης (management systems). Ονομάζονται Διοικητικά δίκτυα Petri (Management Petri Nets) (Shih και Leung, 1997). Στο σχήμα 2.2 υπάρχει το μοντέλο της Επιλογής Υλικών. Αποτελείται από δύο διαδικασίες, την Επιλογή προτεινόμενων υλικών και την Αποδοχή τους. Για την δραστηριότητα της επιλογής υλικών θα χρειαστούν 4 χημικοί μηχανικοί και 4 τεχνικοί για να βρουν τις απαραίτητες πληροφορίες για κάθε πιθανό υλικό. Αυτές οι πληροφορίες θα μεταφερθούν στον ανώτερο χημικό μηχανικό για την τελική επιλογή.





Σχήμα 2.2 Διαδικασία επιλογής υλικού

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές των δικτύων Petri ή των προεκτάσεών τους (όπως τα Διοικητικά δίκτυα Petri) σε τομείς που αφορούν το σχεδιασμό και τη προσομοίωση συστημάτων πληροφόρησης ( Tsalgatidou 1990, Aumaraki και λοιποί, 1992), συστημάτων ροής εργασίας (Ellis και Nutt, 1993), δίκτυα έργων και διαχείρισης ενός προτζεκτ λογισμικού (Liu και Horowicz 1989, Deiters και Grunh 1994, Lee και Murata 1994, Lee και λοιποί 1994).

Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ ενός διοικητικού δικτύου Petri και ενός απλού δικτύου Petri είναι η διαφορά στις μεταβάσεις και στους τόπους. Στα πρώτα έχουμε τόπους κατάστασης, τόπους ρόλου και τόπους πληροφορίας, ενώ οι μεταβάσεις είναι μεταβάσεις τύπου AND και XOR. Ένα διαφορετικό είδος πληροφορίας σε σχέση με τα απλά δίκτυα Petri είναι η πληροφορία, είτε σε μορφή χειροπιαστών εγγράφων τα οποία λαμβάνουν συγκεκριμένα χρήστες είτε σε μορφή αναφοράς και βάσεων δεδομένων (συνήθως σε ηλεκτρονική μορφή).

### 2.2.3 Χρήση των δικτύων Petri στη Διοίκηση Έργου (Project Management)

Η αποτελεσματική χρήση των πόρων στη διοίκηση έργων είναι πολύ σημαντική. Ενώ υπάρχουν πολλά εργαλεία μοντελισμού και ελέγχου, περιορίζονται πολύ στην πράξη όταν έχουν να αντιμετωπίσουν πραγματικές καταστάσεις όπου χρειάζεται εξισορρόπηση (leveling) πόρων, διαμοίραση, αναθεώρηση κλπ. Επομένως χρειάζονται βελτιωμένα εργαλεία. Τα δίκτυα Petri έχουν μεγάλο ορίζοντα εφαρμογών. Τα δίκτυα Petri έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην επίλυση πολλών δυσκολιών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν αρκετά ήδηδίκτυα Petri: μη χρονισμένα, χρονισμένα, έγχρωμα (coloured), στοχαστικά, προτεραιότητας. Πολλά

πολύπλοκα συστήματα έχουν αναλυθεί πρόσφατα χρησιμοποιώντας δίκτυα Petri υψηλού επιπέδου τα οποία εμπεριέχουν έννοιες όπως «χρώμα», «χρόνος» και «ιεραρχία». Αυτά τα δίκτυα Petri επίσης χρησιμοποιούνται για τα πρωτότυπα πακέτων λογισμικού, (επανα)σχεδιασμό των συστημάτων εφοδιαστικής και (επανα)σχεδιασμό των διοικητικών οργανισμών. Τα στοχαστικά «χρωματισμένα» δίκτυα Petri μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για να μοντελοποιήσουν κατασκευαστικά συστήματα και μηχανές ή συστήματα που χειρίζονται υλικά. Επίσης κάποιες προεκτάσεις των δικτύων Petri προτείνονται να ασχοληθούν και με προβλήματα «προς εκτέλεση», όπως για παράδειγμα τα δίκτυα Petri αυξανόμενου χρόνου τα οποία μπορούν να ασχοληθούν με την ανάλυση ρομποτικών συστημάτων συναρμολόγησης.

Η Διοίκηση έργων θεωρείται από πολλούς ερευνητές ως μια περιοχή όπου η σχεδιαστική δύναμη των δικτύων Petri θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με πολύ καλά αποτελέσματα. Αυτό δικαιολογείται από τους παρακάτω λόγους :

- Τα δίκτυα Petri είναι έχουν τη δυνατότητα να μοντελοποιήσουν ένα σύστημα όπου πολλές δραστηριότητες συμβαίνουν ταυτόχρονα και ασύγχρονα, ενώ μπορούν να αναπασταθούν συγκρούσεις ανάμεσα στις δραστηριότητες. Επίσης μπορούν να ευρεθούν κάποια τυχόν αδιέξοδα στο σύστημα (Jeetendra και λοιποί, 2000).
- Παρέχουν πληροφορίες στους υπευθύνους να βοηθούν, να ελέγχουν και βρίσκουν τους πιθανούς λόγους για την βραδεία εξέλιξη μιας δραστηριότητας (Jeetendra και λοιποί 2000).
- Έχουν τη δυνατότητα να αναπαράγουν και επαναπρογραμματίσουν δραστηριότητες (όταν συμβαίνουν «βλάβες» στο σύστημά μας και σε περιπτώσεις περιορισμένων πόρων) (Jeetendra και λοιποί 2000).
- Ένα δίκτυο Petri είναι μια δυναμική παρουσίαση ενός συστήματος δραστηριοτήτων επομένως δίνει τη δυνατότητα για άμεση παρακολούθηση της πορείας του συστήματος.
- Ο σχεδιασμός πολύπλοκων κατασκευαστικών έργων αντιμετωπίζει ένα σημαντικό πρόβλημα, της περιγραφής των δραστηριοτήτων του, των χαρακτηριστικών του και των αλληλεπιδράσεων με έναν περιεκτικό και κατανοητό τρόπο. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος βασική στρατηγική είναι η ιεραρχική αντιμετώπιση. Τα μέρη του έργου μπορούν εύκολα να σχεδιασθούν ως υποδίκτυα (subnets) (Sawhney και λοιποί, 2002). Η έννοια της ιεραρχικής μετάβασης μπορεί να παρέχει και άλλη μεγάλη

ευκολία στο σχεδιασμό κατασκευαστικών έργων με δίκτυο Petri . Σε ένα τέτοιο έργο μπορούν να βρεθούν πολλά επαναλαμβανόμενα τεχνολογικά κομμάτια. Αυτές οι ομάδες δραστηριοτήτων μπορούν να αναπαραστήσουν μια ιεραρχική μετάβαση. Τότε αυτή η ιεραρχική μετάβαση μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο δίκτυο του έργου όσες φορές υπάρχουν αντίστοιχα και αυτά τα επαναλαμβανόμενα κομμάτια.

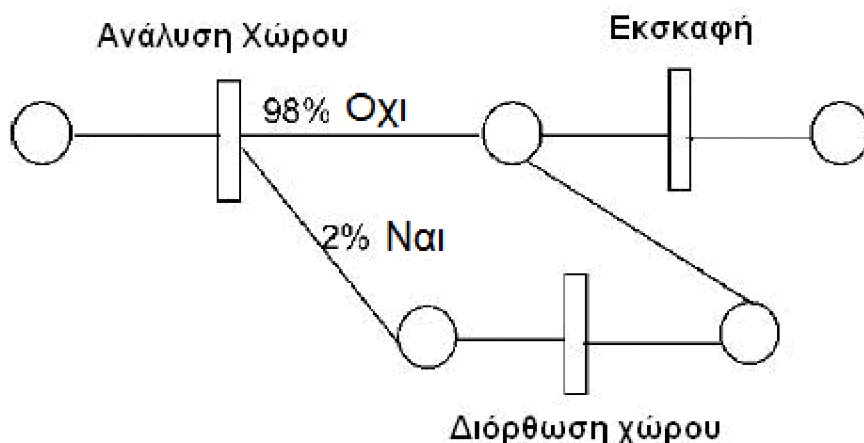
- Η δυναμική προσομοίωση ενός έργου μπορεί να απεικονισθεί γραφικά. Είναι δυνατόν επίσης να προσομοιωθεί ολόκληρο το έργο, έχοντας το υποδίκτυο που μας ενδιαφέρει στο προσκήνιο, οπότε ελέγχουμε μόνο τις δραστηριότητες αυτού ενώ τα υπόλοιπα τα κρατούμε στο «παρασκήνιο»(Jeetendra και λοιποί 2000, Sawhney και λοιποί 2002)
- Η λογική που εκφράζεται στον προφορικό λόγο μπορεί να μεταφερθεί όχι μόνο σε γραφικό επίπεδο αλλά και σε μαθηματικό επίπεδο, το οποίο είναι κατάλληλο για ανάλυση.
- Ένα δίκτυο Petri μπορεί να αναπαραστήσει την αλληλεξάρτηση των πόρων του έργου, την μερική διανομή, την αντικατάσταση ενός πόρου από άλλον καθώς και την αμοιβαία αποκλειστικότητα τους.
- Χρησιμοποιώντας κάποιες ιδιότητες συμπεριφοράς των δικτύων Petri όπως την προσβασιμότητα και το φράξιμο μπορεί να επιτευχθεί βελτιωμένος προγραμματισμός του έργου (και με τον περιορισμό των πόρων)
- Τα δίκτυα των δικτύων Petri μπορούν να απλοποιηθούν αν συνδυαστούν παρόμοιοι τύποι και μεταβάσεις.
- Στα δίκτυα Petri είναι πολύ εύκολη η αναπαράσταση της προτεραιότητας μιας δραστηριότητας.
- Μπορούμε βρούμε τους περιορισμούς σε πρώτες ύλες και σε προτεραιότητες μέσα στο πρόβλημά μας και να αποφασίσουμε για τα άνω και κάτω όρια του χρόνου ολοκλήρωσης (makespan) (Van Der Aalst 1995, σελ 1).
- Τα δίκτυα Petri μπορούν να χειριστούν έργα που έχουν πολυτροπικές δραστηριότητες απόφασεως και μπορούν να μοντελοποιήσουν το δικαίωμα «προτίμησης» των δραστηριοτήτων (Reddy και λοιποί, 2001),
- Κάποιοι πόροι μπορούν να αναπαρασταθούν ως απλά στίγματα (tokens) που μεταφέρονται δυναμικά από μετάβαση σε μετάβαση (δραστηριότητα σε δραστηριότητα). Αν θέλουμε να δείξουμε ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι πόρων θα πρέπει να

«χρωματιστούν» τα στίγματα, ώστε να υπάρχουν παραπάνω από ένας τυπος στιγμάτων άρα πόρου. Επομένως θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα έγχρωμα δίκτυα Petri (Sawhney και λοιποί, 2002).

- Πολλές φορές ένα είδος πόρου χρησιμοποιείται ταυτόχρονα από περισσότερες από μία δραστηριότητες. Τα δίκτυα Petri δίνουν τη δυνατότητα για εύκολη απεικόνιση αυτού του γεγονότος με τη χρησιμοποίηση συγχωνευμένων τόπων (fusion places) ώστε αυτοί οι τόποι ενώ βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία μέσα στο δίκτυο να συμπεριφέρονται σαν να είναι ο ίδιος τόπος (Sawhney και λοιποί, 2002).
- Ενσωματώνουν τους κινδύνους και την αβεβαιότητα μέσα στις χρονικές διάρκειες των δραστηριοτήτων (Sawhney και λοιποί 2002). Ένα κατασκευαστικό έργο είναι ευεπηρέαστο σε ένα μεγάλο αριθμό εξωτερικών παραγόντων (όπως αλλαγές καιρού, συνθήκες του χώρου κατασκευής, ικανότητα ανθρώπινου δυναμικού, οικονομικές εισροές). Αυτά δεν μπορούν να εκτιμηθούν ντετερμινιστικά κατά τη φάση σχεδιασμού. Η αδιαφορία για αυτούς τους παράγοντες συχνά οδηγεί και σε υπερβάσεις χρόνου και κόστους στα έργα. Επομένως είναι αναγκαίο να ενσωματώσουμε τις επιδράσεις αυτών των εξωτερικών παραγόντων στις εκτιμήσεις για το χρόνο και το κόστος των δραστηριοτήτων. Τα δίκτυα Petri επιτρέπουν αποτελεσματική ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στη διάρκεια και στο κόστος του έργου. Δύο βασικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται είναι:

A) Στατιστικές Κατανομές: Είναι δυνατόν σε μια μετάβαση που αναπαριστά μία δραστηριότητα ή μια ομάδα δραστηριοτήτων να ενσωματωθεί μια στοχαστική εκτίμηση της διάρκειας μέσω μιας στατιστικής κατανομής.

B) Βέλη Πιθανοτήτων : Σε παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού μοντέλων κατασκευαστικών έργων, όπου οι διακλαδώσεις γίνονται με ντετερμινιστικό τρόπο, δεν επιτρέπεται η κυκλική επανάληψη (cycling) στο δίκτυο και οι δραστηριότητες πάντοτε ολοκληρώνονται επιτυχώς αφού δεν υπάρχει η έννοια της αποτυχίας. Αυτή η ατέλεια δεν υπάρχει στα δίκτυα Petri μέσω της χρήσης του βέλους πιθανοτήτων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη χρήση ενός τέτοιου βέλους.



Σχήμα 2.3 Βέλος πιθανότητας

Δείχνει μια κατάσταση αρκετά σύνηθης στους υπευθύνους έργων. Ενώ γίνονται εργασίες σε ένα πιθανώς μολυσμένο χώρο κατασκευής είναι σημαντικό να ενσωματωθούν στο έργο, δραστηριότητες που θα σχετίζονται με τη «θεραπεία» του χώρου. Το δίκτυο αποτελείται από τη δραστηριότητα “Ανάλυση χώρου”. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης θα υποδείξει ποιά θα είναι η επόμενη δραστηριότητα: “Εκσκαφή” ή “Θεραπεία χώρου”. Αυτή η αβεβαιότητα αναπαριστάται από τα δύο βέλη πιθανοτήτων που εξέρχονται την ανάλυση χώρου. Οι τιμές των πιθανοτήτων που αναγράφονται προκύπτουν από προηγούμενη εμπειρία. Υπάρχει 98% πιθανότητα ότι η ανάλυση δε θα βρει επικίνδυνα υλικά και μπορεί να αρχίσει η εκσκαφή. Όμως υπάρχει και ένα 2% ότι ίσως χρειαστεί πρώτα η «θεραπεία» του χώρου για να αρχίσει η εκσκαφή.

## 2.2 Δομικά στοιχεία των δικτύων Petri

Με βάση τη θεωρία των γράφων τα δίκτυα Petri μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: Είναι πολυγράφοι (multigraphs) επειδή επιτρέπουν την σύνδεση κόμβων με βέλη πολλαπλότητας μεγαλύτερης του 1. Πρόσθετα είναι προσανατολισμένοι πολυγράφοι (directed multigraphs) επειδή τα βέλη είναι προσανατολισμένα. Τέλος επειδή χρησιμοποιούν δυο ειδών κομβικά στοιχεία είναι διμερείς προσανατολισμένοι πολυγράφοι (bipartite directed polygraphs).

Τα δυο κομβικά στοιχεία των δικτύων Petri είναι τα εξής ο *τόπος* (*place*) που συμβολίζεται με έναν κύκλο και η *μετάβαση* (*transition*) που συμβολίζεται με ένα ορθογώνιο. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους με *βέλη* (*arcs*). Η δυναμικότητα του συστήματος εξασφαλίζεται με την κυκλοφορία *στιγμάτων* (*tokens*) μέσα στο δίκτυο. Θα δοθούν μερικοί ορισμοί στοιχείων των δικτύων Petri.

### **2.2.1 Τόπος (Place)**

Οι τόποι αντιπροσωπεύουν πόρους ή καταστάσεις του συστήματος (διαδικασία ολοκληρώθηκε). Ένας τόπος μπορεί να δέχεται είτε απεριόριστο είτε περιορισμένο αριθμό στιγμάτων λειτουργώντας είτε σαν απεριόριστος ή περιορισμένος αποθηκευτικός χώρος αντίστοιχα

### **2.2.2 Στίγμα (Token)**

Τα στίγματα κυκλοφορούν ή καλύτερα εμφανίζονται στους τόπους δηλώνοντας το τι συμβαίνει σε μια δεδομένη στιγμή και σηματοδοτούν την εξέλιξη της διαδικασίας.

### **2.2.3 Μετάβαση (Transition)**

Οι μεταβάσεις αντιπροσωπεύουν δραστηριότητες γι' αυτό συνήθως ονοματίζονται με ρήματα. Οι μεταβάσεις συνδέουν τόπους και μπορούν να έχουν μηδενική διάρκεια, σταθερή διάρκεια ή μεταβλητή (στοχαστική) διάρκεια. Όταν μια μετάβαση έχει μηδενική διάρκεια ονομάζεται άμεση μετάβαση (immediate transition). Όταν έχουμε μόνο καθορισμένες, σταθερές διάρκειες μεταβάσεων σε ένα δίκτυο αυτό ονομάζεται ντετερμινιστικά χρονισμένο δίκτυο Petri (deterministic timed Petri Net), ενώ όταν έχουμε μόνο διάρκειες μεταβάσεων που αποτελούν τυχαίες τιμές γνωστών κατανομών το δίκτυο ονομάζεται στοχαστικά χρονισμένο δίκτυο Petri (stochastic timed Petri Net). Τέλος αν έχουμε άμεσες και στοχαστικές μεταβάσεις το δίκτυο ονομάζεται γενικευμένο στοχαστικό δίκτυο Petri (generalized stochastic Petri Net).

### **2.2.4 Βέλος**

Τα βέλη συνδέουν μεταβάσεις και τόπους, είναι προσανατολισμένα και καθορίζουν την διάδοχη τόπων και μεταβάσεων. Ένα βέλος μπορεί να συνδέσει μόνο μεταβάσεις με τόπους ή αντίστροφα αλλά ποτέ δυο μεταβάσεις ή δυο τόπους.

### **2.2.5 Εισαγωγικός και Εξαγωγικός Τόπος – Εισαγωγική και Εξαγωγική Μετάβαση**

Ο τόπος που οδηγεί μέσω ενός βέλους σε μια μετάβαση, ονομάζεται *εισαγωγικός τόπος* (input place), ενώ ο τόπος που στον οποίο φτάνει ένα βέλος από μια μετάβαση ονομάζεται *εξαγωγικός τόπος* (output place). Μια μετάβαση μπορεί να έχει περισσότερους του ενός εισαγωγικούς τόπους και περισσότερους του ενός

εξαγωγικούς τόπους. Αντίστοιχα ορίζουμε ως *εισαγωγική μετάβαση* (input transition) ενός τόπου την μετάβαση που μέσω ενός βέλους οδηγεί σε έναν τόπο και ως *εξαγωγική μετάβαση* (output transition) ενός τόπου τη μετάβαση στην οποία καταλήγει ο τόπος αυτός μέσω ενός βέλους. Ένας τόπος μπορεί να έχει περισσότερες από μια εισαγωγικές ή/και εξαγωγικές μεταβάσεις.

### 2.3 Ενεργοποίηση εκπυρσοκρότησης και εκπυρσοκρότηση μιας μετάβασης

Η μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος πραγματοποιείται κυρίως με τη χρονική διάρκεια των μεταβάσεων και την «κυκλοφορία» των στιγμάτων στο δίκτυο. Μια μετάβαση εκτελεί τη δραστηριότητα που περιγράφει όταν όλοι οι εισαγωγικοί της τόποι έχουν από ένα διαθέσιμο στίγμα. Δεν αρκεί να έχουν από ένα στίγμα, πρέπει να είναι και διαθέσιμο για τη συγκεκριμένη μετάβαση (αυτή η συνθήκη αναφέρεται σε περιπτώσεις συγκρούσεων (conflicts) οι οποίες όμως θα παρουσιαστούν παρακάτω). Αυτή η μετάβαση ονομάζεται ενεργοποιημένη (enabled). Τότε και μόνο τότε είναι δυνατόν η μετάβαση να εκπυρσοκροτήσει, δεσμεύοντας ένα στίγμα από κάθε εισαγωγικό τόπο και απελευθερώνοντας ένα στίγμα σε κάθε εξαγωγικό της τόπο.

### 2.4 Ορισμοί δικτύων Petri

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα δίκτυα Petri εκτός από μια αναλυτική αναπαράσταση όλων των καταστάσεων στις οποίες μπορεί ένα σύστημα να περιέλθει, αποτελούν και ένα μαθηματικό εργαλείο μελέτης του εξεταζόμενου συστήματος. Ακολουθούν τρεις μαθηματικοί ορισμοί των δικτύων Petri.

#### 2.4.1 Ορισμός δικτύου Petri 1

*Ένα δίκτυο Petri είναι μια αλγεβρική δομή η οποία ορίζεται από την τετράδα  $N = \langle P, T, F, W \rangle$  όπου:*

- *$P$ : το πεπερασμένο, μη κενό σύνολο  $n = |P|$  τόπων.*
- *$T$ : το πεπερασμένο, μη κενό σύνολο  $m = |T|$  μεταβάσεων.*
- *$P \cap T = \emptyset$ , τα σύνολα των τόπων και των μεταβάσεων δεν έχουν κοινά στοιχεία.*
- *$F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$  η σχέση ροής μεταξύ των θέσεων και των μεταβάσεων, το σύνολο των προσανατολισμένων βέλων.*
- *$W: F \rightarrow N^+$ , αντιστοιχεί μια στάθμιση ή βάρος (weight) σε κάθε βέλος.*

Στην περίπτωση όπου τα βέλη έχουν όλα βάρος 1 τότε το δίκτυο ονομάζεται

κοινό (ordinary).

Αν αντικατασταθούν τα διανύσματα  $F$ ,  $W$  από δυο συναρτήσεις πρόσπτωσης (incidence functions), την συνάρτηση εισόδου (input function)  $Pre$  και τη συνάρτηση εξόδου (output function)  $Post$  προκύπτει ο παρακάτω ορισμός.

### 2.4.2 Ορισμός δικτύου Petri 2

*Ένα δίκτυο Petri είναι μια αλγεβρική δομή η οποία ορίζεται από την τετράδα  $N = \langle P, T, Pre, Post \rangle$  όπου:*

- $P$ : το πεπερασμένο, μη κενό σύνολο  $n = |P|$  τόπων.
- $T$ : το πεπερασμένο, μη κενό σύνολο  $m = |T|$  μεταβάσεων.
- $Pre: P \times T \rightarrow Z^+ \cup \{0\}$  η συνάρτηση εισόδου.
- $Post: T \times P \rightarrow Z^+ \cup \{0\}$  η συνάρτηση εξόδου.

Από τον ορισμό των συναρτήσεων πρόσπτωσης, διαπιστώνουμε ότι όταν αυτές περιέχουν μη μηδενικά στοιχεία, τότε υπάρχουν βέλη που κατευθύνονται από θέσεις τόπους σε μεταβάσεις και το αντίστροφο, ανάλογα με τη συνάρτηση πρόσπτωσης. Έτσι όταν  $Pre(p_i, t_j) \neq 0$  τότε  $Pre(p_i, t_j)$  βέλη κατευθύνονται από τον τόπο  $p_i$  στη μετάβαση  $t_j$ . Αντιστοίχως όταν  $Post(t_k, p_j) \neq 0$  τότε  $Post(t_k, p_j)$  βέλη κατευθύνονται από τη μετάβαση  $t_k$  στον τόπο  $p_j$ .

Το σύνολο των τόπων εισόδου μιας μετάβασης  $t$  δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$${}^*t = \{p \in P \mid Pre(p, t) > 0\}.$$

Το σύνολο των τόπων εξόδου μιας μετάβασης  $t$  δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$t^* = \{p \in P \mid Post(t, p) > 0\}.$$

Το σύνολο των μεταβάσεων που αποτελούν είσοδο για έναν τόπο  $p$  δίνεται από τον

$${}^*p = \{t \in T \mid Post(t, p) > 0\}.$$

Το σύνολο των μεταβάσεων που αποτελούν έξοδο για έναν τόπο  $p$  δίνεται από τον

$$p^* = \{t \in T \mid Pre(p, t) > 0\}.$$



### 2.4.3 Ορισμός δικτύου Petri 3

Ένας γράφος δικτύου Petri είναι ένας διμερής προσανατολισμένος γράφος:

$$G = \langle V, A \rangle$$

Όπου:

- $V = P \cup T$ : ένα σύνολο κόμβων με  $P$ : το πεπερασμένο μη κενό σύνολο  $n = |P|$  τόπων και  $T$ : το πεπερασμένο μη κενό σύνολο  $m = |T|$  μεταβάσεων με  $P \cap T = \emptyset$
- $A = \langle v_i, v_j, w \rangle$ : το σύνολο προσανατολισμένων βέλων, όπου  $v_i, v_j \in V$  και  $w \in W: F \rightarrow N^+$  αντιστοιχεί μια στάθμιση-βάρος σε κάθε βέλος.

### 2.4.4 Ορισμός μαρκάριατος δικτύου Petri

Μαρκάριασμα  $M$  (marking) ενός δικτύου Petri είναι μια εφαρμογή του  $P$  στο  $N$ , δηλαδή η αντιστοίχιση ενός μη αρνητικού αριθμού (αριθμός στιγμάτων) σε κάθε τόπο. Ένα μαρκαρισμένο δίκτυο Petri ορίζεται από το ζεύγος:  $\langle N, M_0 \rangle$  όπου  $N$  είναι ένα δίκτυο Petri και  $M_0$  ένα αρχικό του μαρκάριασμα.

Ένα διάνυσμα  $M$  αποτελεί διάνυσμα κατάστασης (state vector) ενός δυναμικού συστήματος διακριτών γεγονότων όταν περιγράφει όλες οι τοπικές καταστάσεις (local states) του. Οι τοπικές καταστάσεις ορίζονται με τον αριθμό των στιγμάτων που περιέχουν 0, 1 ή και περισσότερα. Έτσι το διάνυσμα  $M$  θα έχει διάσταση ίση με τον αριθμό των τόπων και η κάθε του συνιστώσα θα δίνει τον αριθμό των στιγμάτων που βρίσκονται στον κάθε τόπο.

### 2.4.5 Ορισμός ενεργοποίησης μετάβασης

Μια μετάβαση  $t_j$  ονομάζεται ενεργοποιημένη (enabled), για συγκεκριμένο μαρκάριασμα αν ισχύει ότι:

$$M \geq Pre(t_j)$$

Δηλαδή κάθε εισαγωγικός της τόπος έχει αριθμό στιγμάτων μεγαλύτερο ή ίσο με τη στάθμη (weight) του βέλους που τον συνδέει με την συγκεκριμένη μετάβαση.

### 2.4.6 Ορισμός εκपुरσοκρότησης μετάβασης

Η εκपुरσοκρότηση (firing) μιας ενεργοποιημένης μετάβασης αφαιρεί από κάθε εισαγωγικό τόπο αριθμό στιγμάτων ίσο με τη στάθμη του βέλους που συνδέει τον τόπο αυτό και προσθέτει σε κάθε εξαγωγικό της τόπο αριθμό στιγμάτων ίσο με τη στάθμη του βέλους που συνδέει τη μετάβαση με τον τόπο αυτό.

Η μαθηματική διατύπωση είναι η παρακάτω:

$$M_1 \Big|_{t_j} > M_2$$

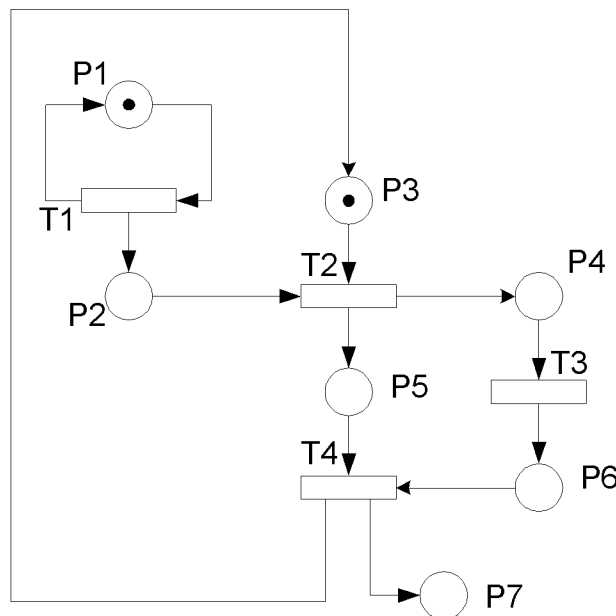
Δηλαδή το  $M_1$  ενεργοποιεί την  $t_j$  και με την εκπυρσοκρότησή της το δίκτυο μεταβαίνει σε μαρκάρισμα  $M_2$  που ορίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$M_2 = M_1 + \text{Post}(t_j) - \text{Pre}(t_j) = M_1 + C(t)$$

όπου:  $C(t) = \text{Post} - \text{Pre}$

### 2.4.7 Παράδειγμα

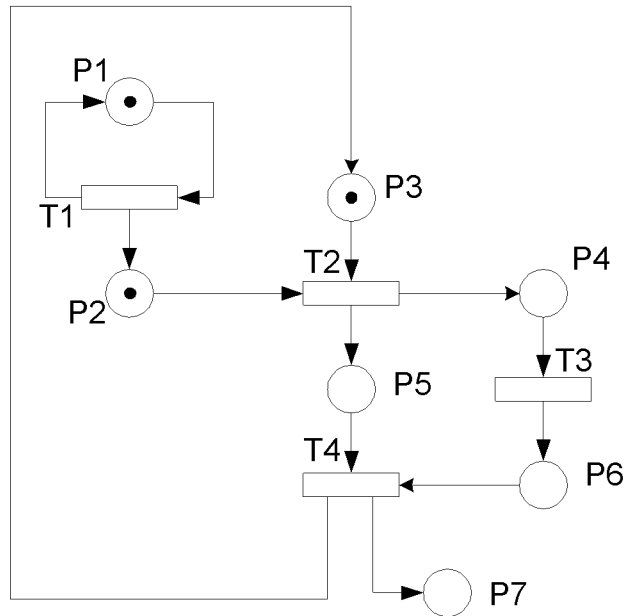
Στο παρακάτω παράδειγμα ενός δικτύου Petri του μπορούμε να δούμε την εναλλαγή των μαρκαρισμάτων.



Σχήμα 2. 4 Μαρκάρισμα  $M_0$

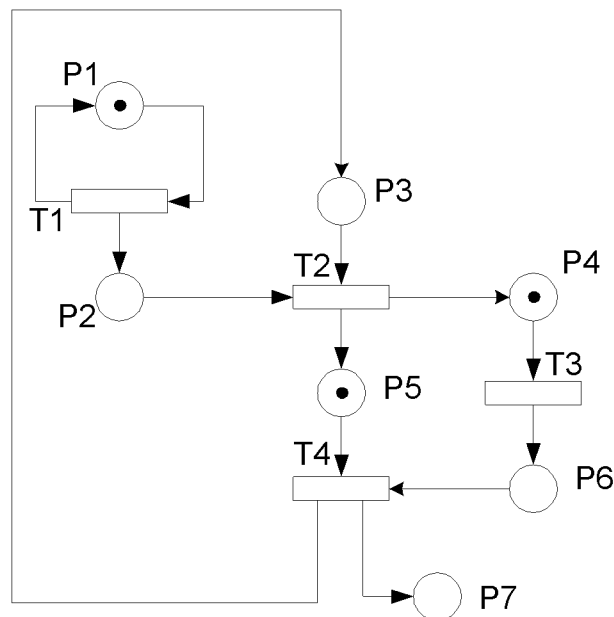
Έστω ότι η διάρκεια της μετάβασης  $T_1$  είναι 40 χρονικές μονάδες, της  $T_2$  15 μονάδες, της  $T_3$  15 μονάδες και της  $T_4$  30 χρονικές μονάδες. Το αρχικό μαρκάρισμα είναι  $M_0 = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7) = (1, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$

Με αυτό το αρχικό μαρκάρισμα το επόμενο μετά την εκπυρσοκρότηση της μόνης ενεργοποιημένης μετάβασης  $T_1$  θα είναι  $M_1 = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 0)$ . Ο χρόνος που έχει περάσει από το  $M_0$  είναι 40 χρονικές μονάδες.



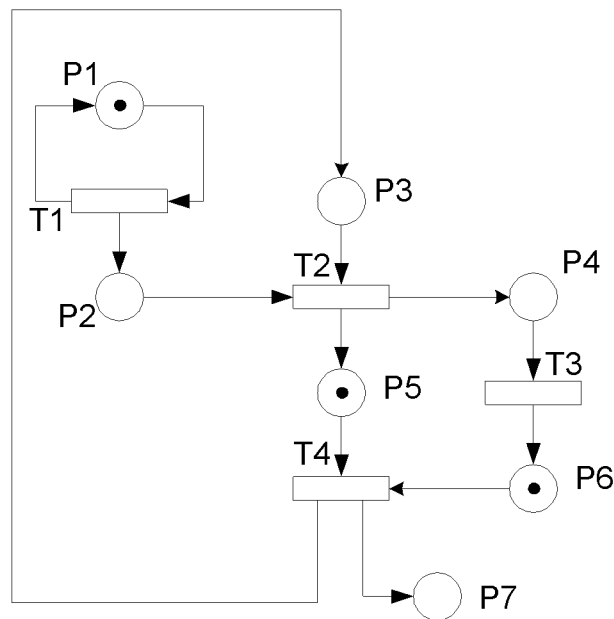
Σχήμα 2. 5 Μαρκάρισμα  $M_1$

Τώρα είναι ενεργοποιημένες οι μεταβάσεις T1 και T2. Αν θυμηθούμε όμως ότι μεταξύ δυο εκπυρσοκροτήσεων της T1 περνούν 40 χρονικές μονάδες, γίνεται αντιληπτό ότι αν και ενεργοποιημένη η T1 δεν εκπυρσοκροτεί, τότε εκπυρσοκροτεί μόνο η T2 παράγοντας στίγματα στους εξαγωγικούς τους τόπους P4, P5.



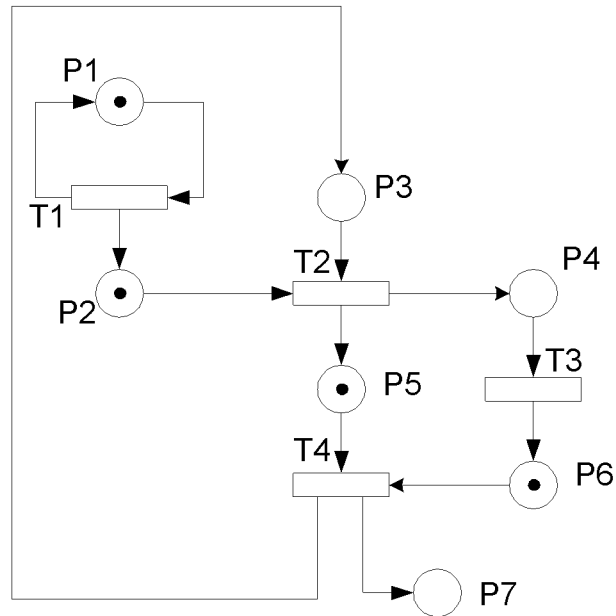
Σχήμα 2. 6 Μαρκάρισμα  $M_2$

Το μαρκάρισμα είναι τώρα  $M_2=(1, 0, 0, 1, 1, 0, 0)$  και ο χρόνος που έχει περάσει από το αρχικό μαρκάρισμα είναι 40 χρονικές μονάδες. Οι ενεργοποιημένες μεταβάσεις είναι οι T1 και T3. Χρονικά προηγείται η T3 η οποία εκπυρσοκροτεί 15 χρονικές μονάδες μετά την ενεργοποίησή της. Μετά την εκπυρσοκρότηση της T3 το μαρκάρισμα του δικτύου είναι  $M_3=(1, 0, 0, 0, 1, 1, 0)$  και ο συνολικός χρόνος από το πρώτο μαρκάρισμα είναι 55 χρονικές μονάδες.



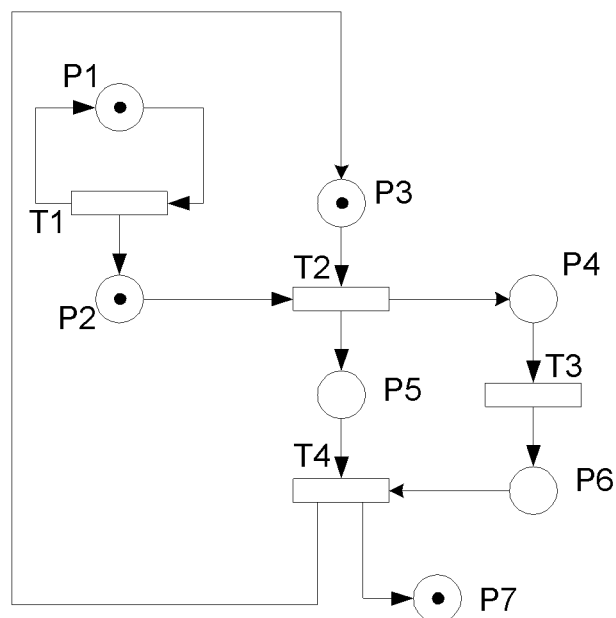
Σχήμα 2. 7 Μαρκάρισμα  $M_3$

Η μετάβαση T4 θα εκπυρσοκροτήσει 30 χρονικές μονάδες μετά την ενεργοποίησή της όποτε χρονικά προηγείται η εκπυρσοκρότηση της T1. Έτσι το επόμενο μαρκάρισμα είναι  $M_4=(1, 1, 0, 0, 1, 1, 0)$  και ο συνολικός χρόνος από το πρώτο μαρκάρισμα είναι 80 χρονικές μονάδες.



Σχήμα 2. 8 Μαρκάρισμα  $M_4$

Ακολουθεί η εκπυρσοκρότηση της T4 και το μαρκάρισμα είναι  $M_5=(1, 1, 1, 0, 0, 0, 1)$  και ο συνολικός χρόνος από το αρχικό μαρκάρισμα είναι 85 χρονικές μονάδες.



Σχήμα 2. 9 Μαρκάρισμα  $M_5$

Στο δίκτυο του παραδείγματος η στάθμη όλων των βέλων ήταν 1, δηλαδή οι ενεργοποιήσεις των μεταβάσεων απαιτούσαν τη διαθεσιμότητα ενός στίγματος σε κάθε εισαγωγικό τόπο και οι πυροδοτήσεις πρόσθεταν από ένα στίγμα σε κάθε εξαγωγικό.

## 2.5 Κύρια κύτταρα (cells) μοντελοποίησης των δικτύων Petri

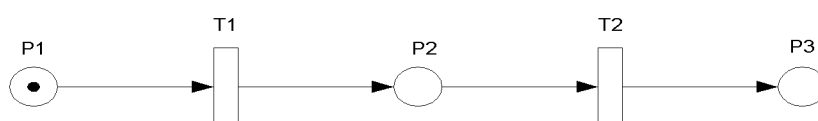
Στην προηγούμενη παράγραφο δόθηκαν μαθηματικοί ορισμοί των δικτύων Petri.

Όπως όμως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή τα δίκτυα Petri παρέχουν δυνατότητες δυναμικής και γραφικής περιγραφής συστημάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια απλά δίκτυα Petri που μοντελοποιούν συνήθεις καταστάσεις και λειτουργίας συστημάτων και υποσυστημάτων. Ονομάζονται κύτταρα μιας και ο συνδυασμός του μπορεί να οδηγήσει σε μια ακριβή μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων. Ανάλογα με το σκοπό εργασίας του μελετητή τα κύτταρα αυτά είναι είτε επιθυμητά ή ανεπιθύμητα. Όταν ο μελετητής θέλει να καταγράψει μια ως έχει (as is) κατάσταση λειτουργίας ενός συστήματος πρέπει να είναι σε θέση να καταγράψει πιθανά προβληματικά μαρκαρίσματα του δικτύου. Όταν όμως ο σκοπός του είναι ο σχεδιασμός εκ νέου ενός συστήματος εύλογα θέλει να τα αποφύγει και να εντοπίσει εναλλακτική μοντελοποίηση.

Τα κυριότερα κύτταρα μοντελοποίησης είναι τα παρακάτω:

- διαδοχικότητα ή αιτιώδης εξάρτηση (sequence ή causal dependence)
- σύγκρουση (conflict)
- παραλληλισμός (concurrency)
- συγχρονισμός (synchronization)
- αμοιβαίος αποκλεισμός (mutual exclusion)
- αδιέξοδο (deadlock)
- έλλειψη φράγματος (unboundedness)

### 2.5.1 Διαδοχικότητα ή αιτιώδης εξάρτηση

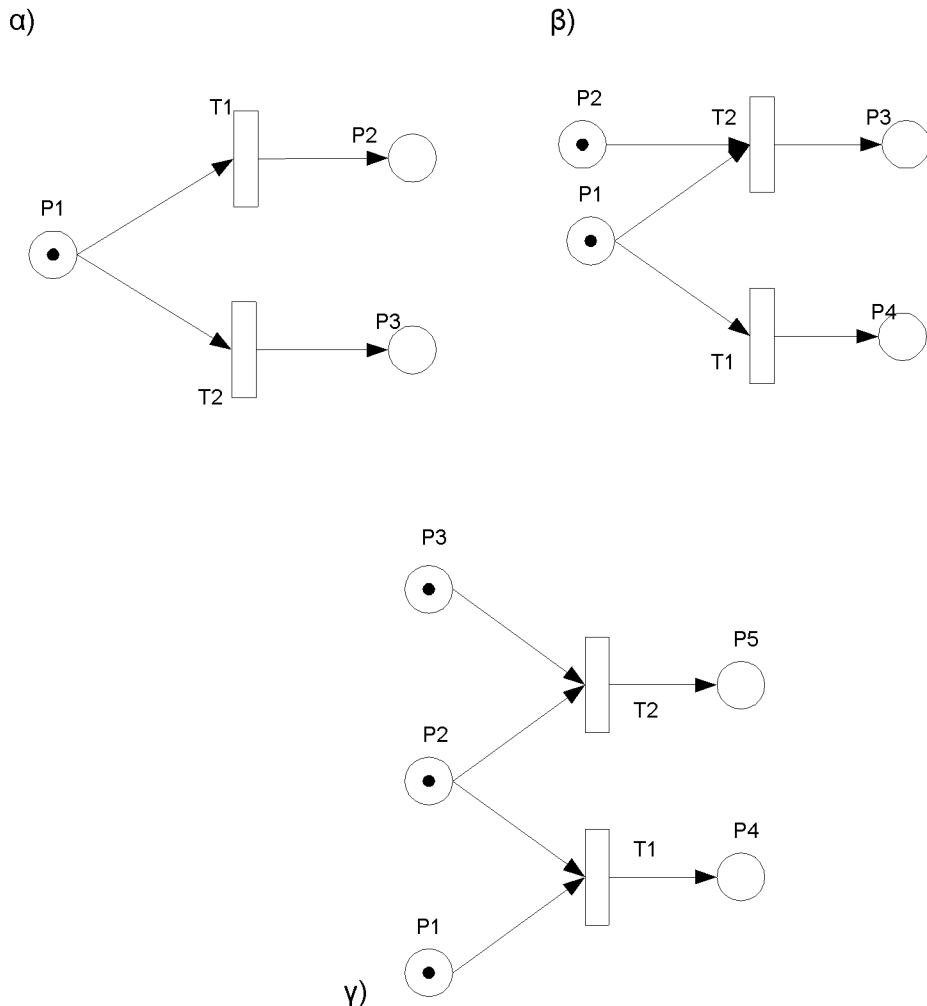


Σχήμα 2.10 Διαδοχικότητα

Το παραπάνω δίκτυο είναι μια περίπτωση διαδοχικότητας. Σε αυτό το δίκτυο οι μεταβάσεις  $T_1$  και  $T_2$  ενεργοποιούνται και εκτυρσοκροτούν με μια καθορισμένη και αδύνατον να διαταραχθεί σειρά. Πρώτη ενεργοποιείται και εκτυρσοκροτεί η  $T_1$  και μόνο τότε ενεργοποιείται η  $T_2$  που με τη σειρά της θα εκτυρσοκροτήσει. Ο σχεδιαστής χρησιμοποιώντας τη διαδοχικότητα μπορεί να εξασφαλίσει συγκεκριμένη ακολουθία ενεργειών, όπως για παράδειγμα μια ακολουθία φάσεων σε ένα έργο.

### 2.5.2 Σύγκρουση

Οι συγκρούσεις συμβαίνουν όταν διαφορετικές μεταβάσεις ενεργοποιούνται από σίγματα που υπάρχουν σε εισαγωγικούς τόπους που εν μέρει ή εξ' ολοκλήρου είναι κοινοί για τις μεταβάσεις αυτές.



Σχήμα 2. 11 Περιπτώσεις σύγκρουσης

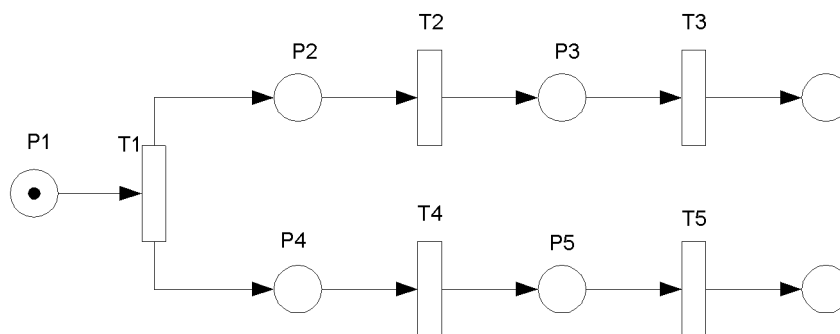
Στο σχήμα 2.11α έχουμε την απλούστερη μορφή σύγκρουσης όπου ένας τόπος ενεργοποιεί δυο μεταβάσεις, από τις οποίες μόνο μια μπορεί να εκπυρσοκροτήσει.

Στο σχήμα 2.11β το δίκτυο είναι λίγο πιο σύνθετο από το πρώτο. Περιγράφει μια περίπτωση που μπορεί να προκύψει σύγκρουση μπορεί όμως και όχι. Με το συγκεκριμένο μαρκάρισμα έχουμε σύγκρουση αλλά αν είχαμε μαρκάρισμα χωρίς στίγμα στον τόπο  $P_2$  τότε θα ενεργοποιούνταν και θα εκπυρσοκροτούσε χωρίς σύγκρουση μόνο η  $T_1$ .

Το σχήμα 2.11γ δείχνει ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί τα δυο αλλά. Τέτοιας μορφής δίκτυα μπορεί να χρησιμεύσουν στη μοντελοποίηση συστημάτων με διαφορετική δέσμευση κοινών πόρων για διαφορετικές λειτουργίες.

### 2.5.3 Παραλληλισμός

Όταν έχουμε μεταβάσεις που εκπυρσοκροτούν ανεξάρτητα έχουμε παραλληλισμό, δηλαδή έχουμε λειτουργίες που διεξάγονται παράλληλα χωρίς να αλληλοεπηρεάζονται.



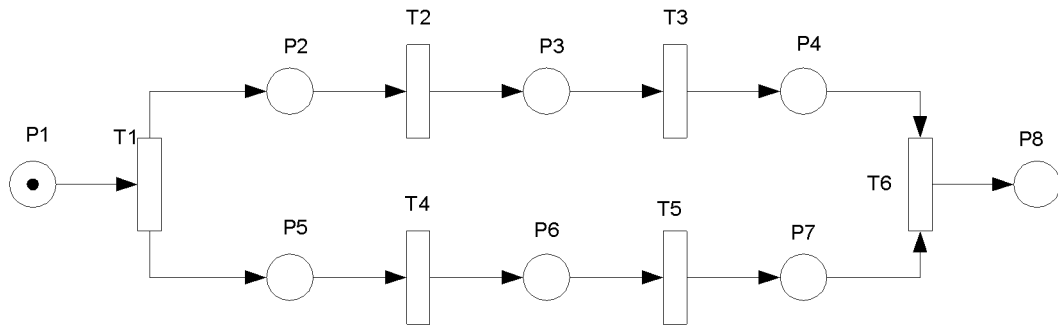
Σχήμα 2. 12 Παραλληλισμός

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε δυο παράλληλες διαδοχικές διαδικασίες. Η μια περιλαμβάνει τους τόπους (ή πόρους)  $P_2$ ,  $P_3$  και η άλλη τους πόρους  $P_4$ ,  $P_5$ . Οι μεταβάσεις  $T_2$ ,  $T_3$  και  $T_4$ ,  $T_5$  μπορούν να ενεργοποιηθούν και να εκπυρσοκροτήσουν ανεξάρτητα μεταξύ τους.

### 2.5.4 Συγχρονισμός

Ο συγχρονισμός συνδυάζει και συγχρονίζει δυο ή περισσότερους παραλληλισμούς, όπως φαίνεται και στο παρακάτω δίκτυο.

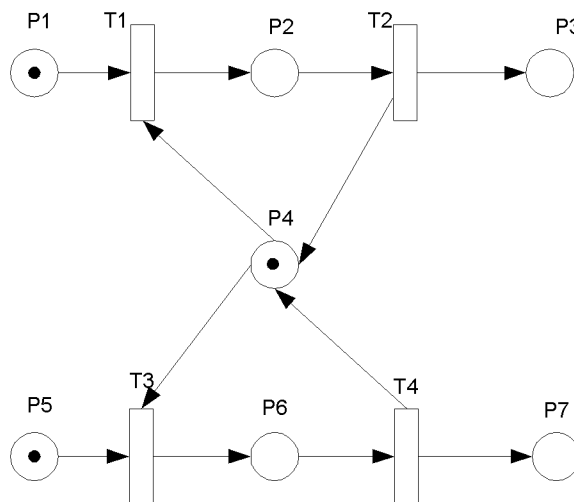




Σχήμα 2. 13 Συγχρονισμός

Η μετάβαση  $T_6$  συγχρονίζει τις δυο ανεξάρτητες και παράλληλες ακολουθίες μεταβάσεων. Η χρήση του παραλληλισμού και του συγχρονισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση που μετά από μια δραστηριότητα εκκινούν 2 άλλες, ταυτόχρονα και αν στη συνέχεια ακολουθούνται διαφορετικοί δρόμοι.

### 2.5.5 Αμοιβαίος αποκλεισμός

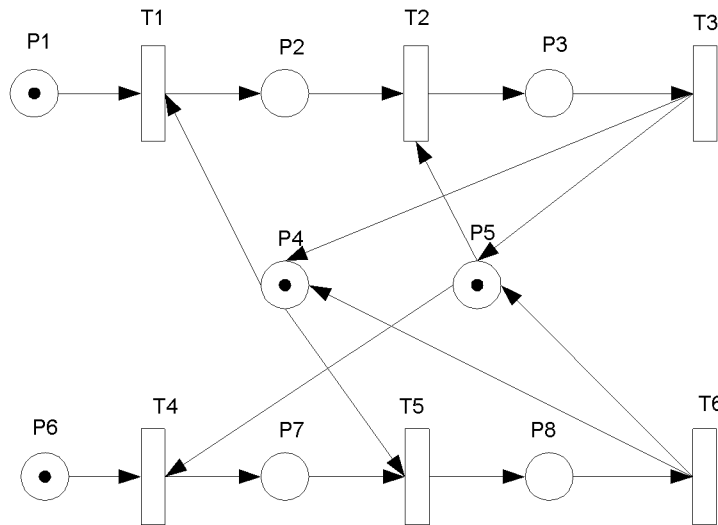


Σχήμα 2. 14 Αμοιβαίος αποκλεισμός

Στο παραπάνω παράδειγμα αμοιβαίου αποκλεισμού οι ακολουθίες εκपुरσοκροτήσεων  $T_1$ ,  $T_2$  και  $T_3$ ,  $T_4$  δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν ταυτόχρονα. Αυτό συμβαίνει λόγω του τόπου  $P_4$ . Όταν μια από τις δυο ακολουθίες εκपुरσοκροτεί χάνει το σίγμα του και απενεργοποιείται η άλλη. Η περίπτωση αυτή μοιάζει με τη σύγκρουση αλλά σε επίπεδο σχεδιασμού δίνει περισσότερες δυνατότητες.

### 2.5.6 Αδιέξοδο

Αδιέξοδο σε ένα δίκτυο Petri εμφανίζεται όταν δεν μπορεί να εκπυρσοκροτήσει καμία μετάβαση. Μια τέτοια κατάσταση είναι φυσικά ανεπιθύμητη σε επίπεδο σχεδιασμού και πρέπει να προλαμβάνεται, σε ανάλυση as-is καταστάσεων είναι πολύ χρήσιμη μιας και πολύ παραστατικά αναδεικνύει τέτοιες περιπτώσεις.

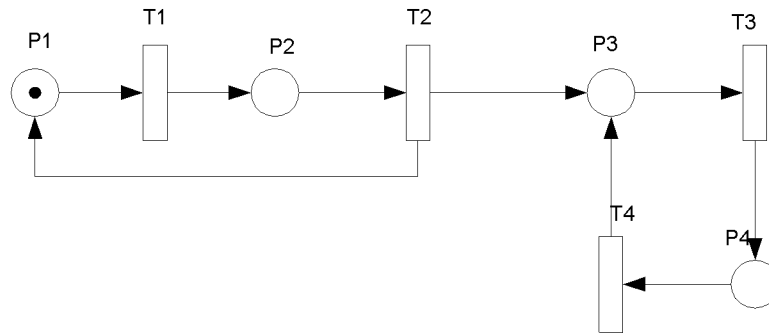


Σχήμα 2. 15 Αδιέξοδο

Αν εκπυρσοκροτήσει η μετάβαση  $T_1$  και στη συνέχεια η  $T_4$ , τότε το σύστημα οδηγείται σε αδιέξοδο γιατί καμία μετάβαση δεν μπορεί να εκπυρσοκροτήσει.

### 2.5.7 Έλλειψη φράγματος

Ορίζεται ότι μια θέση μπορεί να έχει φράγμα βαθμού  $k$ , όταν ο μέγιστος αριθμός στιγμάτων που μπορεί να έχει είναι  $k$ . Ένα δίκτυο παρουσιάζει έλλειψη φράγματος, όταν ένας τόπος του μπορεί να πάρει άπειρο πλήθος στιγμάτων. Μια ελαφρώς διαφορετική περίπτωση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου οι τόποι  $P_3$ , και  $P_4$  δέχονται έναν συνεχώς αυξανόμενο αριθμό στιγμάτων παρ' όλο που έχουν εξαγωγικές μεταβάσεις.



Σχήμα 2. 16 Έλλειψη φράγματος

## 2.6 Υποκατηγορίες των δικτύων Petri

Η ευρεία χρήση και μελέτη των δικτύων Petri εκτός από τα παραπάνω κύτταρα μοντελοποίησης έχουν οδηγήσει στην δημιουργία υποκατηγοριών που η κάθε μια μοντελοποιεί καλύτερα συγκεκριμένου τύπου συστήματα. Η κάθε υποκατηγορία έχει ορισμένες ιδιαίτερες δυνατότητες μοντελοποίησης και ιδιότητες. Βέβαια τα δίκτυα Petri είναι ένα εργαλείο με ελάχιστους περιορισμούς και κανόνες στη χρήση του όποτε ο αναλυτής είναι ελεύθερος να κάνει οποιοσδήποτε προσαρμογές χρειαστούν.

### 2.6.1 Μαρκαρισμένοι Γράφοι (marked graphs – MG)

Ένας μαρκαρισμένος γράφος είναι ένα Petri Net, κάθε τόπος του οποίου έχει ακριβώς μια εισαγωγική και μια εξαγωγική μετάβαση. Η μαθηματική έκφραση αυτής της ιδιότητας είναι:  $|\bullet p| = |p^\bullet| = 1, \forall p \in P$

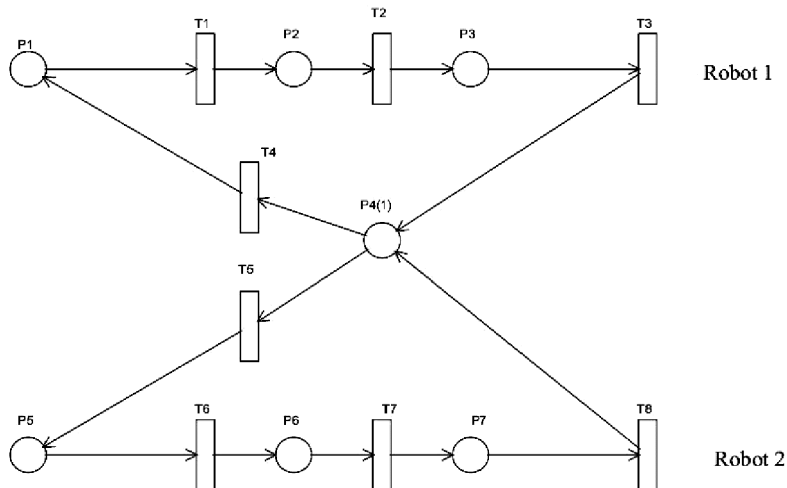
Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να μοντελοποιήσει περιπτώσεις συγχρονισμών. Δεν μπορεί όμως να μοντελοποιήσει περιπτώσεις ανταγωνισμού γιατί ο ανταγωνισμός προϋποθέτει δυο τουλάχιστον εξαγωγικές μεταβάσεις για έναν τόπο. Οι μαρκαρισμένοι γράφοι έχουν μελετηθεί εκτενώς επειδή μοντελοποιούν μεγάλο αριθμό πρακτικών συστημάτων ενώ η ανάλυση τους είναι αρκετά απλή.

### 2.6.2 Κατάσταση μηχανής (state machine-SM)

Πρόκειται για δίκτυα όπου κάθε μετάβαση έχει ακριβώς έναν εισαγωγικό και έναν εξαγωγικό τόπο. Η μαθηματική έκφραση αυτής της ιδιότητας είναι:

$$|\bullet t| = |t^\bullet| = 1, \forall t \in T$$

Αυτά τα δίκτυα μπορούν να μοντελοποιήσουν συγκρούσεις, αφού οι τόποι μπορούν να έχουν περισσότερες από μια εξαγωγικές μεταβάσεις. Αντιθέτως δεν μπορούν να μοντελοποιήσουν συγχρονισμούς μιας και θα ήταν απαραίτητο να υπάρχουν μεταβάσεις με περισσότερους του ενός εξαγωγικούς τόπους, περίπτωση που αποκλείεται σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό.



Σχήμα 2. 17 Κατάσταση μηχανής

Οι δυο παραπάνω κατηγορίες δικτύων Petri έχουν συμπληρωματικές ιδιότητες, αφού οι καταστάσεις μηχανής μπορούν να μοντελοποιήσουν επιλογές και συγκρούσεις αλλά όχι συγχρονισμός ενώ οι μαρκαρισμένοι γράφοι μπορούν να μοντελοποιήσουν συγχρονισμούς αλλά όχι συγκρούσεις.

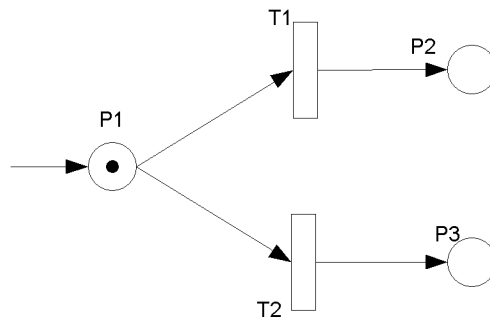
### 2.6.3 Δίκτυα ελεύθερης επιλογής (free choice nets – FCN)

Στα δίκτυα ελεύθερης επιλογής κάθε βέλος που εξέρχεται από έναν τόπο είναι το μοναδικό βέλος που εξέρχεται από αυτόν ή αν έχει περισσότερα, καθένα από αυτά καταληγει σε μια μετάβαση που έχει μοναδικό εισαγωγικό βέλος το εν λόγω βέλος. Η μαθηματική έκφραση αυτής της ιδιότητας είναι:

$$\bullet t_j = \{p_i\}, \forall p_i \in P \quad \text{ή} \quad p_i^\bullet = \{t_j\}, \forall t_i \in T$$

Με τέτοια δίκτυα μοντελοποιούνται συγκρούσεις ενώ έχουμε τη δυνατότητα να εισάγουμε μηχανισμούς για την επίλυση τους, για παράδειγμα με τη χρήση

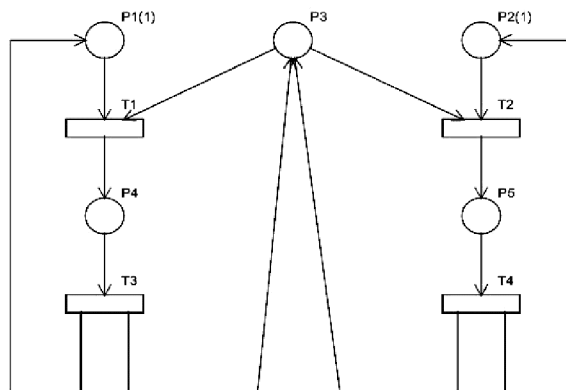
προτεραιοτήτων. Στο σχήμα 2.18 φαίνεται ένα δίκτυο ελεύθερης επιλογής.



**Σχήμα 2. 18 Δίκτυο ελεύθερης επιλογής**

Πράγματι ένα στίγμα στον τόπο  $P_1$  ενεργοποιεί τις  $T_1, T_2$  χωρίς να υπάρχει περιορισμός στο ποια από τις δυο θα εκπυρσοκροτήσει. Ένα τέτοιο δίκτυο δίνει στο μελετητή να επιλέξει ελεύθερα να οδηγήσει το σύστημα στην κατάσταση που επιθυμεί.

Στο σχήμα 2.19 φαίνεται μια περίπτωση σύγκρουσης που όμως δεν αποτελεί δίκτυο ελεύθερης επιλογής.



**Σχήμα 2. 19**

Αυτό το δίκτυο δεν είναι ελεύθερης επιλογής γιατί η επίλυση της σύγκρουσης μεταξύ  $T_1, T_2$  επηρεάζεται από την ύπαρξη ή όχι σιγμάτων στους τόπους  $P_1, P_2$ .

Τα δίκτυα ελεύθερης επιλογής περιέχουν τους μαρκαρισμένους γράφους και τα δίκτυα καταστάσεων μηχανής, αφού μπορούν χωρίς πρόβλημα να μοντελοποιούν

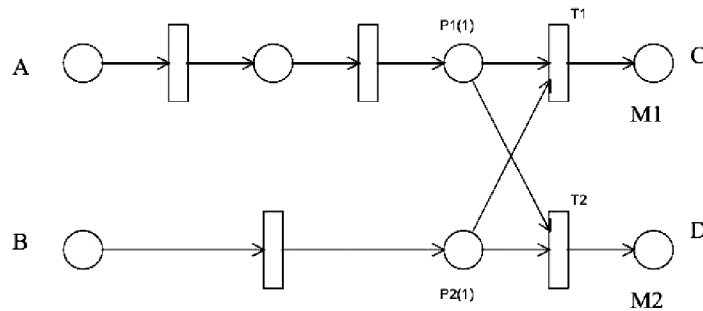
τόσο συγχρονισμός όσο και επιλογές-συγκρούσεις.

### 2.6.4 Επεκτάσεις δικτύων ελεύθερης επιλογής (extensions to free choice net)

Πρόκειται για δίκτυα τα οποία, ενώ δεν ικανοποιούν απολύτως τον ορισμό των δικτύων ελεύθερης επιλογής, διατηρούν την ικανότητα επιλογής για το ποια μετάβαση θα πυροβολήσει σε έναν ανταγωνισμό. Ένα δίκτυο επέκτασης δικτύων ελεύθερης επιλογής είναι ένα σύνθετος δίκτυο Petri, τέτοιο ώστε για κάθε ζεύγος μεταβάσεων  $t_1, t_2 \in T$ , που μοιράζονται τον ίδιο εισαγωγικό τόπο, δεν υπάρχει μαρκάρισμα για το οποίο η μία είναι ικανή να πυροβολήσει κι η άλλη όχι. Ο ορισμός αυτός εκφράζεται ως εξής:

$$\text{Αν } p_1^\bullet \cap p_2^\bullet \neq \emptyset \text{ τότε } p_1^\bullet = p_2^\bullet \quad \forall p_1, p_2 \in P$$

Ένα παράδειγμα τέτοιου δικτύου φαίνεται στο σχήμα 2.20.



Σχήμα 2. 20 Επέκταση δικτύου ελεύθερης επιλογής

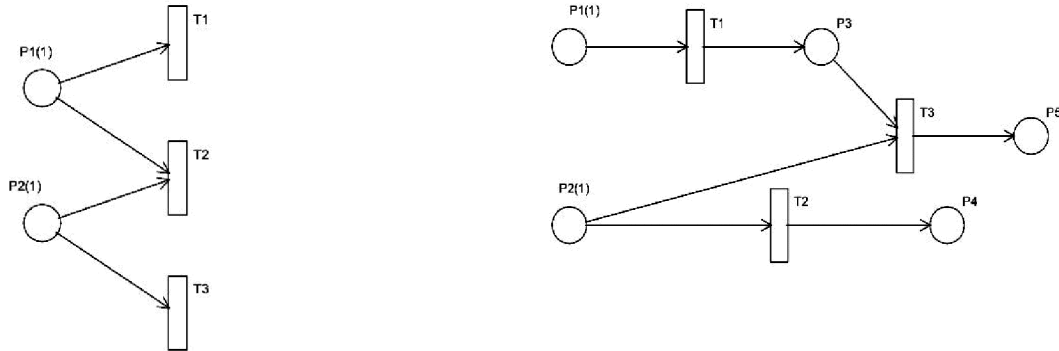
Στο σχήμα φαίνεται πως καμία από τις μεταβάσεις  $T_1$  και  $T_2$  δεν ενεργοποιείται αν δεν ενεργοποιηθεί και η άλλη. Άρα ενεργοποιούνται ταυτόχρονα. Το ποια από τις δύο θα εκπυροσοκροτήσει τελικά, είναι ελεύθερα ελεγχόμενο, όπως και στην περίπτωση των δικτύων ελεύθερης επιλογής.

### 2.6.5 Απλά δίκτυα (simple nets – SN)

Στα απλά δίκτυα κάθε μετάβαση έχει το πολύ έναν εξαγωγικό τόπο κοινό και με άλλες μεταβάσεις. Η μαθηματική έκφραση αυτής της ιδιότητας είναι:

$$\forall t \in T \left\{ p \in \bullet t \text{ τέτοιο ώστε } |p^\bullet| > 1 \right\} \leq 1$$

Ο ορισμός αυτός επιτρέπει συνδυασμό συγχρονισμού και επιλογής στο ίδιο δίκτυο. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται *σύγχυση* (confusion) και μπορεί να μοντελοποιηθεί από τα απλά δίκτυα.



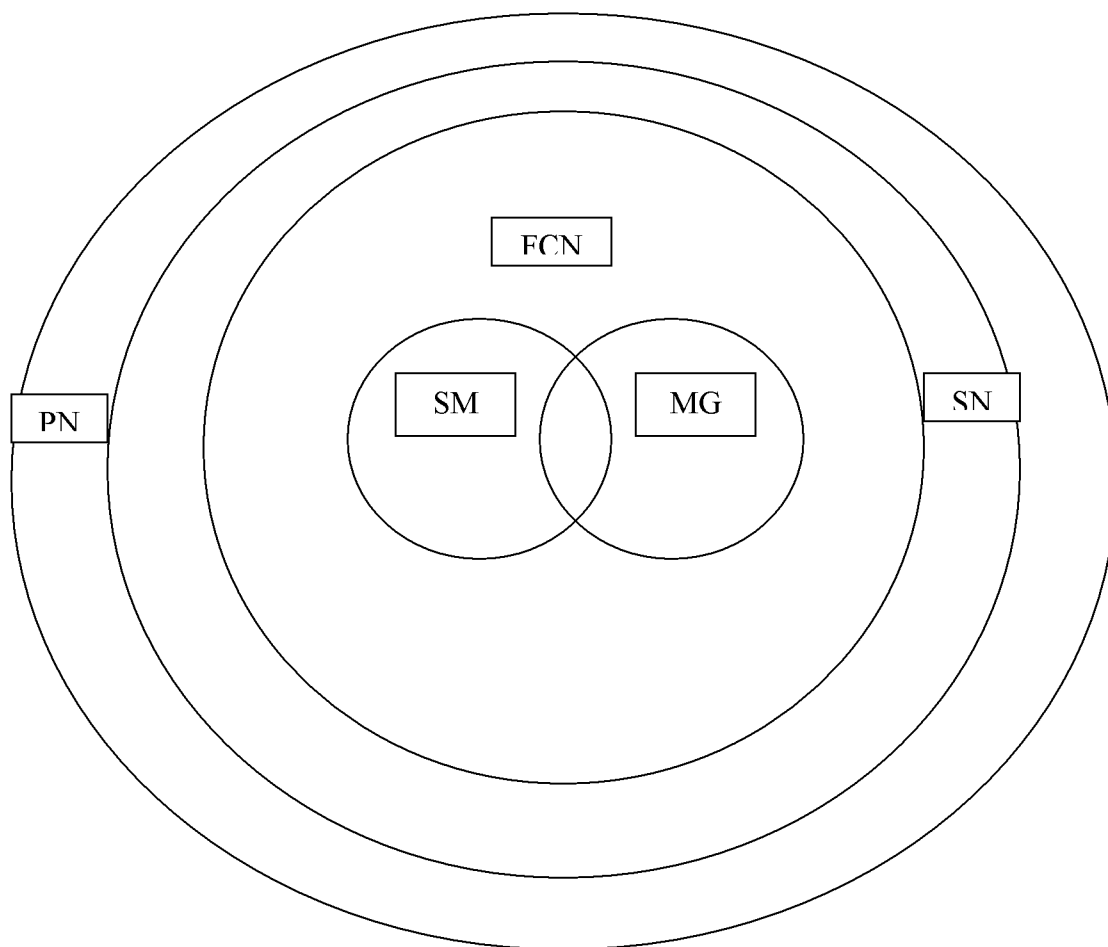
α)

β)

Σχήμα 2. 21 Σύγχυση

Τα παραπάνω δίκτυα δείχνουν την περίπτωση της σύγχυσης. Στο πρώτο οι μεταβάσεις  $T_1$  και  $T_3$  παρουσιάζουν συγχρονισμό, διότι και οι δύο ενεργοποιούνται ταυτόχρονα, και συγχρόνως είναι σε σύγκρουση με τη μετάβαση  $T_2$ , με την οποία έχουν κοινό εισαγωγικό τόπο. Όμοια στο δεύτερο, οι μεταβάσεις  $T_1$  και  $T_2$  παρουσιάζουν συγχρονισμό. Αν η  $T_1$  εκπυρσοκροτήσει πρώτη τότε θα βρεθούν σε σύγκρουση οι μεταβάσεις  $T_2$  και  $T_3$ . Η πρώτη περίπτωση λέγεται συμμετρική σύγχυση (symmetric confusion) και η δεύτερη ασύμμετρη σύγχυση (asymmetric confusion). Τα δίκτυα αυτά είναι επίσης γνωστά με το όνομα «δίκτυα ασύμμετρης επιλογής» (asymmetric choice-nets).

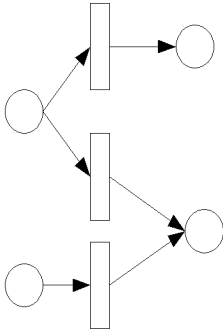
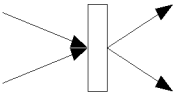
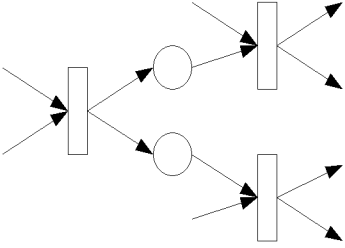
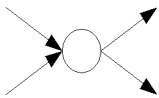
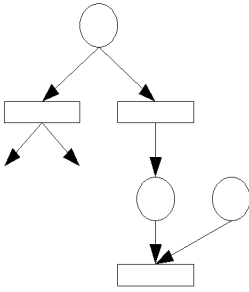
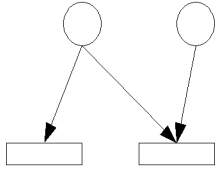
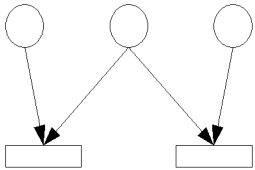
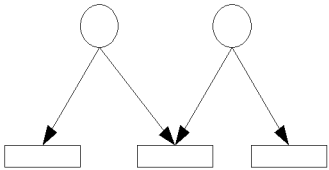
Στο σχήμα 2.22 φαίνονται οι σχέσεις των υποκατηγοριών των δικτύων Petri.



**Σχήμα 2. 22 Σχέσεις υποκατηγοριών δικτύων Petri**

Συνοπτικά οι ιδιότητες των υποκατηγοριών που περιγράφηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.



	Επιτρέπεται	Δεν επιτρέπεται
Κατάσταση Μηχανής (SM)		
Μαρκαρισμένος Γραφος (MG)		
Δίκτυο Ελεύθερης Επιλογής (FCN)		
Απλό Δίκτυο (SN)		

Πίνακας 2.1

---

## 2.7 Ιδιότητες των δικτύων Petri

Οι ιδιότητες που θα παρουσιαστούν παρακάτω μπορούν να δώσουν μια καλή εικόνα για τη δυναμική συμπεριφορά ενός δικτύου. Ανάλογα με το αν οι ιδιότητες ενός δικτύου Petri εξαρτώνται από το αρχικό μαρκάρισμα ή όχι, χωρίζονται σε ιδιότητες συμπεριφοράς (behavioral properties) και σε ιδιότητες δομής.

Οι ιδιότητες αυτές είναι:

- Προσβασιμότητα (Reachability)
- Φράξιμο (Boundeness)
- Βιωσιμότητα (Liveness)
- Αναστρεψιμότητα (Reversibility)
- Συντηρητικότητα (Conservation)
- Καλυψιμότητα (Coverability)
- Επαναληπτικότητα (Repetitivity)
- Συνοχή (Consistency)

### 2.7.1 Προσβασιμότητα

Πολλές φορές για ένα δεδομένο δίκτυο είναι χρήσιμο να εντοπιστούν όλα τα δυνατά μαρκάρια στο οποίο μπορεί να φτάσει από ένα αρχικό μαρκάρισμα  $M_0$ . Έστω ότι ένα δίκτυο με τα την εκपुरσοκρότηση μιας ακολουθίας μεταβάσεων φτάνει στο μαρκάρισμα  $M_r$ . Ορίζεται τότε ότι το μαρκάρισμα  $M_r$  είναι προσβασιμο από το αρχικό  $M_0$ . Σε περίπτωση που το μαρκάρισμα  $M_r$  είναι προσβασιμο με την εκपुरσοκρότηση μιας μόνο μετάβασης τότε αυτό ορίζεται ως άμεσα προσβασιμο (immediately reachable). Το σύνολο των δυνατών μαρκαρισμάτων (reachability set) ενός δικτύου  $N$  με αρχικό μαρκάρισμα  $M_0$  συμβολίζεται με:  $R(N, M_0)$ .

Η ιδιότητα της προσβασιμότητας είναι ιδιότητα συμπεριφοράς και η μαθηματική της έκφραση είναι η εξής:  $M_r \in R(N, M_0)$ .

### 2.7.2 Φράξιμο

Ένα δίκτυο Petri παρουσιάζει φράγμα  $k$  βαθμού, όταν στο σύνολο των δυνατών μαρκαρισμάτων στα οποία μπορεί να φτάσει  $R(M_0)$ , κάθε τόπος του δικτύου μπορεί να έχει το πολύ  $k$  τον αριθμό στίγματα. Το φράξιμο αποτελεί ιδιότητα δομής ενός δικτύου και χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση τόπων με πεπερασμένη χωρητικότητα.

### 2.7.3 Βιωσιμότητα

Ένα δίκτυο Petri είναι βιώσιμο για ένα μαρκάρισμα  $M_0$ , όταν για οποιαδήποτε μαρκάρισμα από το σύνολο των δυνατών μαρκαρισμάτων  $R(M_0)$ , είναι δυνατό να εκπυρσοκροτήσει οποιαδήποτε μετάβαση του δικτύου. Ειδικότερα μια μετάβαση έχει τα εξής επίπεδα βιωσιμότητας:

- Επίπεδο 0: δεν μπορεί ποτέ να εκπυρσοκροτήσει
- Επίπεδο 1: είναι πιθανώς ενεργοποιημένη, δηλαδή υπάρχει  $M \in R(N, M_0)$  τέτοιο ώστε η μετάβαση να μπορεί να ενεργοποιηθεί
- Επίπεδο 2: για κάθε πεπερασμένο θετικό ακέραιο  $n$ , υπάρχει ακολουθία εκπυρσοκροτήσεων τέτοια ώστε να περιλαμβάνει τη μετάβαση τουλάχιστον  $n$  φορές.
- Επίπεδο 3: υπάρχει άπειρου μήκους ακολουθία εκπυρσοκροτήσεων, τέτοια ώστε η μετάβαση εκπυρσοκροτεί άπειρες φορές.
- Επίπεδο 4: για κάθε  $M \in R(N, M_0)$  η μετάβαση ενεργοποιείται.

Ένα δίκτυο Petri είναι επιπέδου βιωσιμότητας  $i$ , όταν κάθε μετάβαση του είναι επιπέδου βιωσιμότητας  $i$ . Ένα δίκτυο Petri είναι δομικά βιώσιμο (structurally live) όταν είναι βιώσιμο για κάθε αρχικό μαρκάρισμα.

Κάθε επίπεδο βιωσιμότητας περιέχει το προηγούμενο του. Έτσι το επίπεδο 4 περιλαμβάνει όλα τα υπόλοιπα.

### 2.7.4 Αναστρεψιμότητα

Ένα δίκτυο Petri είναι αναστρέψιμο όταν:

$$\forall M \in R(N, M_0) \text{ και } M \in R(N, M)$$

Ένα δίκτυο Petri είναι δομικά αναστρέψιμο (structurally reversible), αν για κάθε αρχικό μαρκάρισμα είναι αναστρέψιμο.

### 2.7.5 Συντηρητικότητα

Η συντηρητικότητα αφορά την ιδιότητα ενός δικτύου να διατηρεί σταθερό τον αριθμό των σιγμάτων ή το σταθμισμένο άθροισμα τους σταθερό. Ορίζεται ως αυστηρά συντηρητικό ένα δίκτυο Petri με αρχικό μαρκάρισμα  $M_0$  και  $M \in R(N, M_0)$  όταν ισχύει ότι :

$$\sum_{p_i \in P} M(p_i) = \sum_{p_i \in P} M_0(p_i)$$

Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται ως συντηρητικό ένα δίκτυο με αρχικό μαρκάρισμα  $M_0$  και  $M \in R(N, M_0)$  σε σχέση με ένα διάνυσμα στάθμισης  $w=(w_1, w_2, \dots, w_{in})$  όπου  $n = |P|$ ,

$$w_{ig} \geq 0 \text{ αν } \sum_i w \cdot M(p_i) = \sum_i w \cdot M_0(p_i).$$

Ένα δίκτυο Petri είναι δομικά συντηρητικό (structurally conservative), αν είναι συντηρητικό για κάθε αρχικό μαρκάρισμα.

### 2.7.6 Καλυψιμότητα

Ένα μαρκάρισμα  $M' \in R(N, M_0)$  καλύπτει ένα μαρκάρισμα  $M \in R(N, M_0)$  αν ισχύει ότι  $M' \geq M$ .

### 2.7.7 Επαναληπτικότητα

Ένα δίκτυο Petri είναι επαναληπτικό (repetitive), όταν στο γράφο προσβασιμότητας υπάρχει κατευθυνόμενο κύκλωμα (directed circuit), όπου περιέχονται όλες οι μεταβάσεις με άπειρη συχνότητα. Όταν το κατευθυνόμενο κύκλωμα δεν περιέχει όλες τις μεταβάσεις, αλλά μέρος αυτών, τότε το δίκτυο ονομάζεται μερικώς επαναληπτικό (partially repetitive).

### 2.7.8 Συνοχή

Ένα δίκτυο Petri ονομάζεται συνεκτικό (consistent), όταν στο γράφο προσβασιμότητας υπάρχει κατευθυνόμενο κύκλωμα (directed circuit), όπου περιέχονται όλες οι μεταβάσεις τουλάχιστον μια φορά. Όταν το κατευθυνόμενο κύκλωμα δεν περιέχει όλες τις μεταβάσεις, αλλά μέρος αυτών, τότε το δίκτυο ονομάζεται μερικώς συνεκτικό (partially consistent).

Ο γράφος προσβασιμότητας είναι ένα εργαλείο ανάλυσης των δικτύων Petri που περιγράφεται στη παρακάτω παράγραφο.

## 2.8 Ανάλυση των δικτύων Petri

Η ανάλυση ενός δικτύου Petri μπορεί να αποφέρει σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με το σύστημα που μοντελοποιεί. Οι κυριότερες τεχνικές ανάλυσης των δικτύων Petri είναι οι εξής:

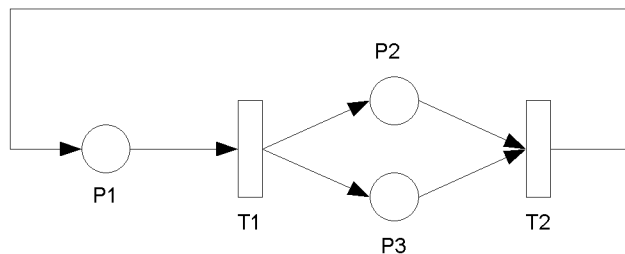
- Ανάλυση με τη χρήση του γράφου ή δένδρα προσβασιμότητας και καλυψιμότητας (reachability and coverability graphs)
- Ανάλυση με τη χρήση της μήτρας πρόσπτωσης (incidence matrix)

- Ανάλυση με μετασχηματισμούς (transformations)
- Ανάλυση με προσομοίωση (simulation)

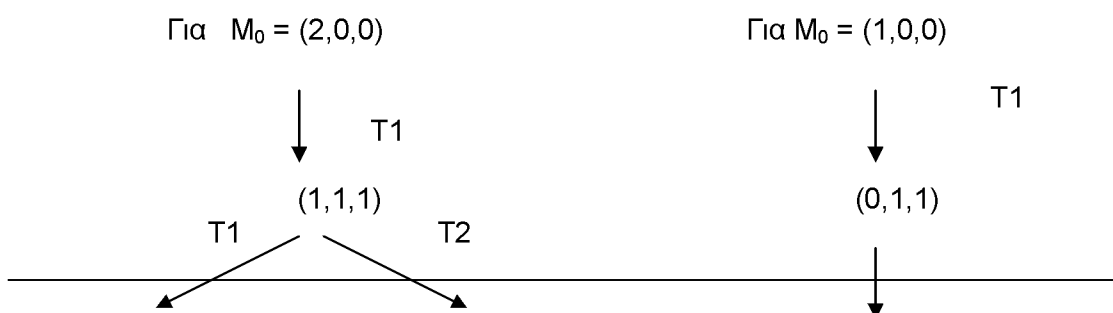
### 2.8.1 Γράφοι προσβασιμότητας και καλυψιμότητας

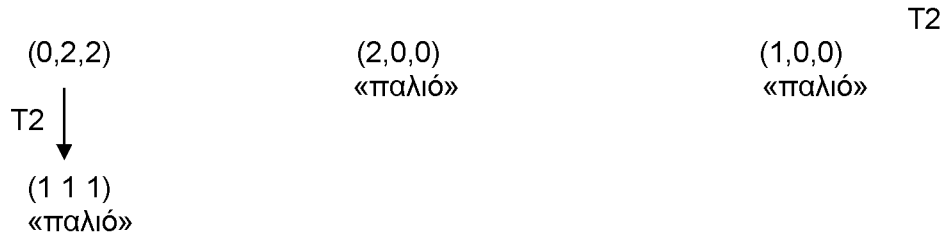
Ο γράφος ή το δένδρο προσβασιμότητας (reachability graph or tree) είναι ένας γράφος, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να παριστά το σύνολο των δυνατών καταστάσεων στις οποίες μπορεί να προέλθει ένα δίκτυο. Ο γράφος προσβασιμότητας αποτελείται από τα διανύσματα των δυνατών μαρκαρισμάτων συνδεόμενα με βέλη. Δίπλα στα βέλη αναφέρεται το όνομα της μετάβασης που εκπυρσοκροτεί κάθε φορά.

Για να σχεδιαστεί ο γράφος προσβασιμότητας ξεκινούμε από το αρχικό μαρκάρισμα που τοποθετείται στη κορυφή. Διακλάδωση δημιουργείται κάθε φορά που ενεργοποιούνται περισσότερες τις μια μεταβάσεις ταυτόχρονα. Ο γράφος τελικά θα περιέχει όλα τα δυνατά μαρκαρίσματα που προκύπτουν από το αρχικό. Ακολουθεί ένα δίκτυο (σχήμα 2.23) και δυο γράφοι προσβασιμότητας με διαφορετικό αρχικό μαρκάρισμα. (σχήμα 2.24)



Σχήμα 2. 23





**Σχήμα 2. 24 Γράφοι προσβασιμότητας**

Ο γράφος προσβασιμότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τον παρακάτω λόγο:

Αν στις μεταβάσεις προστεθεί χρόνος και μάλιστα ο χρόνος αυτός είναι τυχαία μεταβλητή, τότε προκύπτει ένα Στοχαστικό Δίκτυο Petri. Αν, επιπλέον, οι μεταβλητές αυτές ακολουθούν εκθετική κατανομή τότε το δίκτυο αυτό θα είναι ισομορφικό με μία διαδικασία Markov διακριτού συνόλου καταστάσεων - συνεχούς χρόνου (αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου). Μ' αυτόν τον τρόπο τίθεται η βάση της ανάλυσης της απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιώντας τα δίκτυα Petri, διότι είναι δυνατή η ανάλυση λύνοντας την αλυσίδα Markov. Αυτό συνοπτικά γίνεται ως εξής:

Ας θεωρήσουμε το προηγούμενο παράδειγμα για το μαρκάρισμα  $M_0=(2,0,0)$ . Συνδέουμε κάθε μετάβαση με ένα ρυθμό  $\lambda$  μιας εκθετικής κατανομής, που αποτελεί το ρυθμό εκπυρσοκρότησης της μετάβασης. Έστω ότι η μετάβαση  $t_1$  έχει ρυθμό εκπυρσοκρότησης  $\lambda_1$  και η μετάβαση  $t_2$  έχει ρυθμό  $\lambda_2$ . Υπάρχουν τρεις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα και παριστάνονται με  $\Pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3)$ , όπου με  $\pi_1$  παριστάνεται η κατάσταση  $(P_1, P_2, P_3) = (2,0,0)$ , με  $\pi_2$  η κατάσταση  $(1,1,1)$  και  $\pi_3$  η κατάσταση  $(0,2,2)$ . Έτσι διαμορφώνουμε τη μήτρα των ρυθμών μεταβάσεων ως εξής:

$$Q = \begin{pmatrix} - \Sigma \text{ ρυθμοί που φεύγουν από το } \pi_1 & \text{Ρυθμός από } \pi_2 \text{ στο } \pi_1 \\ \text{Ρυθμός από } \pi_1 \text{ στο } \pi_2 & - \Sigma \text{ ρυθμοί που φεύγουν από το } \pi_2 \\ \text{Ρυθμός από } \pi_1 \text{ στο } \pi_3 & \text{Ρυθμός από το } \pi_2 \text{ στο } \pi_3 \end{pmatrix}$$

$\pi_1$

$\pi_2$

Ρυθμός από  $\pi_3$  στο

Ρυθμός από  $\pi_3$  στο

-  $\Sigma$  ρυθμοί που φεύγουν από το

---

$\pi_3$

ή

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \lambda_1 & -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_2 \\ 0 & \lambda_1 & -\lambda_2 \end{bmatrix}$$

Στη συνέχεια, λύνοντας τη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d\pi(t)}{dt} = \pi(t) \cdot Q^T$$

με αρχική συνθήκη  $\pi(0) = (2 \ 0 \ 0)$ , θα προκύψει το διάνυσμα  $\pi(t)$ , του οποίου η  $i$ -οστή συνιστώσα είναι η πιθανότητα το σύστημα να βρίσκεται στην  $i$  κατάσταση τη χρονική στιγμή  $t$ .

Είναι πιθανό, ωστόσο, ο γράφος αυτό να επεκτείνεται απεριόριστα. Για να μπορέσουμε όμως να κρατήσουμε το μέγεθος του δέντρου πεπερασμένο, χρησιμοποιούμε το σύμβολο  $\omega$ , το οποίο αντιπροσωπεύει έναν αριθμό στιγμάτων που μπορεί να γίνει απεριόριστα μεγάλος. Για το  $\omega$  ισχύουν τέσσερις κανόνες, σε σχέση με έναν ακέραιο  $\alpha$ :

$$\alpha < \omega$$

$$\omega \leq \omega$$

$$\omega + \alpha = \omega$$

$$\omega - \alpha = \omega$$

Ένας γράφος προσβασιμότητας που περιέχει το σύμβολο  $\omega$  λέγεται δέντρο καλυψιμότητας (coverability tree). Το δέντρο καλυψιμότητας είναι πάντα πεπερασμένο και περιέχει όλα τα προσβάσιμα σημαδέματα από το αρχικό  $M_0$ , που είτε φαίνονται ως ξεχωριστές καταστάσεις του δέντρου, είτε επικαλύπτονται από κάποια άλλη κατάσταση μέσω του συμβόλου  $\omega$ . Αντίθετα, ένα δέντρο προσβασιμότητας μπορεί να είναι είτε πεπερασμένο είτε απείρου μήκους. Το δέντρο επικάλυψης προκύπτει με τη βοήθεια του αλγορίθμου που παρατίθεται στη συνέχεια.

Αλγόριθμος κατασκευής του δέντρου επικάλυψης:

**Βήμα 1:** Ονομάζουμε το αρχικό μαρκάρισμα  $m_0$  ως «νέο»,

**Βήμα 2:** Για όσο υφίσταται το «νέο» μαρκάρισμα κάνουμε:

**Βήμα 2.1:** Επιλέγουμε ένα «νέο» μαρκάρισμα  $m$ ,

**Βήμα 2.2:** Αν καμία μετάβαση δεν τίθεται ικανή να εκπυρσοκοτηθεί από το  $m$ , τότε ονομάζουμε το  $m$  ως «αδιέξοδο».

**Βήμα 2.3:** Αν το  $m$  είναι ίδιο με κάποιο άλλο μαρκάρισμα στη διαδρομή από το αρχικό  $m_0$  στο  $m$ , τότε ονομάζουμε το  $m$  ως «παλιό» και πάμε σε άλλο μαρκάρισμα.

**Βήμα 2.4:** Για όλες τις μεταβάσεις που τίθενται ικανές να εκπυρσοκοτηθούν από το  $m$  κάνουμε:

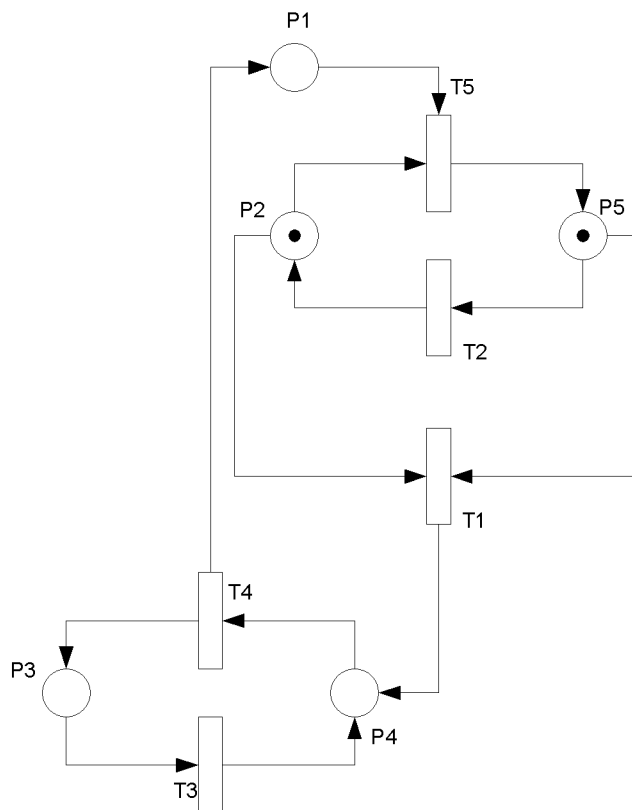
**Βήμα 2.4.1:** Εκπυρσοκορήση μιας μετάβασης και αποκτούμε το μαρκάρισμα  $M'$ ,

**Βήμα 2.4.2:** Αν από το αρχικό μαρκάρισμα μέχρι το  $m$  υπάρχει ένα  $M''$ , τέτοιο ώστε  $M'(p_i) \geq M''(p_i)$  για όλα τα  $i=1, \dots, n$  και  $M' \neq M''$

τότε:

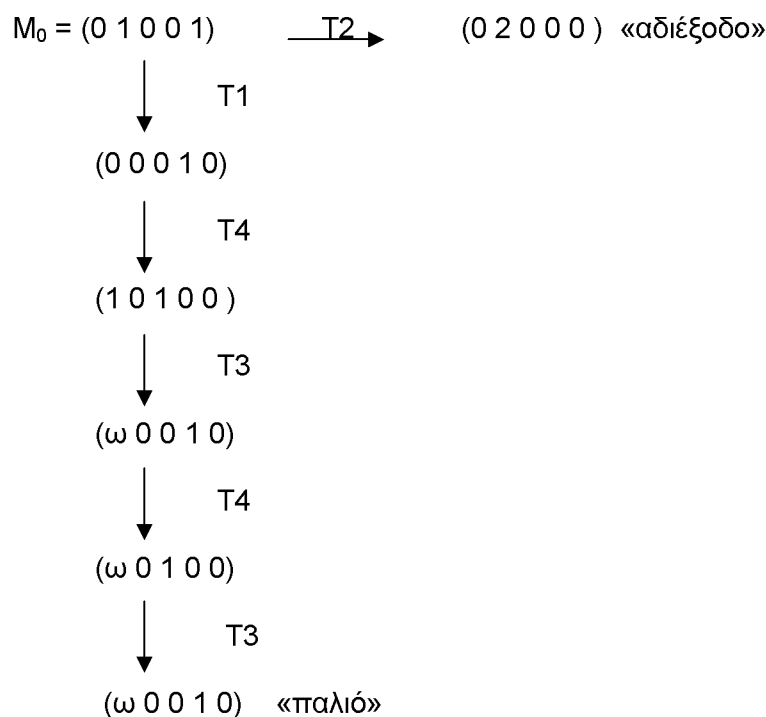
Αντικαθιστούμε το  $m'(p_i)$  με  $\omega$  για όπου ισχύει  $M'(p_i) \geq M''(p_i)$ , Προσθέτουμε το  $M'$  στο δέντρο ονομάζοντας το βέλος με κατάλληλη μετάβαση, ονομάζουμε το  $M'$  ως «νέο».

Ένα παράδειγμα στο οποίο έχουν γίνει τα παραπάνω είναι το εξής:



Σχήμα 2. 25





**Σχήμα 2. 26 Δέντρο προσβασιμότητας**

Το δένδρο προσβασιμότητας ή το δένδρο καλυψιμοτητας δίνει στοιχεία για τις ιδιότητες συμπεριφοράς και όχι για τις ιδιότητες δομής ενός Petri Net. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να πάρουμε στοιχεία για τις εξής ιδιότητες.

➤ Φράξιμο

Ένα δίκτυο Petri είναι φραγμένο αν το  $\omega$  δεν εμφανίζεται πουθενά στο γράφο καλυψιμότητας. Το άνω φράγμα  $k$  είναι ο μέγιστος ακέραιος που θα βρεθεί στους κόμβους του γράφου.

➤ Συντηρητικότητα

Ένα δίκτυο Petri είναι συντηρητικό αν το σταθμισμένο άθροισμα των στιγμάτων σε κάθε κόμβο του γράφου καλυψιμότητας είναι σταθερό.

➤ Καλυψιμότητα

Η ιδιότητα αυτή συνεπάγεται εμφάνιση του  $\omega$

➤ Βιωσιμότητα

Δεν μπορούν να ανιχνευτούν όλες οι περιπτώσεις βιωσιμότητας γι' αυτό και δεν θεωρείται ένα καλό εργαλείο για το σκοπό αυτό.

➤ Επαναληπτικότητα

Μέσα από το γράφο προσβασιμότητας είναι εύκολο να βρεθεί, αν υπάρχει κάποιο κατευθυνόμενο κύκλωμα που περιέχει, είτε όλες τις μεταβάσεις

(επαναληπτικό δίκτυο) είτε μερικές από αυτές (μερικώς επαναληπτικό δίκτυο).

➤ Συνεκτικότητα

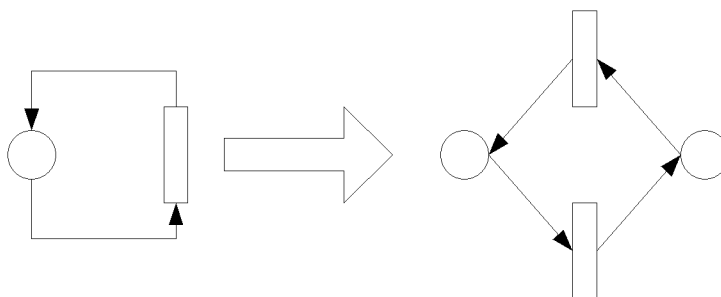
Όμοια με την επαναληπτικότητα, ο γράφος προσβασιμότητας βοηθάει στον εντοπισμό κάποιου κατευθυνόμενου κυκλώματος που περιέχει, είτε όλες τις μεταβάσεις (συνεκτικό δίκτυο) είτε μερικές από αυτές (μερικώς συνεκτικό δίκτυο).

## 2.8.2 Μήτρα πρόσπτωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συνάρτηση εισόδου αναφέρεται στα βέλη, τα οποία ξεκινούν από τους εισαγωγικούς τόπους και καταλήγουν στη μετάβαση. Ομοίως η συνάρτηση εξόδου αναφέρεται στα βέλη που ξεκινούν από μεταβάσεις και καταλήγουν στους εξαγωγικούς τόπους των μεταβάσεων. Προκειμένου να απεικονιστούν όλα τα ζεύγη τόπων – μεταβάσεων, χρησιμοποιούνται οι μήτρες εισόδου (Pre) και εξόδου (Post). Οι μήτρες αυτές έχουν διαστάσεις  $n \times m$  όπου  $n = |P|$  ο αριθμός των τόπων και  $m = |T|$  ο αριθμός των μεταβάσεων του δικτύου. Η μήτρα πρόσπτωσης ορίζεται ως:

$$C = \text{Post} - \text{Pre}.$$

Η μήτρα πρόσπτωσης δεν μπορεί να περιγράψει πλήρως δίκτυα τα οποία περιέχουν βρόγχους (self loops). Βρόγχος ορίζεται ένα ζευγάρι τόπου- μετάβασης, στο οποίο ο τόπος είναι ταυτόχρονα εισαγωγικός και εξαγωγικός για τη μετάβαση. Ένας βρόγχος μπορεί να απαλειφθεί αντικαθιστώντας τη μετάβαση με δυο μεταβάσεις μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ένας τόπος.

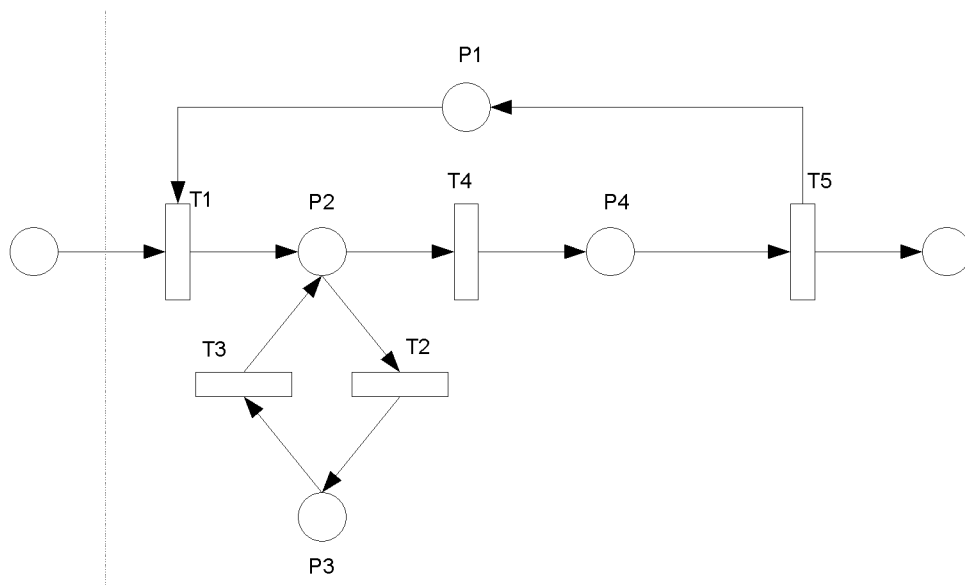


Σχήμα 2. 27 Απαλειφή βρόχου

Ένα δίκτυο ονομάζεται αγνό (pure) όταν δεν περιέχει βρόγχους. Επομένως η μήτρα πρόσπτωσης μπορεί να περιγράψει αγνά δίκτυα.

Μέσα στη μήτρα πρόσπτωσης τα θετικά στοιχεία προέρχονται από τη μήτρα εξόδου (Post) και τα αρνητικά από τη μήτρα εισόδου (Pre). Στο σχήμα 2.28 φαίνεται ένα δίκτυο, στο οποίο έχει γίνει η χρήση της τεχνικής αυτής, και ακολουθεί η μήτρα

πρόσπτωσής του, που αναφέρεται στο κομμάτι του δικτύου που περικλείεται από τη γραμμή.



Σχήμα 2. 28

$$C = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Με τη βοήθεια της μήτρας πρόσπτωσης  $C$  μπορεί να μοντελοποιηθεί μαθηματικά το μοντέλο. Έτσι, αν είναι  $M_k$  το μαρκάρισμα ενός δικτύου Petri μετά την εκπυρσοκρότηση της  $k$ -οστής μετάβασης, τότε το επόμενο μαρκάρισμα  $M_{k+1}$  ορίζεται από τη σχέση  $M_{k+1} = M_k + Cu_k$ .

Το διάνυσμα  $u_k$  ορίζεται ως διάνυσμα εκπυρσοκρότησης (firing vector) με διαστάσεις  $m \times 1$  και στοιχεία μη αρνητικούς ακέραιους αριθμούς, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των εκπυρσοκροτήσεων της αντίστοιχης μετάβασης κατά την  $k$ -οστή κατάσταση του δικτύου.

Η πιο πάνω σχέση ορίζεται ως εξίσωση κατάστασης (state equation) ενός δικτύου Petri. Είναι δυνατόν να βρεθεί ο τύπος που συνδέει ένα μαρκάρισμα  $M_r$  με το αρχικό μαρκάρισμα  $M_0$ . Είναι:

$$M_1 = M_0 + Cu_0$$

$$M_2 = M_1 + Cu_1$$

.

.

.

$$M_r = M_{r-1} + Cu_{r-1}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$M_r = M_0 + Cu$$

Όπου

$$u = u_0 + u_1 + \dots + u_r$$

Οι ιδιότητες που μπορούν να ελεγχθούν με τη μήτρα πρόσπτωσης είναι οι εξής.

➤ Προσβασιμότητα

Όταν ο βαθμός της μήτρας πρόσπτωσης είναι  $r = \text{rank}(C)$ , τότε η μήτρα μπορεί να επιμεριστεί στους ακόλουθους πίνακες.

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}$$

Όπου ο  $C$  έχει διαστάσεις  $n \times m$ , ο  $C_{11}$   $r \times (m-r)$ , ο  $C_{12}$   $r \times r$ , ο  $C_{21}$   $(n-r) \times (m-r)$  και ο  $C_{22}$   $(n-r) \times r$ .

Ορίζοντας

$$B_p = \begin{bmatrix} I & -C_{22} & C_{12}^{-1} \end{bmatrix} \text{ με διαστάσεις } r \times m$$

και

$$\Delta M = M_r - M_0$$

καταλήγουμε στην αναγκαία συνθήκη για την προσβασιμότητα:

*Ένα μαρκάρισμα  $M_r$  είναι προσβασιμο από ένα αρχικό  $M_0$  όταν  $B_p \cdot \Delta M = 0$*

➤ Συντηρητικότητα

Ένα δίκτυο Petri είναι συντηρητικό, αν και μόνο αν, υπάρχει διάνυσμα  $x$  θετικών ακέραιων, διαστάσεων  $n \times 1$  τέτοιο ώστε:

$$x^T \cdot C = 0$$

➤ Φράξιμο

Ένα δίκτυο Petri είναι δομικά φραγμένο, αν και μόνο αν, υπάρχει διάνυσμα  $x$  θετικών ακέραιων, διαστάσεων  $n \times 1$  τέτοιο ώστε:

$$x^T \cdot C \leq 0$$

➤ Επαναληπτικότητα

Ένα δίκτυο Petri είναι επαναληπτικό, αν και μόνο αν, υπάρχει διάνυσμα  $y$  θετικών ακεραίων, διαστάσεων  $m \times 1$  τέτοιο ώστε:

$$C \cdot y \geq 0$$

Αν το  $y$  περιέχει και μηδενικά στοιχεία τότε το δίκτυο είναι μερικώς επαναληπτικό.

➤ Συνεκτικότητα

Ένα δίκτυο Petri είναι συνεκτικό, αν και μόνο αν, υπάρχει διάνυσμα  $y$  θετικών ακέραιων, διαστάσεων  $m \times 1$  τέτοιο ώστε:

$$C \cdot y = 0$$

Αν το  $y$  περιέχει και μηδενικά στοιχεία τότε το δίκτυο είναι μερικώς συνεκτικό.

➤ Αναστρεψιμότητα

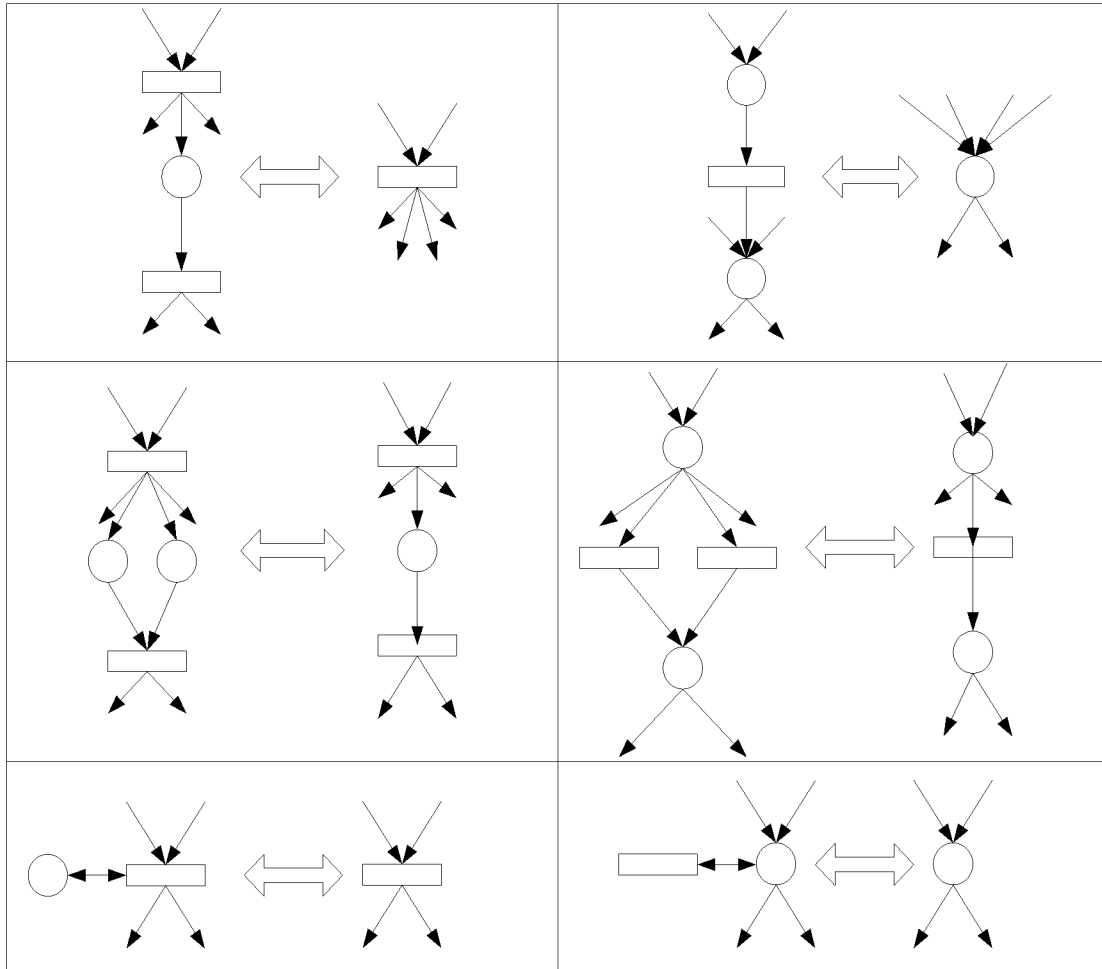
Ένα δίκτυο Petri είναι μη αναστρέψιμο, αν η εξίσωση:

$$C \cdot y = 0 \text{ παρουσιάζει μόνο τη λύση } y = 0$$

Η συνθήκη αυτή είναι απαραίτητη αλλά όχι αναγκαία.

### 2.8.3 Μετασχηματισμοί

Ένας μεγάλος περιορισμός για την ανάλυση πολύπλοκων δικτύων Petri είναι το μέγεθος τους, αφού μπορεί ένα δίκτυο να περιέχει ως και χιλιάδες τόπους και μεταβάσεις. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με την ανάλυση με μετασχηματισμούς. Οι μετασχηματισμοί έχουν ως στόχο να απλοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερο το δίκτυο, διατηρώντας όμως τις αρχικές του ιδιότητες. Η δυνατότητα ιεραρχικών δομών που έχουν τα δίκτυα Petri επιτρέπει τέτοιους μετασχηματισμούς. Στο νέο δίκτυο, μετά τους μετασχηματισμούς, μπορούν να ληφθούν οι ιδιότητες, που θα ισχύουν και για το αρχικό δίκτυο. Συνήθως τα δίκτυα που προκύπτουν μετά τους μετασχηματισμούς έχουν μικρότερο αριθμό πιθανών μαρκαρισμάτων (reachability set) γεγονός που απλοποιεί την ανάλυση τους. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται μερικοί τέτοιοι μετασχηματισμοί και μέθοδοι συμπίεσης (reduction methods).



Πίνακας 2. 1 Μετασχηματισμοί

#### 2.8.4 Προσομοίωση

Η δυναμική συμπεριφορά ενός δικτύου Petri μπορεί να αναλυθεί με την προσομοίωση του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιαστής εξετάζει πως θα συμπεριφερθεί το υπό μελέτη σύστημα κάτω από ορισμένες συνθήκες. Επίσης είναι δυνατό να βρεθούν λάθη ή παραλείψεις στο μοντέλο που έχει σχεδιαστεί.

Η προσομοίωση είναι ιδιαίτερως χρήσιμη, γιατί συχνά λόγω μεγέθους και πολυπλοκότητας του μοντέλου είναι δύσκολο για τον αναλυτή να αντιληφθεί πλήρως τη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου.

Η προσομοίωση απαιτεί τη χρήση Η/Υ με την υποστήριξη κατάλληλου λογισμικού, που θα κάνει δυνατή την καταγραφή και επεξεργασία των πληροφοριών που περιέχει το μοντέλο. Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι και το λογισμικό Artifex, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατάστρωση του μοντέλου και την προσομοίωση του.

## 2.9 Χρονισμένα δίκτυα Petri

Όπως έχει ήδη καταδειχθεί στα δίκτυα Petri μπορεί να εισαχθεί η έννοια του χρόνου. Υπάρχουν δυο τρόποι συσχέτισης του χρόνου με τα δίκτυα Petri, είτε μέσω των μεταβάσεων, είτε μέσω των τόπων.

### 2.9.1 Χρόνος και μεταβάσεις

Όταν ο χρόνος συνδέεται με τις μεταβάσεις, τότε ακολουθείται η διαδικασία της χρονομετρημένης εκπυρσοκρότησης (timed firing) όπως έγινε και στο παράδειγμα της συναρμολόγησης. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από τα εξής στάδια:

1. Αφαιρείται ακαριαία αριθμός στιγμάτων ίσος με το βάρος του βέλους εισόδου της μετάβασης από όλες τις θέσεις εισόδου.
2. Η μετάβαση μέτρα τη χρονική καθυστέρηση.
3. Μετά το τέλος της χρονικής καθυστέρησης τοποθετείται αριθμός στιγμάτων ίσος με τα βέλη εξόδου της μετάβασης σε όλους τους εξαγωγικούς της τόπους.

Μαθηματικά, ένα χρονισμένο δίκτυο Petri με χρόνους στις μεταβάσεις, συμβολίζεται ως  $\langle N, Z \rangle$ , όπου  $N = \langle P, N, Pre, Post \rangle$  είναι το δίκτυο Petri και  $Z$  μια συνάρτηση, η οποία αντιστοιχεί ένα μη αρνητικό αριθμό  $z_i$  σε κάθε μετάβαση του δικτύου  $z_i = Z(t_i)$ . Ο αριθμός αυτός ονομάζεται χρόνος εκπυρσοκρότησης της μετάβασης  $t_i$ .

### 2.9.2 Χρόνος και τόποι

Όταν ο χρόνος συνδέεται με τόπους, τότε το δίκτυο Petri μπορεί να οριστεί ως  $\langle N, R \rangle$ , όπου  $N = \langle P, T, Pre, Post \rangle$  είναι το δίκτυο Petri και  $R$  μια συνάρτηση, η οποία αντιστοιχεί έναν μη αρνητικό αριθμό  $r_i$  σε κάθε μετάβαση του δικτύου  $r_i = R(p_i)$ . Ο αριθμός αυτός ονομάζεται ελάχιστος χρόνος παραμονής στη θέση  $r_i$ . Σε ένα χρονισμένο δίκτυο Petri με χρόνους στους τόπους, τα στίγματα χαρακτηρίζονται έτοιμα ή ανέτοιμα.

Έτοιμα στίγματα σε έναν τόπο είναι αυτά που έχουν παραμείνει στον τόπο αυτό για χρόνο τουλάχιστον ίσο με τον ελάχιστο χρόνο παραμονής. Ανέτοιμα είναι τα στίγματα που έχουν παραμείνει στον τόπο λιγότερο χρόνο από τον ελάχιστο χρόνο παραμονής. Μια μετάβαση μπορεί να εκπυρσοκροτήσει μόνο όταν ενεργοποιείται από έτοιμα στίγματα.

## 2.10 Στοχαστικά χρονισμένα δίκτυα Petri

Τα δίκτυα Petri που φέρουν σαν χρονικές καθυστερήσεις ή/και ελάχιστους

---

χρόνους παραμονής στοχαστικά μεγέθη ονομάζονται στοχαστικά χρονισμένα δίκτυα. Τα στοχαστικά χρονισμένα δίκτυα παρέχουν καλύτερες δυνατότητες για πιο ρεαλιστικές μοντελοποιήσεις.

### **2.11 Έγχρωμα δίκτυα Petri (Coloured Petri Nets)**

Τα δίκτυα Petri με χρώματα είναι πολύ σημαντικά για συστήματα στα οποία η επικοινωνία, ο συγχρονισμός και το μοίρασμα των πόρων του συστήματος μεταξύ των λειτουργιών είναι σημαντικά. Έτσι τα δίκτυα αυτά είναι ικανά να μοντελοποιήσουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των λειτουργιών και ταυτόχρονα να προσδιορίσουν και να χειριστούν διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Επίσης χρησιμοποιώντας αυτά τα δίκτυα είναι δυνατό να μειώσουμε το μέγεθος ενός δικτύου, αφού παρόμοιες συνιστώσες του συστήματος μπορούν να μοντελοποιηθούν όλες μαζί, αντί να χρειάζεται να δημιουργήσουμε ξεχωριστό υποδίκτυο για καθεμιά από αυτές.

Συχνά τα στίγματα αντιπροσωπεύουν αντικείμενα (πόρους, ανθρώπους, υλικά κ.τ.λ.), των οποίων τις ιδιότητες θέλουμε να αναπαραστήσουμε. Έτσι, αντί για κλασσικά στίγματα, χρησιμοποιούμε τα χρωματισμένα στίγματα (colored tokens). Έτσι κάθε χρωματισμένο στίγμα αντιπροσωπεύει διαφορετικό αντικείμενο, καθένα με τις δικές του ιδιότητες. Οι μεταβάσεις είναι αυτές που καθορίζουν τις μετατροπές μεταξύ των διάφορων χρωματισμένων στιγμάτων. Επίσης οι μεταβάσεις μπορεί να περιέχουν κανόνες για το ποια στίγματα είναι ικανά να την ενεργοποιήσουν, που λέγονται συνθήκες (predicate ή guard). Ακόμα, και οι τόποι μπορούν να συσχετιστούν με χρωματισμένα στίγματα.

### **2.12 Δίκτυα Petri υψηλού επιπέδου (high level Petri Nets)**

Τα δίκτυα Petri υψηλού επιπέδου είναι όμοια με τα απλά δίκτυα, αλλά έχουν κάποιες επιπλέον ιδιότητες, μιας και παρέχουν κάποιες επιπλέον δυνατότητες. Αυτές είναι:

- Τα στίγματα μπορούν να μεταφέρουν μέσα τους πληροφορίες, π.χ. μεταβλητές.
- Οι τόποι μπορούν να έχουν διαφορετικούς τύπους και να δέχονται συγκεκριμένους τύπους στιγμάτων.
- Οι μεταβάσεις μπορούν να έχουν συνθήκες και ενέργειες που αλληλεπιδρούν με τις μεταβλητές των στιγμάτων.

Με τη χρήση σταθερών, μεταβλητών και συναρτήσεων η διάδοχη των

---



εκπυρσοκροτήσεων μπορεί να επηρεαστεί και έτσι το μοντέλο μπορεί να γίνει πολύ ρεαλιστικό και ο αναλυτής μπορεί να το διαμορφώσει όσο καλύτερα μπορεί. Τέτοιου είδους δίκτυα απαιτούν ανάλυση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή λόγω του όγκου πληροφοριών και υπολογισμών. Το Artifex είναι ένα λογισμικό που επιτρέπει την ανάλυση δικτύων Petri υψηλού επιπέδου.

### **3 Διοίκηση Έργων**

Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό του PMI, 2004 η Διοίκηση Έργων είναι η εφαρμογή των γνώσεων, των ικανοτήτων, των εργαλείων και των τεχνικών στις δραστηριότητες ενός έργου με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιηθούν (ή να ξεπεραστούν) οι απαιτήσεις του έργου. Η ικανοποίηση των απαιτήσεων απαιτεί διασαφήνιση των στόχων, συνεχή παρακολούθηση του έργου και έλεγχο, εξισορρόπηση τις ποιότητας, του σκοπού, του χρόνου και του κόστους.

Ένας «εναλλακτικός» ορισμός μπορεί να εκφράσει(Λεώπουλος 2001) την Διοίκηση Έργων ως την επιστήμη ( ή η «τέχνη») του να δημιουργείται η ψεύτικη εικόνα ότι ένα έργο είναι μια αλληλουχία σωστά σχεδιασμένων δραστηριοτήτων ενώ στην πραγματικότητα αυτή η αλληλουχία εξαρτάται κατα ένα πολύ μεγάλο βαθμό από την τύχη και εξωγενείς παράγοντες. Το πλαίσιο της Διοίκησης Έργων υιοθετήθηκε γιατί πρόχειροι υπολογισμοί και έλλειψη συντονισμού οδηγούσαν σε λάθος αποτελέσματα και με υπέρβαση του κόστους

#### **3.1 Τι είναι έργο**

Σύμφωνα με τον ορισμό που μας δίνει το PMI (2004), «ένα έργο είναι μία προσωρινή προσπάθεια για να δημιουργηθεί ένα μοναδικό προϊόν, υπηρεσία ή αποτέλεσμα».

Η ποιότητα ενός έργου καθορίζεται από την εξισορρόπηση τριών απαιτήσεων

- Χρόνος
- Κόστος
- Πρόοδος έργου (απόδοση)

#### **3.2 Χαρακτηριστικά Έργου**

Ένα έργο είναι προσωρινό, έχει μοναδικό αποτέλεσμα και αναπτύσσεται σταδιακά και δυναμικά (PMI, 2004).

##### **3.2.1 Προσωρινό**

Προσωρινό σημαίνει ότι κάθε έργο έχει μία συγκεκριμένη διάρκεια και δεν είναι αέναο δηλαδή έχει διακριτή αρχή και διακριτό τέλος.. Το τέλος έρχεται όταν οι σκοποί του έργου έχουν επιτευχθεί, ή όταν είναι προφανές πως οι σκοποί αυτοί δε είναι δυνατόν να επιτευχθούν είτε δεν υπάρχει πλέον ανάγκη να καλυφθούν οι ανάγκες τις οποίες θα εξυπηρετούσαν αυτοί οι σκοποί. Πάντως το προσωρινό δε σημαίνει και

σύντομα. Όπως είναι γνωστό, ένα έργο δεν είναι ανάγκη να είναι σύντομο αλλά μπορεί να διαρκέσει πολλά χρόνια.

Το προσωρινό πρέπει να τονιστεί ότι δε σχετίζεται με το αποτέλεσμα του έργου. Ένα έργο μπορεί να έχει συνέπειες (κοινωνικές, οικονομικές κλπ) για το χώρο στον οποίο γίνεται για πολλά χρόνια μετά το τέλος του.

Κυρίως μπορεί να γίνει αντιληπτή η έννοια του προσωρινού όσον αφορά:

- την ευκαιρία που δίνει η αγορά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή για να γίνει το έργο και να αποδώσει αυτό που είναι επιθυμητό.
- Την ομάδα που αναλαμβάνει να φέρει το έργο εις πέρας. Αυτή η ομάδα δημιουργείται μόνο για τους σκοπούς του έργου και όταν τελειώνει διαλύεται.

### **3.2.2 Μοναδικότητα του Αποτελέσματος**

Το αποτέλεσμα ενός έργου μπορεί να περιλαμβάνει:

- Ένα προϊόν που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και είναι αντικείμενο ή μέρος αντικειμένου.
- Μια υπηρεσία υποστήριξης παραγωγής ή διανομής.
- Ένα συμπέρασμα ή κείμενο, που θα μπορούσε π.χ. να ήταν το αποτέλεσμα ενός ερευνητικού έργου.

### **3.2.3 Προοδευτική Επεξεργασία ( Progressive Elaboration)**

Η προοδευτική επεξεργασία του έργου σημαίνει ότι αυτό αναπτύσσεται σταδιακά και όλο και νέα δεδομένα και αναθεωρήσεις θα έχουμε κατά τη διάρκειά του. Δηλαδή στην αρχή το φάσμα του έργου θα περιγράφεται γενικά και στην εξέλιξή του θα γίνεται πιο ειδικό και συγκεκριμένο καθώς η ομάδα του έργου θα αντιλαμβάνεται καλύτερα τους στόχους του έργου.

### **3.2.4 Εμπλεκόμενοι στο έργο**

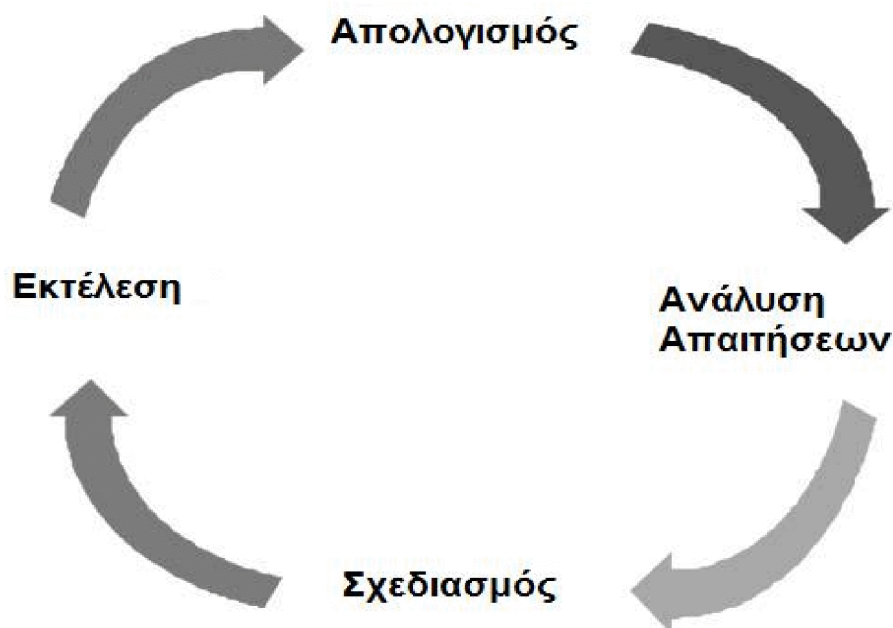
- Πελάτης: Η εταιρεία ή οργανισμός η οποία και αναθέτει το έργο. Άμεση εμπλοκή έχει φυσικά η ομάδα που η διοίκηση θα έχει ορίσει για τη συνεργασία, τον τελικό λόγο όμως θα τον έχει η κεντρική διοίκηση.
- Χρηματοδότης – ελεγκτής: Αν πρόκειται για χρηματοδότηση μέσω κοινοτικών προγραμμάτων για παράδειγμα τότε σίγουρα υπάρχει ένας ελεγκτικός οργανισμός ο οποίος και θα εποπτεύει την σωστή

απορρόφηση των κονδυλίων.

- Οργανισμός Υλοποίησης: η διοίκηση της εταιρείας η οποία και αναλαμβάνει να φέρει σε πέρας το έργο με δικά της μέσα ή ακόμα και με προς τρίτους ανάθεση (υπεργολαβία), κρατώντας πάντα την γενική ευθύνη υλοποίησης.
- Υπεύθυνος – ομάδα έργου: ο υπεύθυνος του έργου και η ομάδα που αναλαμβάνει την υλοποίηση (εγκαταστάτες, μηχανογράφοι, αναλυτές, σύμβουλοι). Ο υπεύθυνος έργου για να πετύχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα πρέπει να πετύχει όσο το δυνατόν το καλύτερο στόχο (να τον προσεγγίσει όσο το δυνατόν πιο πολύ ή να τον επιτύχει απολύτως) και αυτό με το μικρότερο κόστος και στο λιγότερο δυνατό χρόνο (Λεώπουλος 2001). Πρέπει να έχει ένα συγκεκριμένο επίπεδο ικανοτήτων στο τεχνικό και οικονομικό μάνατζμεντ και στη διαχείριση των ανθρωπίνων πόρων (Yeung και Hall 2007).

### 3.3 Κύκλος Ζωής του έργου

Οι υπεύθυνοι έργου ή οι οργανισμοί χωρίζουν ένα έργο σε φάσεις για να μπορούν να έχουν καλύτερη εποπτεία και διαχείριση. Το σύνολο αυτών των φάσεων, από την αρχή ενός έργου μέχρι την περάτωσή του, είναι ο κύκλος ζωής έργου (project life cycle) (PMI 2004).



Σχήμα 3.1 Κύκλος Έργου

Ο κύκλος ζωής του έργου περιλαμβάνει τις φάσεις του έργου από την αρχή του

---

εως το τέλος του. Τις περισσότερες φορές είναι καλύτερο να μην εμπεριέχει τις προκαταρκτικές μελέτες που κάνει ο οργανισμός υλοποίησης, όταν έχει κάποια πιθανά έργα ν'αναλάβει, ώστε να ελέγξει αν συμφέρει η δέσμευσή του σε κάποιο έργο.

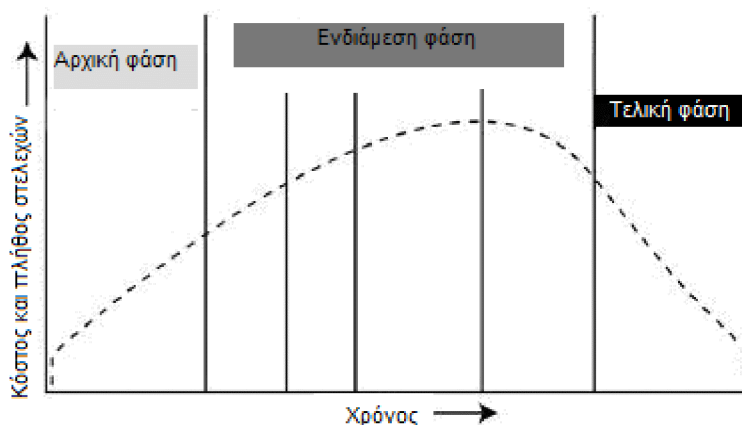
Για να συμβεί η μετάβαση από τη μία φάση στην επόμενη (ή επόμενες), πρέπει να υπάρχει ένα μεταφερόμενο αποτέλεσμα από την προηγούμενη. Τα παραδοτές της μία φάσης ελέγχονται για το κατά πόσον έχουν ολοκληρωθεί και για την ακρίβεια στις προδιαγραφές του και αν γίνουν δεκτά, ξεκινάει η εργασία στις φάσεις που ακολουθούν. Παρ' όλα αυτά δεν είναι περίεργο, ούτε σπάνιο, μία φάση να ξεκινήσει πριν τελειώσει η προηγούμενη, όταν αυτό είναι δυνατόν και οι κίνδυνοι ενός τέτοιου ενδεχόμενου είναι μέσα σε αποδεκτά όρια.

Ο κύκλος ζωής του έργου, πιο γενικά, καθορίζει:

- Τι τεχνική δουλειά θα γίνει σε κάθε φάση.
- Σε ποιο στάδιο της κάθε φάσης θα επιτρέπεται η δημιουργία των παραδοτέων και με ποιον τρόπο αυτά θα αξιολογούνται και θα επαληθεύονται.
- Ποιοί θα εμπλέκονται σε κάθε φάση.
- Πως θα ελέγχεται και θα γίνεται δεκτή η ολοκλήρωση κάθε φάσης.

Η περιγραφή ενός κύκλου ζωής έργου μπορεί να γίνει από διαγράμματα, έγγραφα, για να είναι πιο σαφής η δομή του και ο έλεγχός του. Αυτά μπορεί να είναι είτε πιο λεπτομερειακά είτε πιο γενικά, ανάλογα με τις επιθυμίες των συμμετοχόντων στο έργο. Πέρα όμως από το πως θα διαμορφώνεται ο κύκλος ζωής σε κάθε έργο, στα περισσότερα έργα διαθέτουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Οι σχέσεις μεταξύ των φάσεων είναι (τις περισσότερες φορές) αλληλοδιάδοχες και το τέλος τους καθορίζονται από ένα είδος παραδοτέας πληροφορίας ή αντικειμένου.
- Το κόστος και το πλήθος των στελεχών είναι μικρό στην αρχή, στις ενδιάμεσες φάσεις φτάνουν στην κορύφωσή τους. Όσο το έργο οδηγείται προς το τέλος του και τα δύο μειώνονται ταχύτατα (σχήμα 1.2).



**Σχήμα 3.2 Πορεία έργου**

- Η αβεβαιότητα είναι υψηλάτατη και επομένως και ο κίνδυνος αποτυχίας στην αρχή ενός έργου. Η βεβαιότητα της ολοκλήρωσης αυξάνεται προοδευτικά όσο προχωρούν επιτυχώς οι φάσεις του έργου.
- Η ικανότητα των χρηματοδοτών να επηρεάσουν τα τελικά χαρακτηριστικά του έργου είναι υψηλή στην αρχή και μειώνονται όσο πηγαίνει το έργο προς το τέλος.

### **3.4 Τομείς γνώσης της Διοίκησης Έργων**

Η Διοίκηση Έργων απαιτεί γνώσεις σε θέματα διαχείρισης ανθρώπων και υλικών, λήψης αποφάσεων, επικοινωνίας εντός και εκτός της επιχειρήσης, σχεδιασμού, διαχείρισης χρόνου, αναλύσεις οικονομικών, ολικής ποιότητας και διαχείρισης κινδύνων. Αυτό το ευρύ πεδίο χωρίζεται σε Τομείς Γνώσης. Παρακάτω αναφέρονται οι τομείς των γνώσεων που απαιτούνται και εμπλέκονται στη Διοίκηση Έργων, όπως αυτές αναφέρονται στο PMI (2004).

- Ολική διοίκηση έργων (Project Integration Management)
- Στοχοθέτηση (Project Scope Management)
- Διαχείριση Χρόνου (Project Time Management)
- Διαχείριση Κόστους (Project Cost Management)
- Διαχείριση ποιότητας (Project Quality Management)
- Διαχείριση Ανθρωπίνων Πόρων (Project Human Resource Management)
- Διαχείριση Επικοινωνίας – πληροφόρησης (Project Communication Management)
- Διαχείριση κινδύνων έργου (Project Risk Management)

- Διαχείριση προμηθειών (Project Procurement Management)

### **3.4.1 Ολική διοίκηση έργων (Project Integration Management)**

Ασχολείται με όλες τις διαδικασίες και τις δραστηριότητες που είναι αναγκαίες για τον συντονισμό του έργου ως σύνολο. Αποτυπώνει τη συνολική στρατηγική του έργου, φροντίζει για την παρακολούθησή του και ενσωματώνει οποιοσδήποτε αλλαγές γίνουν κατά τη διάρκειά του. Ολική Διοίκηση στο πλαίσιο ενός έργου, είναι να γίνονται επιλογές για το που να συγκεντρωθούν και η ανθρώπινη εργασία μια συγκεκριμένη μέρα, να αναμένει ενδεχόμενα θέματα ή προβλήματα που παρουσιαστούν, να αντιμετωπίζει αυτά τα θέματα πριν γίνουν πολύ επικίνδυνα ή κρίσιμα και να συντονίζει τις εργασίες για το γενικό καλό του έργου και την προοδό του.

Η ανάγκη για Ολική Διοίκηση γίνεται εμφανής όταν χρειάζεται η αλληλεπίδραση διεργασιών της Διοίκησης Έργων. Για παράδειγμα, μια εκτίμηση κόστους για ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης χρειάζεται τη σωστή συνεργασία διαδικασιών από διαφορετικούς τομείς, της Διαχείριση Κόστους, της Διαχείριση Χρόνου και της Διαχείριση κινδύνων. Επίσης, στην πορεία ενός έργου οι εσωτερικές διαδικασίες του έργου θα αλληλοεξαρτώνται με τα τεκταινόμενα στην επιχείρησης που εμπλέκονται, οπότε η Ολική Διοίκηση του έργου αφορά και το «περιβάλλον» του έργου.

### **3.4.2 Στοχοθέτηση (Project Scope Management)**

Ασχολείται με τις απαιτούμενες διαδικασίες για τον καθορισμό του στόχου, την αποδοχή του από τους εμπλεκόμενους και για να διασφαλιστεί ότι το έργο έχει τους πόρους που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί επιτυχώς. Αποτυπώνει το τι περιέχεται στο έργο και το τι δεν περιέχεται. Οι 5 βασικές διαδικασίες της Στοχοθέτησης είναι ο σχεδιασμός, καθορισμός, επιβεβαίωση και ο έλεγχος του στόχου και η δημιουργία της Δομής Ανάλυσης Εργασιών ( Work Breakdown Structure, WBS).

### **3.4.3 Διαχείριση Χρονοδιαγράμματος (Project Time Management)**

Εξασφαλίζει την τήρηση του χρονοδιαγράμματος του έργου και την ολοκλήρωση του στην επιθυμητή διάρκεια. Οι διεργασίες αυτού του τομέα είναι:

- Καθορισμός των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων του έργου

- Τοποθέτηση των δραστηριοτήτων σε διάγραμμα, καθορίζοντας την (χρονική) εξάρτηση ανάμεσα τους
- Εκτίμηση του είδους και της ποσότητας των πόρων που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί κάθε δραστηριότητα.
- Εκτίμηση της χρονικής διάρκειας κάθε δραστηριότητας χωριστά.
- Δημιουργία χρονοδιαγράμματος, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από τις παραπάνω διαδικασίες
- Έλεγχος του χρονοδιαγράμματος, κάνοντας και τις απαραίτητες αλλαγές και διορθωτικές κινήσεις.

Η Διαχείριση Χρονοδιαγράμματος θα εξεταστεί αναλυτικά παρακάτω καθώς αφορά το σκοπό αυτής της εργασίας.

#### **3.4.4 Διαχείριση Κόστους (Project Cost Management)**

Οι διαδικασίες αυτού του τομέα καλύπτουν όλα τα χρηματοοικονομικά στοιχεία που αφορούν το έργο και εξασφαλίζουν την τήρηση του προϋπολογισμού σε κάθε φάση του έργου και τη μη υπέρβαση του. Οι τρεις σημαντικές διαδικασίες της Διαχείρισης Χρόνου είναι η εκτίμηση του κόστους, ο συνολικός προϋπολογισμός του κόστους και ο έλεγχος του.

Η Διαχείριση Κόστους ασχολείται κυρίως με το κόστος των πόρων που απαιτούνται για τις δραστηριότητες του έργου. Αλλά είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψιν και οι συνέπειες που θα έχουν οι αποφάσεις που αφορούν το έργο στο κόστος υποστήριξης του αποτελέσματος του έργου, δηλαδή στο να διασφαλιστεί ότι το προϊόν του έργου ή η υπηρεσία θα συνεχίσει να είναι το επιθυμητό και αφού τελειώσει το έργο. Μπορεί δηλαδή η περικοπή του κόστους σε κάποια διεργασία μέσω στο έργο να αυξήσει το κόστος λειτουργίας του έργου στον πελάτη που θα παραδοθεί. Αυτή η οπτική της Διαχείρισης Κόστους ονομάζεται κοστολόγηση κύκλου ζωής (life-cycle costing). Αυτή η κοστολόγηση μαζί με οικονομικές τεχνικές μπορεί να βοηθήσει την ανάληψη αποφάσεων και να μειώσει το κόστος και τη διάρκεια του έργου.

#### **3.4.5 Διαχείριση ποιότητας (Project Quality Management)**

Οι διαδικασίες της Διαχείρισης ποιότητας καθορίζουν την πολιτική ποιότητας της του φορέα υλοποίησης του έργου, τους στόχους και τις ευθύνες, ώστε το έργο να

---



καλύπτει τις ανάγκες για τις οποίες κατασκευάστηκε και να εξασφαλίζεται η συμμόρφωσή του στα πρότυπα ποιότητας που καθορίστηκαν εξαρχής. Η Διαχείριση Ποιότητας εφαρμόζεται στην πολιτική, στις διαδικασίες και στις διεργασίες του σχεδιασμού ποιότητας, της διασφάλισης ποιότητας και του ελέγχου ποιότητας με στόχο τη συνεχή βελτίωση των διαδικασιών. Οι διαδικασίες αυτού του τομέα είναι:

- Το σχέδιο ποιότητας του έργου.
- Η διασφάλιση της ποιότητας και ο έλεγχος της ποιότητας ώστε να γίνεται σαφές αν σε συγκεκριμένους τομείς τηρούνται οι προδιαγραφές ποιότητας και να εξαλείφονται οι αιτίες που έχουν ως αποτέλεσμα μη ικανοποιητική ποιότητα.

#### **3.4.6 Διαχείριση Ανθρωπίνων Πόρων (Project Human Resource Management)**

Η Διαχείριση Ανθρωπίνων Πόρων βρίσκει εφαρμογή σε κάθε τομέα του σύγχρονου κόσμου των επιχειρήσεων. Στη Διοίκηση έργων, πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει εκείνες τις διεργασίες που ασχολούνται με την ομάδα του έργου και τον οργανωτικό σχεδιασμό της. Αυτή η ομάδα αποτελείται από άτομα που έχουν αναλάβει σαφείς ρόλους και ευθύνες για την ολοκλήρωση του έργου. Αυτή η ανάθεση και ο καθορισμός των ρόλων δεν πρέπει να γίνεται μόνο σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά τα μέλη της ομάδας οφείλουν να ασχολούνται ενεργά με την πορεία του έργου ανάλογα με το ρόλο τους. Αυτό το σύνολο ατόμων μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια του έργου είτε σε ποσότητα είτε σε ποιότητα ( γνώσεις, εμπειρία).

Οι διεργασίες αυτού του τομέα είναι:

- Δημιουργία της ομάδας εργασίας.
- Ανάπτυξη της ομάδας εργασίας, με τη βελτίωση των ικανοτήτων των μελών και της συνεργασίας τους.
- Διαχείριση της ομάδας εργασίας, δηλαδή ελέγχοντας τις επιδόσεις των μελών της και κάνοντας αλλαγές όπου είναι αναγκαίο.
- Σχεδιασμός του οργανογράμματος με την με την περιγραφή των θέσεων και των καθηκόντων.

#### **3.4.7 Διαχείριση Επικοινωνίας – Πληροφόρησης (Project Communication Management)**

Οι υπεύθυνοι των έργων συνήθως χρησιμοποιούν μεγάλο κομμάτι του χρόνου τους επικοινωνώντας με τον ανάδοχο του έργου, τον πελάτη και τα μέλη της ομάδας του. Η σωστή επικοινωνία και διακίνηση των πληροφοριών είναι απαραίτητη για τη

---

σωστή και έγκαιρη ενημέρωση όλων των εμπλεκόντων. Η Διαχείριση Επικοινωνίας παρέχει τις διεργασίες για την επίτευξη αυτού του στόχου, οι οποίες είναι συνοπτικά:

- Δημιουργία ξεκάθαρα σχεδίου επικοινωνίας.
- Έγκαιρη «διανομή» των πληροφοριών.
- Αναφορά καταστάσεων, αξιολόγησης και προόδου

Κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των εμπλεκόμενων του έργου οφείλει να έχει διασφαλιστεί η ασφάλεια των επικοινωνιών και η εμπιστευτικότητα.

### **3.4.8 Διαχείριση κινδύνων έργου (Project Risk Management)**

Η διαχείριση κινδύνων έργου περιλαμβάνει τις διαδικασίες εντοπισμού, ανάλυσης και αντιμετώπισης των κινδύνων σε ένα έργο. Ανάλυση κινδύνου είναι η διαδικασία της οποίας το αντικείμενο είναι να αναγνωρίσει, να αποτιμήσει, να μειώσει, να δεχθεί και να ελέγξει τους κινδύνους που θα εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ενός έργου, με συστηματικό, πλήρες τρόπο και με ανεκτό κόστος, λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους περιορισμούς (υλικούς, χρονικούς,οικονομικούς) (Charrel και D. Galarreta, 2007).

Βασικός στόχος της Διαχείρισης κινδύνων έργου είναι η αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης αλλά και των συνεπειών θετικών γεγονότων και αντίστοιχα η μείωση της πιθανότητας εμφάνισης και των συνεπειών αρνητικών γεγονότων.

Οι διαδικασίες αυτού του τομέα περιλαμβάνουν:

- Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων
- Αναγνώριση κινδύνων και των χαρακτηριστικών τους
- Ποιοτική ανάλυση κινδύνων, τοποθετώντας τους κινδύνους σε αύξουσα σειρά σύμφωνα με το μέγεθος των συνεπειών και τη πιθανότητα εμφάνισης, ορίζοντας έτσι και την περαιτέρω ανάλυση που θα έχει ο καθένας.
- Ποσοτική ανάλυση κινδύνων, αναλύοντας με αριθμούς την επίδραση που θα έχουν γνωστοί κίνδυνοι στο έργο
- Σχέδιο αντιμετώπισης κινδύνων, που περιλαμβάνει τρόπους δράσης για να μειωθούν οι απειλές στην προσπάθεια επίτευξης των στόχων του έργου.
- Παρακολούθηση και έλεγχος των κινδύνων

### **3.4.9 Διαχείριση προμηθειών (Project Procurement Management)**

Η διαχείριση προμηθειών καλύπτει τις διαδικασίες εκείνες οι οποίες είναι απαραίτητες για την προμήθεια υλικών ή υπηρεσιών από τρίτους για χρήση στο έργο.

Η διαχείριση προμηθειών περιλαμβάνει τη διαχείριση των συμβολαίων και τις διεργασίες που είναι απαραίτητες για να διαχειριστούν οι εντολές αγοράς από εξουσιοδοτημένα μέλη της ομάδας του έργου.

Οι διεργασίες του τομέα συνοπτικά είναι:

- Σχέδιο προμηθειών, που καθορίζει τι θα αγοραστεί, πότε και πως.
- Σχέδιο συμβολαίων, που καταγράφει τις απαιτήσεις σε προϊόντα και υπηρεσίες και τους πιθανούς πωλητές.
- Ανταπόκριση στις προτάσεις των πωλητών (request sellers responses), δηλαδή συλλογή πληροφοριών, τιμών και προσφορών από πωλητές.
- Επιλογή πωλητών, μετά από εξέταση των προσφορών και διαπραγμάτευση του συμβολαίου
- Διαχείριση συμβολαίων, αφορά το συμβόλαιο και τη σχέση ανάμεσα στον αγοραστή και τον πωλητή, καταγράφοντας την επίδοση του πωλητή, πόσο καλά ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του αγοραστή και στο συμβόλαιο και θέτει τις βάσεις για μελλοντικές συνεργασίες μεταξύ αγοραστή – πωλητή.
- Τήρηση των συμβολαίων μέχρι τελευταίου όρου και κάλυψη κάθε ζητήματος που αυτά καθορίζουν.

### **3.5 Διαχείριση Χρονοδιαγράμματος (Project Time Management)**

Στις περισσότερες των περιπτώσεων στη Διοίκηση Έργων είναι πιθανόν, αν δεν υπάρχει άλλη επιλογή να αλλάξει είτε ο σκοπός του έργου ή απλώς κάποιος στόχος, να αναθεωρηθεί η ποιότητά του ή η απαιτήσεις του, αλλά είναι πολύ δύσκολο στο να δεχθούν οι χρηματοδότες καθυστέρηση. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα στα συμβόλαια των έργων συμπεριλαμβάνονται μεγάλες ρήτρες στην περίπτωση καθυστέρησης αλλά και μπόνους στην περίπτωση νωρίτερης παράδοσης του έργου. Γίνεται επομένως κατανοητό ότι η διαχείριση χρονοδιαγράμματος και ο προγραμματισμός του έργου (project scheduling) είναι ίσως το πιο σημαντικό κομμάτι της Διοίκησης

---

Έργων. Επιπλέον το να περατωθεί ένα έργο στο σωστό χρόνο είναι δείγμα της ικανότητας και της απόδοσης του οργανισμού (Chan και Kumaraswamy, 1997).

Υπάρχει πολύ σημαντικό κομμάτι μελέτης που έχει ως θέμα της την διαχείριση χρονοδιαγράμματος. Από το 1990, οπότε οι Karshenas και Haber χώρισαν τη διαχείριση χρονοδιαγράμματος στο κομμάτι του προγραμματισμού, του χρονοδιαγράμματος και στην κατανομή των πόρων στις δραστηριότητες, φτάσαμε στο 2004 όπου σύμφωνα με το PMI ορίστηκαν ως διεργασίες οι εξής παρακάτω:

- Καθορισμός των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων του έργου.
- Τοποθέτηση των δραστηριοτήτων σε διάγραμμα, καθορίζοντας την (χρονική) εξάρτηση ανάμεσα τους
- Εκτίμηση του είδους και της ποσότητας των πόρων που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί κάθε δραστηριότητα.
- Εκτίμηση της χρονικής διάρκειας κάθε δραστηριότητας χωριστά.
- Δημιουργία χρονοδιαγράμματος, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από τις παραπάνω διαδικασίες
- Έλεγχος του χρονοδιαγράμματος, κάνοντας και τις απαραίτητες αλλαγές και διορθωτικές κινήσεις.

Το παραδοτέο αυτών των διεργασιών θα είναι το η δημιουργία της αλληλουχίας των δραστηριοτήτων του έργου, οι σχέσεις μεταξύ τους, το πότε μπορεί να ξεκινήσει κάθε μία και η ημερομηνία αρχής και τέλους κάθε δραστηριότητας. Η σπουδαιότητα αυτών των πληροφοριών γίνεται εμφανής από το γεγονός ότι ακόμα και αν δεν υπήρχαν κίνδυνοι, το έργο δε θα τελείωνε ποτέ στην προυπολογισμένη ημερομηνία αν οι διάρκειες των δραστηριοτήτων ή οι εξαρτήσεις μεταξύ τους δεν ήταν σωστές (Λεώπουλος και λοιποί, 2002).

### **3.5.1 Δομή Ανάλυση Έργου ( Work Breakdown Structure, WBS)**

Εφαρμόζοντας τη δομή ανάλυση έργου, το έργο υποδιαιρείται σε πακέτα εργασιών και παραδοτέων, που μπορούν να χειριστούν και να προγραμματιστούν από συγκεκριμένα άτομα ή ομάδες του οργανισμού (PMI 2004). Ο σκοπός της είναι να δείξει τι πρέπει να γίνει (ορισμός δραστηριότητας) και τι πρέπει να παραχθεί (παραδοτέα).

Η WBS είναι βασικό δυναμικό εργαλείο του προγραμματισμού έργων, το οποίο μπορεί να αναθεωρηθεί κατά τη διάρκεια του έργου. Παρουσιάζεται σε μορφή δέντρου όπου το αρχικό επίπεδο αναλύεται σε υποεπίπεδα και υπολειτουργίες.

---

Πρέπει να αποφεύγεται όμως η υπερβολική ανάλυση γιατί η αλληλουχία των δραστηριοτήτων είναι πολύ σημαντική για τον προγραμματισμό και επομένως η μεγάλη λεπτομέρεια και τα πολλά επίπεδα της WBS να δημιουργήσουν πρόβλημα και δυσχέρεια στον έλεγχο του έργου, αντί για ευκολία.

Η WBS λειτουργεί σαν ένας χάρτης που επιτρέπει να αναλύεται το έργο σε συνιστώσες που είναι εύκολο να χειριστούν. Σε κάθε συνιστώσα αντιστοιχεί ένας κωδικός, μια σύντομη περιγραφή, τεχνικές λεπτομέρειες, καταμερισμός ευθυνών, απαιτήσεις σε πόρους, σχετικές δραστηριότητες και πολλά άλλα αναλόγως με το είδος που έχει κάθε κομμάτι της WBS.

Να τονιστεί όμως ότι η WBS δε δείχνει τις εξαρτήσεις μεταξύ των δραστηριοτήτων, ούτε έχει υπολογιστεί χρονική διάρκεια των δραστηριοτήτων. Πολλοί ερευνητές συμφωνούν πως αυτές οι δυο πληροφορίες είναι τα πιο σημαντικά βήματα στην πορεία ενός έργου.

### **3.5.2 Διάγραμμα Δικτύου**

Με την περαιτέρω ανάλυση της WBS δημιουργείται ένας κατάλογος δραστηριοτήτων. Το επόμενο βήμα είναι να καθορίσουμε το είδος των σχέσεων και των εξαρτήσεων μεταξύ των δραστηριοτήτων. Αυτό θα γίνει με το διάγραμμα δικτύου προτεραιότητας. Είναι μία γραφική μέθοδος αναπαράστασης που απεικονίζει ένα δίκτυο δραστηριοτήτων έργου με τη μορφή κόμβων που συνδέονται με βέλη. Αυτά τα βέλη δείχνουν τις λογικές σχέσεις μεταξύ των δραστηριοτήτων.

Η ανάπτυξη του διαγράμματος δικτύου δεν είναι εύκολη υπόθεση και πρέπει να υπάρχει πολύ καλή συνεργασία και επικοινωνία μεταξύ του υπεύθυνου έργου και των υπολοίπων εμπλεκομένων στο έργο. Μια καλή αρχή για την κατάρτιση του διαγράμματος είναι η απάντηση στο ερώτημα «τι πρέπει να έχει ολοκληρωθεί πριν μπορεί να ξεκινήσει αυτή η δραστηριότητα» (Young, 1996 σελ 90).

### **3.5.3 Σχέσεις και εξαρτήσεις μεταξύ δραστηριοτήτων**

Το PMI ορίζει τέσσερα είδη λογικών εξαρτήσεων μεταξύ των δραστηριοτήτων. Αυτές είναι:

- Έναρξη μετά τη λήξη (FS, Finish-to-Start) : η έναρξη του επόμενης δραστηριότητας εξαρτάται από το τέλος της προηγούμενης. Η δραστηριότητα B δε μπορεί να ξεκινήσει πριν τελειώσει η δραστηριότητα

- A. Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος εξάρτησης. Μπορεί να υπάρξει και χρονική καθυστέρηση μεταξύ του τέλους της A και την έναρξης της B.
- Έναρξη μετά την έναρξη (SS, Start-to-Start) : η έναρξη της επόμενης δραστηριότητας εξαρτάται από την έναρξη της προηγούμενης. Η διαδικασία B μπορεί να ξεκινήσει μόλις ξεκινήσει η A, αν και συνήθως υπάρχει ένα χρονικό περιθώριο, δηλαδή η B ξεκινάει κάποιες χρονικές μονάδες μετά την A.
  - Λήξη μετά τη λήξη (FF, Finish-to-Finish) : το τέλος της επόμενης δραστηριότητας εξαρτάται από το τέλος της προηγούμενης. Αναφέρεται στη σχέση που έχουν οι ημερομηνίες λήξης των δραστηριοτήτων, πχ η δραστηριότητα B μπορεί να ολοκληρωθεί μερικές χρονικές μονάδες μετά την ολοκλήρωση της A.
  - Λήξη μετά την έναρξη (SF, Start-to-Finish) : το τέλος της επόμενης δραστηριότητας εξαρτάται από την έναρξη της προηγούμενης. Αυτό το είδος εξάρτησης χρησιμοποιείται σπάνια.

Επόμενο βήμα είναι η εύρεση των διαρκειών εκτέλεσης για κάθε μία από τις δραστηριότητες του έργου.

### 3.5.4 Χρονική διάρκεια δραστηριοτήτων

Ως χρονική διάρκεια μιας δραστηριότητας ορίζεται το χρονικό διάστημα από την έναρξη μέχρι τη λήξη της δραστηριότητας.

Αυτές οι διάρκειες συνήθως δεν είναι πραγματικές, αλλά μια προσέγγιση του χρόνου που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η δραστηριότητα (Πρωτοσύγγελος, 1994, σελ 7). Η ακρίβεια της προσέγγισης εξαρτάται από την εμπειρία των μελών της ομάδας του έργου και ιστορικά δεδομένα από άλλα έργα και παρόμοιες δραστηριότητες (Young, 1997, σελ 99).

Η διάρκεια μιας δραστηριότητας εξαρτάται άμεσα από τους πόρους που θα χρησιμοποιηθούν. Αυτό σημαίνει πως αν αυξήσουμε τους πόρους (άρα και το κόστος του έργου) που δεσμεύονται από τη συγκεκριμένη δραστηριότητα, η διάρκειά της θα μειωθεί. Επομένως πρέπει να βρεθεί η χρυσή τομή ανάμεσα στη μεγάλη διάρκεια – λίγοι πόροι – μικρό κόστος και στη μικρή διάρκεια – πολλοί πόροι – μεγάλο κόστος. Αυτό φυσικά μπορεί να αναθεωρηθεί κατά τη διάρκεια του έργου αναλόγως με τις απαιτήσεις.

### 3.6 Μέθοδοι Χρονικού Προγραμματισμού Έργων

Οι πιο σημαντικές μέθοδοι χρονικού προγραμματισμού έργων είναι η μέθοδος κρίσιμης διαδρομής (Critical Path Method (CPM – Maylor, 2003), η Τεχνική Εκτίμησης και Αναθεώρησης Προγράμματος (Program Evaluation and Review Technique) (PERT - Malcolm και λοιποί, 1959), η τεχνική γραφικής εκτίμησης και Αναθεώρησης (Graphical Evaluation and Review Technique) (GERT – Pritsker, 1996), και κάποιες μέθοδοι προσομοίωσης (Van Slyke, 1963).

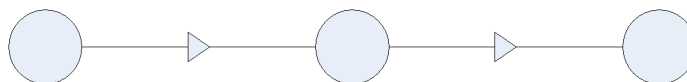
Οι μέθοδοι CPM, PERT και GERT λέγονται μέθοδοι δικτυωτής ανάλυσης. Λέγονται έτσι γιατί χρησιμοποιούν για την απεικόνισή τους τόξα και κόμβους. Έχοντας ως δεδομένα τις διάρκειες των δραστηριοτήτων και τις μεταξύ τους λογικές εξαρτήσεις, υπολογίζουν την νωρίτερη έναρξη, (ES, Early Start), τη νωρίτερη λήξη, (EF, Early Finish), την αργότερη έναρξη, (LS, Late Start) και την αργότερη λήξη (LF, Late Finish) κάθε δραστηριότητας (Turner, 1999). Αυτές οι μέθοδοι μπορούν έως ένα βαθμό να διαχειριστούν προβλήματα της διαχείρισης χρόνου όπως ο προγραμματισμός, το σχέδιο κόστους και την κατανομή των πόρων (Pagnoni, 1999).

Οι μέθοδοι CPM και PERT, αν και έχουν κάποιες διαφορές, στηρίζονται στις ίδιες αρχές και με την πάροδο των χρόνων αναφέρονται πλέον ως μια μέθοδο γι'αυτο θα παρουσιαστούν μαζί.

#### 3.6.1 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής CPM – PERT

Η μέθοδος CPM είναι ένας αλγόριθμος που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1950 από την εταιρεία Du-Pont για τον προγραμματισμό της κατασκευής και συντήρησης ενός χημικού εργοστασίου και εφαρμόστηκε με μεγάλη επιτυχία.

Στηρίζεται αρχικά στη θεωρία των γράφων. Κάθε δραστηριότητα απεικονίζεται από ένα βέλος και η έναρξη και η λήξη της από έναν κόμβο.



Σχήμα 3.3 Αλληλουχία δραστηριοτήτων.

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια απλή αλληλουχία 2 δραστηριοτήτων. Ο πρώτος κόμβος συμβολίζει την έναρξη της πρώτης δραστηριότητας, το επόμενο βέλος τη διάρκειά της, ο μεσαίος κόμβος τη λήξη της και την έναρξη της επόμενης δραστηριότητας. Φυσικά δε γίνεται πάντα να έχουν όλες εξάρτηση. Οπότε

χρησιμοποιείται μια απεικόνιση του παρακάτω σχήματος. Για να έχει περισσότερες πληροφορίες το διάγραμμα χρησιμοποιούνται τα τετράγωνα δραστηριοτήτων, όπου καταγράφονται όλες οι πληροφορίες της κάθε δραστηριότητας. Αυτές είναι:

- Νωρίτερη Έναρξη
- Νωρίτερη Λήξη
- Αργότερη Έναρξη
- Αργότερη Λήξη
- Αριθμός (κωδικός) δραστηριότητας
- Περιθώριο (slack ή activity float) : υποδηλώνει το πόσες μέρες μπορεί να καθυστερήσει ή να επεκταθεί η διάρκεια μιας δραστηριότητας χωρίς να επηρεαστεί η ημερομηνία λήξης του έργου.

Συνήθως αυτό το τετράγωνο έχει τη μορφή του σχήματος 3.4.

Νωρίτερη Έναρξη	Διάρκεια	Νωρίτερη Έναρξη
Αριθμός Δραστηριότητας		
Αργότερη Έναρξη	Περιθώριο	Αργότερη Λήξη

**Σχήμα 3.4**

Έστω ότι έχουμε τις εξής δραστηριότητες: Α,Β,Γ,Δ,Ε,ΣΤ. Ο πίνακας 3.1 δείχνει τις δραστηριότητες με τις διάρκειες τους και τις εξαρτήσεις τους. Έστω ότι οι διάρκειες είναι σε μέρες.

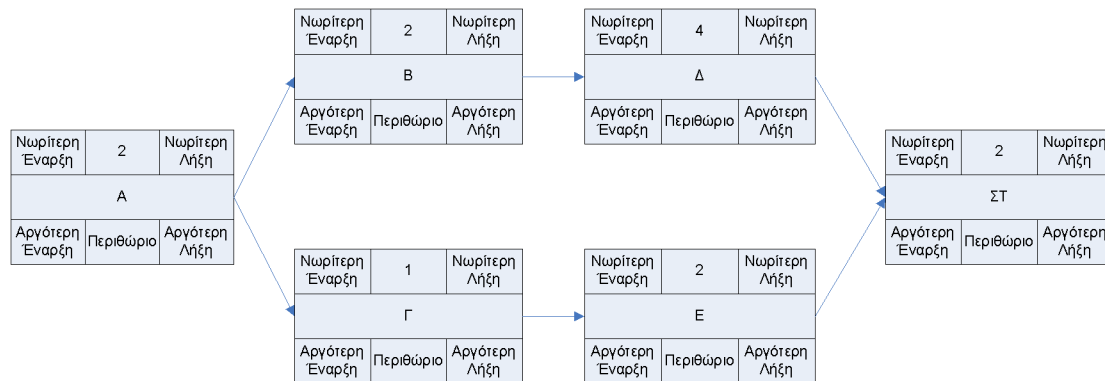
Δραστηριότητα	Προηγούμενη Δραστηριότητα	Διάρκεια Δραστηριότητας (σε μέρες)
A	-	2
B	A	2
Γ	A	1
Δ	B	4
Ε	Γ	2
ΣΤ	Δ,Ε	2

**Πίνακας 3.1 Σχέσεις και διάρκειες δραστηριοτήτων**

Σύμφωνα με αυτόν τον πίνακα κατασκευάζεται το παρακάτω δίκτυο, το οποίο πρέπει αρχικά να επιλυθεί από έναρξη προς το τέλος για να υπολογιστούν οι ημερομηνίες των νωρίτερων ενάρξεων και νωρίτερων λήξεων. Απαραίτητο σε κάθε έργο είναι να καθορίζεται η ημερομηνία έναρξης του. Στο παράδειγμα ορίζεται ως



έναρξη η μέρα 1.



Σχήμα 3.5 Δίκτυο CPM

Για να υπολογίζουμε την νωρίτερη έναρξη μιας δραστηριότητας αν προσθέσουμε τη διάρκεια της δραστηριότητας στην ημερομηνία νωρίτερης έναρξής της, αφαιρώντας μία μέρα, δηλαδή:

$$\text{Νωρίτερη λήξη(A)} = \text{Νωρίτερη Έναρξη(A)} + \text{Διάρκεια(A)} - 1$$

Για παράδειγμα, η νωρίτερη λήξη της A είναι  $1 + 2 - 1 = 2$ . Άρα η δραστηριότητα A θα ξεκινήσει την πρώτη μέρα και θα περατωθεί στο τέλος της δεύτερης μέρας.

Η νωρίτερη έναρξη υπολογίζεται με τον εξής τρόπο:

$$\text{Νωρίτερη Έναρξη(B)} = \text{Νωρίτερη Λήξη(A)} + 1$$

που ουσιαστικά εκφράζει το γεγονός ότι η B μπορεί να ξεκινήσει την επόμενη από τη λήξη της A. Δηλαδή την τρίτη μέρα. Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε τη νωρίτερη έναρξη και λήξη για όλες τις δραστηριότητες:

1.  $EF(B) = ES(B) + 2 - 1 = 3 + 2 - 1 = 4$
2.  $ES(\Gamma) = EF(A) + 1 = 2 + 1 = 3$
3.  $EF(\Gamma) = ES(\Gamma) + 1 - 1 = 3$
4.  $ES(\Delta) = EF(B) + 1 = 4 + 1 = 5$
5.  $EF(\Delta) = ES(\Delta) + 4 - 1 = 8$
6.  $ES(E) = EF(\Gamma) + 1 = 3 + 1 = 4$
7.  $EF(E) = ES(E) + 2 - 1 = 4 + 2 - 1 = 5$
8.  $ES(\Sigma\text{T}) = EF(\Delta) + 1 = 9$
9.  $EF(\Sigma\text{T}) = ES(\Sigma\text{T}) + 2 - 1 = 10$

Στην περίπτωση της διαδικασίας ΣΤ, επειδή έχουμε 2 δραστηριότητες που καταλήγουν σε αυτήν, χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη τιμή νωρίτερης λήξης για τον υπολογισμό της νωρίτερης έναρξής της.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της αργότερης έναρξης και αργότερης λήξης των δραστηριοτήτων, θα επιλυθεί το δίκτυο από το τέλος προς την αρχή. Η

ημερομηνία αργότερης λήξης της τελευταίας δραστηριότητας θα είναι η αργότερη λήξη. Για να υπολογιστεί η αργότερη έναρξη χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\underline{LS(B) = LF(B) - \text{Διάρκεια}(B) + 1}$$

και για τον υπολογισμό της αργότερης λήξης η σχέση:

$$\underline{LF(A) = LS(B) - 1}$$

Ο υπολογισμός όλων των δραστηριοτήτων γίνεται παρακάτω:

1.  $LF(\Sigma T) = EF(\Sigma T) = 10$
2.  $LS(\Sigma T) = LF(\Sigma T) - 2 + 1 = 9$
3.  $LF(\Delta) = LS(\Sigma T) - 1 = 8$
4.  $LS(\Delta) = LF(\Delta) - 4 + 1 = 5$
5.  $LF(E) = LS(\Sigma T) - 1 = 8$
6.  $LS(E) = LF(E) - 2 + 1 = 7$
7.  $LF(\Gamma) = LS(E) - 1 = 6$
8.  $LS(\Gamma) = LF(F) - 1 + 1 = 6$
9.  $LF(B) = LS(\Delta) - 1 = 4$
10.  $LS(B) = LF(B) - 2 + 1 = 3$
11.  $LF(A) = LS(B) - 1 = 2$
12.  $LS(A) = LF(A) - 2 + 1 = 1$

Στην επίλυση από το πέρας προς την αρχή, αν πολλές δραστηριότητες οδηγούν σε μία, όπως στην περίπτωση των Β,Γ που οδηγούν στην Α, χρησιμοποιείται η μικρότερη τιμή αργότερης έναρξης, δηλαδή στην περίπτωση αυτή της Β που είναι η μέρα 3.

Για να ολοκληρωθεί το διάγραμμα πρέπει να υπολογιστούν όλα τα περιθώρια. Υποδηλώνει το πόσες χρονικές μονάδες μπορεί να καθυστερήσει η έναρξη της δραστηριότητας ή να επεκταθεί η διάρκειά της χωρίς αυτό να επηρεάσει την ημερομηνία λήξης του έργου ή κάποια ενδιάμενη ημερομηνία. Το περιθώριο υπολογίζεται από τη σχέση:

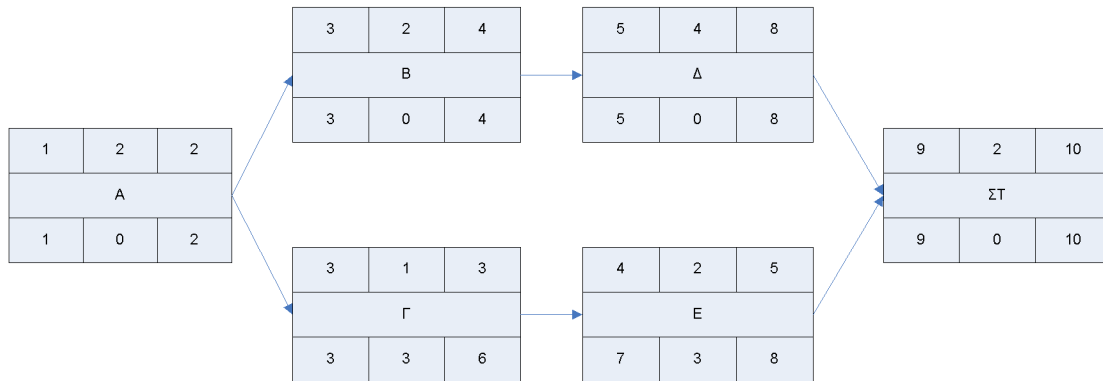
$$\underline{\text{Χρονικό περιθώριο} = \text{Αργότερη Έναρξη} - \text{Νωρίτερη Έναρξη} = \text{Αργότερη Λήξη} - \text{Νωρίτερη Λήξη}}$$

Επομένως έχουμε:

1.  $S(A) = 2 - 2 = 0$
2.  $S(B) = 4 - 4 = 0$
3.  $S(\Gamma) = 6 - 3 = 3$

4.  $S(\Delta) = 8-8 = 0$
5.  $S(E) = 8-5 = 3$
6.  $S(\Sigma\text{T}) = 10-10 = 0$

Το τελικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6



Σχήμα 3.6

Οι δραστηριότητες A,B,Δ,ΣΤ έχουν χρονικό περιθώριο 0. Αυτό σημαίνει ότι αυτές οι δραστηριότητες βρίσκονται πάνω στην κρίσιμη διαδρομή (critical path) και οποιαδήποτε καθυστέρηση σε αυτές θα καθυστερήσει ολόκληρο το έργο.

Το PERT αναπτύχθηκε το 1958 από το ναυτικό των ΗΠΑ, με σκοπό τον επιστημονικό προγραμματισμό της κατασκευής των βαλλιστικών πυραύλων Polaris. Η σημαντική διαφορά του PERT με το απλό CPM είναι ότι στο CPM οι διάρκειες είναι καθαρά ντετερμινιστικές και απόλυτες, ενώ στο PERT λαμβάνεται υπόψιν η αβεβαιότητα στη διάρκεια των δραστηριοτήτων. Το PERT υποθέτει ότι οι διάρκειες των δραστηριοτήτων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατανομή, συνήθως Beta (Kirytopoulos και λοιποί, 2007). Κάθε διάρκεια έχει μια πιο πιθανή διάρκεια, την πιο αισιόδοξη πρόβλεψη(a) και την πιο απαισιόδοξη(b). Από αυτές τις 3 εκτιμήσεις προκύπτει η ντετερμινιστική τιμή της διάρκειας των δραστηριοτήτων σύμφωνα με τη σχέση:

$$T = (a + 4c + b) / 6$$

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση και εκτιμήσεις των 3 τιμών. Ο πίνακας 1.1 παίρνει την παρακάτω μορφή:

Δραστηριότητα	Αισιόδοξη εκτίμηση διάρκειας a	Πιο πιθανή διάρκεια c	Απαισιόδοξη εκτίμηση διάρκειας b	Ντετερμινιστική διάρκεια δραστηριότητας (σε μέρες)
A	1	2	4	2,17
B	1	2	3	2

Δραστηριότητα	Αισιόδοξη εκτίμηση διάρκειας a	Πιο πιθανή διάρκεια c	Απαισιόδοξη εκτίμηση διάρκειας b	Ντετερμινιστική διάρκεια δραστηριότητας (σε μέρες)
Γ	1	1	2	1,17
Δ	3	4	7	4,33
Ε	1	2	3	2
ΣΤ	1	2	4	2,17

Πίνακας 3.2

Επομένως οι υπολογισμοί του διαγράμματος PERT θα γίνουν με αυτές τις διάρκειες.

Οι Nasir και λοιποί (2003) και Διαμάντας και λοιποί (2006) διατυπώνουν το σημαντικό περιορισμό της μέθοδο PERT στο χρονικό προγραμματισμό έργων, ο οποίος πηγάζει από τους ίδιους τους περιορισμούς του Θεωρήματος Κεντρικών Ορίων, και είναι αναγκασμένη να ακολουθεί σε κάθε δραστηριότητα την ίδια κατανομή ενώ οι δραστηριότητες και οι κατανομές τους είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Επιπροσθέτως αναγνωρίζει μόνο μία κρίσιμη διαδρομή, η οποία έχει υπολογιστεί και με ντετερμινιστικές τιμές και δε λαμβάνει υπόψιν την επίδραση των υποκρίσιμων δρόμων στη διάρκεια του έργου (Douglas, 1978, Nasir και λοιποί, 2003) Τέλος, επηρεάζεται από τους κινδύνους που συνδέονται μόνο με την αβεβαιότητα στη διάρκεια των δραστηριοτήτων.

### 3.6.2 Μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo (Monte Carlo Simulation, MCS)

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι πιθανότατα η πιο γνωστή και συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος ποσοτικής ανάλυσης κινδύνων. Το όνομα δόθηκε από τον πολωνό μαθηματικό Ulam, το οποίο δανείστηκε από το γνωστό καζίνο, γιατί η MCS στηρίζεται στη θεωρία των τυχαίων αριθμών. Ο Ulam εργάστηκε κατά την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου στο "Manhattan Project" των αμερικανικών ενόπλων δυνάμεων με σκοπό την ανάπτυξη ατομικών όπλων.

Η θεωρία της Monte Carlo μπορεί να γίνει αντιληπτή εύκολα με το παρακάτω παράδειγμα. Ρίχνοντας ένα ζάρι 100 φορές, η κάθε τιμή από το 1 έως το 6 θα έχει εμφανιστεί περίπου 1/6 των 100, αλλά όχι ακριβώς λόγω του ότι το ρίξιμο του ζαριού είναι τυχαίο. Αν όμως οι φορές γίνουν 1000, τότε η κατανομή θα είναι πιο κοντά στο 1/6 και αν γίνουν 1000000 τότε θα είναι ακόμα πιο κοντά στο 1/6.

Για να γίνει εμφανές το πως μπορεί η MCS να εφαρμοστεί στη διοίκηση έργων, θα υποθεθεί ότι ένα έργο έχει τις δραστηριότητες με τη ντετερμινιστική διάρκεια που φαίνονται στον πίνακα 1.4, με σειριακή εξάρτηση.

Δραστηριότητα	Διάρκεια
A1	10
A2	10
A3	35
A4	20
A5	15
A6	20
Συνολική διάρκεια:	110

**Πίνακας 3.3**

Σύμφωνα με τον πίνακα 1.3, η διάρκεια του συνολικού έργου θα ήταν ακριβώς 110 χρονικές μονάδες, κάτι που είναι φανερά λάθος. Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα καθυστέρησης ή λήξη του έργου πριν από αυτήν τη διάρκεια. Η διάρκεια των δραστηριοτήτων θα γίνει στη MCS με εκτίμηση τριών σημείων (Wang, 2005). Ελλείψει περισσότερων στοιχείων η διάρκεια των δραστηριοτήτων στο έργο θα περιγράφεται από τριγωνική κατανομή με αισιόδοξη, πιθανή και απαισιόδοξη εκτίμηση, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.4.

Δραστηριότητα	Αισιόδοξη	Πιο Πιθανή	Απαισιόδοξη
A1	8	10	14
A2	7	10	15
A3	20	35	60
A4	16	20	25
A5	12	15	25
A6	10	20	30
Συνολική διάρκεια:		110	

**Πίνακας 3.4**

Κάθε διάρκεια θα μπορεί να λάβει τιμή από την αισιόδοξη εκτίμηση μέχρι και την απαισιόδοξη, σύμφωνα με την τριγωνική κατανομή, όπως προαναφέρθηκε. Έστω  $T_i$  η τιμή που θα πάρει η διάρκεια. Το άθροισμα των διαρκειών θα είναι η αντικειμενική συνάρτηση της MCS:

$$\Sigma\Delta = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6$$

Στη συνέχεια η κάθε διάρκεια λαμβάνει μια τυχαία τιμή. Έστω ότι είναι τιμές είναι 9, 9, 36, 24, 12 και 30 για τις μεταβλητές  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  και  $T_6$  αντίστοιχα. Τότε η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 120. Που σημαίνει ότι σε αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση η συνολική διάρκεια του έργου μας θα ήταν 120 χρονικές μονάδες. Όμως, όπως και πριν με το παράδειγμα του ζαριού, έτσι και εδώ μπορούν να υπάρξουν πολλές επαναλήψεις της προσομοίωσης του έργου. Κάθε φορά οι διάρκειες θα λαμβάνουν διαφορετικές τιμές, σύμφωνα με μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών, άρα και η διάρκεια θα είναι διαφορετική. Στο τέλος θα υπάρχει ένα σύνολο τιμών της συνολικής διάρκειας, το οποίο θα μπορεί να επεξεργαστεί στατιστικά και να βρεθεί η σωρευτική κατανομή πιθανότητάς της.

Η προσομοίωση με Monte Carlo λαμβάνει υπόψιν τις αλλαγές στη κρίσιμη διαδρομή και την επίδραση των «υποκρίσιμων δρόμων» (Douglas, 1978). Ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα της είναι ότι μπορεί να μοντελοποιήσει με πολύ καλή προσέγγιση τους κινδύνους και την επίδραση που θα έχουν αυτοί στη διάρκεια του έργου. Παρ'όλα αυτά η προσομοίωση Monte Carlo έχει ως μειονέκτημα την πολύ μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από τη μέθοδο CPM/PERT και απαιτεί περισσότερο χρόνο και πολύ περισσότερη υπολογιστική ισχύ (Διαμάντας και λοιποί, 2006).

## 4 Δημιουργία και Περιγραφή του Δικτύου Petri

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το δίκτυο Petri του έργου. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του μοντέλου είναι το Artifex της Faber Software. Το Artifex δε χρησιμοποιεί την ελληνική γραμματοσειρά οπότε οι όροι που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτό θα αναφέρονται στα αγγλικά.

### 4.1 Έργο

Το κατασκευαστικό έργο που παρουσιάζεται είναι ένας μεσαίας κλίμακας έργο στο νησί της Χίου. Αφορά την κατασκευή πολλών οκιστικών κτιρίων.

Το έργο αποτελείται από 68 δραστηριότητες οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1, όπως αυτό υπάρχουν στο αρχείο MS Project του έργου.

ID	Δομή Ανάλυσης εργασιών	Όνομα δραστηριότητας	Διάρκεια	Έναρξη	Λήξη	Προηγούμενη Δραστηριότητα
1	1	Έναρξη Εργασιών	0 ημέρες	10/5/2004	10/5/2004	
2	2	<b>Διοίκηση Έργου</b>	<b>291 ημέρες</b>	<b>10/5/2004</b>	<b>20/6/2005</b>	1
3	2.1	<b>Εργοταξιακές Εγκαταστάσεις</b>	<b>15 ημέρες</b>	<b>10/5/2004</b>	<b>28/5/2004</b>	
4	2.1.1	Εργοταξιακές εγκαταστάσεις	5 ημέρες	10/5/2004	14/5/2004	1
5	2.1.2	Προμήθεια & τοποθέτηση εξωτερικής περίφραξης από γαλβανισμένη λαμαρίνα	5 ημέρες	17/5/2004	21/5/2004	4
6	2.1.3	Προμήθεια και τοποθέτηση δίφυλλης ανοιγόμενης εξωτερικής μεταλλικής πόρτας στην περίφραξη πλάτους 6m	5 ημέρες	24/5/2004	28/5/2004	5
7	2.2	<b>Εργασίες Χωματοουργικών</b>	<b>55 ημέρες</b>	<b>31/5/2004</b>	<b>13/8/2004</b>	
8	2.2.1	Εκσκαφή- Μεταφορά εκτός	10 ημέρες	31/5/2004	11/6/2004	3
9	2.2.2	Εκσκαφή- Μεταφορά εντός	10 ημέρες	31/5/2004	11/6/2004	3
10	2.2.3	Εξυγιάνσεις	10 ημέρες	14/6/2004	25/6/2004	
11	2.2.3.1	Επίχωση με υγιή προϊόντα	5 ημέρες	14/6/2004	18/6/2004	8

ID	Δομή ανάλυσης εργασιών	Όνομα δραστηριότητας	Διάρκεια	Έναρξη	Λήξη	Προηγούμενη Δραστηριότητα
12	2.2.3.2	Θραυστό Υλικό	5 ημέρες	21/6/2004	25/6/2004	11
13	2.2.4	Θεμελιώσεις	10 ημέρες	2/8/2004	13/8/2004	
14	2.2.4.1	Επίχωση με υγιή προϊόντα	5 ημέρες	2/8/2004	6/8/2004	22
15	2.2.4.2	Τοποθέτηση Γεωφάσματος	1 ημέρα	9/8/2004	9/8/2004	14
16	2.2.4.3	Θραυστό Υλικό	5 ημέρες	9/8/2004	13/8/2004	14
17	2.2.4.4	Τοποθέτηση Γεωφάσματος	1 ημέρα	9/8/2004	9/8/2004	14
18	2.2.4.5	Υλικό 3Α	5 ημέρες	9/8/2004	13/8/2004	14
19	2.2.4.6	Τοποθέτηση NYLON	1 ημέρα	9/8/2004	9/8/2004	14
20	2.3	<b>Εργασίες Σκυροδετήσεων</b>	<b>100 ημέρες</b>	<b>28/6/2004</b>	<b>12/11/2004</b>	
21	2.3.1	Σκυρόδεμα καθαριότητας (άοπλο)	5 ημέρες	28/6/2004	2/7/2004	12
22	2.3.2	Σκυρόδεμα οπλισμένο θεμελιώσεων	20 ημέρες	5/7/2004	30/7/2004	21
23	2.3.3	Σκυρόδεμα εδαφόπλακας	5 ημέρες	16/8/2004	20/8/2004	18
24	2.3.4	Σκυρόδεμα σκελετού	50 ημέρες	23/8/2004	29/10/2004	23
25	2.3.5	Πλήρης Μόνωση Ανεστραμμένου Δώματος	10 ημέρες	1/11/2004	12/11/2004	24
26	2.4	<b>Εργασίες Τοιχοδομών</b>	<b>30 ημέρες</b>	<b>4/10/2004</b>	<b>12/11/2004</b>	
27	2.4.1	Τοιχοδομές	30 ημέρες	4/10/2004	12/11/2004	24FS -40%
28	2.4.2	Πρέκια & σενάζ από οπλισμένο σκυρόδεμα	30 ημέρες	4/10/2004	12/11/2004	24FS -40%
29	2.5	<b>Εργασίες Επιχρισμάτων</b>	<b>30 ημέρες</b>	<b>2/11/2004</b>	<b>13/12/2004</b>	
30	2.5.1	Εσωτερικές επιφάνειες	30 ημέρες	2/11/2004	13/12/2004	26FS -30%
31	2.5.2	Εξωτερικές επιφάνειες	30 ημέρες	2/11/2004	13/12/2004	26FS -30%
32	2.5.3	Σκωτίες επιχρισμάτων	30 ημέρες	2/11/2004	13/12/2004	26FS -30%
33	2.6	<b>Εργασίες Μαρμάρων</b>	<b>10 ημέρες</b>	<b>26/11/2004</b>	<b>9/12/2004</b>	
34	2.6.1	Εργασίες μαρμάρινων ποδιών	10 ημέρες	26/11/2004	9/12/2004	36
35	2.7	<b>Εργασίες Δαπέδων</b>	<b>57 ημέρες</b>	<b>19/11/2004</b>	<b>7/2/2005</b>	

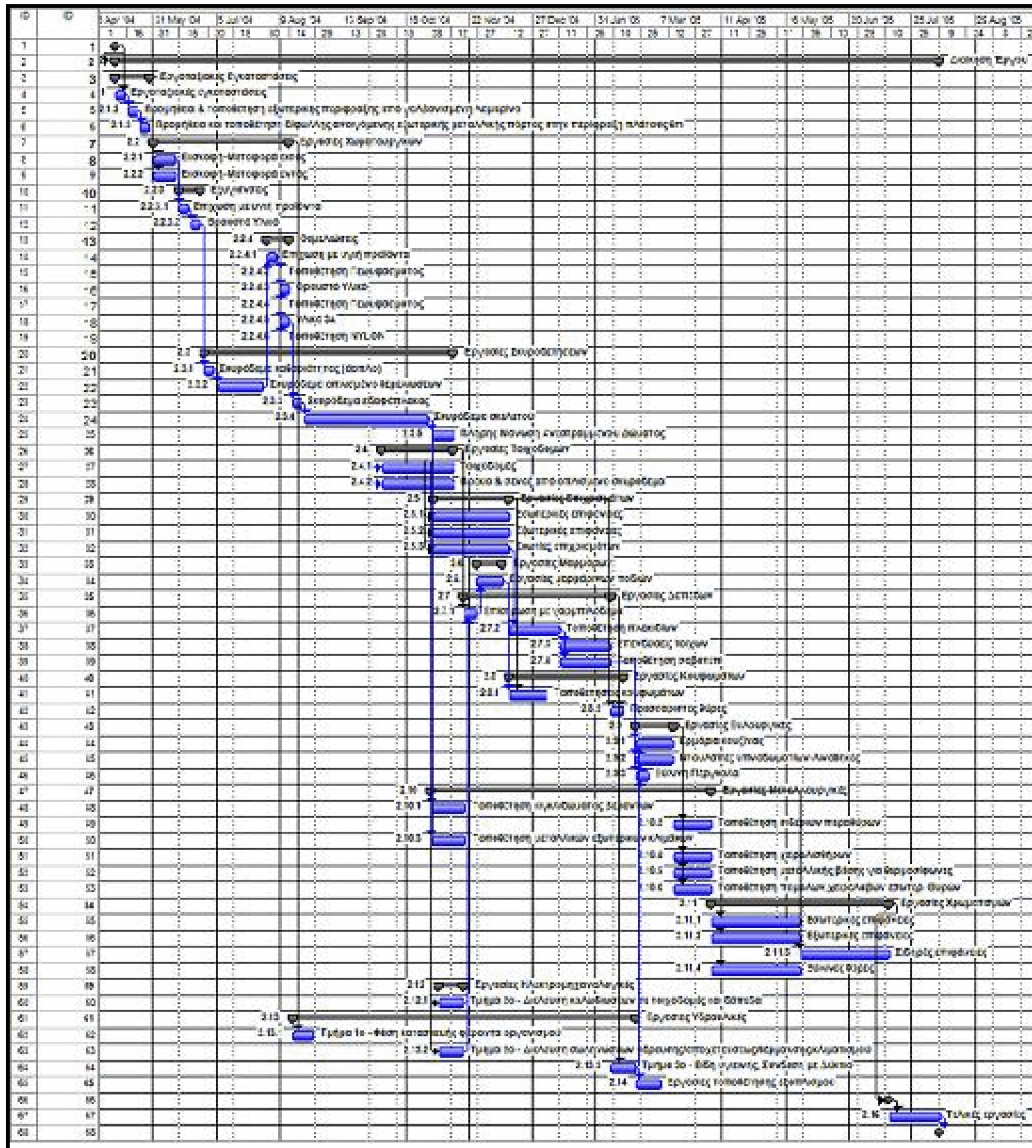


ID	Δομή ανάλυσης εργασιών	Όνομα δραστηριότητας	Διάρκεια	Έναρξη	Λήξη	Προηγούμενη Δραστηριότητα
36	2.7.1	Επίστρωση με γαρμπιλόδεμα	5 ημέρες	19/11/2004	25/11/2004	26;60 ,63
37	2.7.2	Τοποθέτηση πλακιδίων	20 ημέρες	14/12/2004	10/1/2005	32
38	2.7.3	Επενδύσεις τοίχων	20 ημέρες	11/1/2005	7/2/2005	37
39	2.7.4	Τοποθέτηση σοβατεπί	20 ημέρες	11/1/2005	7/2/2005	37
40	2.8	<b>Εργασίες Κουφωμάτων</b>	<b>45 ημέρες</b>	<b>14/12/2004</b>	<b>14/2/2005</b>	
41	2.8.1	Τοποθετήσεις κουφωμάτων	15 ημέρες	14/12/2004	3/1/2005	29;34
42	2.8.2	Πρεσσαριστές θύρες	5 ημέρες	8/2/2005	14/2/2005	29;35
43	2.9	<b>Εργασίες Ξυλουργικές</b>	<b>15 ημέρες</b>	<b>22/2/2005</b>	<b>14/3/2005</b>	
44	2.9.1	Ερμάρια κουζίνας	15 ημέρες	22/2/2005	14/3/2005	64;39
45	2.9.2	Ντουλάπες υπνοδωματίων- Λινοθήκες	15 ημέρες	22/2/2005	14/3/2005	64;39
46	2.9.3	Ξύλινη Πέργκολα	5 ημέρες	22/2/2005	28/2/2005	64;39
47	2.10	<b>Εργασίες Μεταλλουργικές</b>	<b>111 ημέρες</b>	<b>1/11/2004</b>	<b>4/4/2005</b>	
48	2.10.1	Τοποθέτηση κιγκλιδώματος βεραντών	15 ημέρες	1/11/2004	19/11/2004	24
49	2.10.2	Τοποθέτηση σιδεριών παραθύρων	15 ημέρες	15/3/2005	4/4/2005	43
50	2.10.3	Τοποθέτηση μεταλλικών εξωτερικών κλιμάκων	15 ημέρες	1/11/2004	19/11/2004	24
51	2.10.4	Τοποθέτηση χειρολισθήρων	15 ημέρες	15/3/2005	4/4/2005	43
52	2.10.5	Τοποθέτηση μεταλλικής βάσης για θερμοσίφωνες	15 ημέρες	15/3/2005	4/4/2005	43
53	2.10.6	Τοποθέτηση πομόλων, χειρολαβ ών εσωτερ. θυρών	15 ημέρες	15/3/2005	4/4/2005	43
54	2.11	<b>Εργασίες Χρωματισμών</b>	<b>35 ημέρες</b>	<b>5/4/2005</b>	<b>23/5/2005</b>	
55	2.11.1	Εσωτερικές επιφάνειες	35 ημέρες	5/4/2005	23/5/2005	47
56	2.11.2	Εξωτερικές επιφάνειες	35 ημέρες	5/4/2005	23/5/2005	47
57	2.11.3	Σιδηρές επιφάνειες	35 ημέρες	5/4/2005	23/5/2005	47
58	2.11.4	Ξύλινες θύρες	35 ημέρες	5/4/2005	23/5/2005	47

ID	Δομή ανάλυσης εργασιών	Όνομα δραστηριότητας	Διάρκεια	Έναρξη	Λήξη	Προηγούμενη Δραστηριότητα
59	2.12	<b>Εργασίες Ηλεκτρομηχανολογικές</b>	<b>10 ημέρες</b>	<b>5/11/2004</b>	<b>18/11/2004</b>	
60	2.12.1	Τμήμα 2ο - Διέλευση καλωδιώσεων σε τοιχοδομές και δάπεδα	10 ημέρες	5/11/2004	18/11/2004	26FS -20%
61	2.13	<b>Εργασίες Υδραυλικές</b>	<b>136 ημέρες</b>	<b>16/8/2004</b>	<b>21/2/2005</b>	
62	2.13.1	Τμήμα 1ο - Φάση κατασκευής φέροντα οργανισμού	10 ημέρες	16/8/2004	27/8/2004	7
63	2.13.2	Τμήμα 2ο - Διέλευση σωληνώσεων ύδρευσης/αποχετε ύσεως/θέρμανσης/ κλιματισμού	10 ημέρες	5/11/2004	18/11/2004	26FS -20%
64	2.13.3	Τμήμα 3ο - Είδη υγιεινής, Σύνδεση με Δίκτυο	10 ημέρες	8/2/2005	21/2/2005	35
65	2.14	<b>Εργασίες τοποθέτησης εξοπλισμού</b>	<b>10 ημέρες</b>	<b>22/2/2005</b>	<b>7/3/2005</b>	<b>64</b>
66	2.15	<b>Προσωρινή παραλαβή</b>	<b>0 ημέρες</b>	<b>23/5/2005</b>	<b>23/5/2005</b>	<b>54</b>
67	2.16	<b>Τελικές εργασίες</b>	<b>20 ημέρες</b>	<b>24/5/2005</b>	<b>20/6/2005</b>	<b>66</b>
68	2.17	<b>Οριστική παραλαβή</b>	<b>0 ημέρες</b>	<b>20/6/2005</b>	<b>20/6/2005</b>	<b>67</b>

Πίνακας 4.1 Πίνακας Δραστηριοτήτων

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα Gantt του έργου, από το αρχείο MS Project του έργου. Φαίνονται οι κωδικοί της δομής ανάλυσης εργασιών και οι ονομασίες των δραστηριοτήτων.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα Gantt Έργου

Οι διάρκειες που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 είναι οι ντετερμινιστικές. Η διάρκεια του έργου με βάση αυτές τις διάρκειες είναι 291 μέρες. Σύμφωνα με εμπειρία από προηγούμενα έργα εκτιμήθηκαν επίσης οι πιο αισιόδοξες (ελάχιστες) τιμές της διάρκειας των δραστηριοτήτων και οι πιο απαισιόδοξες (μέγιστες) (πίνακας 3.2).

Δομή Ανάλυσης εργασιών	Δραστηριότητα	Ελάχιστη διάρκεια	Πιο πιθανή διάρκεια	Μέγιστη διάρκεια
2.1.2	Προμήθεια & τοποθέτηση εξωτερικής περιφραξης από γαλβανισμένη λαμαρίνα	4	5	6

Δομή Ανάλυσης εργασιών	Δραστηριότητα	Ελάχιστη διάρκεια	Πιο πιθανή διάρκεια	Μέγιστη διάρκεια
2.1.3	Προμήθεια και τοποθέτηση δίφυλλης ανοιγόμενης εξωτερικής μεταλλικής πόρτας στην περίφραξη πλάτους 6m	4	5	6
2.2.1	Εκσκαφή-Μεταφορά εκτός	9	10	13
2.2.2	Εκσκαφή-Μεταφορά εντός	9	10	14
2.2.3.1	Επίχωση με υγιή προϊόντα	4	5	6
2.2.3.2	Θραυστό Υλικό	4	5	6
2.2.4.1	Επίχωση με υγιή προϊόντα	4	5	6
2.2.4.2	Τοποθέτηση Γεωυφάσματος	1	1	1
2.2.4.3	Θραυστό Υλικό	4	5	6
2.2.4.4	Τοποθέτηση Γεωυφάσματος	1	1	1
2.2.4.5	Υλικό 3Α	4	5	7
2.2.4.6	Τοποθέτηση NYLON	1	1	1
2.3.1	Σκυρόδεμα καθαριότητας (άσπλο)	4	5	7
2.3.2	Σκυρόδεμα οπλισμένο θεμελιώσεων	18	20	26
2.3.3	Σκυρόδεμα εδαφόπλακας	4	5	6
2.3.4	Σκυρόδεμα σκελετού	46	50	60
2.3.5	Πλήρης Μόνωση Ανεστραμμένου Δώματος	8	10	15
2.4.1	Τοιχοδομές	24	30	41
2.4.2	Πρέκια & σενάζ από οπλισμένο σκυρόδεμα	26	30	36
2.5.1	Εσωτερικές επιφάνειες	24	30	41
2.5.2	Εξωτερικές επιφάνειες	24	30	41
2.5.3	Σκωτίες επιχρισμάτων	24	30	41
2.6.1	Εργασίες μαρμάρινων ποδιών	8	10	14
2.7.1	Επίστρωση με γαρμπιλόδεμα	4	5	6
2.7.2	Τοποθέτηση πλακιδίων	18	20	24
2.7.3	Επενδύσεις τοίχων	18	20	25
2.7.4	Τοποθέτηση σοβατεπί	17	20	27
2.8.1	Τοποθετήσεις κουφωμάτων	13	15	18
2.8.2	Πρεσσαριστές θύρες	4	5	8
2.9.1	Ερμάρια κουζίνας	12	15	19
2.9.2	Ντουλάπες υπνοδωματίων-Λινοθήκες	12	15	19
2.9.3	Ξύλινη Πέργκολα	4	5	6
2.10.1	Τοποθέτηση κιγκλιδώματος βεραντών	13	15	17
2.10.2	Τοποθέτηση σιδερίων παραθύρων	13	15	17
2.10.3	Τοποθέτηση μεταλλικών εξωτερικών κλιμάκων	13	15	17
2.10.4	Τοποθέτηση χειρολισθήρων	13	15	17
2.10.5	Τοποθέτηση μεταλλικής βάσης για θερμοσίφωνες	13	15	17
2.10.6	Τοποθέτηση πομόλων, χειρολαβών εσωτερ. θυρών	13	15	17

Δομή Ανάλυσης εργασιών	Δραστηριότητα	Ελάχιστη διάρκεια	Πιο πιθανή διάρκεια	Μέγιστη διάρκεια
2.11.1	Εσωτερικές επιφάνειες	30	35	42
2.11.2	Εξωτερικές επιφάνειες	30	35	42
2.11.3	Σιδηρές επιφάνειες	30	35	42
2.11.4	Ξύλινες θύρες	30	35	42
2.12.1	Τμήμα 2ο - Διέλευση καλωδιώσεων σε τοιχοδομές και δάπεδα	7	10	16
2.13.1	Τμήμα 1ο - Φάση κατασκευής φέροντα οργανισμού	7	10	14
2.13.2	Τμήμα 2ο - Διέλευση σωληνώσεων ύδρευσης/αποχετεύσεως/θέρμανσης/κλιματισμο	7	10	14
2.13.3	Τμήμα 3ο - Είδη υγιεινής, Σύνδεση με Δύκτιο	7	10	16
2.14	Εργασίες τοποθέτησης εξοπλισμού	7	10	14
2.16	Τελικές εργασίες	14	20	35

Πίνακας 4.2 Διάρκειες

## 4.2 Κατασκευή δικτύου

Η κατασκευή του δικτύου ακολούθησε τη λογική του υποδικτύου (subnet) στο Artifex, ώστε να είναι εύκολη η εποπτεία του. Χρησιμοποιήθηκε δηλαδή το εικονίδιο

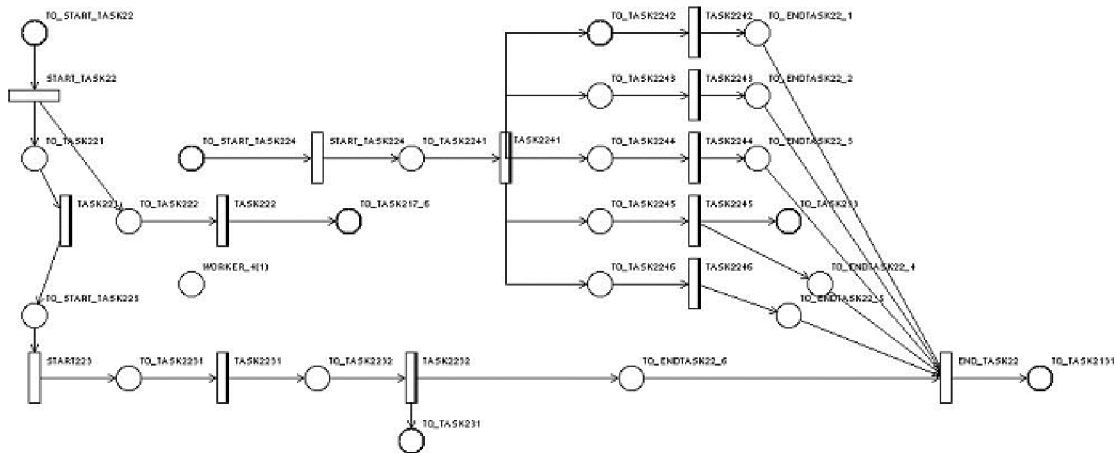


. Τα υποδίκτυα στα οποία χωρίστηκε το συνολικό δίκτυο είναι οι περιληπτικές δραστηριότητες του έργου (summary tasks) και θα αναφέρονται ως φάσεις. Παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 με έντονη γραμματοσειρά και είναι συνολικά 15. Το πρώτο υποδίκτυο, έναρξη εργασιών, χρησιμοποιείται αν και δεν έχει διάρκεια, για να επιτευχθεί και να φαίνεται καθαρά η επαναληπτικότητα του έργου.

### 4.2.1 Πρώτη φάση κατασκευής

Σε πρώτη φάση δημιουργήθηκε το δίκτυο με τις πιο πιθανές τιμές διάρκειες . Δόθηκε μεγάλη προσοχή στις προγενέστερες και μεταγενέστερες δραστηριότητες της κάθε δραστηριότητας. Εφοσον με τις απόλυτες τιμές επαληθευθηκε πως η διάρκεια του είναι 291 μέρες και επομένως σωστά σχεδιάστηκε. Η κεντρική σελίδα του δικτύου (πρώτο επίπεδο δικτύου) φαίνεται στο σχήμα 4.2.





**Σχήμα 4.3 Υποδίκτυο χρωματουργικών εργασιών χωρίς πόρους**

Από τον κοινό τόπο `TO_START_TASK22`, που φαίνεται και στη κεντρική σελίδα, το στίγμα εισέρχεται στο υποδίκτυο, που σημαίνει ότι ξεκινούν οι δραστηριότητες των χρωματουργικών εργασιών. Οι ονομασίες που χρησιμοποιήθηκαν στις μεταβάσεις του Artifex για τις αντίστοιχες δραστηριότητες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αναφέρουν τον κωδικό δομής ανάλυσης εργασιών, όπως αυτός αναγράφεται στο πίνακα 4.2.

Πρέπει να τονιστεί πως δεν είναι ανάγκη να τελειώσει μια φάση του έργου για να προχωρήσει το έργο. Μια δραστηριότητα μπορεί να έχει επόμενη ή προηγούμενη μια δραστηριότητα που δεν είναι η πρώτη ή η τελευταία σε ένα υποδίκτυο. Όπως για παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 4.3, η δραστηριότητα 2.3.1 έχει προηγούμενη την δραστηριότητα 2.2.3.2.

Σε κάποιες περιπτώσεις έχει επιλεχθεί να χρησιμοποιηθούν μεταβάσεις χωρίς διάρκεια, που δεν προσφέρουν διάρκεια στο έργο αλλά χρειάζονται για να υποδηλώνουν την αρχή ή το τέλος μιας φάσης έργου, αφού κάποιες φορές ως προηγούμενη δραστηριότητα ορίζεται μια ολόκληρη φάση έργου, όπως για παράδειγμα η δραστηριότητα 2.1.3.1 που έχει ως προηγούμενη δραστηριότητα τις χρωματουργικές εργασίες.

#### 4.2.1 Δεύτερη φάση κατασκευής

Σε δεύτερη φάση έπρεπε να γίνουν στοχαστικές οι διάρκειες των δραστηριοτήτων.

Έχει ήδη αναφερθεί πως έχουν ήδη εκτιμηθεί οι πιο αισιόδοξες και οι πιο απαισιόδοξες τιμές διάρκειας των δραστηριοτήτων, όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2. Η κατανομή που χρησιμοποιήθηκε είναι η τριγωνική. Για να

μοντελοποιηθεί η κατανομή στο δίκτυο χρησιμοποιήθηκε κώδικας C στο πεδίο «δράση» (action) κάθε μετάβασης.

Για την κατανομή χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις

- Διάρκεια δραστηριότητας =  $a + (dx * (b-a) * (c-a))^{1/2}$  αν  $dx < 0,5$
- Διάρκεια δραστηριότητας =  $b - ((-dx + 1) * (b-a) * (b-c))^{1/2}$  αν  $dx \geq 0,5$

Όπου  $dx$  ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ  $[0,1)$ . Πριν χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις στο δίκτυο έγινε δοκιμαστική χρήση από την οποία προέκυψε ένα σύνολο τιμών. Από το στατιστικό τεστ που έγινε σε αυτό το σύνολο τιμών επαληθεύτηκε ότι όντως αυτές οι σχέσεις μοντελοποιούν την τριγωνική κατανομή.

#### 4.2.2 Τρίτη φάση κατασκευής

Στην τρίτη και τελευταία φάση της κατασκευής του δικτύου μοντεποϊήθηκαν οι πόροι στο έργο, που ήταν και το πιο απαιτητικό κομμάτι.

Στο αρχικό αρχείο του MS Project τοποθετήθηκαν δέκα εργάτες ως πόροι που θα χρησιμοποιηθούν στο έργο και δηλώθηκαν οι εργάτες που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε δραστηριότητα. Η κατανομή των πόρων φαίνεται στον πίνακα 4.3.

Δομή ανάλυσης εργασιών	Όνομα δραστηριότητας	Πόροι (αριθμός)
1	Έναρξη Εργασιών	
2	<b>Διοίκηση Έργου</b>	
2.1	<b>Εργοταξιακές Εγκαταστάσεις</b>	
2.1.1	Εργοταξιακές εγκαταστάσεις	Εργάτες (3)
2.1.2	Προμήθεια & τοποθέτηση εξωτερικής περιφραξης από γαλβανισμένη λαμαρίνα	Εργάτες (3)
2.1.3	Προμήθεια και τοποθέτηση δίφυλλης ανοιγόμενης εξωτερικής μεταλλικής πόρτας στην περιφραξη πλάτους 6m	Εργάτες (3)
2.2	<b>Εργασίες Χωματοουργικών</b>	
2.2.1	Εκσκαφή-Μεταφορά εκτός	Εργάτες (5)
2.2.2	Εκσκαφή-Μεταφορά εντός	Εργάτες (6)
2.2.3	Εξυγιάνσεις	
2.2.3.1	Επίχωση με υγιή προϊόντα	Εργάτες (3)
2.2.3.2	Θραυστό Υλικό	Εργάτες (3)
2.2.4	Θεμελιώσεις	
2.2.4.1	Επίχωση με υγιή προϊόντα	Εργάτες (2)
2.2.4.2	Τοποθέτηση Γεωυφάσματος	Εργάτες (2)
2.2.4.3	Θραυστό Υλικό	Εργάτες (4)

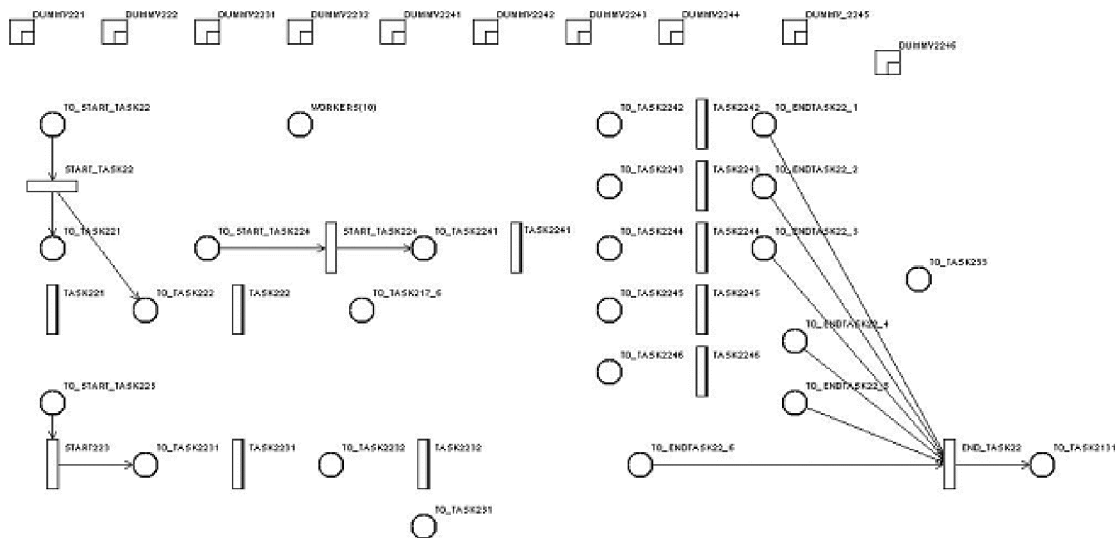


Δομή ανάλυσης εργασιών	Όνομα δραστηριότητας	Πόροι (αριθμός)
2.2.4.4	Τοποθέτηση Γεωυφάσματος	Εργάτες (2)
2.2.4.5	Υλικό 3Α	Εργάτες (4)
2.2.4.6	Τοποθέτηση NYLON	Εργάτες (2)
2.3	<b>Εργασίες Σκυροδετήσεων</b>	
2.3.1	Σκυρόδεμα καθαριότητας (άοπλο)	Εργάτες (2)
2.3.2	Σκυρόδεμα οπλισμένο θεμελιώσεων	Εργάτες (5)
2.3.3	Σκυρόδεμα εδαφόπλακας	Εργάτες (2)
2.3.4	Σκυρόδεμα σκελετού	Εργάτες (4)
2.3.5	Πλήρης Μόνωση Ανεστραμμένου Δώματος	Εργάτες (3)
2.4	<b>Εργασίες Τοιχοδομών</b>	
2.4.1	Τοιχοδομές	Εργάτες (3)
2.4.2	Πρέκια & σενάζ από οπλισμένο σκυρόδεμα	Εργάτες (2)
2.5	<b>Εργασίες Επιχρισμάτων</b>	
2.5.1	Εσωτερικές επιφάνειες	Εργάτες (2)
2.5.2	Εξωτερικές επιφάνειες	Εργάτες (2)
2.5.3	Σκωτίες επιχρισμάτων	Εργάτες (3)
2.6	<b>Εργασίες Μαρμάρων</b>	
2.6.1	Εργασίες μαρμάρινων ποδιών	Εργάτες (2)
2.7	<b>Εργασίες Δαπέδων</b>	
2.7.1	Επίστρωση με γαρμπιλόδεμα	Εργάτες (3)
2.7.2	Τοποθέτηση πλακιδίων	Εργάτες (2)
2.7.3	Επενδύσεις τοίχων	Εργάτες (2)
2.7.4	Τοποθέτηση σοβατεπί	Εργάτες (3)
2.8	<b>Εργασίες Κουφωμάτων</b>	
2.8.1	Τοποθετήσεις κουφωμάτων	Εργάτες (3)
2.8.2	Πρεσσαριστές θύρες	Εργάτες (2)
2.9	<b>Εργασίες Ξυλουργικές</b>	
2.9.1	Ερμάρια κουζίνας	Εργάτες (3)
2.9.2	Ντουλάπες υπνοδωματίων-Λινοθήκες	Εργάτες (5)
2.9.3	Ξύλινη Πέργκολα	Εργάτες (4)
2.10	<b>Εργασίες Μεταλλουργικές</b>	
2.10.1	Τοποθέτηση κιγκλιδώματος βεραντών	Εργάτες (3)
2.10.2	Τοποθέτηση σιδερίων παραθύρων	Εργάτες (4)
2.10.3	Τοποθέτηση μεταλλικών εξωτερικών κλιμάκων	Εργάτες (3)
2.10.4	Τοποθέτηση χειρολισθήρων	Εργάτες (4)
2.10.5	Τοποθέτηση μεταλλικής βάσης για θερμοσίφωνες	Εργάτες (3)

Δομή ανάλυσης εργασιών	Όνομα δραστηριότητας	Πόροι (αριθμός)
2.10.6	Τοποθέτηση πομόλων, χειρολαβών εσωτερ. θυρών	Εργάτες (3)
2.11	<b>Εργασίες Χρωματισμών</b>	
2.11.1	Εσωτερικές επιφάνειες	Εργάτες (4)
2.11.2	Εξωτερικές επιφάνειες	Εργάτες (4)
2.11.3	Σιδηρές επιφάνειες	Εργάτες (5)
2.11.4	Ξύλινες θύρες	Εργάτες (2)
2.12	<b>Εργασίες Ηλεκτρομηχανολογικές</b>	
2.12.1	Τμήμα 2ο - Διέλευση καλωδιώσεων σε τοιχοδομές και δάπεδα	Εργάτες (3)
2.13	<b>Εργασίες Υδραυλικές</b>	
2.13.1	Τμήμα 1ο - Φάση κατασκευής φέροντα οργανισμού	Εργάτες (2)
2.13.2	Τμήμα 2ο - Διέλευση σωληνώσεων ύδρευσης/αποχετεύσεως/θέρμανσης/κλιματισμού	Εργάτες (4)
2.13.3	Τμήμα 3ο - Είδη υγιεινής, Σύνδεση με Δίκτυο	Εργάτες (3)
2.14	<b>Εργασίες τοποθέτησης εξοπλισμού</b>	Εργάτες (4)
2.15	Προσωρινή παραλαβή	
2.16	Τελικές εργασίες	Εργάτες (5)
2.17	Οριστική παραλαβή	

Πίνακας 4.3 Κατανομή πόρων

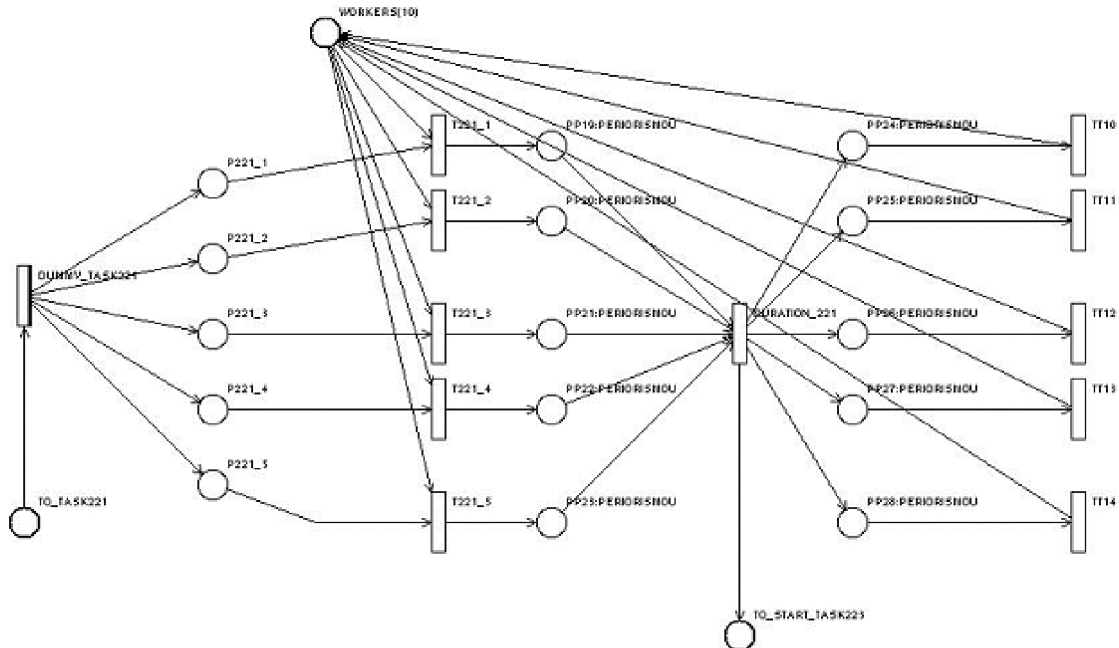
Επομένως στο δίκτυο τοποθετήθηκε ένας τόπος με ονομασία WORKERS και με δέκα στίγματα, ένα για κάθε εργάτη. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ένα συγκεκριμένο μοντούλ για τη χρησιμοποίηση τόσων εργατών όσων είναι απαραίτητο.



**Σχήμα 4.4 Υποδίκτυο χρωματουργικών εργασιών με πόρους**

Το υποδίκτυο των χρωματουργικών εργασιών παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Παρατηρείται πως έχουν σβηστεί οι συνδέσεις μεταξύ των δραστηριοτήτων και για κάθε δραστηριότητα έχει κατασκευαστεί το αντίστοιχο υποδίκτυο, ως μία «ψεύτικη» δραστηριότητα (εξού και ο όρος dummy). Το σίγμα πλέον μετακινείται μέσω αυτών των υποδικτύων (το τρίτο επίπεδο στην ιεραρχία).

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η δομή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δραστηριότητες για τη δέσμευση και απελευθέρωση των πόρων στο σωστό χρονικό σημείο. Είναι το υποδίκτυο της δραστηριότητας 2.2.1.

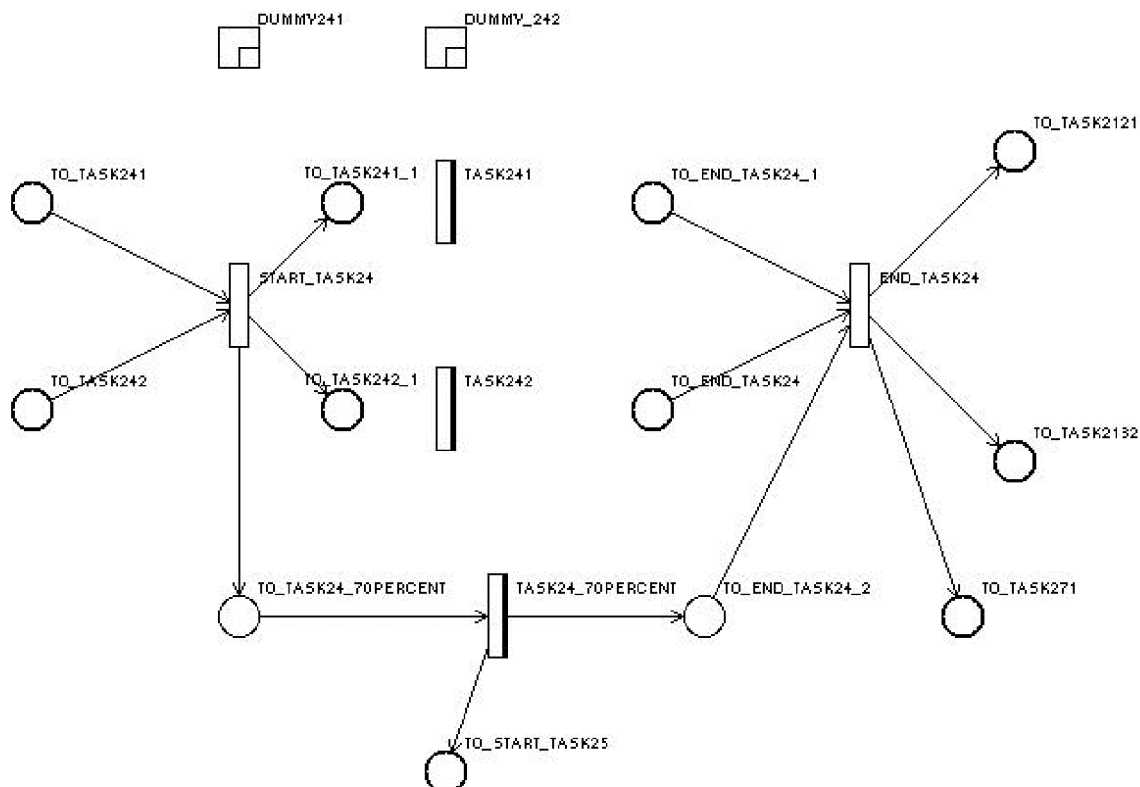


**Σχήμα 4.5 Υποδίκτυο δραστηριότητας 2.2.1**

Η δραστηριότητα, σύμφωνα με τον πίνακα 4.3, απαιτεί 5 εργάτες. Η διάρκεια της δραστηριότητας πλέον υπολογίζεται στη μετάβαση DUMMY\_TASK221, δηλαδή αυτή

εμπεριέχει τον κώδικα της τριγωνικής κατανομής. Όμως με εντολή του Artifex, η τιμή της διάρκειας που υπολογίζεται χρησιμοποιείται από την μετάβαση DURATION\_221, οπότε αυτή έχει τη διάρκεια της δραστηριότητας 2.2.1 και η μετάβαση DUMMY\_TASK221 έχει μηδενική.

Αξίζει εδώ να αναφερθεί πως η ίδια εντολή έχει χρησιμοποιηθεί σε κάποιες δραστηριότητες που ενώ έχουν μεταξύ τους σχέση έναρξης μετά τη λέξη της προηγούμενης (Finish-to-Start), ξεκινούν κατά ένα ποσοστό νωρίτερα ή αργότερα, όπως για παράδειγμα οι δραστηριότητες των επιχρισμάτων όταν έχει ολοκληρωθεί το 70% της περιληπτικής δραστηριότητας 2.4 Το σχήμα 4.6 παρουσιάζει αυτό ακριβώς.

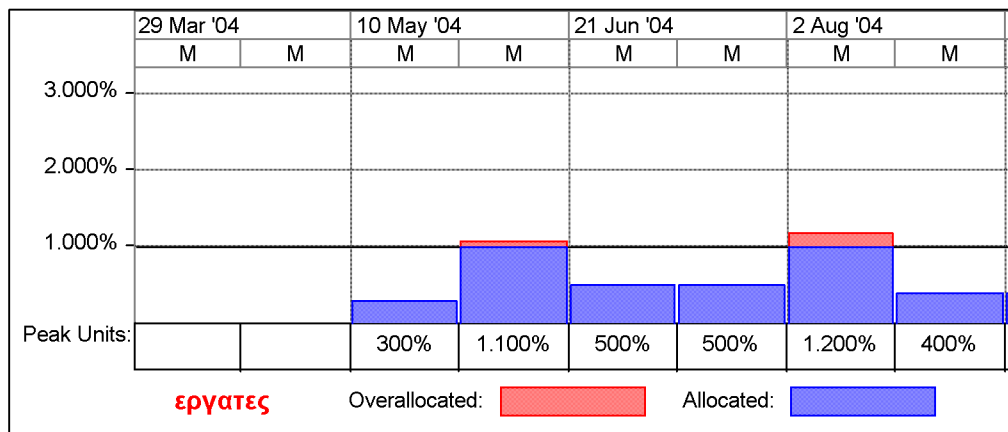


Σχήμα 4.6 Υποδίκτυο τοιχοδομών

Για να δεσμεύσει 5 στίγματα η μετάβαση DURATION\_221 μέχρι να εκπυρσοκροτήσει (επομένως 5 εργάτες η δραστηριότητα 2.2.1, για όσο χρόνο διαρκεί), προηγούνται 5 μεταβάσεις χωρίς διάρκεια, ώστε η καθεμία να δεσμεύει έναν εργάτη. Αν δεν εκπυρσοκροτήσει μία από αυτές τις μεταβάσεις, δηλαδή δεν υπάρχει ένας ή περισσότεροι εργάτες διαθέσιμοι, δε γίνεται να εκπυρσοκροτήσει και η μετάβαση DURATION\_221, οπότε δεν ξεκινάει η δραστηριότητα. Όταν και οι 5 αυτές μεταβάσεις έχουν δεσμεύσει από ένα στίγμα και το στείλουν στους τόπους πριν από την DURATION\_221, μόνο τότε θα εκπυρσοκροτήσει αυτή και επομένως θα έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία. Σε εκείνη τη χρονική στιγμή θα αρχίσουν να

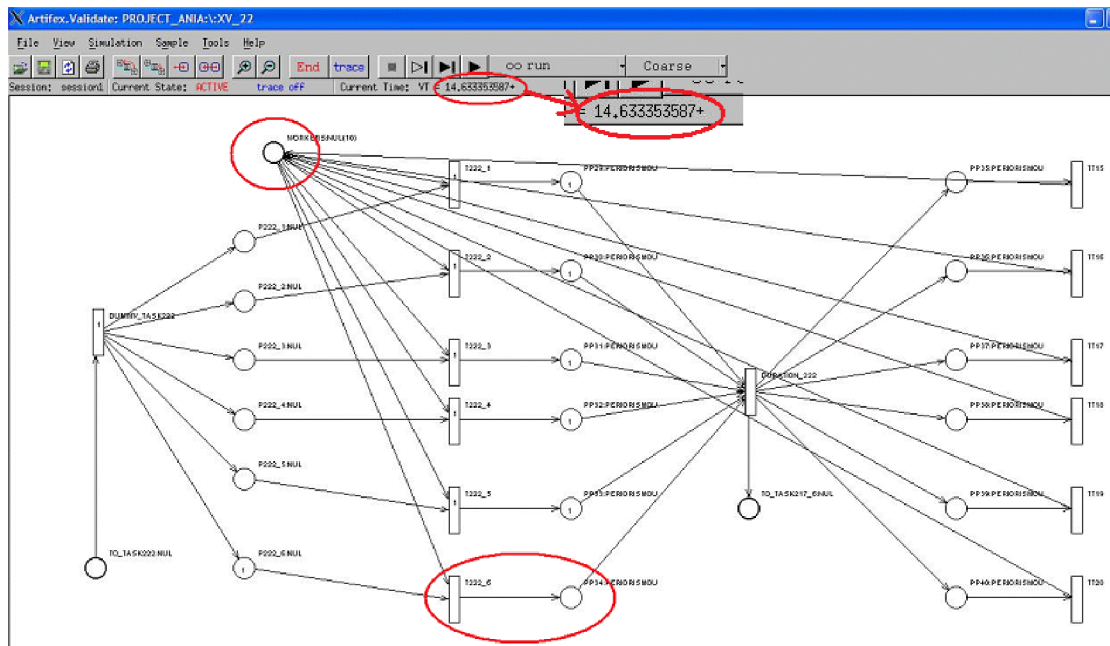
αποδεσμεύονται τα 5 στίγματα και γυρίζουν στον τόπο WORKERS για να δεσμευτούν από επόμενες δραστηριότητες ενώ ένα στίγμα πηγαίνει προς τη δραστηριότητα 2.2.3 μέσω του κοινού τόπου TO\_START\_TASK223 για να συνεχιστεί το έργο.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αρκετοί εργάτες για να ξεκινήσει μια δραστηριότητα θα περιμένει μέχρι να τελειώσει κάποια άλλη και να αποσμέυσει τους δικούς της εργάτες, επομένως θα καθυστερούν οι δραστηριότητες. Θα δοθεί ένα παράδειγμα του περιορισμού αυτού, λόγω της έλλειψης εργατών. Στο σχήμα 4.7, που δείχνει το γράφημα των πόρων από το MS Project του έργου, φαίνεται πως ο



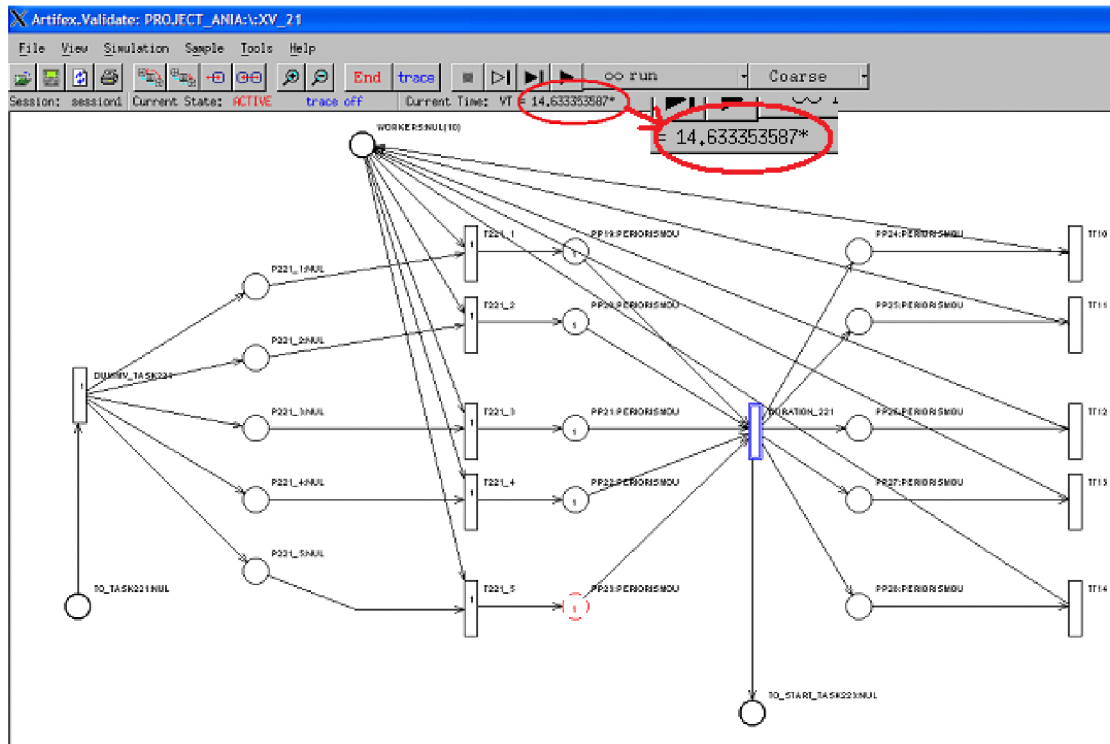
Σχήμα 4.7 Διαγράμμα πόρων

πρώτος περιορισμός εμφανίζεται στις χωματουργικές εργασίες, στις δραστηριότητες 2.2.1 και 2.2.2, όπου ενώ υπάρχουν 10 εργάτες, αυτές οι δύο δραστηριότητες που γίνονται ταυτόχρονα, ζητούν 5 και 6 εργάτες αντίστοιχα. Επομένως η δραστηριότητα 2.2.2 πρέπει να καθυστερήσει για να αποδεσμευτεί ένας εργάτης από την 2.2.1 και να ξεκινήσει ύστερα.



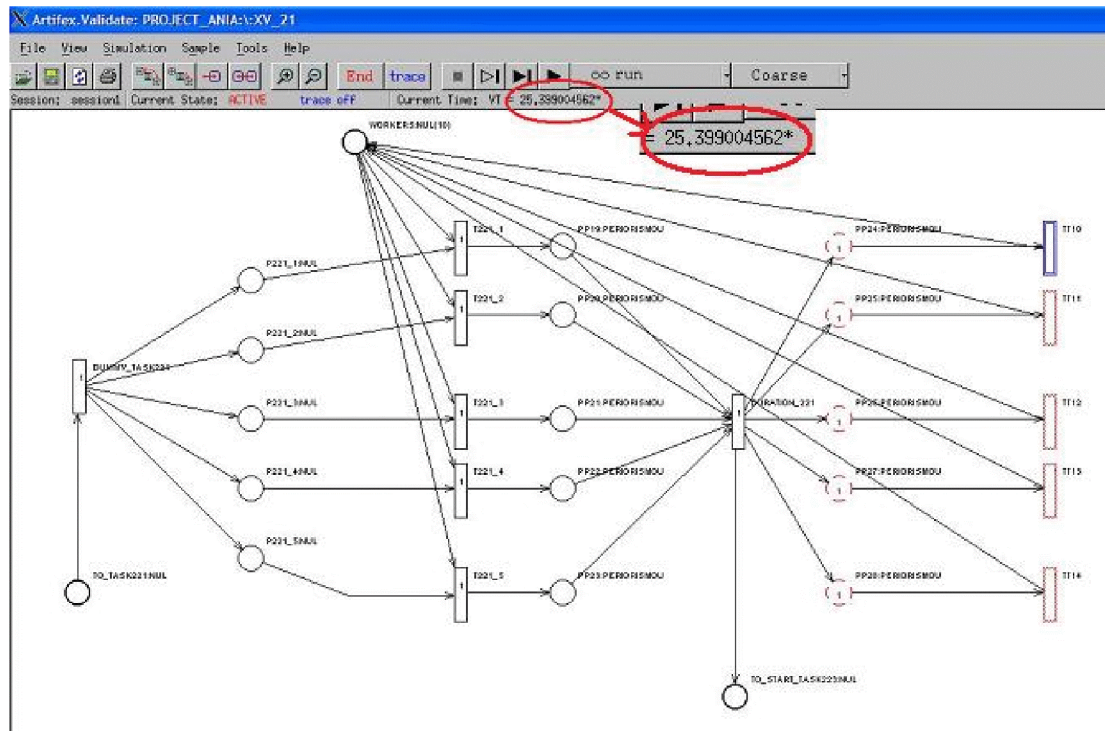
Σχήμα 4.8

Στο σχήμα 4.8, που είναι ένα καρέ από τη προσομοίωση στο Artifex του υποδικτύου της δραστηριότητας 2.2.2, φαίνεται πως τη χρονική στιγμή 14.633 ενώ έχουν δεσμευτεί 5 εργάτες, η δραστηριότητα δε μπορεί να ξεκινήσει γιατί δεν υπάρχει κανένας ελεύθερος εργάτης. Την ίδια χρονική στιγμή η δραστηριότητα 2.2.1 είναι έτοιμη να εκκινήσει, αφού έχει δεσμεύσει και τους 5 εργάτες που είναι απαραίτητοι (σχήμα 4.9 – και οι 5 τόποι πριν από τη μετάβαση που έχει τη διάρκεια της δραστηριότητας, έχουν στίγμα).



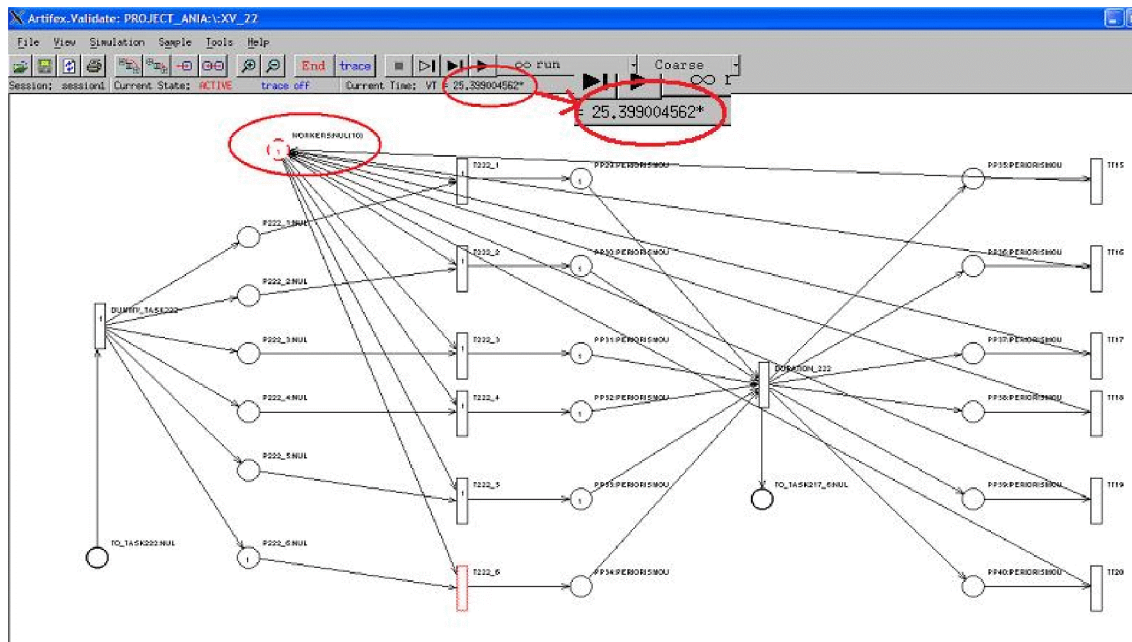
Σχήμα 4.9

Για να μπορέσει η δραστηριότητα 2.2.2 να ξεκινήσει περιμένει πρώτα να ολοκληρωθεί η 2.2.1 (σχήμα 4.10). Η 2.2.1 έχει ολοκληρωθεί τη χρονική στιγμή 25,399, οι εργάτες θα επιστρέψουν στον τόπο WORKERS και θα συνεχιστούν οι επόμενες δραστηριότητες. Εφόσον οι μεταβάσεις που επιστρέφουν πίσω τους εργάτες έχουν μηδενική διάρκεια και οι 5 εργάτες θα έχουν επιστρέψει την ίδια χρονική στιγμή.



Σχήμα 4.10

Την ίδια χρονική στιγμή που αποδεσμεύονται οι εργάτες από την δραστηριότητα 2.2.1, την ίδια χρονική στιγμή γίνονται διαθέσιμοι για τις επόμενες δραστηριότητες. Επομένως πλέον θα μπορέσει να ξεκινήσει η δραστηριότητα 2.2.2, Αυτό ακριβώς που δείχνει και το σχήμα 4.11. Τη χρονική στιγμή 25,399 μπορεί να ξεκινήσει πλέον, αφού έγινε διαθέσιμος ο ένας εργάτης που χρειαζόταν, οπότε η μετάβαση P222\_6 μπορεί να εκπυρσοκροτήσει και επομένως να καταστήσει δυνατή και την εκπυρσοκρότηση της DURATION\_222.



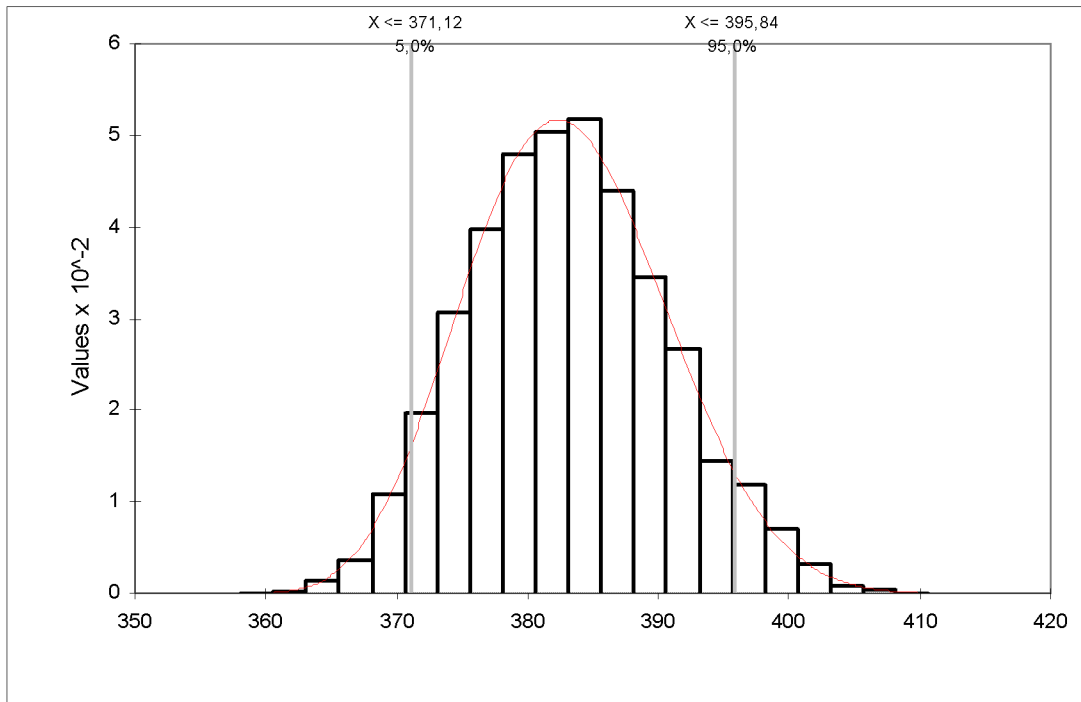
Σχήμα 4.11

Συνολικά, αντί να ξεκινήσει η 2.2.2 τη χρονική στιγμή 14,633 ξεκίνησε τη χρονική στιγμή 25,399. Άρα υπήρξε μια καθυστέρηση 11 σχεδόν ημερών στη δραστηριότητα 2.2.2. Παρ'όλα αυτά δεν επηρεάστηκε από το συγκεκριμένο περιορισμό η συνολική διάρκεια του έργου, αφού η διαδικασία 2.2.2 δεν έχει καμία μεταγενέστερη.

### 4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

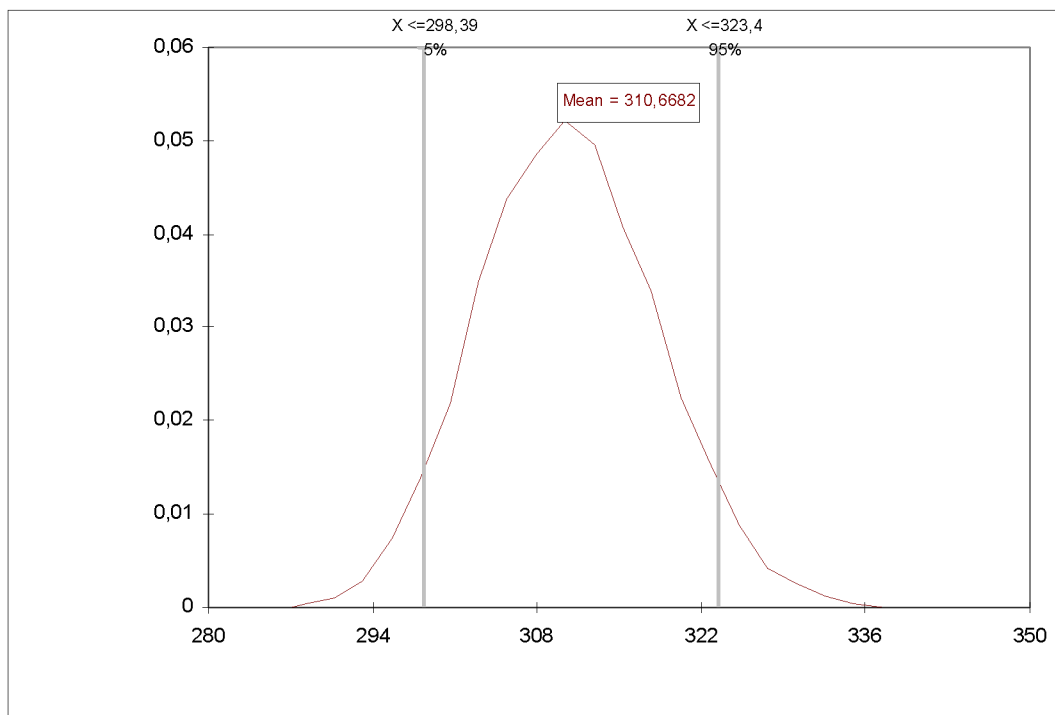
Αρχικά έγινε η προσομοίωση στα δίκτυα Petri. Για να επιτευχθεί η επαναληπτικότητα έγινε σύνδεση του τέλους του έργου με την αρχή του. Αφού έγινε επιλογή στο Artifex να γίνεται καταγραφή των τιμών των μεταβάσεων (track all) και καταγραφή τους σε αρχείο. Με τη χρησιμοποίηση φίλτρου στο MS Excel βρέθηκαν μόνο οι τιμές της μετάβασης GET\_TIME, που κάθε φορά δείχνει αθροιστικά τη διάρκεια του έργου και έχοντας αυτές βρέθηκαν οι διάρκειες και τις 4.500 επαναλήψεις της προσομοίωσης του έργου. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Palisade Tools από την Palisade για τη δημιουργία των κατανομών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.11, με μέση τιμή 384 μέρες (383,08 για την ακρίβεια αλλά δεν έχει ουσία το δεκαδικό, αφού είναι εργάσιμες μέρες).





**Σχήμα 4.11 Κατανομή αποτελεσμάτων με δίκτυα Petri**

Επόμενο βήμα ήταν η προσομοίωση σε Monte Carlo. Η κατανομή των αποτελεσμάτων φαίνονται στο σχήμα 4.12. Η μέση τιμή εδώ, που είναι 311 (310,67) μέρες, παρουσιάζει μεγάλη διαφορά από την κατανομή που αντιστοιχεί στην προσομοίωση με τα δίκτυα Petri. Συγκεκριμένα η προσομοίωση με Monte Carlo δίνει μέση τιμή διάρκειας 18,9%, σημαντικά μικρότερη από τη προσέγγιση με δίκτυα Petri.



#### **Σχήμα 4.12 Κατανομή αποτελεσμάτων με προσομοίωση Monte Carlo**

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης πόρων στα δίκτυα Petri αναδεικνύει τις μεγάλες δυνατότητες που έχουν στη χρησιμοποίησή τους στη Διοίκηση Έργων. Είναι μια πολύ καλή εναλλακτική της προσομοίωσης Monte Carlo, ενώ από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνεται πως μπορούν να βοηθήσουν σε μεγάλο βαθμό τις ομάδες έργων να έχουν πιο ακριβή προϋπολογισμό της συνολικής διάρκειας ενός έργου, αφού μοντελοποιούνται σε πολύ μεγάλο βαθμό οι περιορισμοί που μπορούν να υπάρξουν λόγω έλλειψης πόρων αλλά και πολύ καλή εποπτεία των επιμέρους δραστηριοτήτων, λόγω της ανάλυσης σε υποδίκτυα.

Φυσικά ενώ το αποτέλεσμα της προσέγγισης με δίκτυα Petri είναι αρκετά πιο κοντά στην πραγματικότητα, είναι αρκετά πιο χρονοβόρο η κατασκευή ενός τέτοιου μοντέλου, ειδικά σε σύγκριση με την προσομοίωση MC. Θα ήταν μεγάλη διευκόλυνση στην επέκταση της χρήσης των δικτύων Petri η δημιουργία ενός λογισμικού που να μπορεί μειώσει το χρόνο δημιουργίας ενός μοντέλου, καθώς θα μειωνόταν κατά μεγάλο βαθμό η πολυπλοκότητά τους.

## 5 Βιβλιογραφία

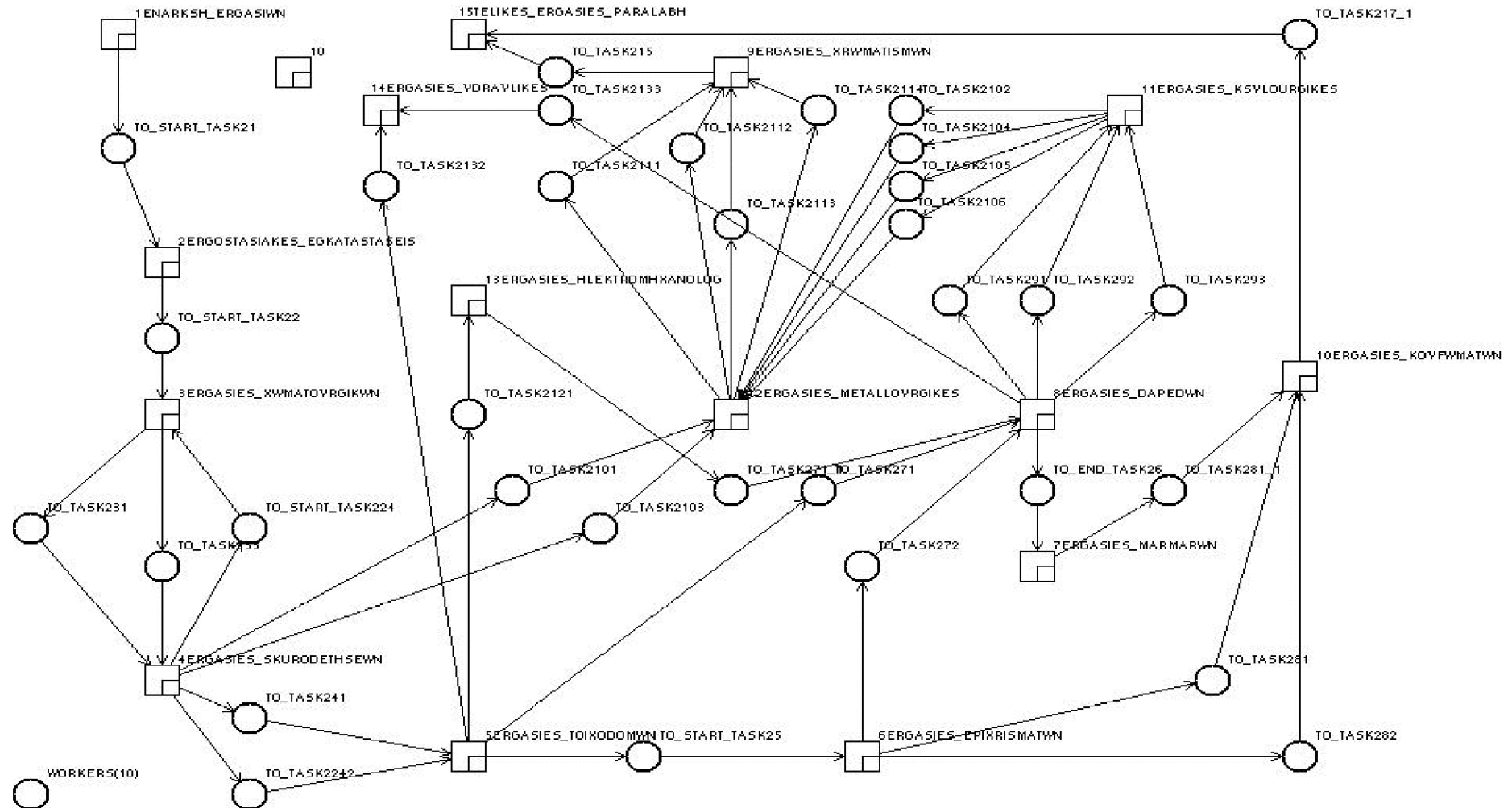
- 1) Chan, D. and Kumaraswamy, M. 1997, 'A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects', *International Journal of Project Management*, Vol 15, No 1, pp. 55-63.
- 2) Project Management Institute. 2004, 'A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide) (2004 ed.)'. Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- 3) Karshenas, S. and Haber, D. 1990, 'Economic optimization of construction project scheduling', *Construction Management and Economics*, ASCE, Vol 8, pp. 135-146.
- 4) Leopoulos, V., Kirytopoulos, K. and Bellos, V. 2002, 'A model for product risk estimation through corporate memory and techniques integration', *Proceedings of Advances in Multimedia, Video and Signal Processing Systems*, WSEAS Press, pp. 302-307.
- 5) Desmond L., Celia 2004, 'Work Breakdown Structure', *Project Management for Telecommunications Managers*, Springer US, pp. 71-72
- 6) Van Slyke, R.M. 1963, "Monte Carlo methods and the PERT problem", *Operations Research*, Vol. 11, No. 5, pp. 839-860.
- 7) Pritsker A.A.B., 1966, 'GERT graphical evaluation and review technique', Memorandum RM – 4973 - NASA, Rand Corporation.
- 8) Maylor, H. 2005, *Project Management*, 3<sup>rd</sup> edn, Pearson Education Limited, Harlow.
- 9) Malcolm, D.G, Rooseboom, JH, Clark, CE, and Fazer, W., 1959, 'Application of a technique for research and development program evaluation', *Operations Research*, Vol. 7, pp. 646-669.
- 10) Pagnon, i A. 1990, 'Project Engineering: Computer-Oriented Planning and Operational Decision Making', Germany: Springer-Verlag.
- 11) Diamantas, V., Kirytopoulos, K. and Leopoulos V. 2006, 'Simulation in Project Scheduling: Why PERT is not enough', *Proceedings of the 3rd Future Business Technology Conference*, The European Simulation Society, Athens, Greece, pp. 64-70.
- 12) Rentizelas, A., Tziralis, G. and Kirytopoulos, K. 2006, 'An integrative approach to investment appraisal: Simulating the risk of an optimum decision', *Proceedings of the 3rd Future Business Technology Conference*, The European Simulation Society, Athens, Greece, pp. 27-34
- 13) Sawhney, A. Mund, A. and Chaitavatputtiporn, T. 2003, 'Petri Net-Based Scheduling of Construction Projects', *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 20, No. 4, pp. 255–271
- 14) Jeetendra, V. A., Krishnaiah Chetty, O. V. and Prashanth Reddy J. 2000, 'Petri Nets for Project Management and Resource Levelling', *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, vol16, pp. 516–520
- 15) Van der Aalst W. M. P., 1996, 'Petri net based scheduling', *OR Spectrum*, Vol 18, pp. 219-229
- 16) Sawhney, A. 1997, 'Petri Net Based Simulation of Construction Schedules', *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference ed S. Andratottir K. J. Healy, D. H. Withers and B. L. Nelson*
- 17) Prashant Reddy, J., Kumanan S. and Krishnaiah Chetty, O. V. 2001, 'Application of Petri Nets and a Genetic Algorithm to Multi-Mode Multi-Resource Constrained Project Scheduling', *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol 17, pp. 305–314

- 18) Mizuno, O. 2001, 'Software Project Simulator for Effective Software Process Improvement', A dissertation submitted to the Graduate School of Engineering Science of Osaka University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Engineering
- 19) Tuncel, G., Bayhan M. G. 2006, 'Applications of Petri nets in production scheduling: a review', *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007
- 20) M. Lee, Ronald 1999, 'Automated Generation of Electronic Procedures: Procedure Constraint Grammars', *Proceedings of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences*
- 21) Shih, H. M. and Leung, C. K. H. 1997, 'Management Petri net - a modelling tool for management systems', *Int. J. Prod. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1665 – 1680
- 22) Barros M.O., C.M.L., Werner, Travassos, G. H. 2000, 'Applying System Dynamics to Scenario Based Software Project Management'. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> Conference of the System Dynamics Society*, Bergen, NW (August)
- 23) Balbo, G. 2001, 'Introduction to Stochastic Petri Nets', *Lectures on Formal Methods and Performance Analysis*, vol. 2090/2001, pp. 84-155
- 24) Noronha, S. J. and Sarma, V. V. S. 1991, 'Knowledge-Based Approaches for Scheduling Problems: A Survey', Vol. 3, No. 2, pp. 160-171
- 25) McChesney I. R. 1998, 'Modelling multi-party activity in the software process using CoPlans' in *Proc. Third Intl. Workshop on the Language/Action Perspective - LAP'98*, pp 89-102, Stockholm, Sweden, June
- 26) Grolleau, E. and Choquet-Geniet, A. 2002, 'Off-line Computation of Real-Time Schedules using Petri Nets', *Discrete Event Dynamic Systems*, Vol. 2 Issue 3, pp. 311 – 333
- 27) Noe, J. D. and Nutt, G. J. 1973, 'Macro e-nets representation of parallel systems', *IEEE Transactions on Computer*, Vol. 3, pp. 718–727.
- 28) Merlin, P. M. and Farber, D. J. 1976. 'Recoverability of communication protocols: Implications of a theoretical study', *IEEE Transactions on Communications*, Vol 24, pp. 1036 – 1043
- 29) Tsalgatidou, A., 1990, 'Modelling and animating information systems dynamics', *Information Processing Letter*, vol 36, pp. 108 – 127
- 30) Auramaiki, E., Hirschheim, R. and Lyytinen, K. 1992, 'Modelling offices through discourse analysis: the SAMPO approach', *The Computer Journal*, vol 35, 343-352.
- 31) Young L. T. 1996, 'The Handbook of Project Management: A Practical Guide to Effective Policies and Procedures', Kogan Page Limited
- 32) Lock, D. 1997, 'Gower Handbook of Project Management', 2<sup>nd</sup> edn, Gower Press
- 33) Burke, R. 1999, 'Project Management: Planning and Control Techniques', John Wiley and Sons Limited
- 34) Pagnoni A., 1990, 'Project Engineering', Springer- Verlag Berlin Heidelberg
- 35) Κηρυττόπουλος Κ. 2002, 'Εγχειρίδιο για τη Διαχείριση Κινδύνων', Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα
- 36) Διονύση Μ. (2004), Διπλωματική Εργασία 'Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Διαδικασιών Συντήρησης της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού', Αθήνα

## Παράρτημα

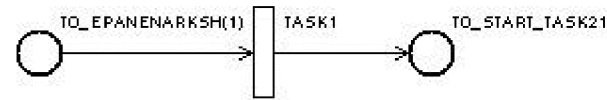
### 6 Παρουσίαση Δικτύου

#### 6.1 Ανώτατο ιεραρχικό επίπεδο (Top level)

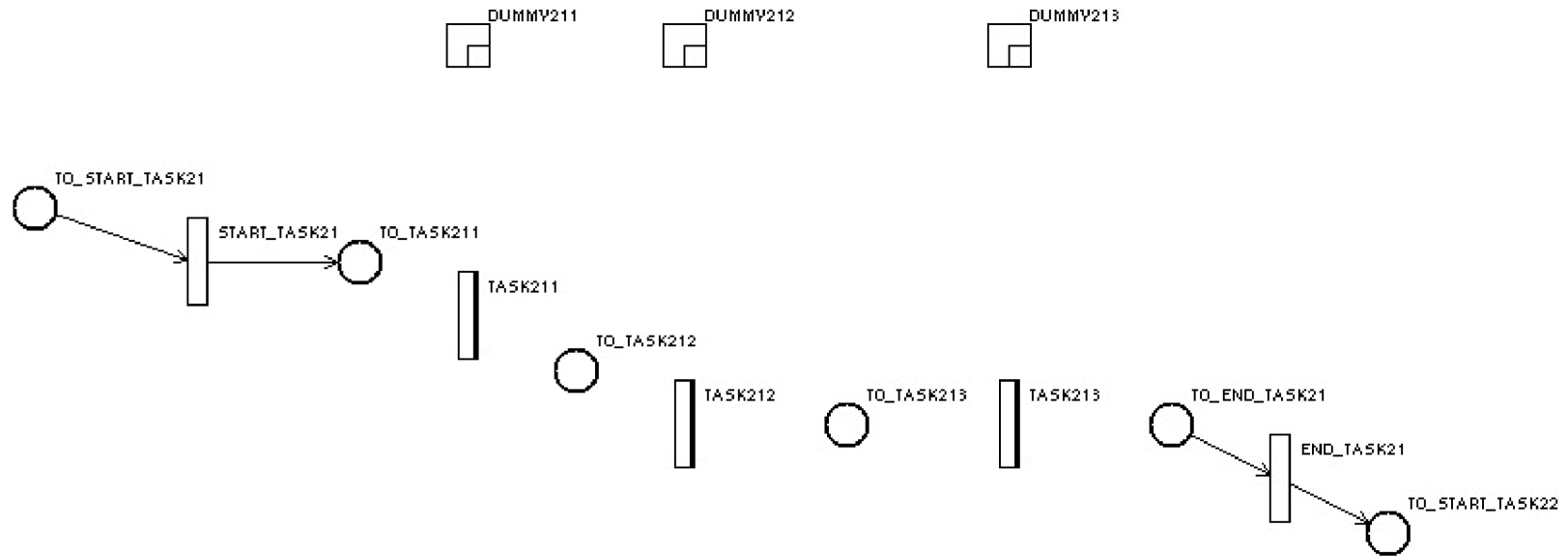


Σχήμα 6.1: Κεντρική σελίδα δικτύου (Top Level)

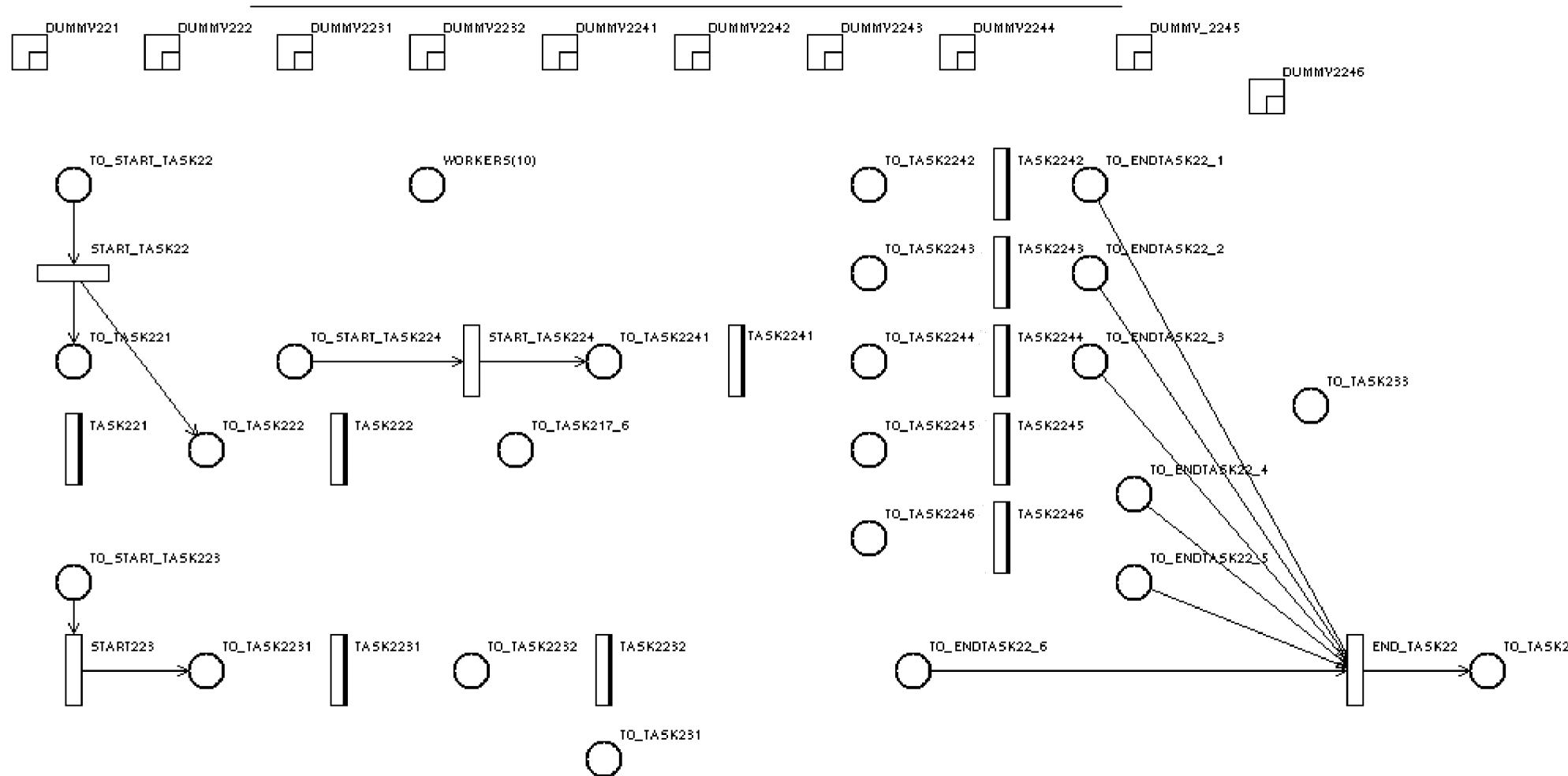
## 6.2 Δεύτερο ιεραρχικό επίπεδο



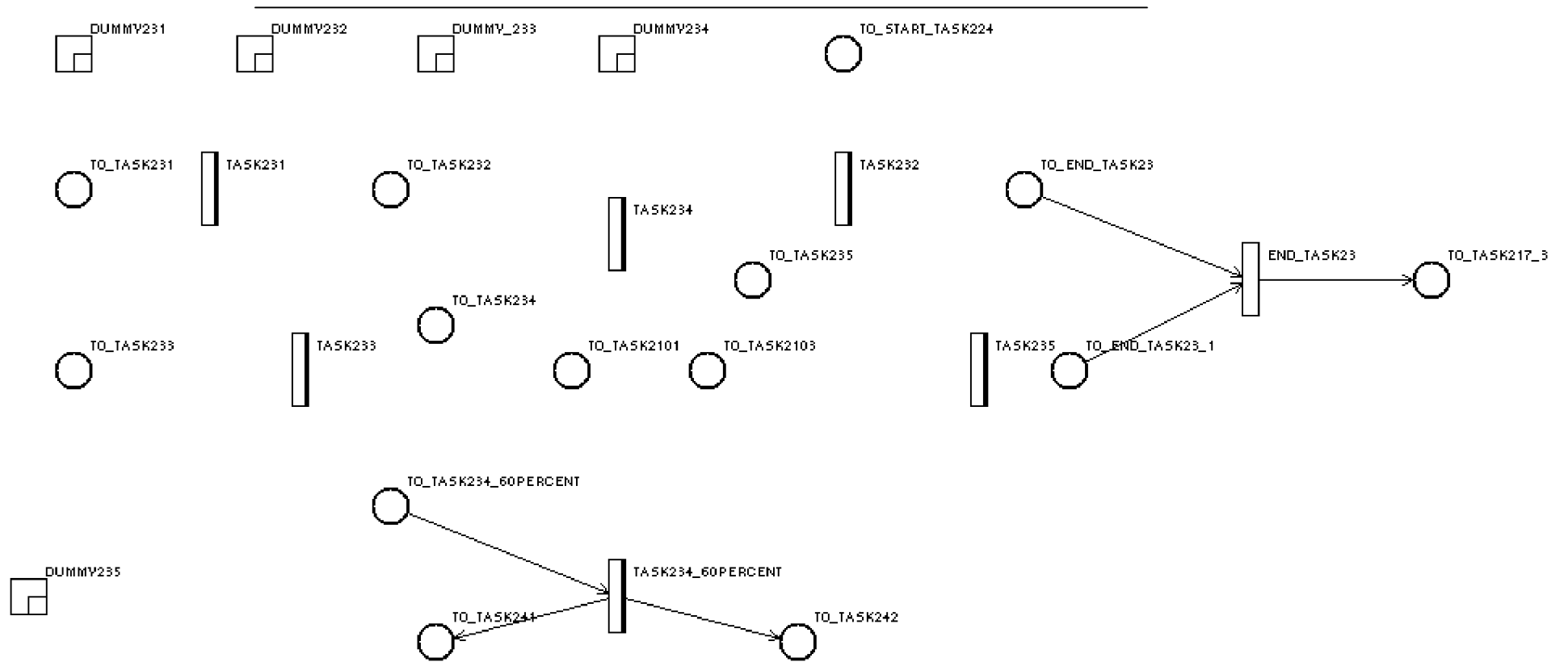
Σχήμα 6.2: Υποδίκτυο έναρξης



Σχήμα 6.3: Υποδίκτυο εργασιολογικών εγκαταστάσεων

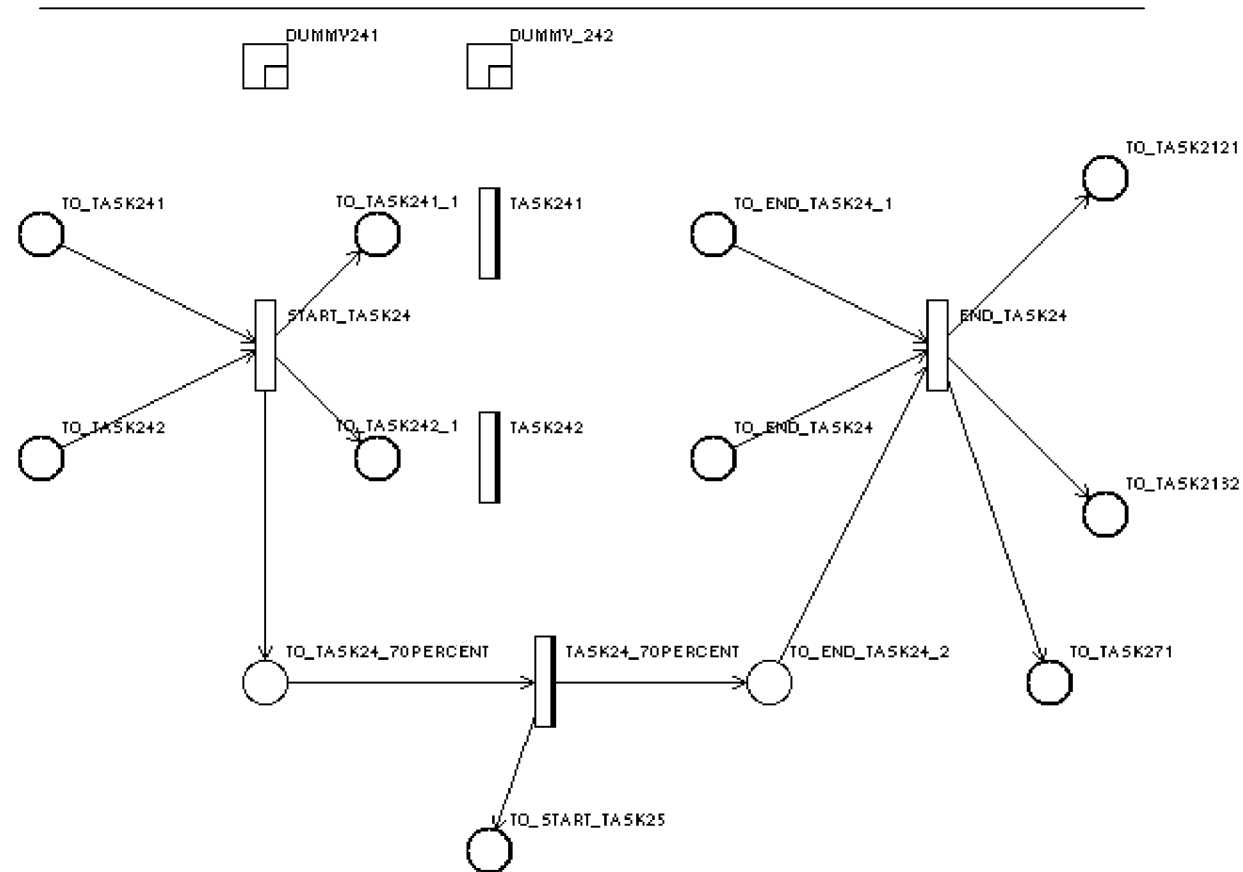


Σχήμα 6.4: Υποδίκτυο χρωματουργικών εργασιών

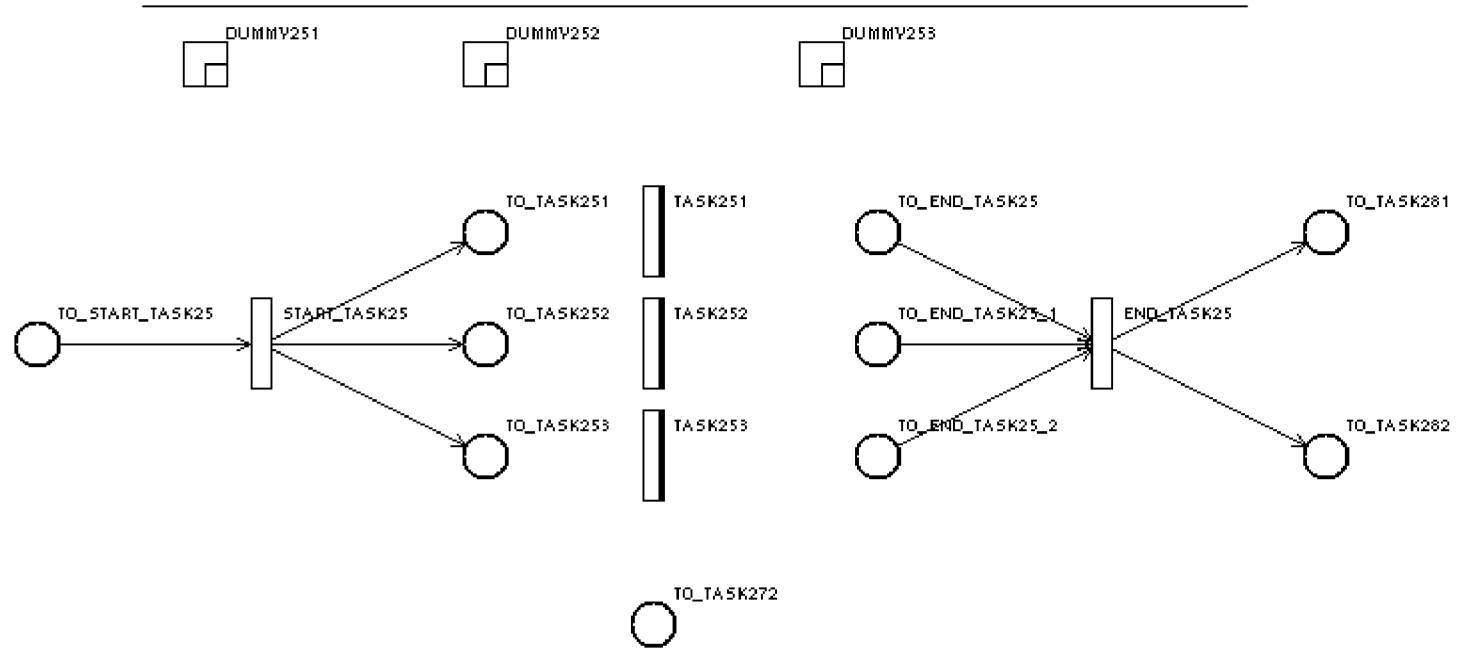


Σχήμα 6.5: Υποδίκτυο εργασιών σκυροδετήσεων

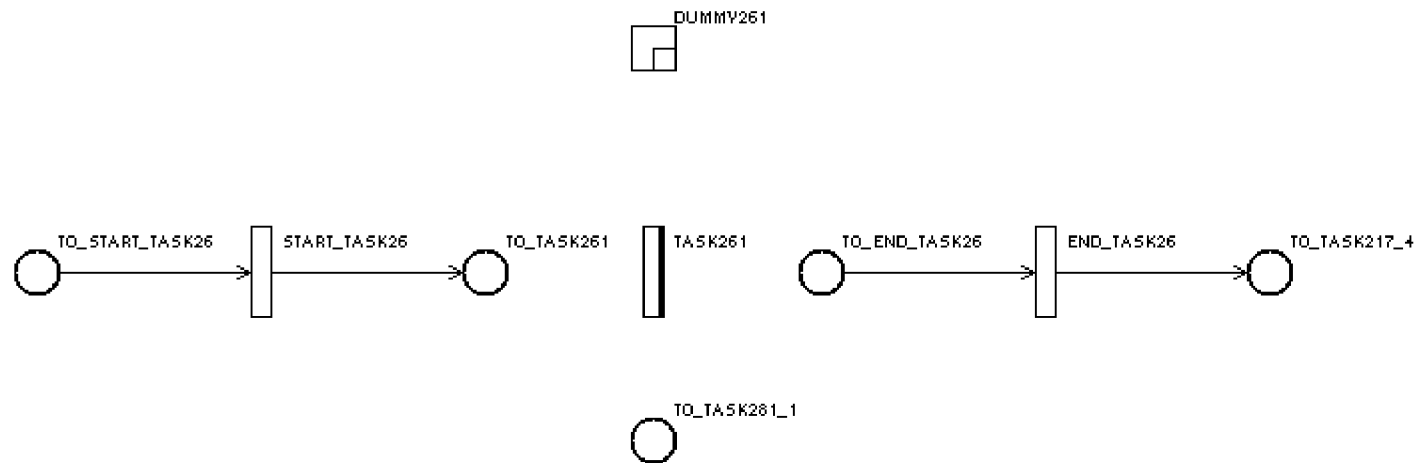




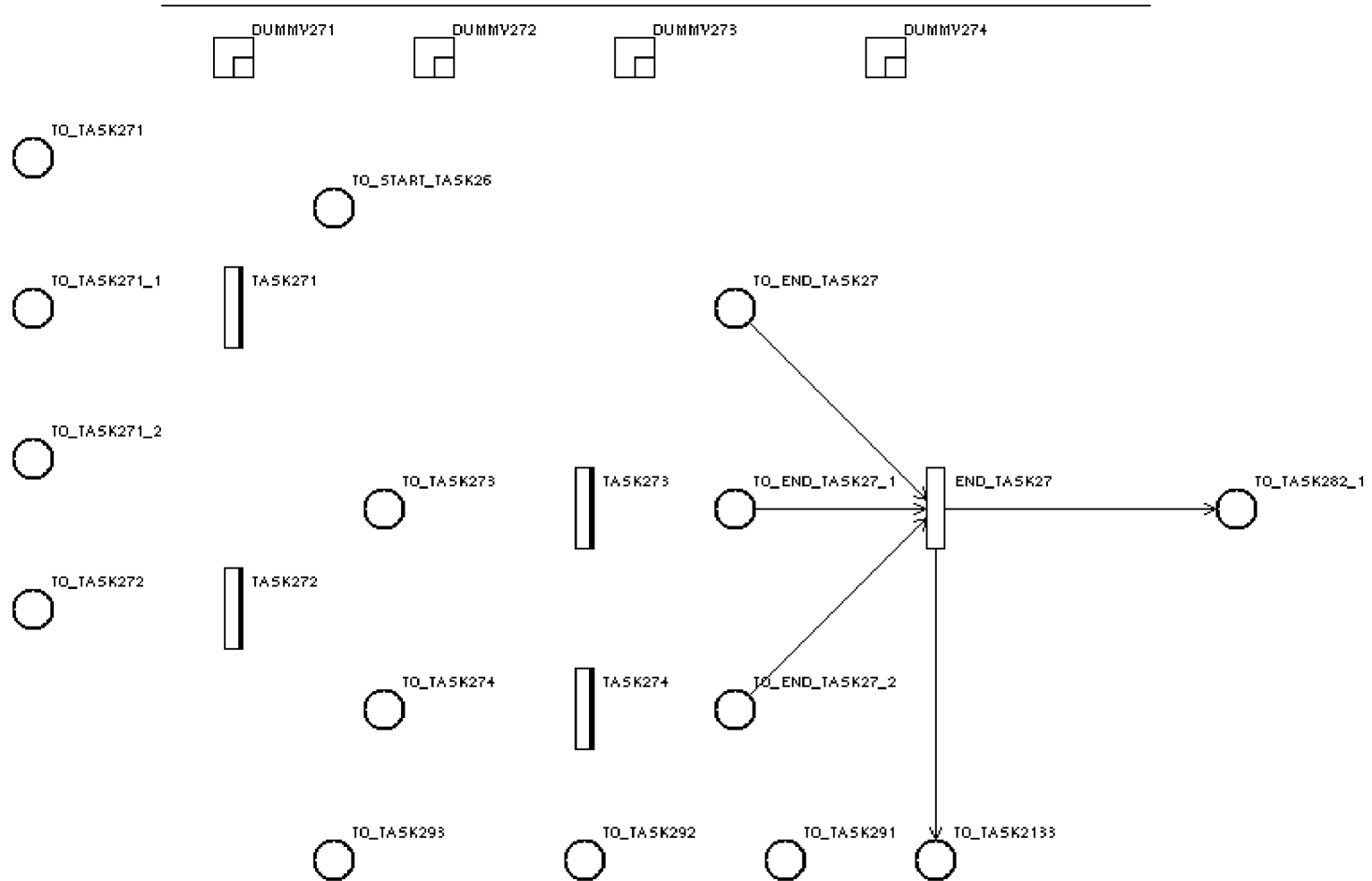
Σχήμα 6.6: Υποδίκτυο εργασιών τοιχοδομών



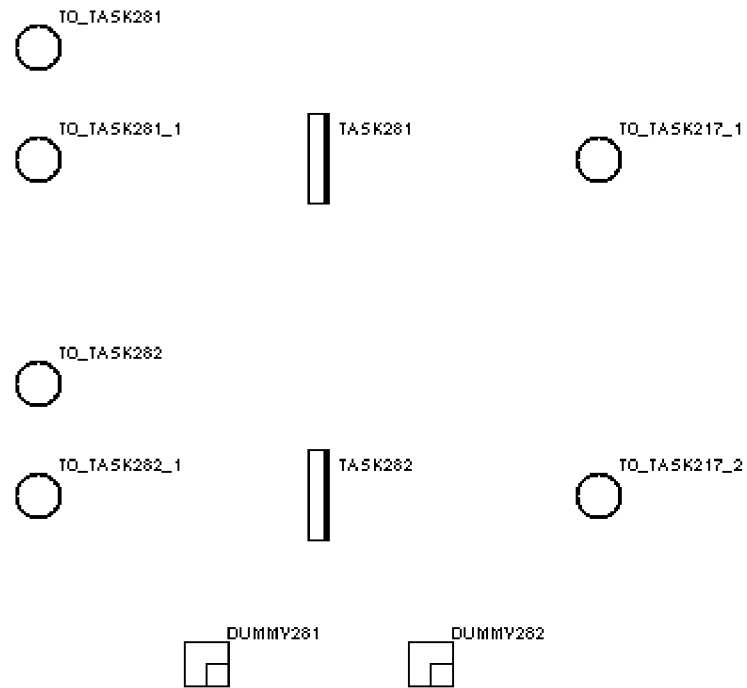
Σχήμα 6.7: Υποδίκτυο εργασιών επιχρισμάτων



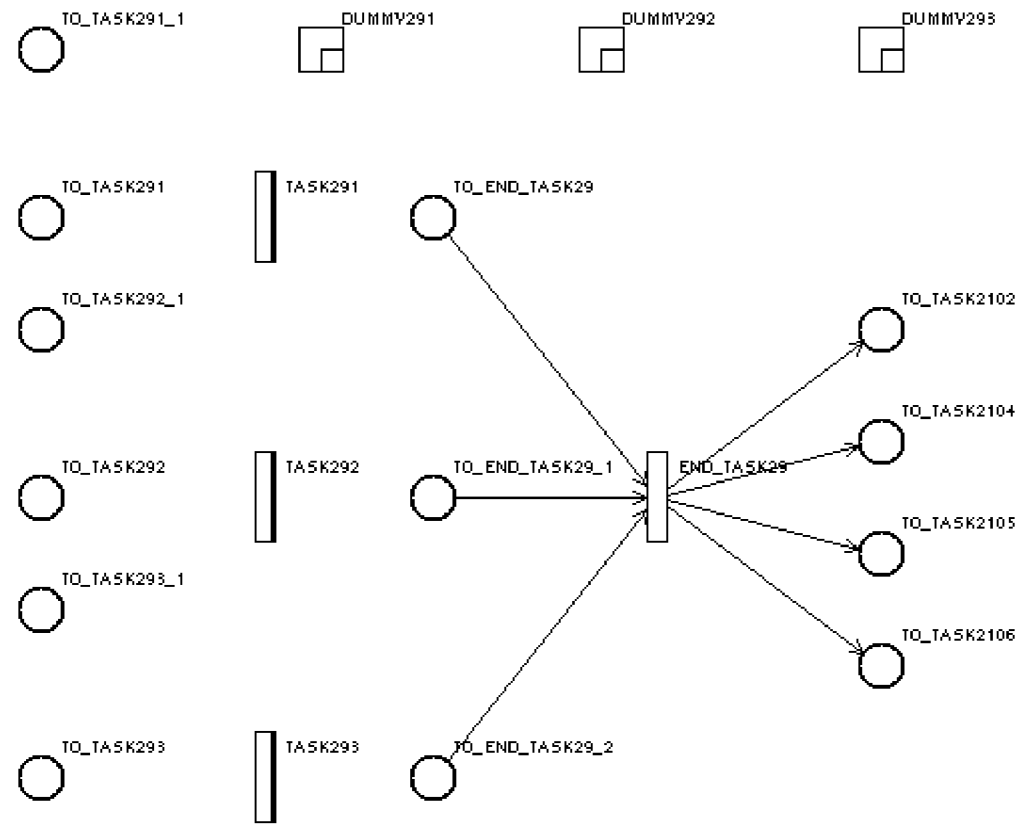
Σχήμα 6.8: Υποδίκτυο εργασιών μαρμάρων



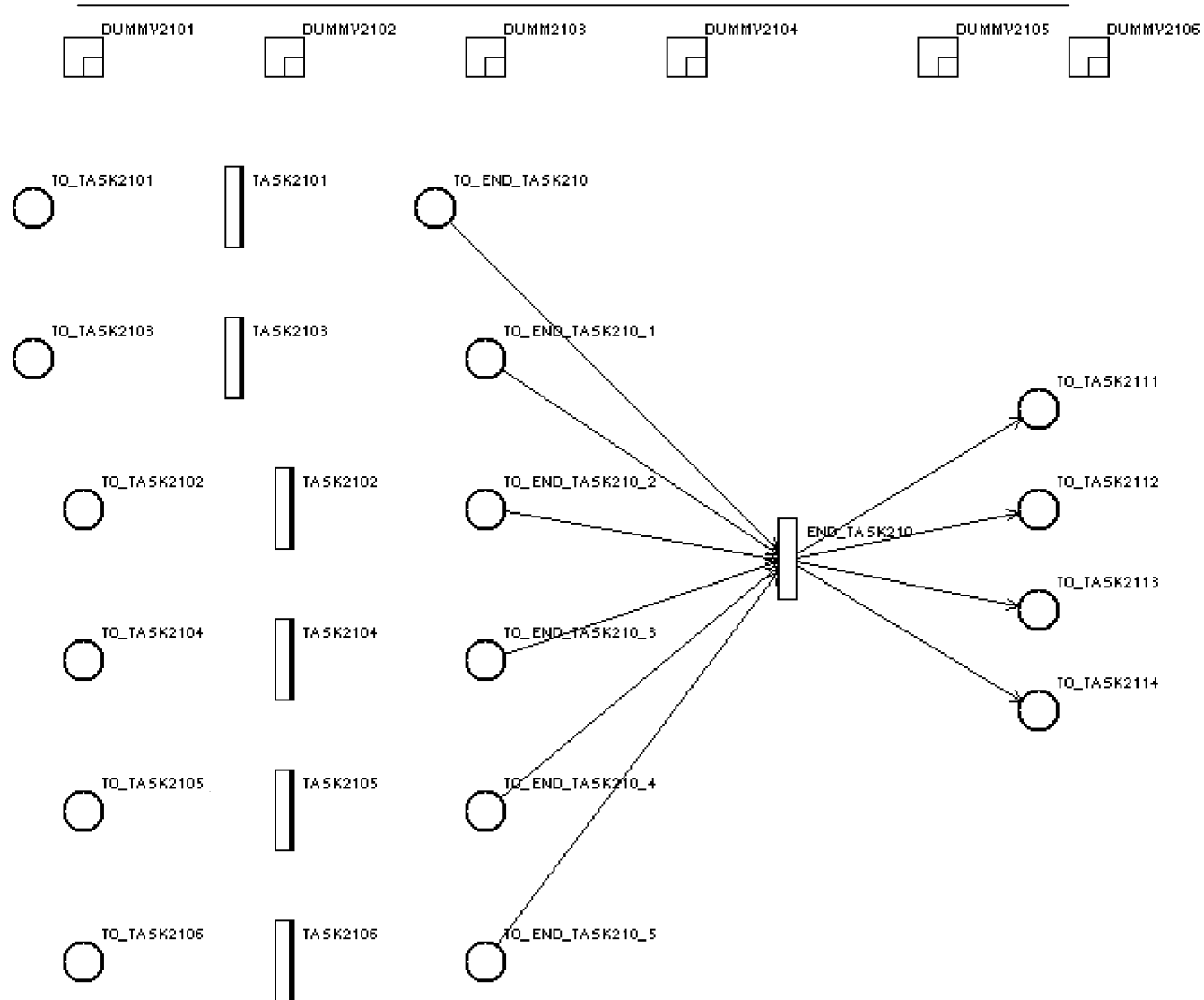
Σχήμα 6.9: Υποδίκτυο εργασιών δαπέδων



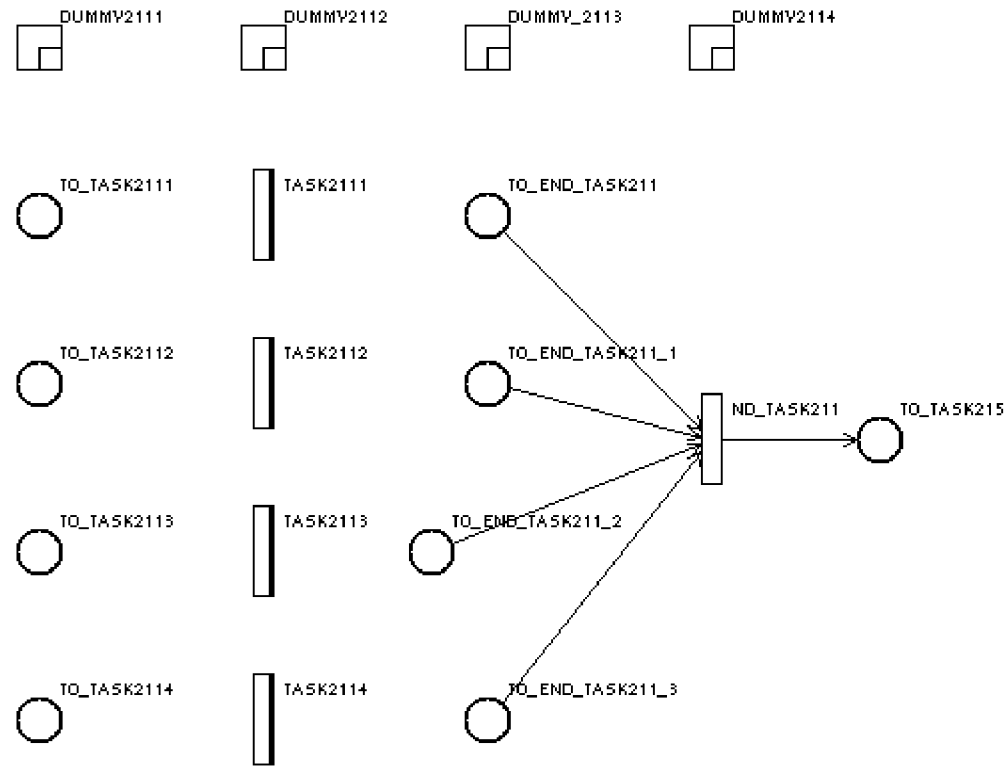
Σχήμα 6.10: Υποδίκτυο εργασιών κουφωμάτων



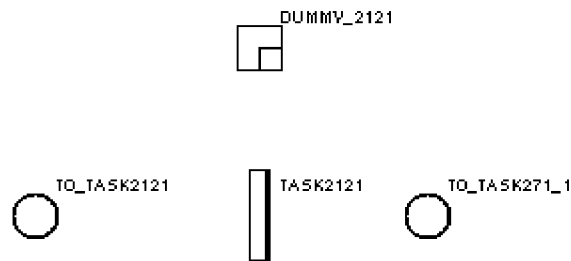
Σχήμα 6.11: Υποδίκτυο ξυλοουργικών εργασιών



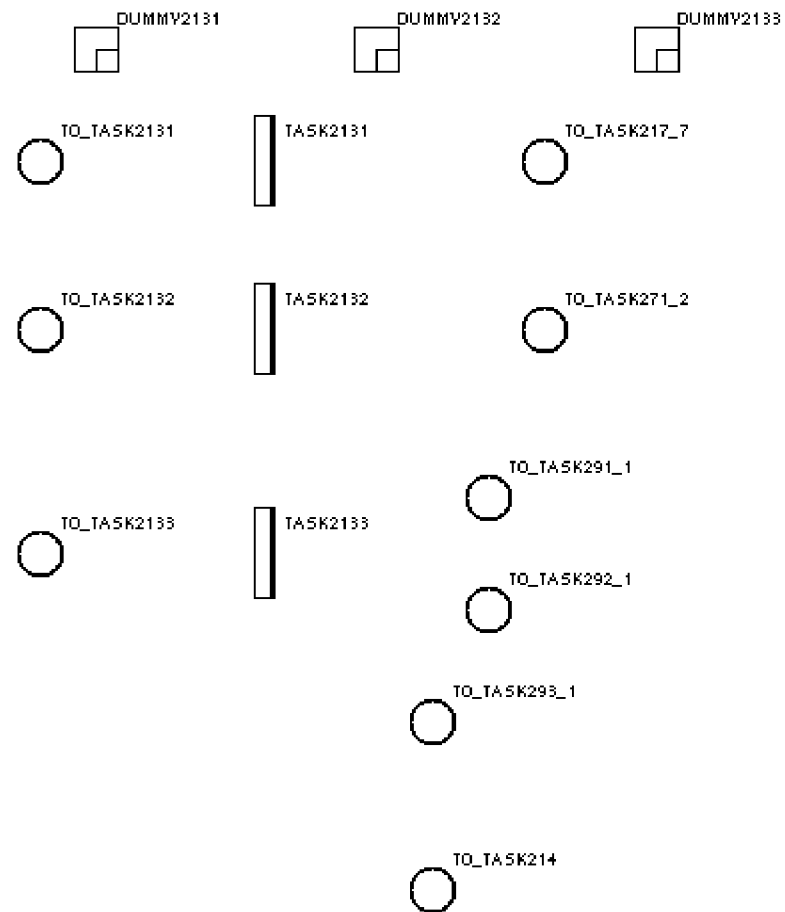
Σχήμα 6.12: Υποδίκτυο μεταλλουργικών εργασιών



Σχήμα 6.13: Υποδίκτυο εργασιών χρωματισμών

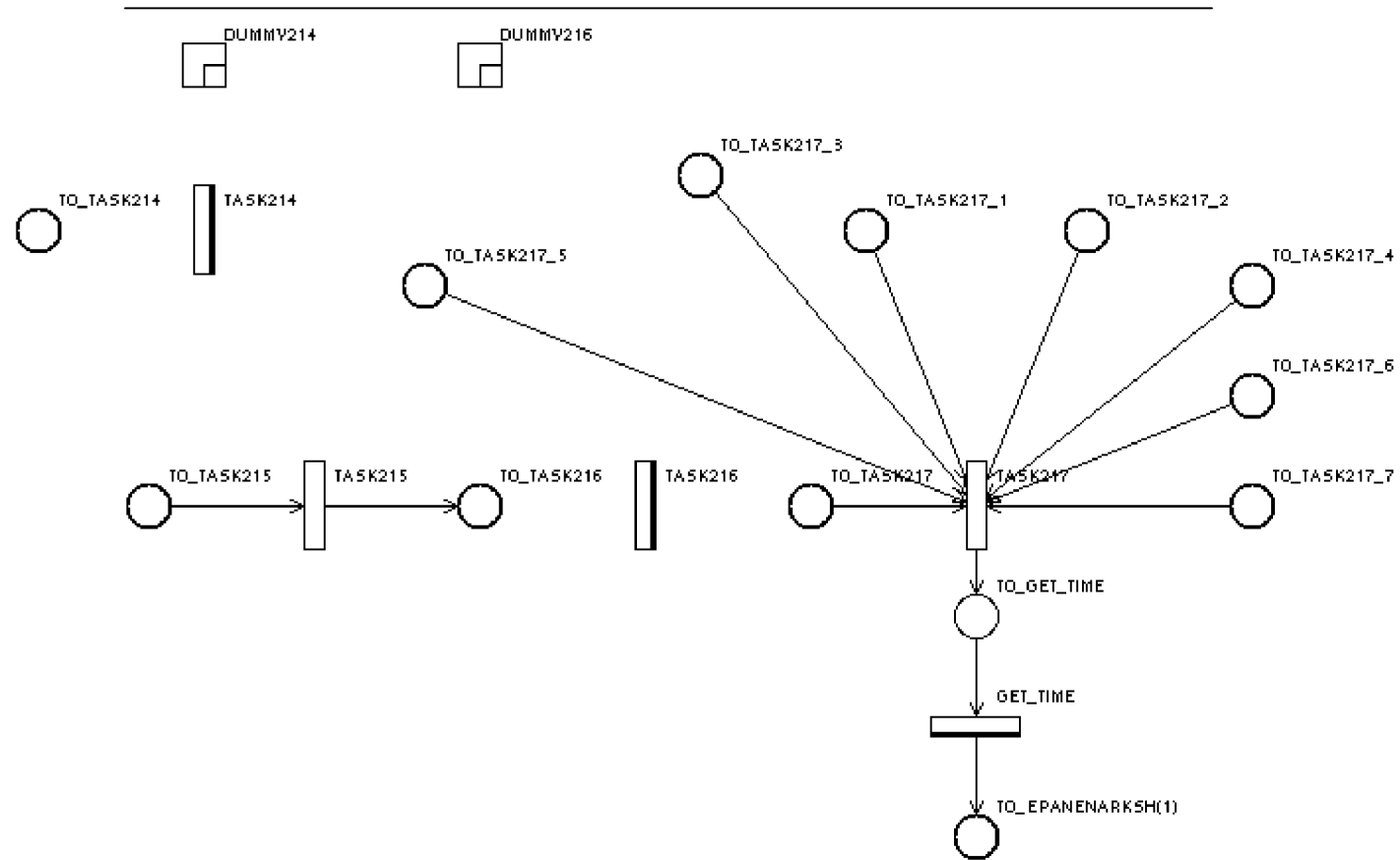


Σχήμα 6.14: Υποδίκτυο ηλεκτρομηχανολογικών εργασιών



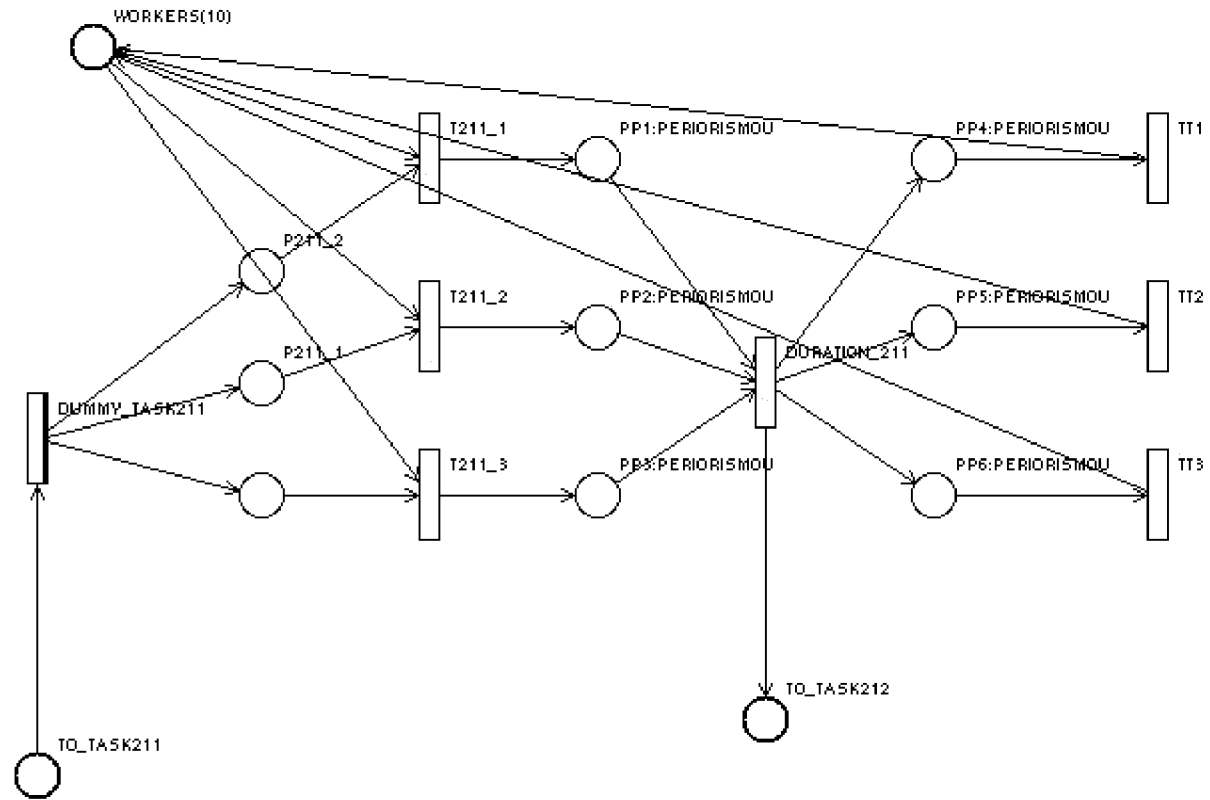
Σχήμα 6.15: Υποδίκτυο υδραυλικών εργασιών



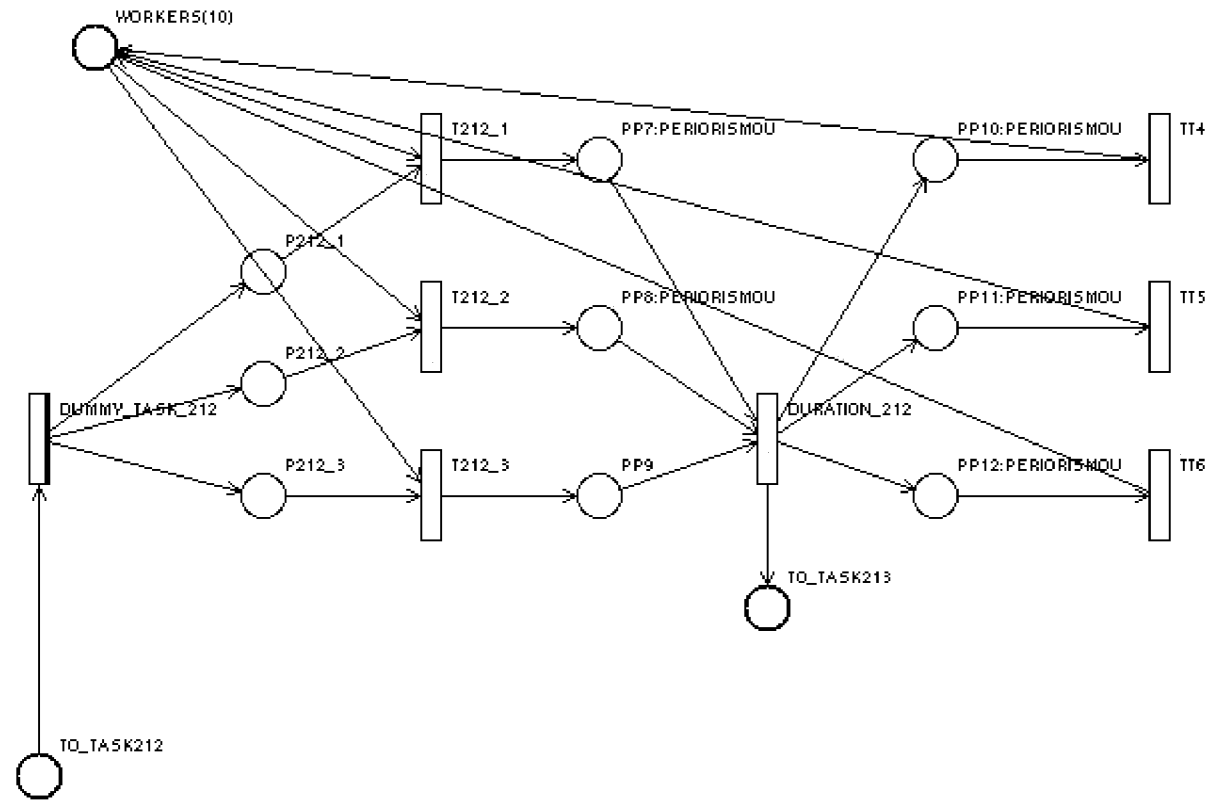


Σχήμα 6.16: Υποδίκτυο τελικών εργασιών

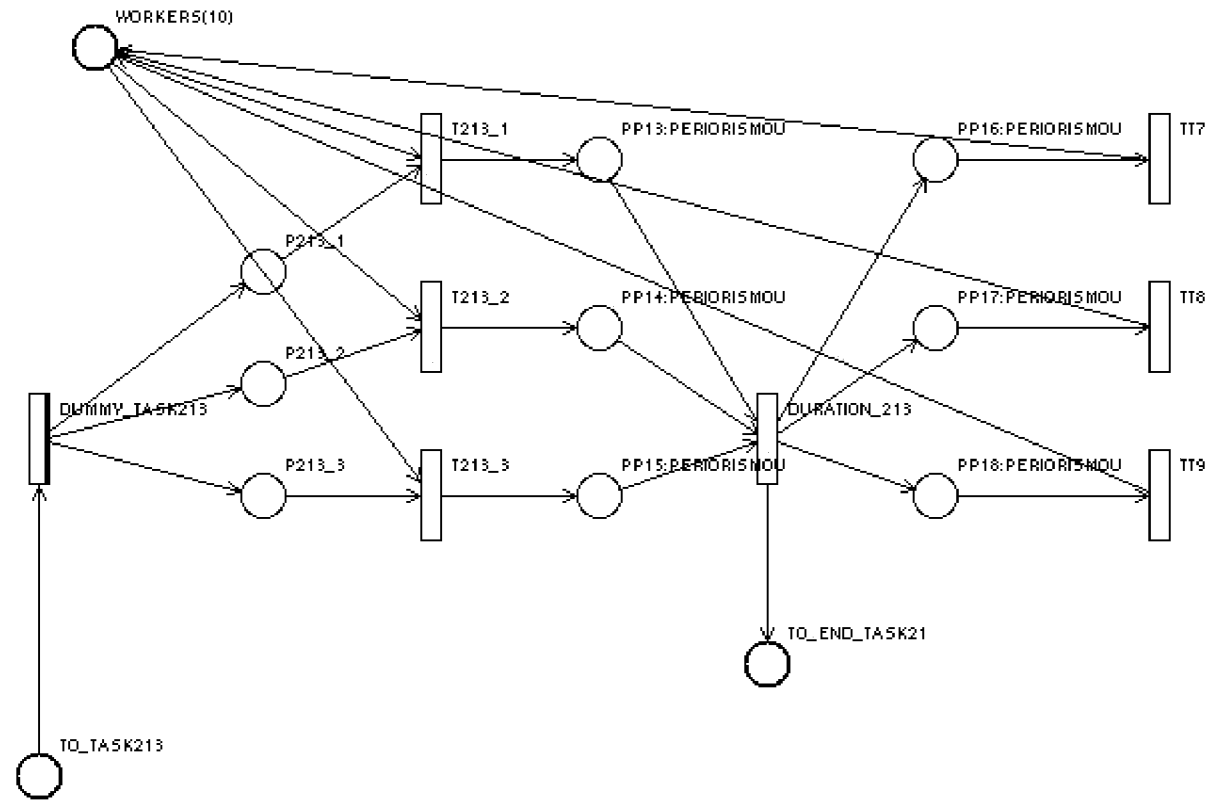
6.3 Τρίτο ιεραρχικό επίπεδο



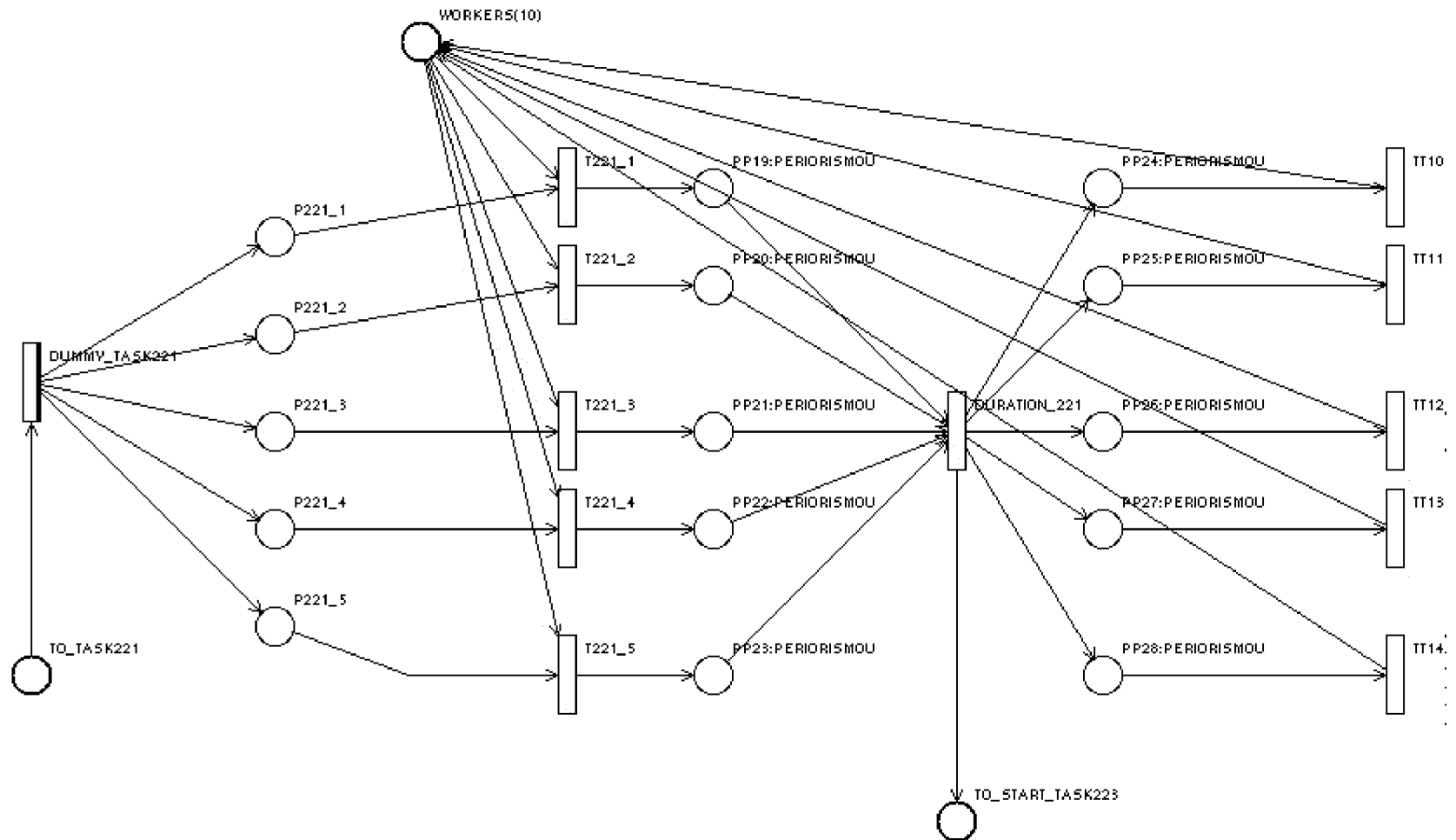
Σχήμα 6.17: Δραστηριότητα 2.1.1



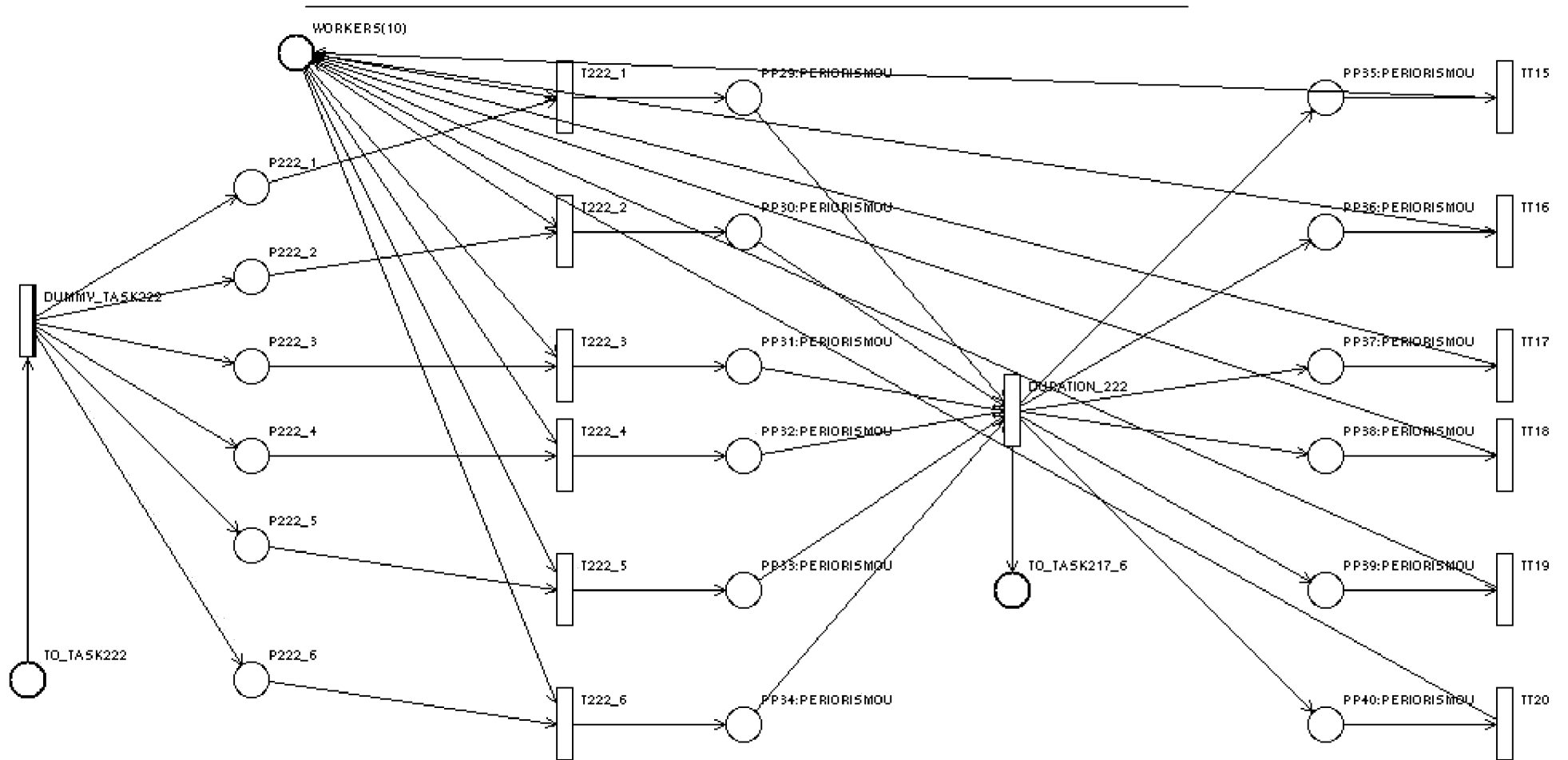
Σχήμα 6.18: Δραστηριότητα 2.1.2



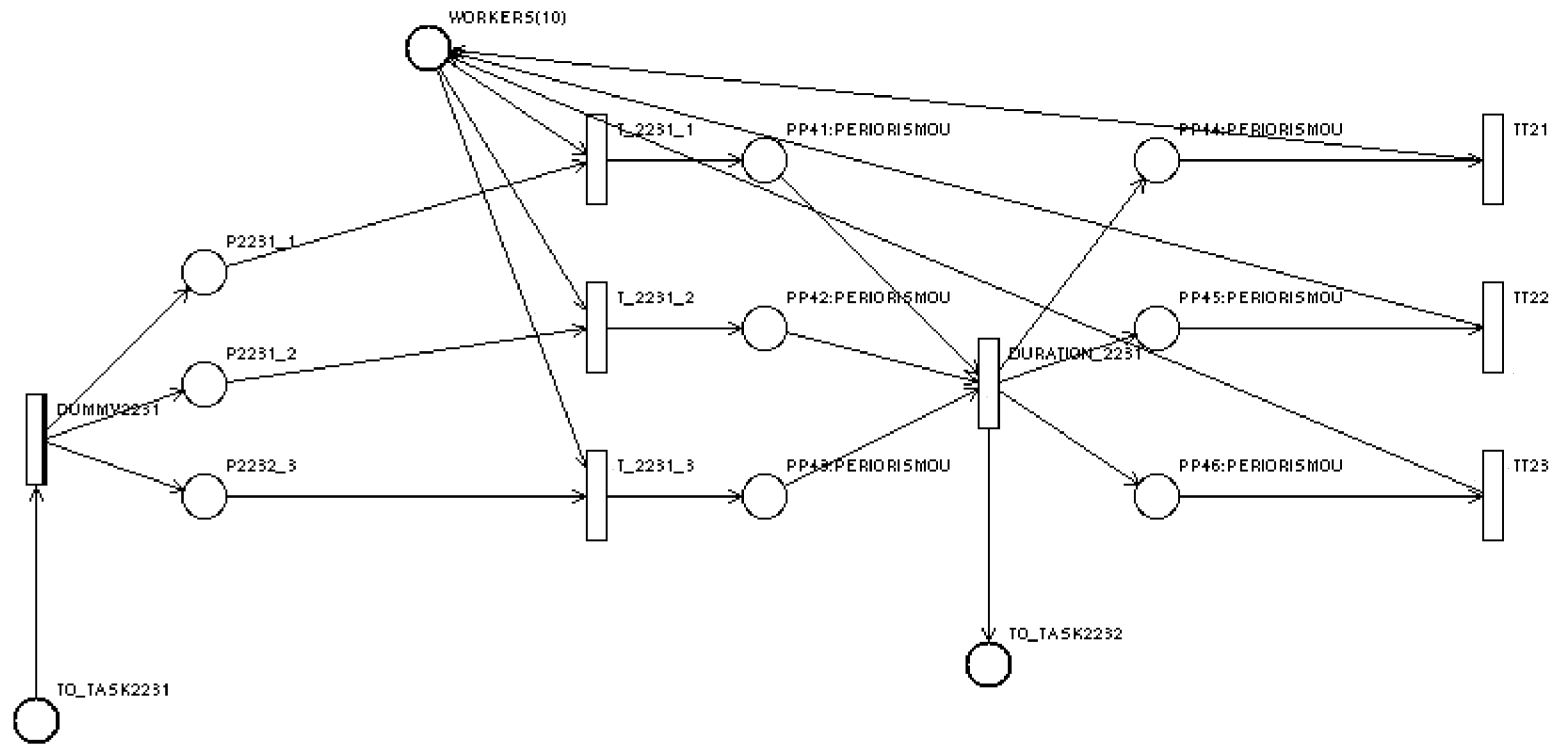
Σχήμα 6.19: Δραστηριότητα 2.1.3



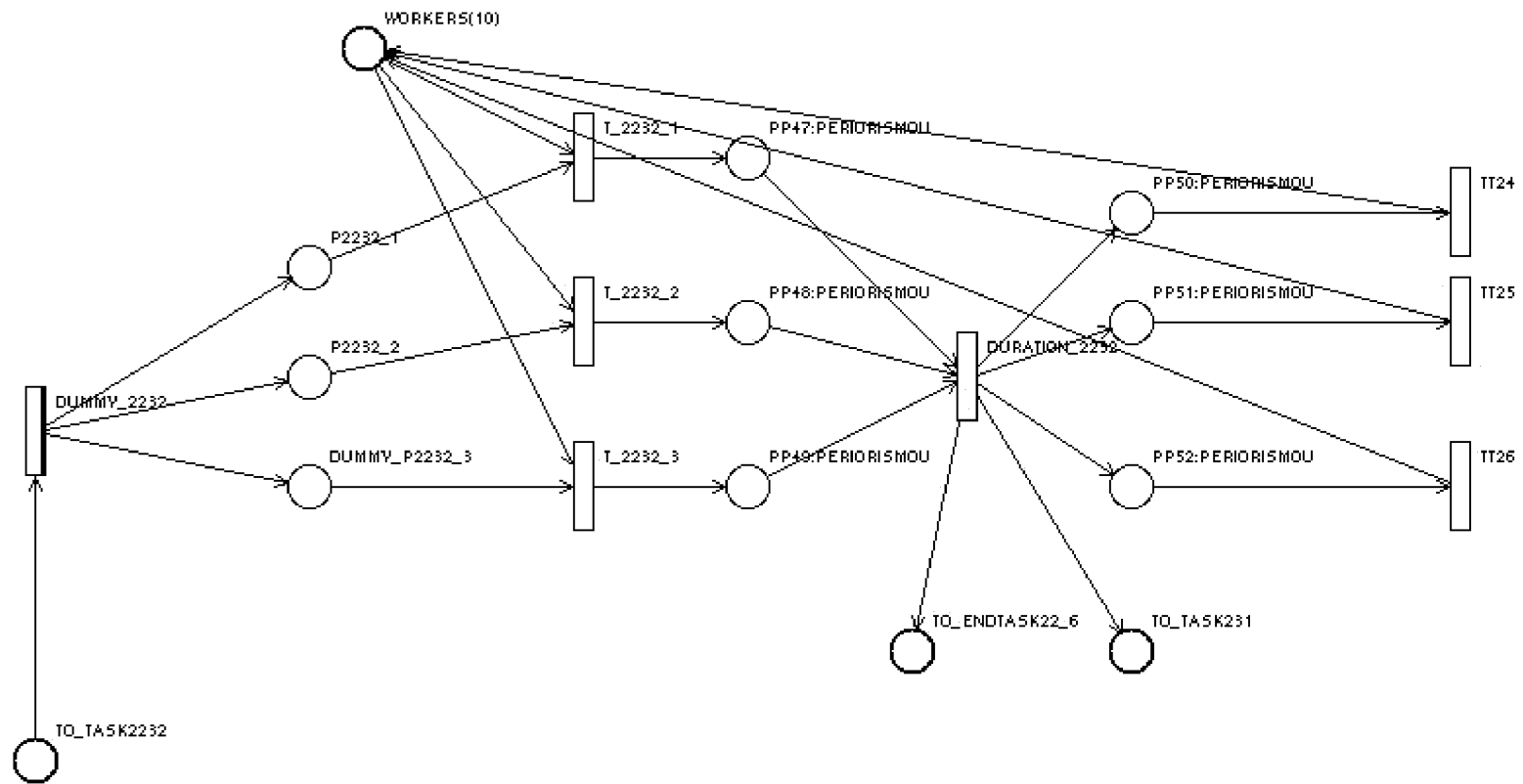
Σχήμα 6.20: Δραστηριότητα 2.2.1



Σχήμα 6.21: Δραστηριότητα 2.2.2

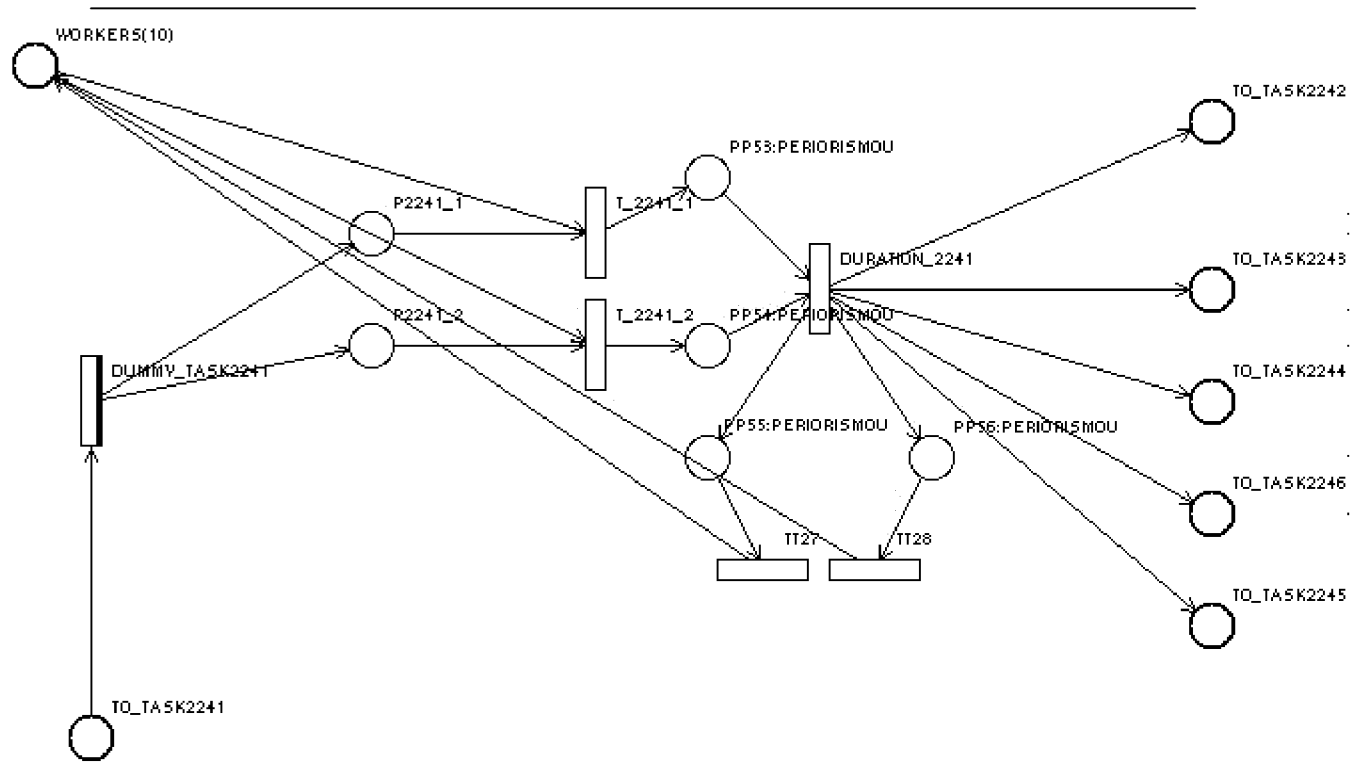


Σχήμα 6.22: Δραστηριότητα 2.2.3.1

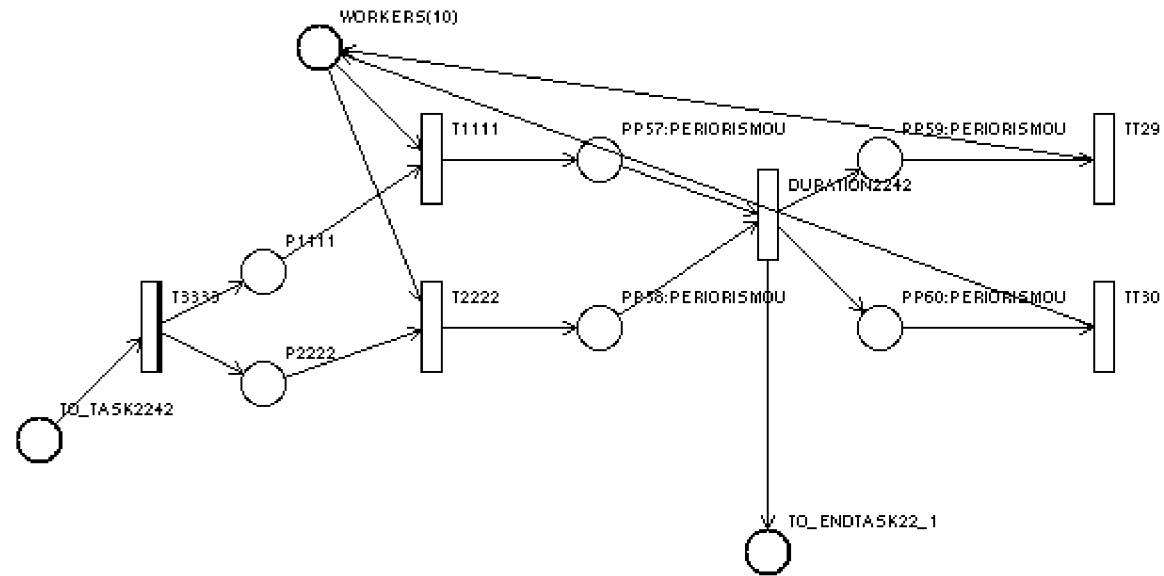


Σχήμα 6.23: Δραστηριότητα 2.2.3.2

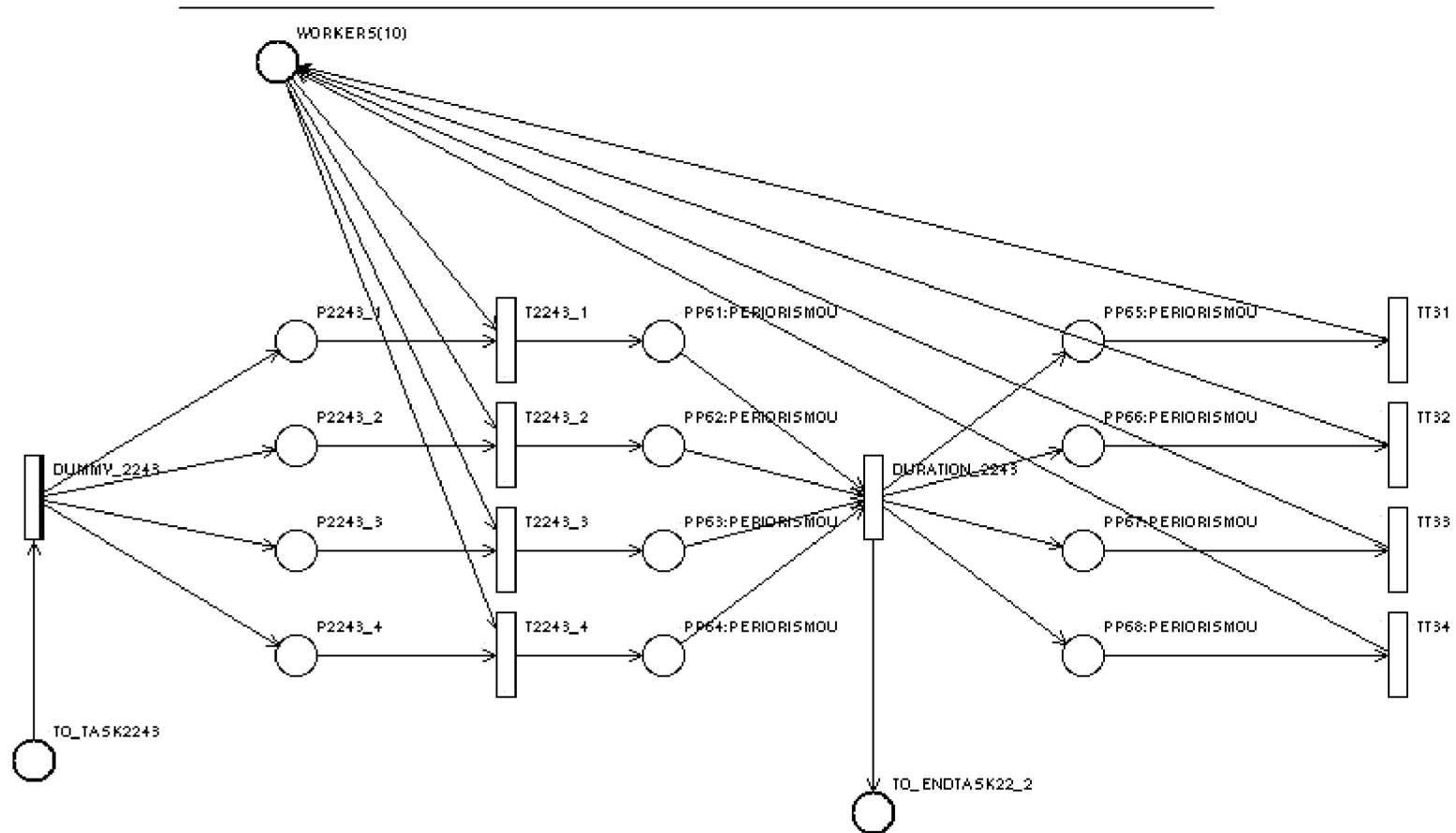




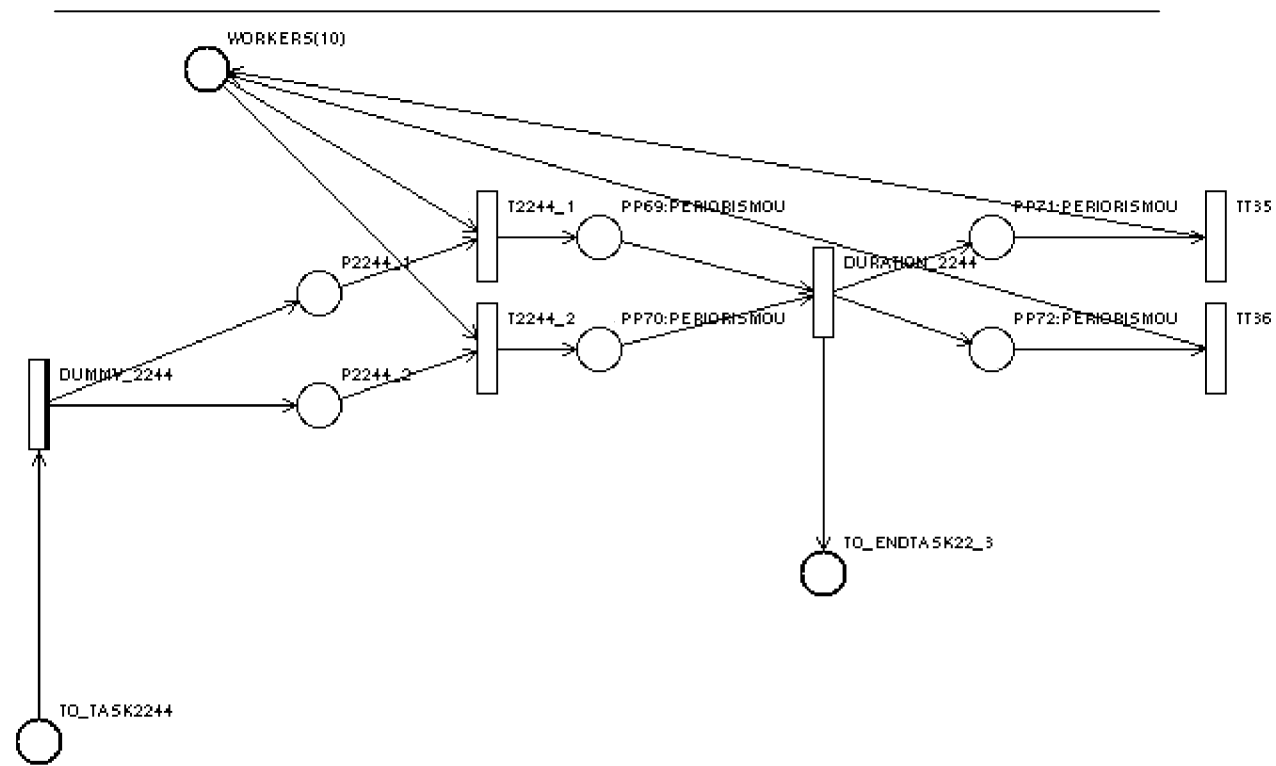
Σχήμα 6.24: Δραστηριότητα 2.2.4.1



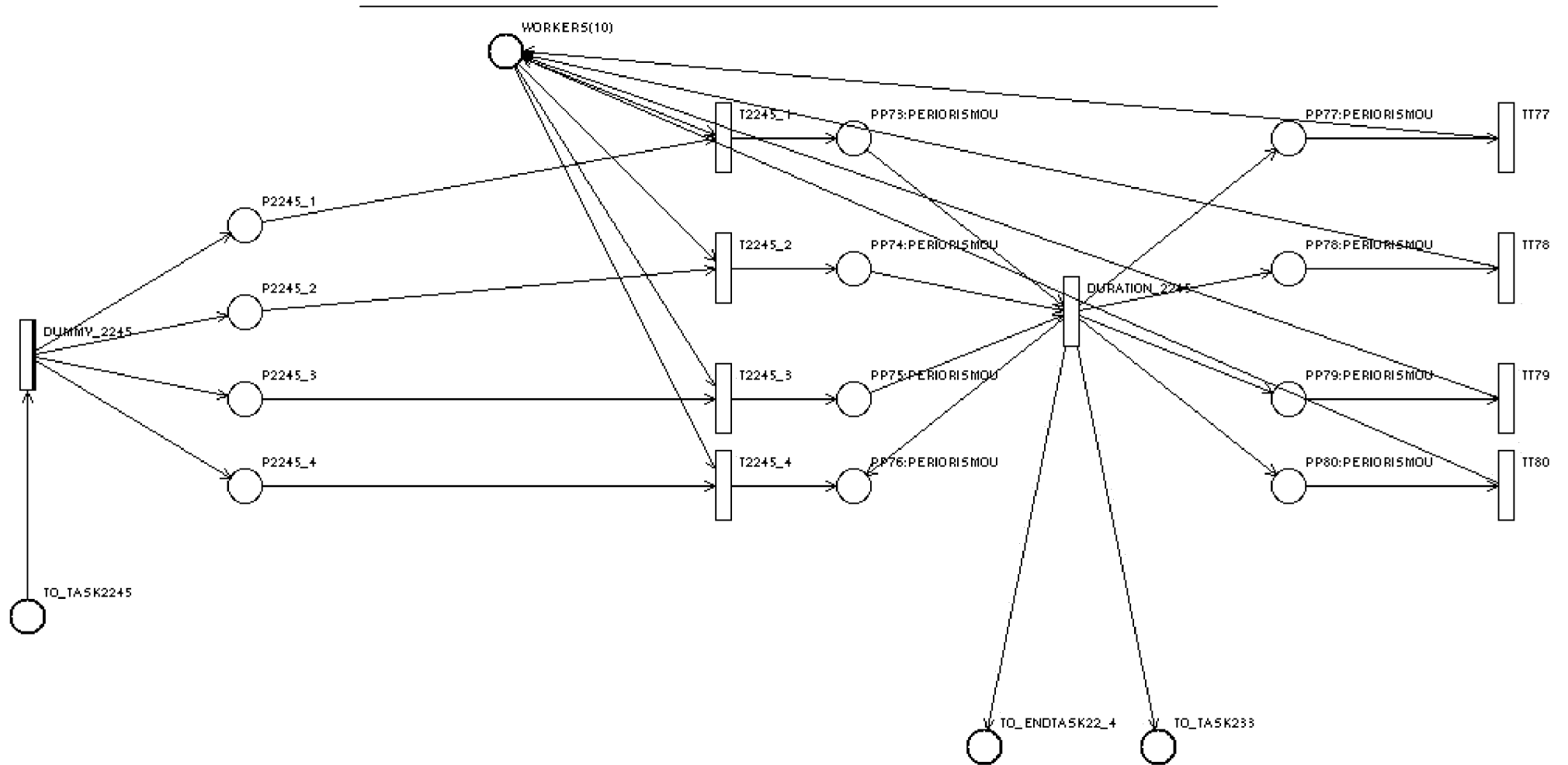
Σχήμα 6.25: Δραστηριότητα 2.2.4.2



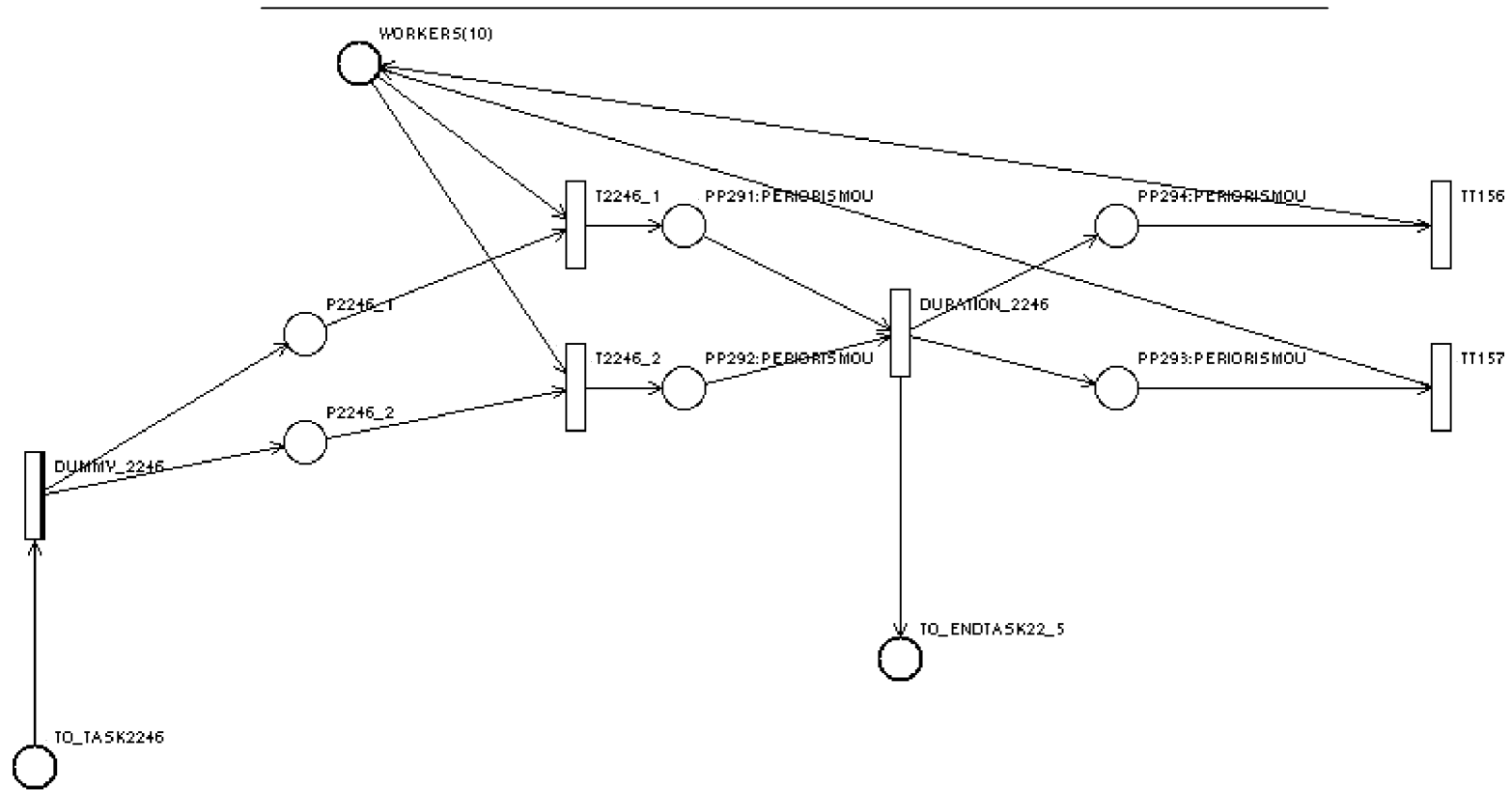
Σχήμα 6.26: Δραστηριότητα 2.2.4.3



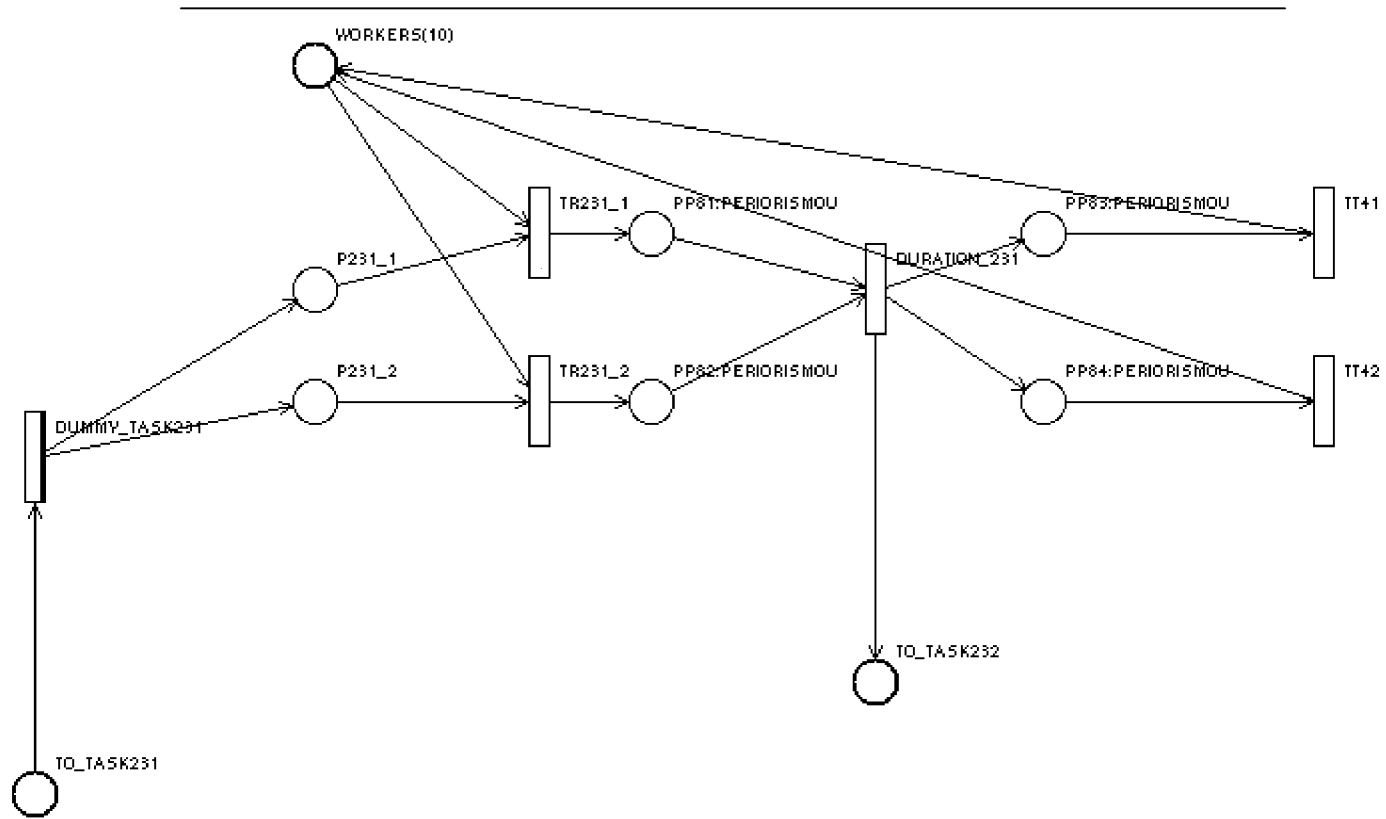
Σχήμα 6.27: Δραστηριότητα 2.2.4.4



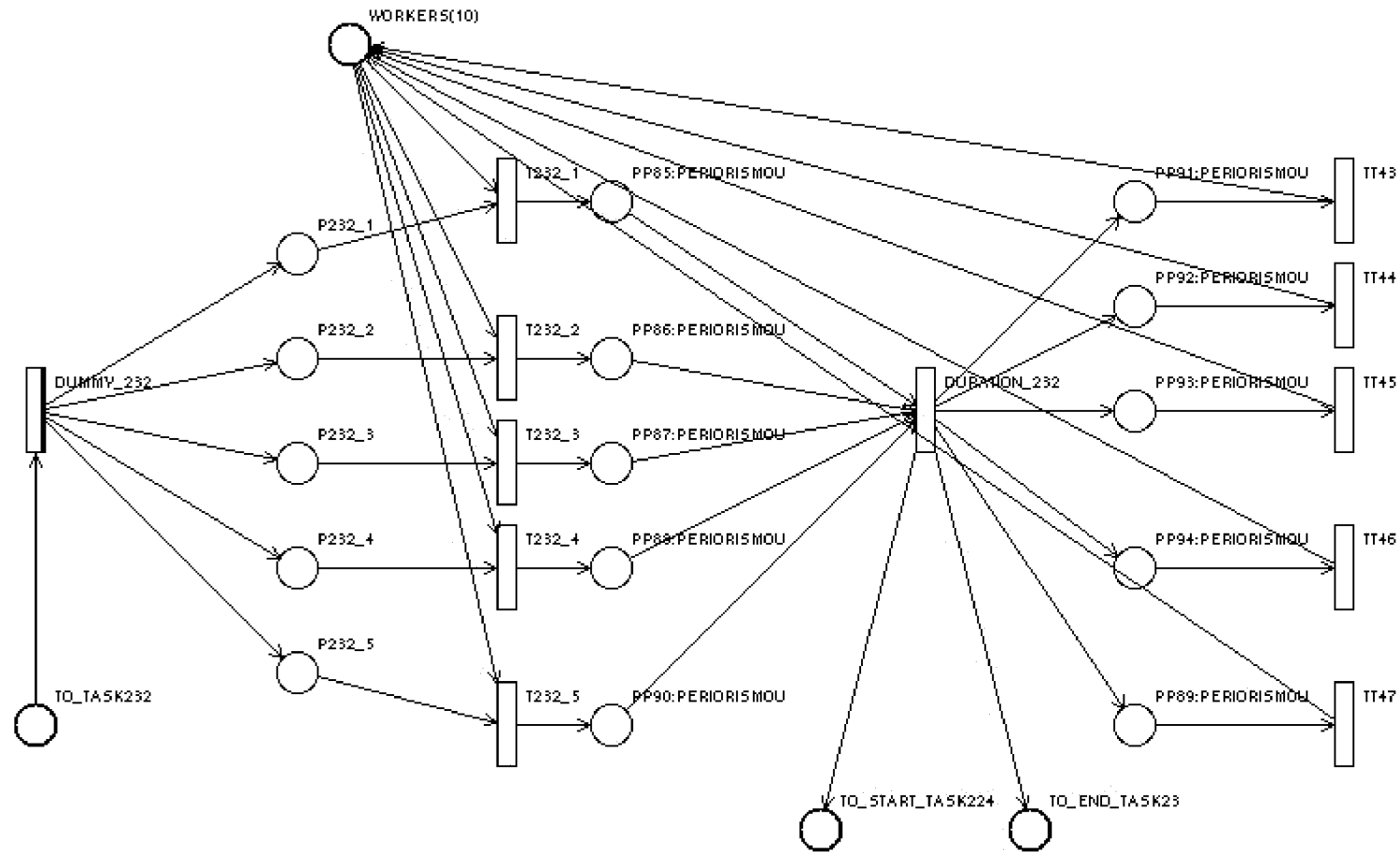
Σχήμα 6.28: Δραστηριότητα 2.2.4.5



Σχήμα 6.29: Δραστηριότητα 2.2.4.6

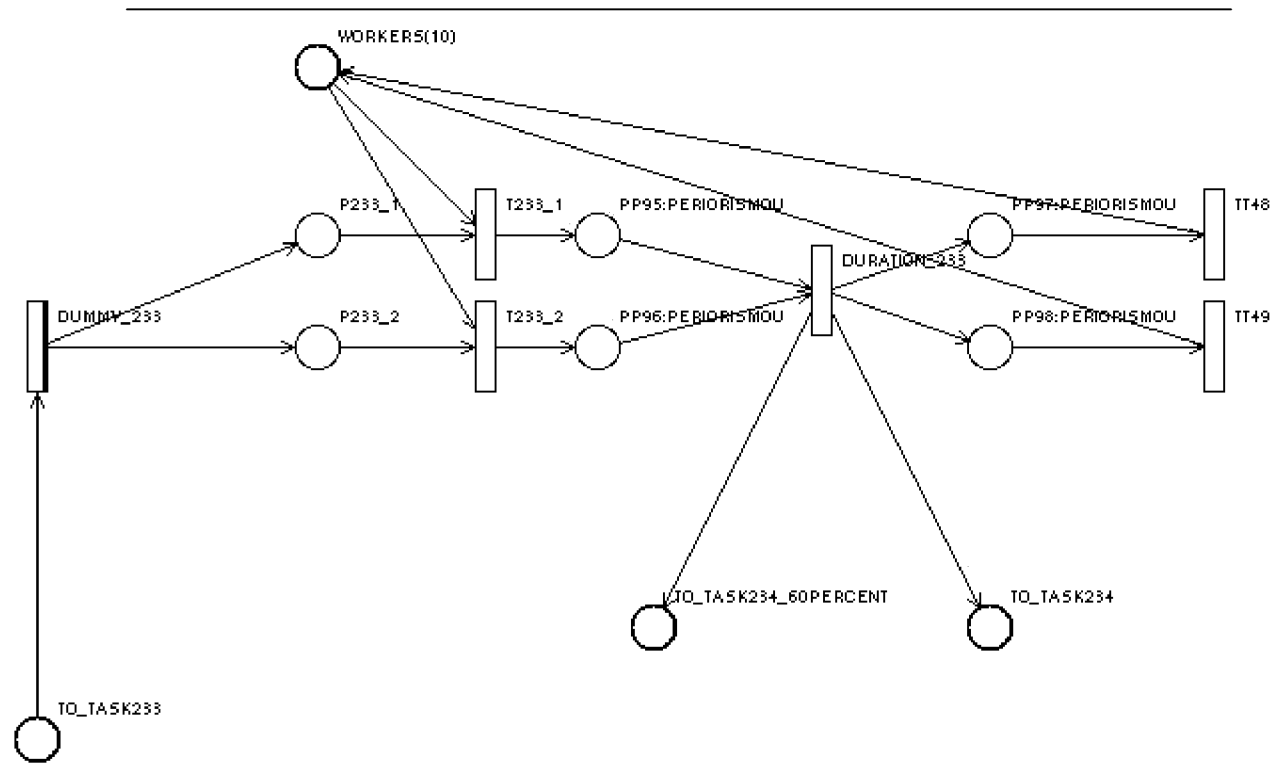


Σχήμα 6.30: Δραστηριότητα 2.3.1

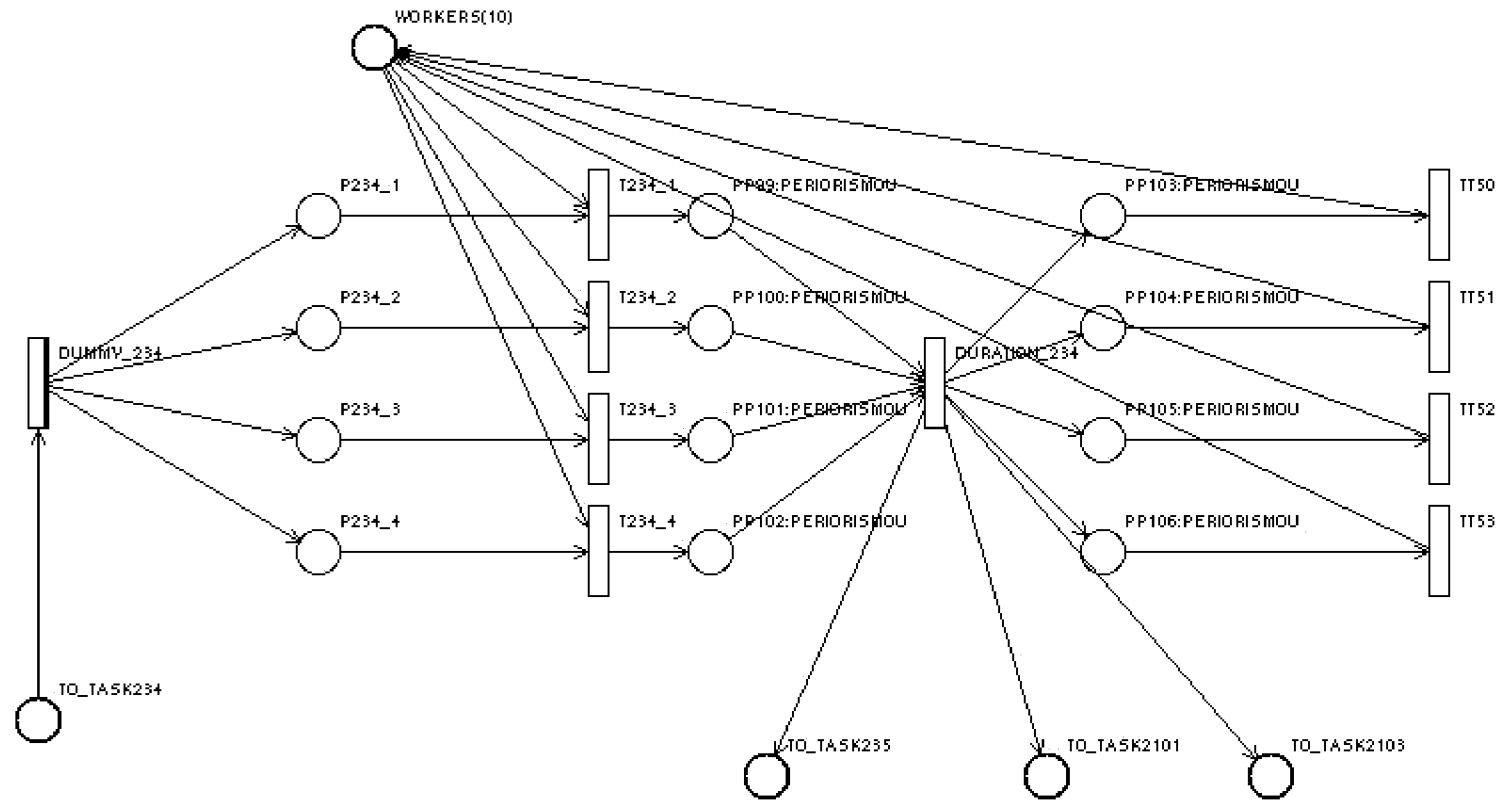


Σχήμα 6.31: Δραστηριότητα 2.3.2

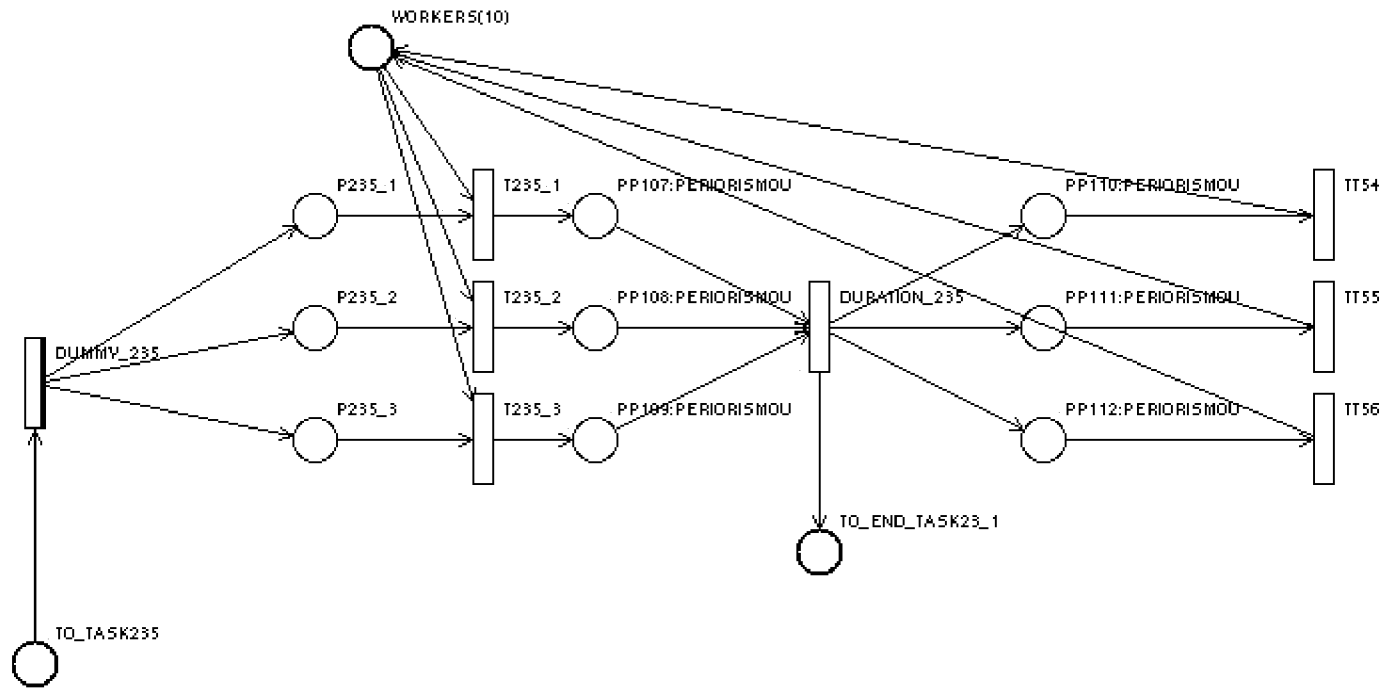




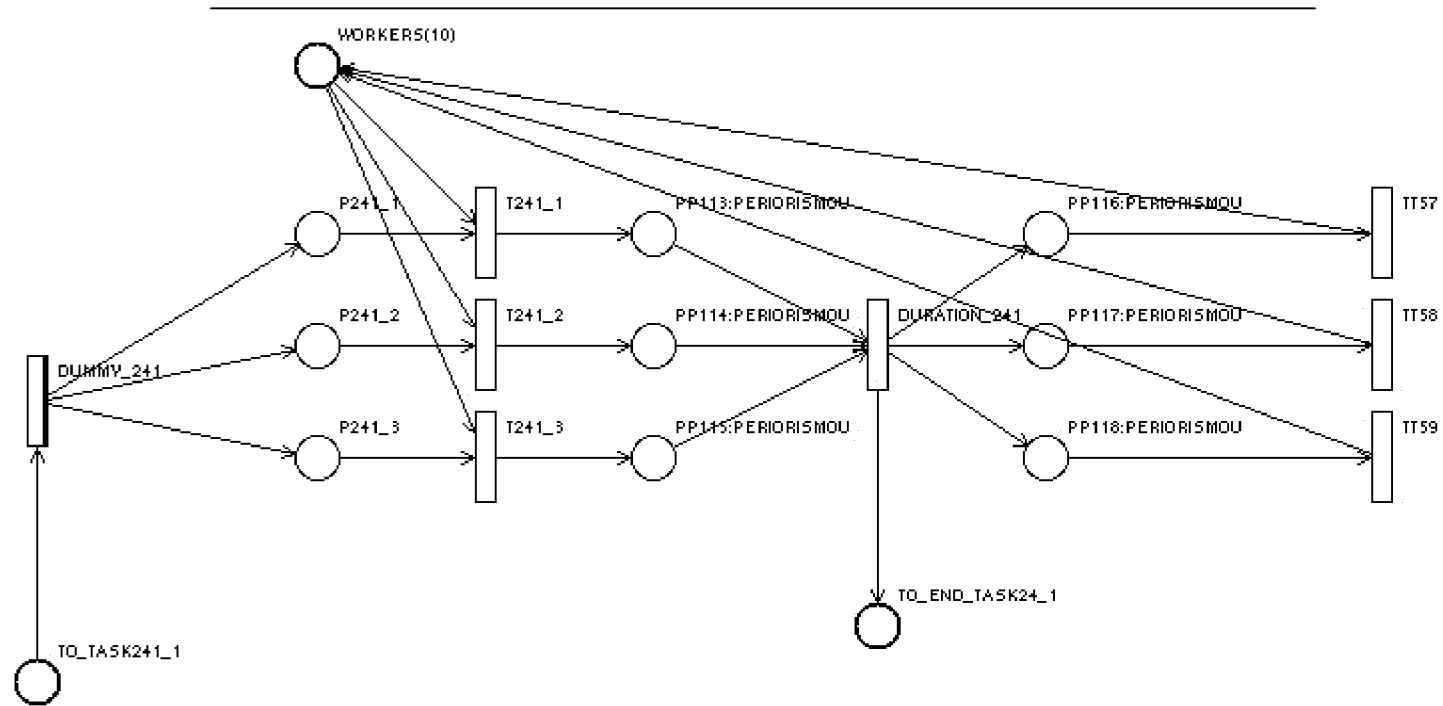
Σχήμα 6.32: Δραστηριότητα 2.3.3



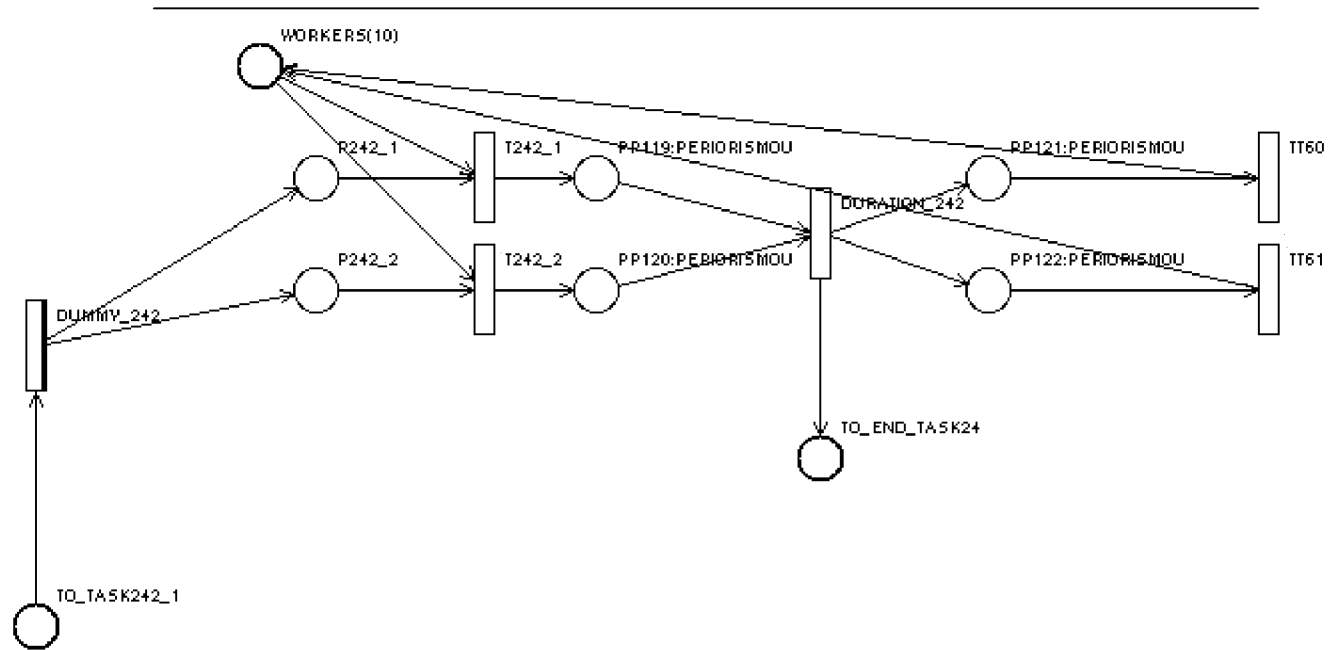
Σχήμα 6.33: Δραστηριότητα 2.3.4



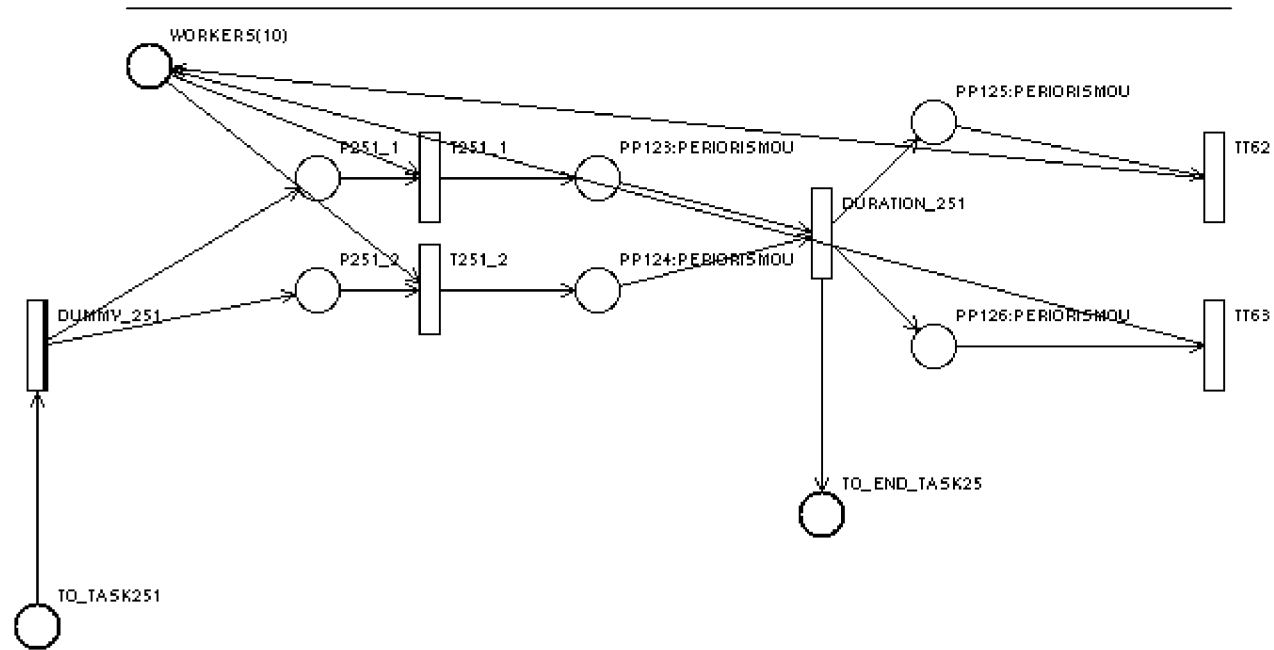
Σχήμα 6.34: Δραστηριότητα 2.3.5



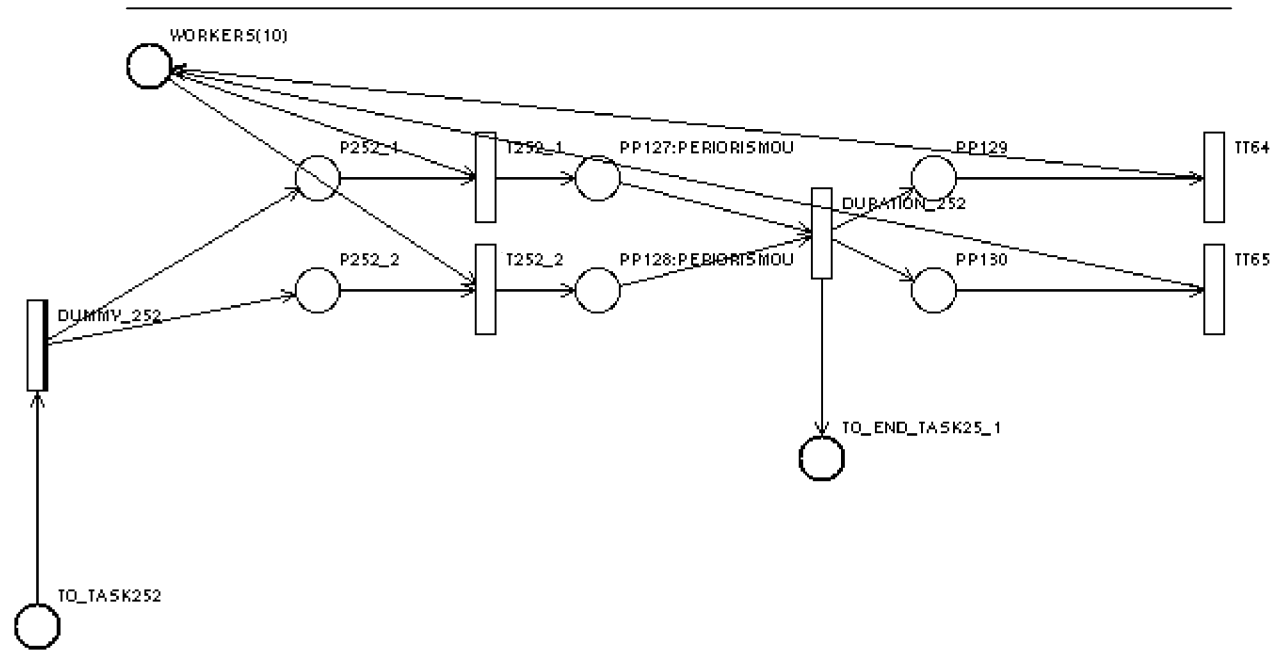
Σχήμα 6.35: Δραστηριότητα 2.4.1



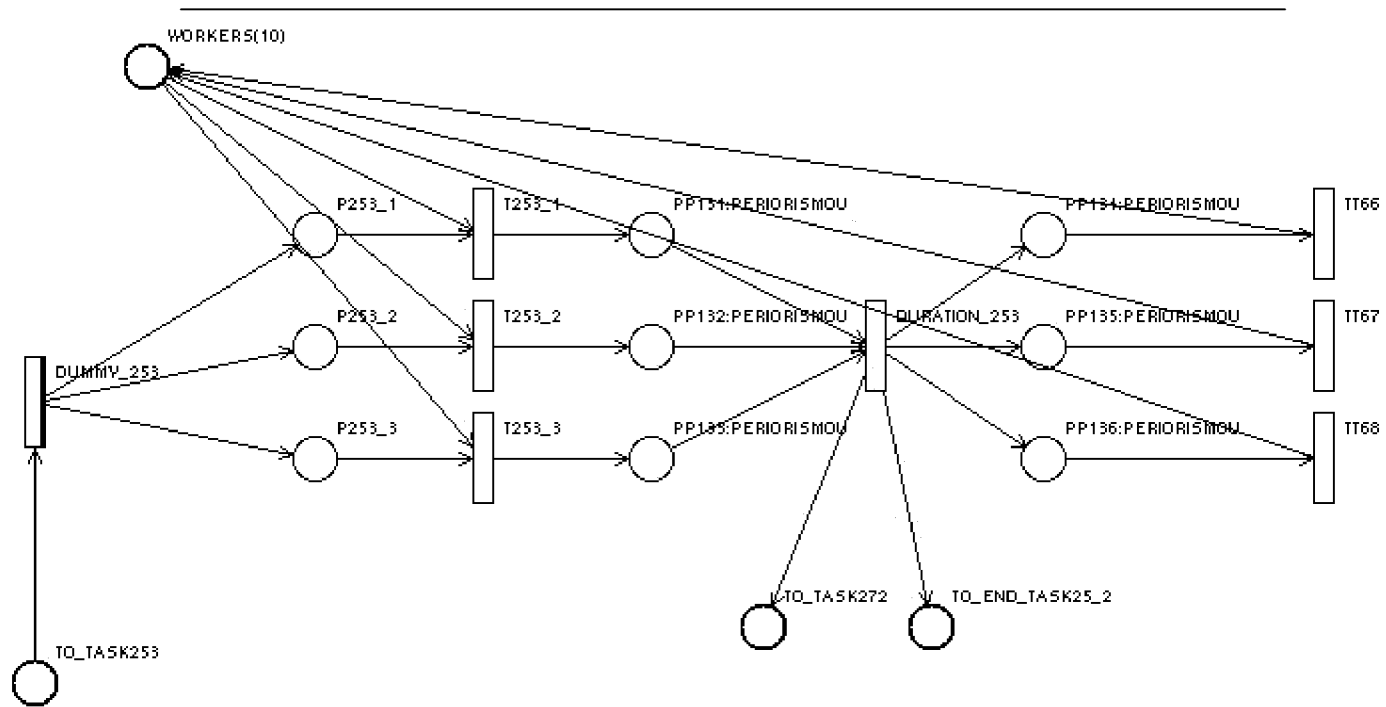
Σχήμα 6.36: Δραστηριότητα 2.4.2



Σχήμα 6.37: Δραστηριότητα 2.5.1

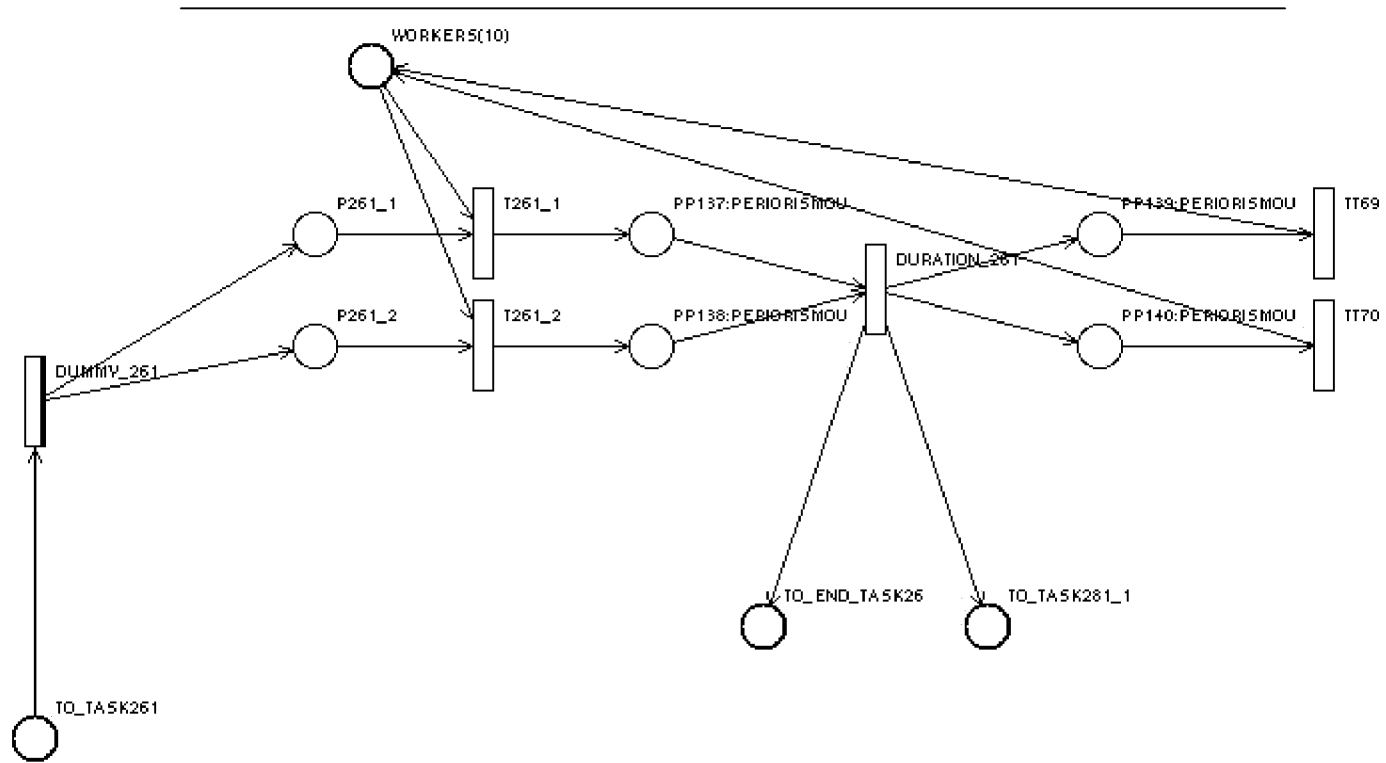


Σχήμα 6.38: Δραστηριότητα 2.5.2

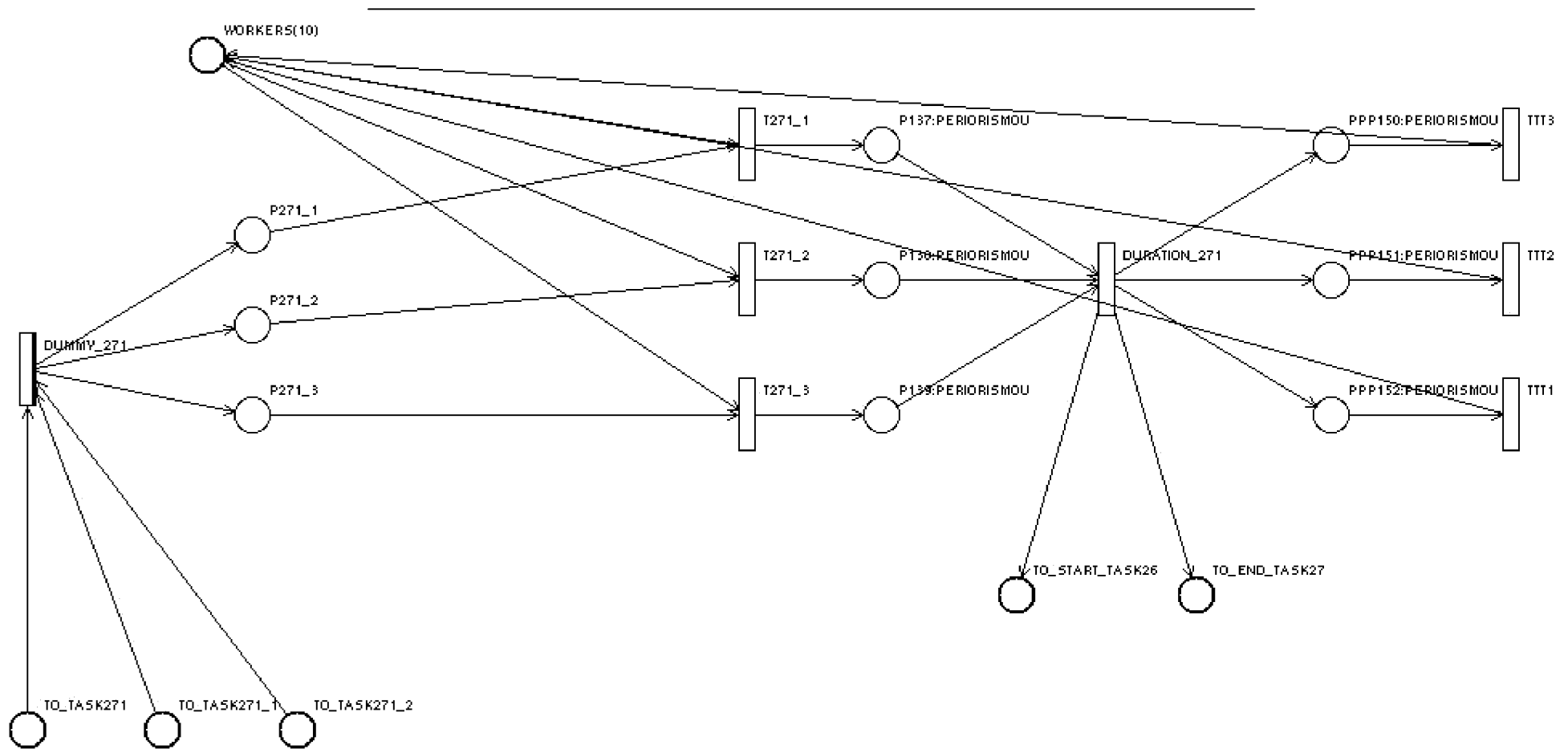


Σχήμα 6.39: Δραστηριότητα 2.5.3

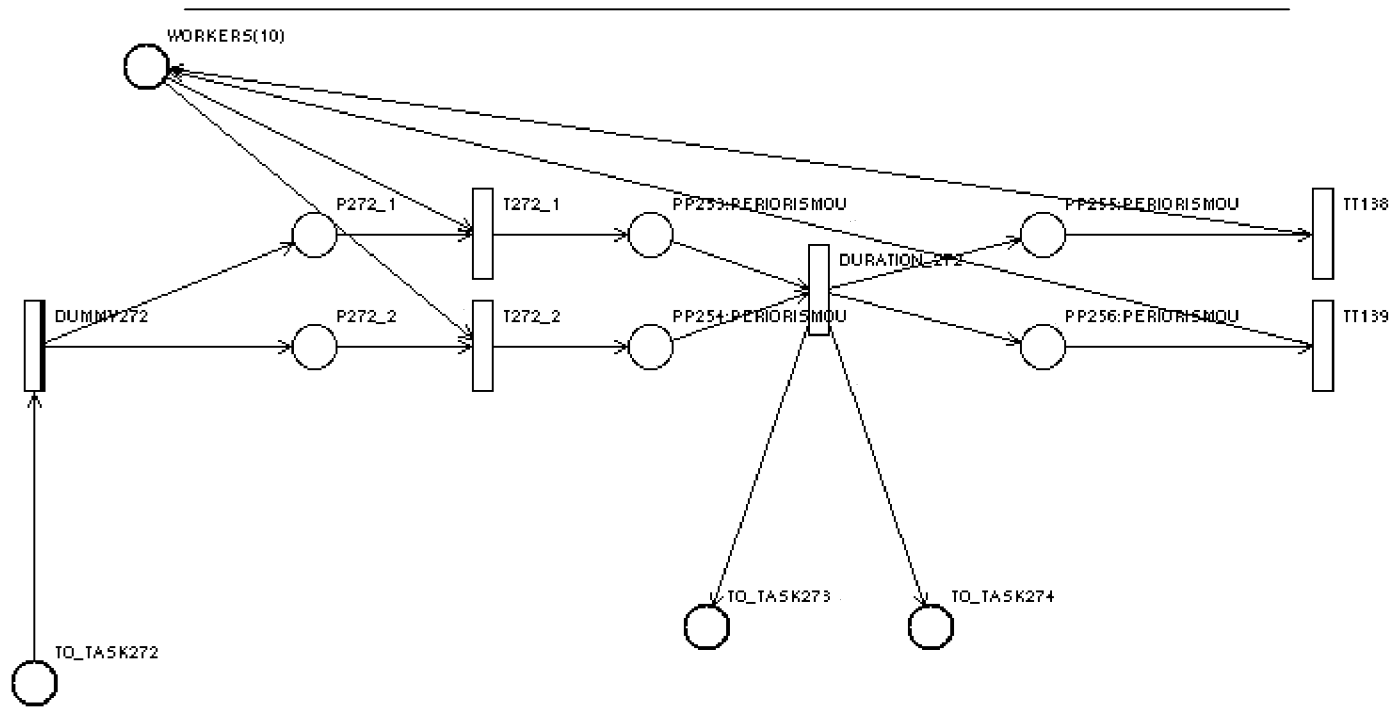




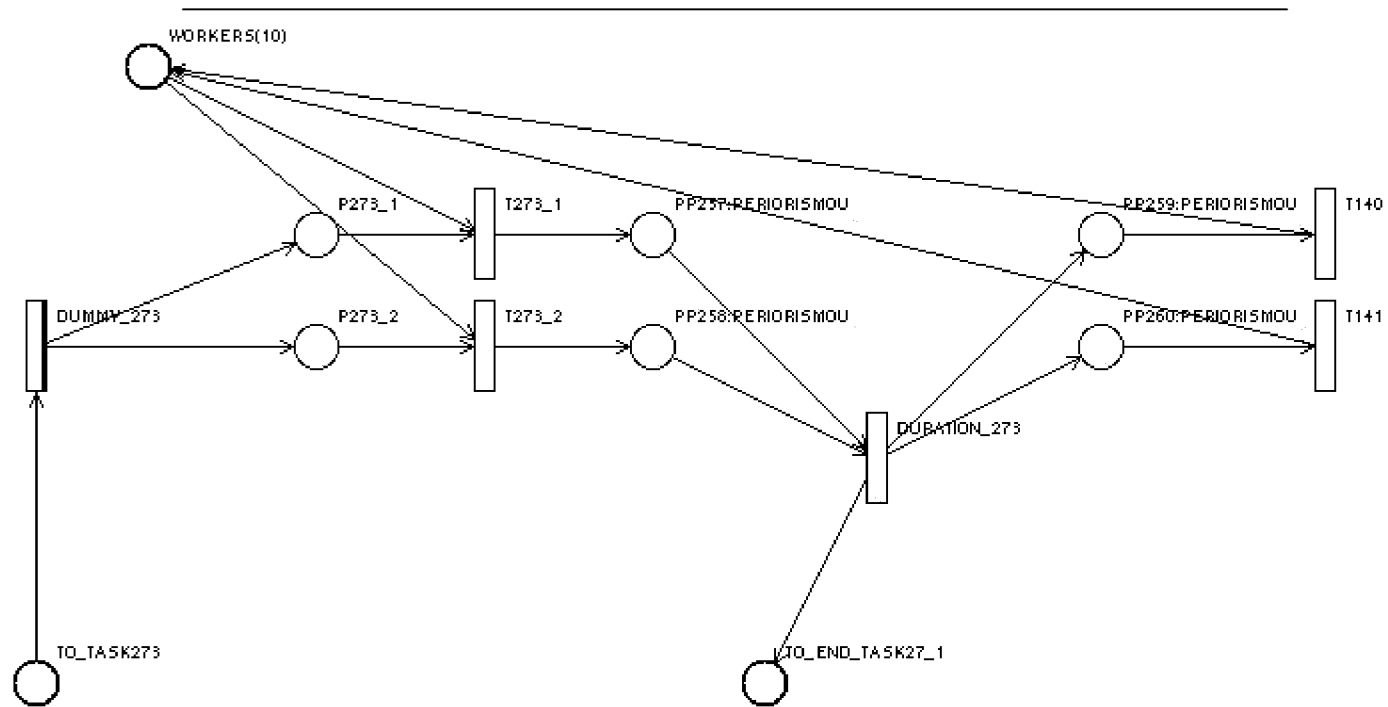
Σχήμα 6.40: Δραστηριότητα 2.6.1



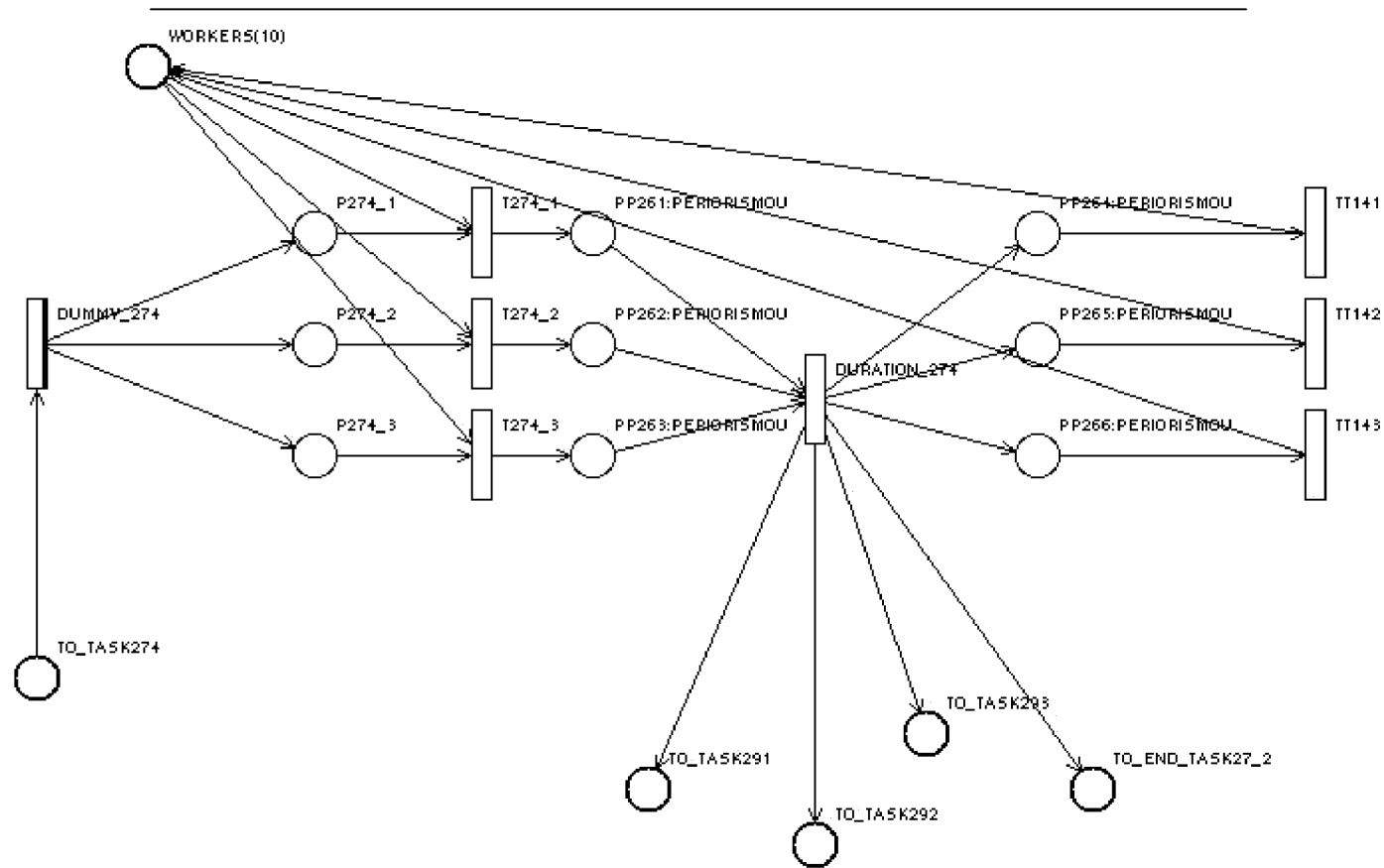
Σχήμα 6.41: Δραστηριότητα 2.7.1



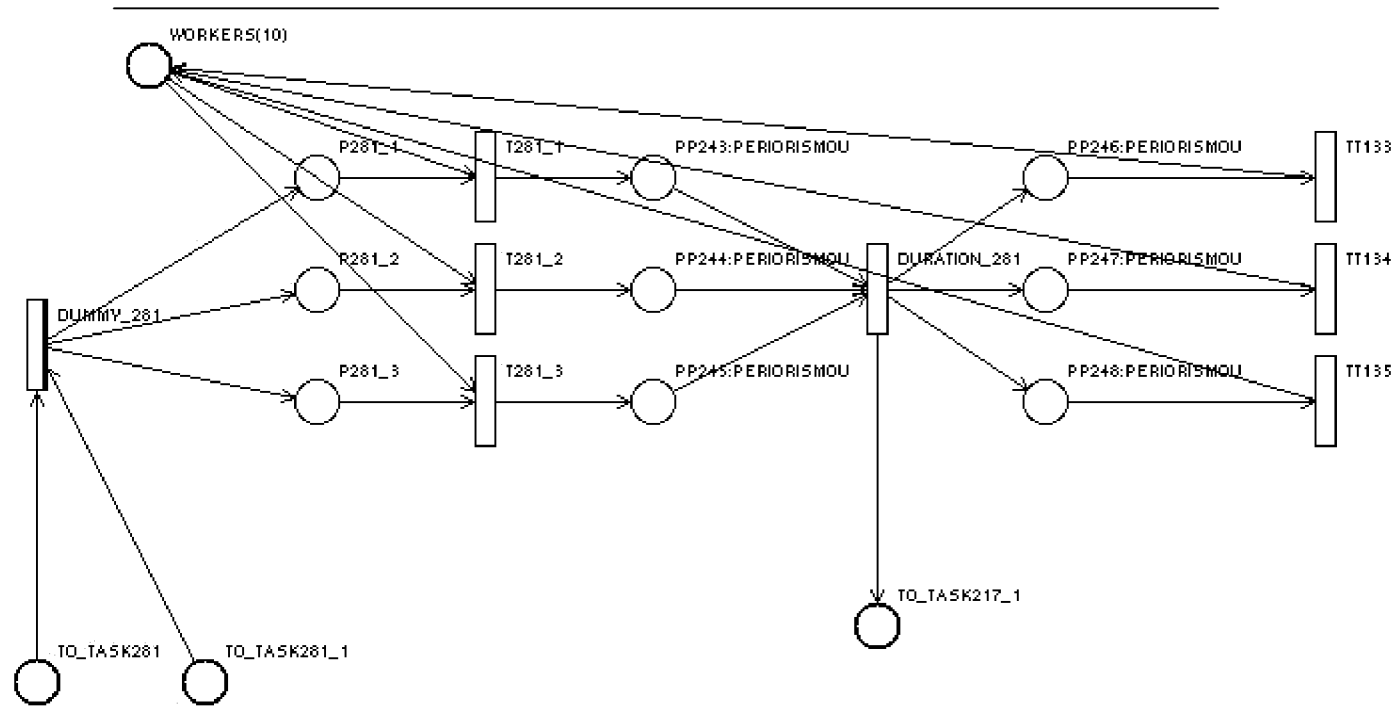
Σχήμα 6.42: Δραστηριότητα 2.7.2



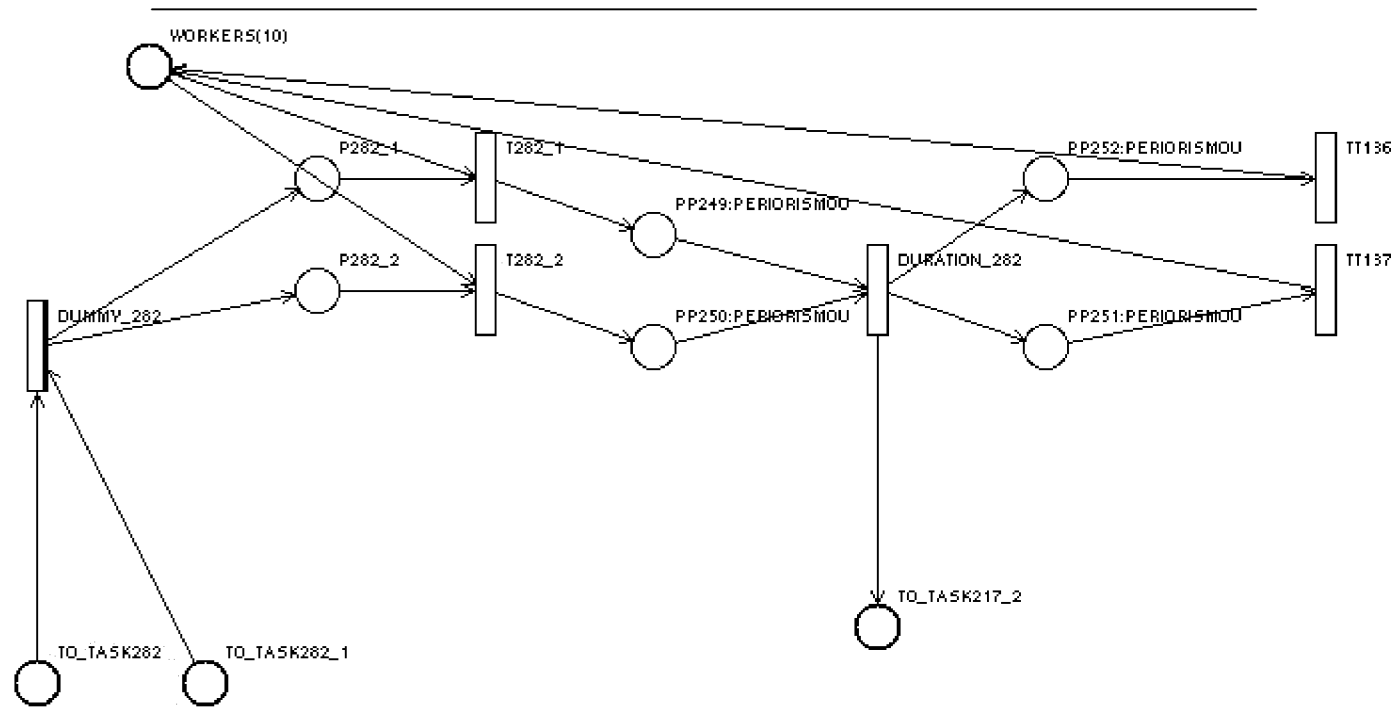
Σχήμα 6.43: Δραστηριότητα 2.7.3



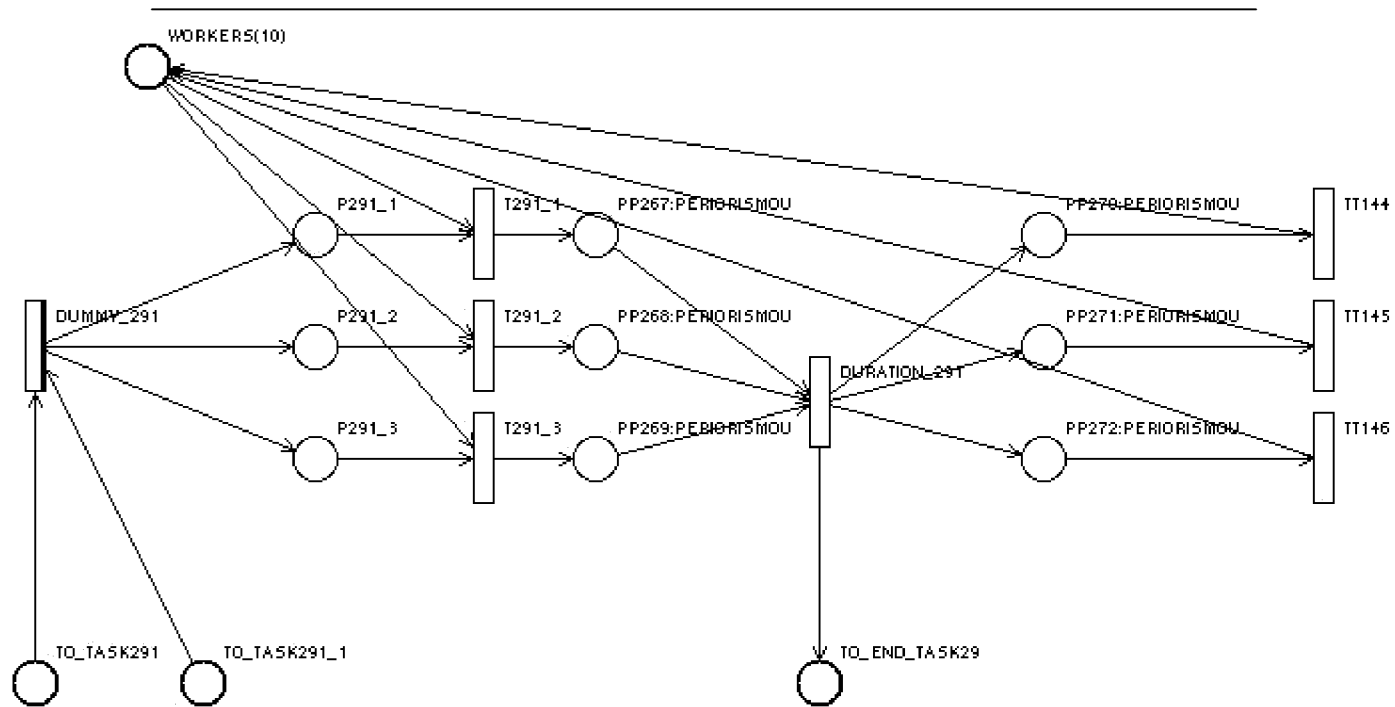
Σχήμα 6.44: Δραστηριότητα 2.7.4



Σχήμα 6.45: Δραστηριότητα 2.8.1

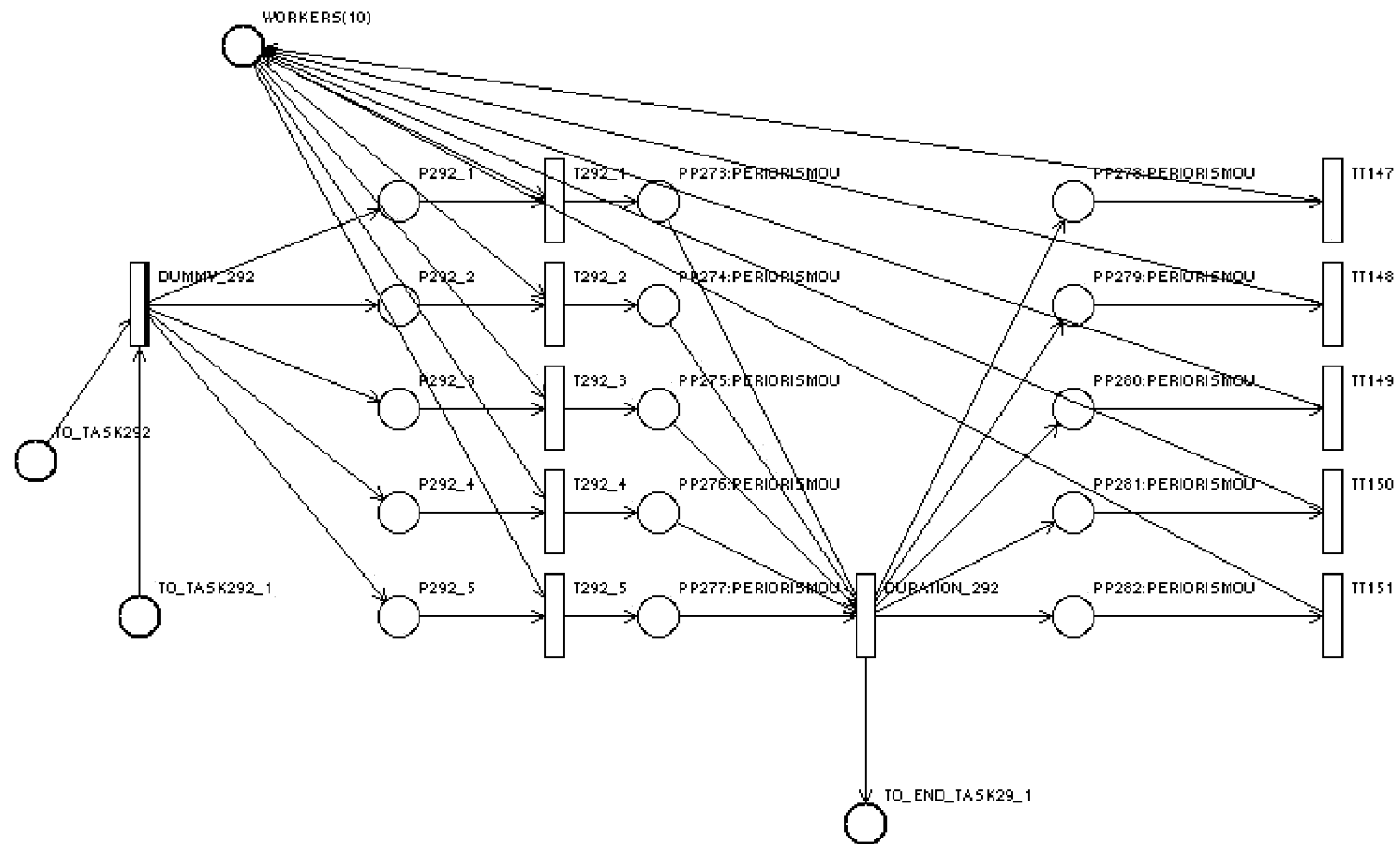


Σχήμα 6.46: Δραστηριότητα 2.8.2

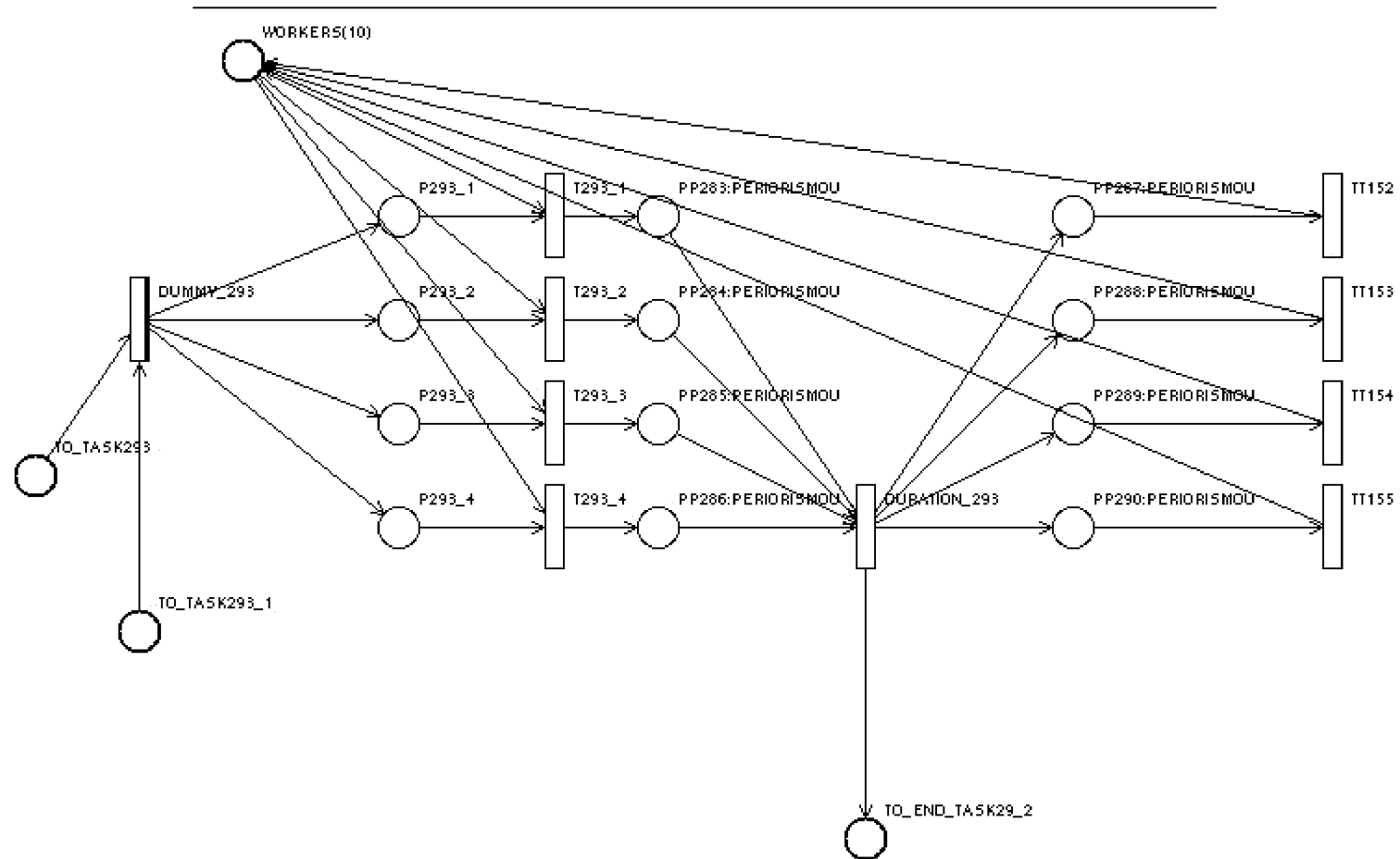


Σχήμα 6.47: Δραστηριότητα 2.9.1

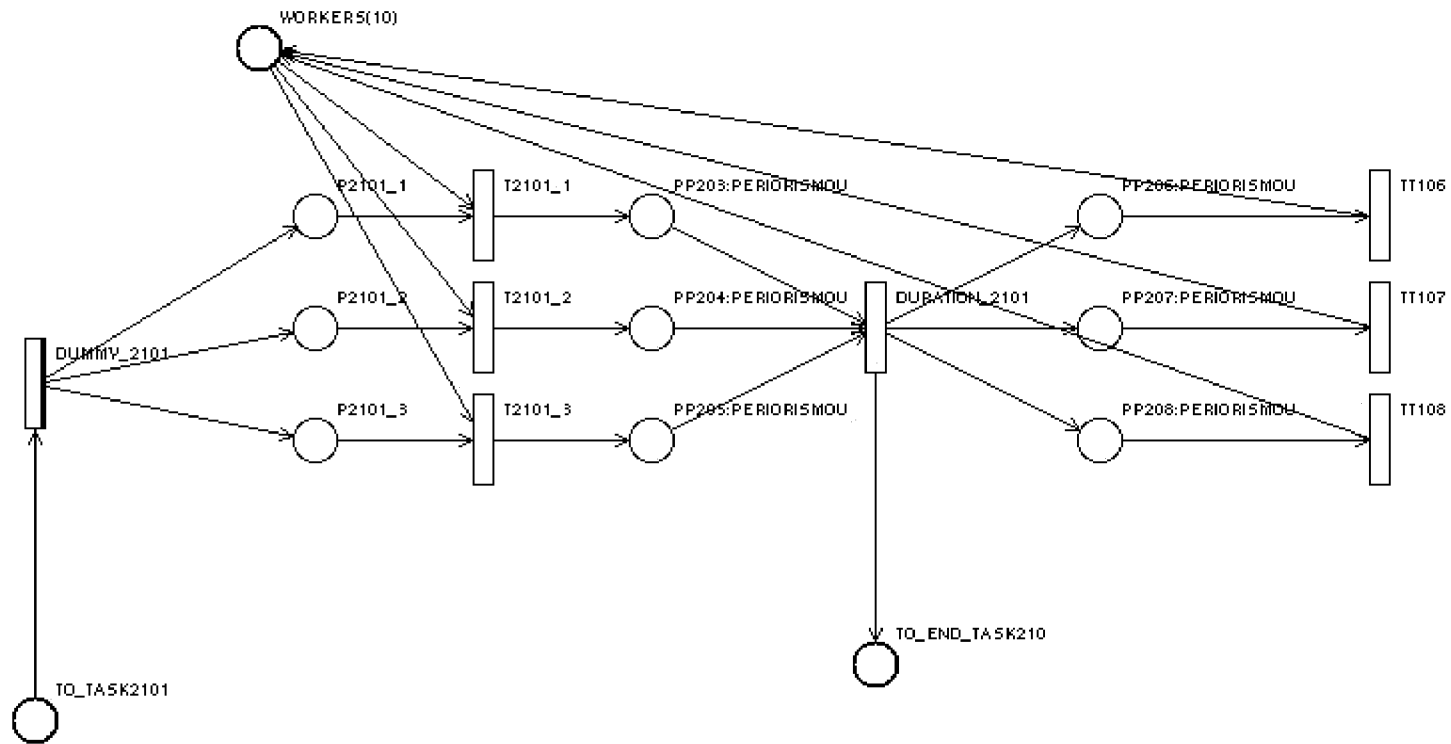




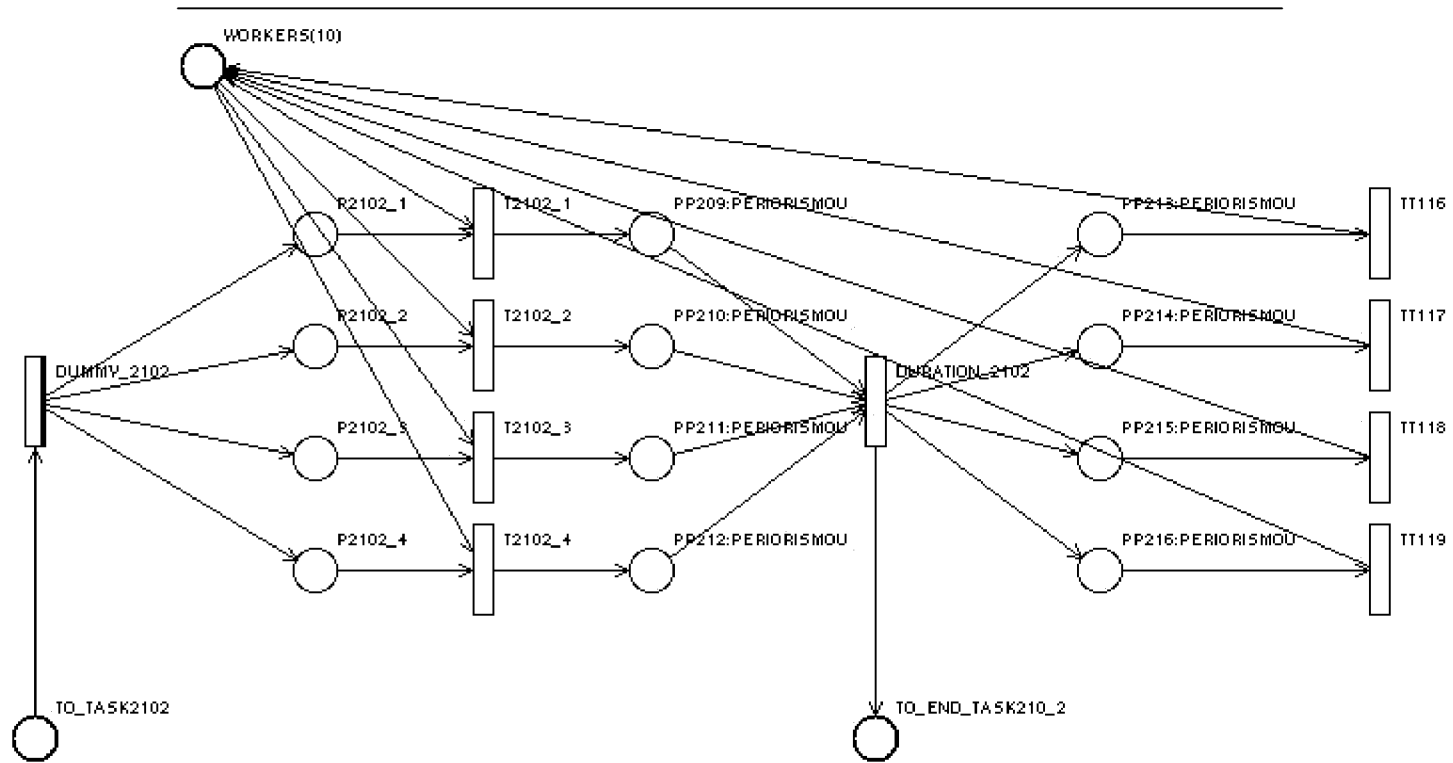
Σχήμα 6.48: Δραστηριότητα 2.9.2



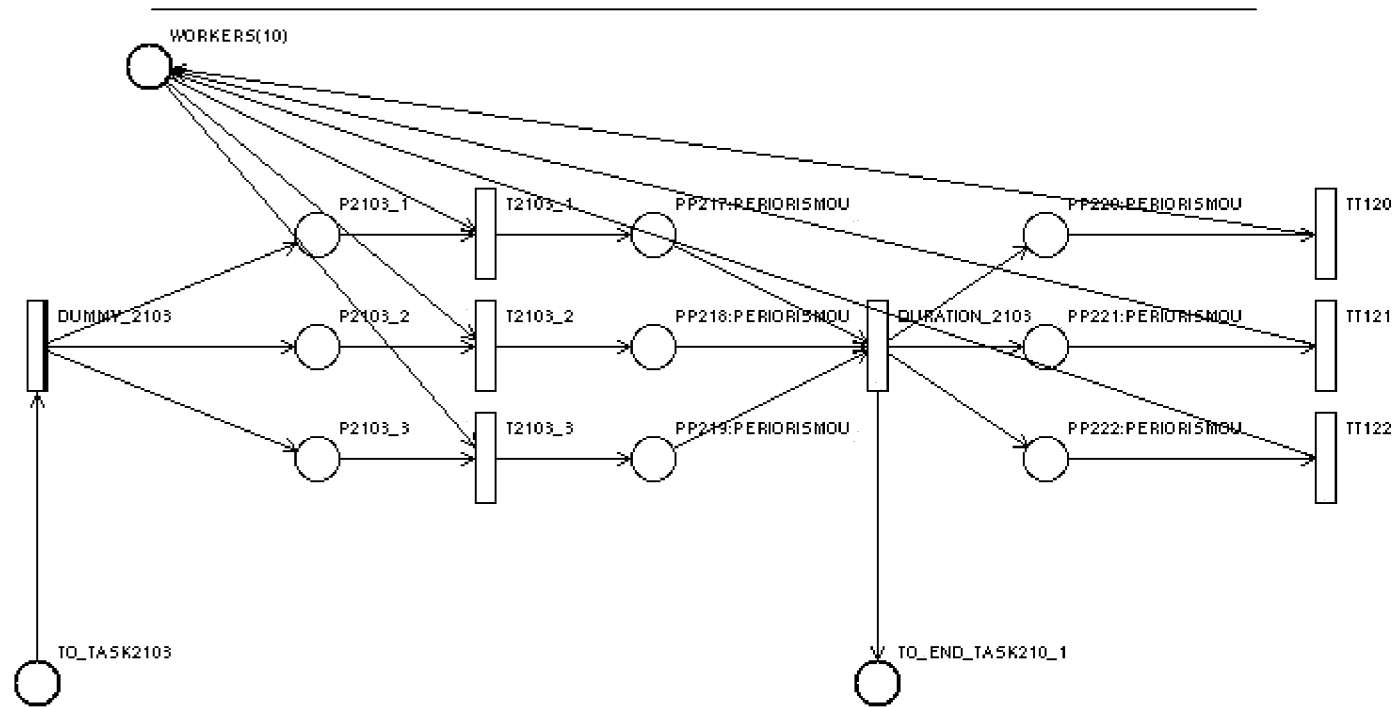
Σχήμα 6.49: Δραστηριότητα 2.9.3



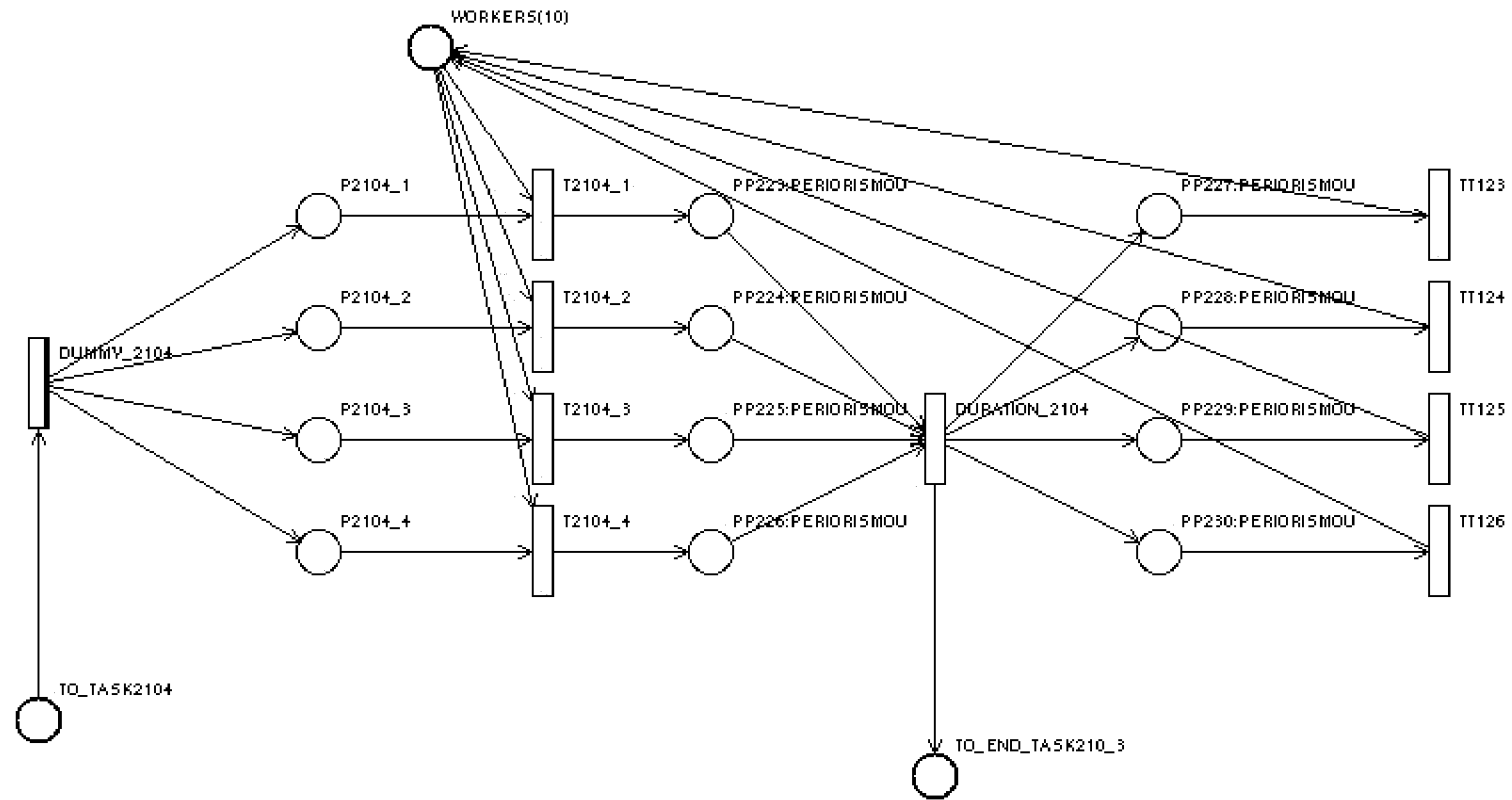
Σχήμα 6.50: Δραστηριότητα 2.10.1



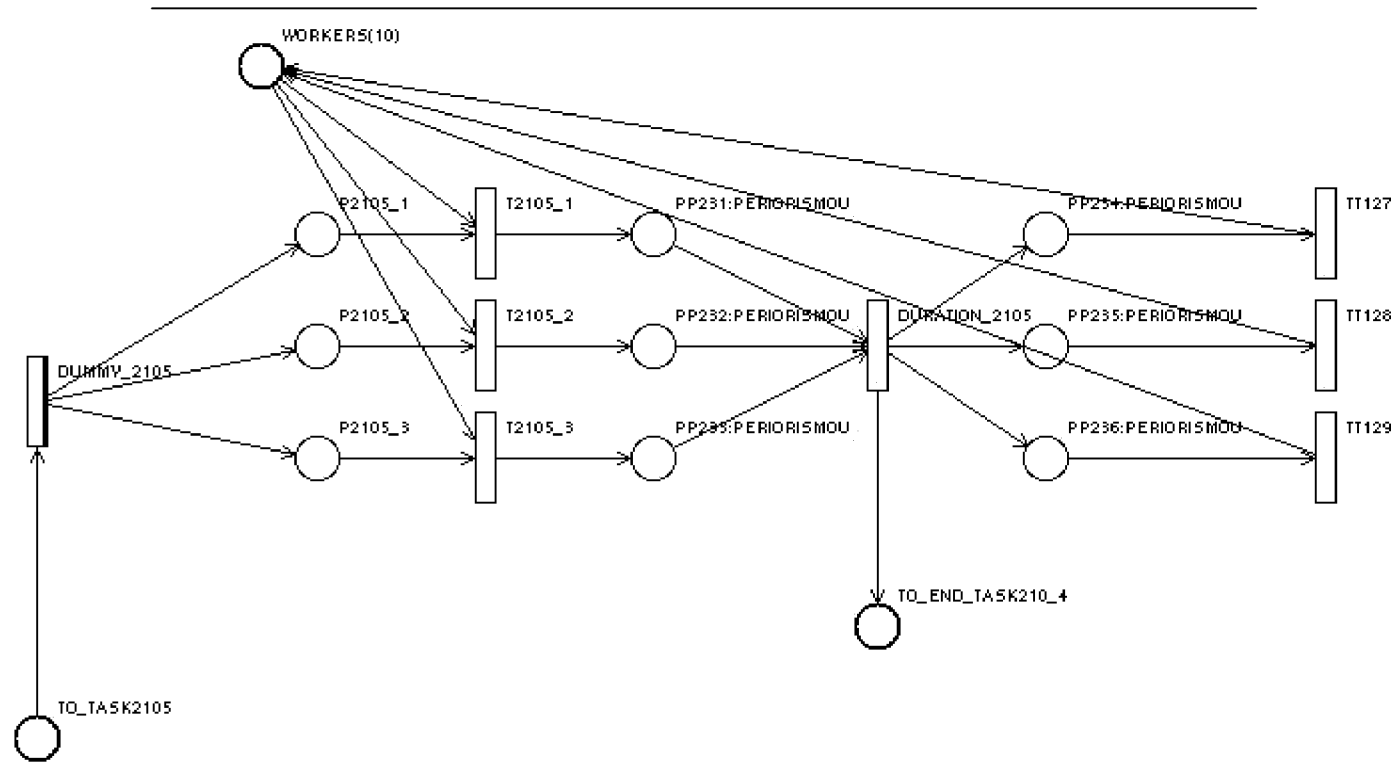
Σχήμα 6.51: Δραστηριότητα 2.10.2



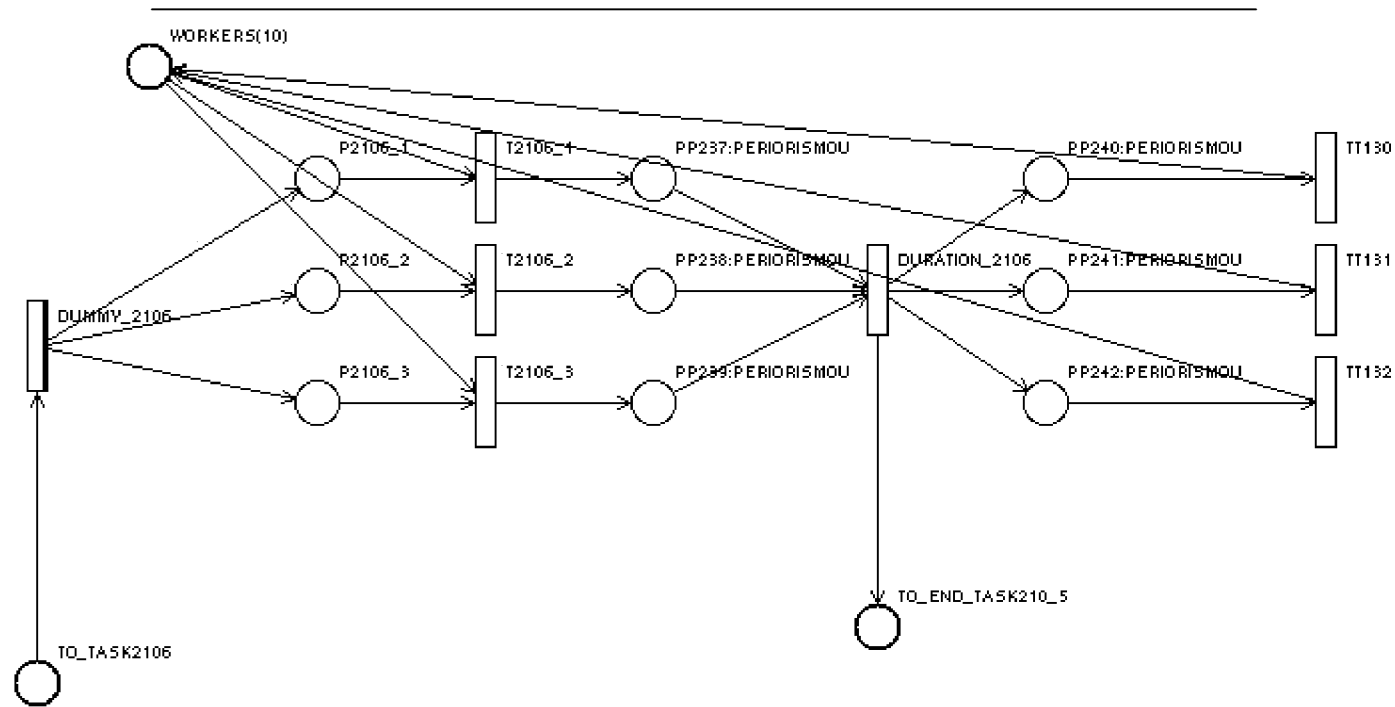
Σχήμα 6.52: Δραστηριότητα 2.10.3



Σχήμα 6.53: Δραστηριότητα 2.10.4

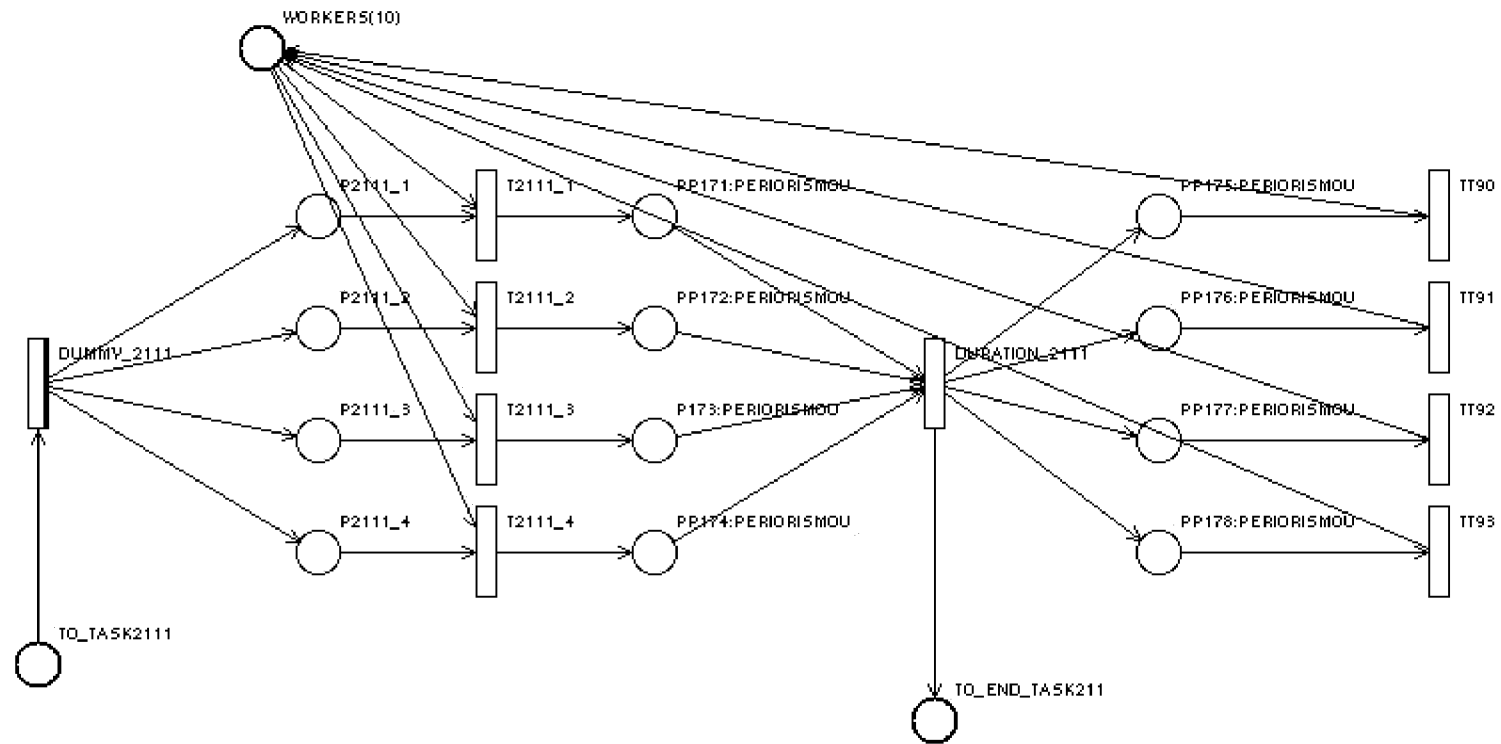


Σχήμα 6.54: Δραστηριότητα 2.10.5

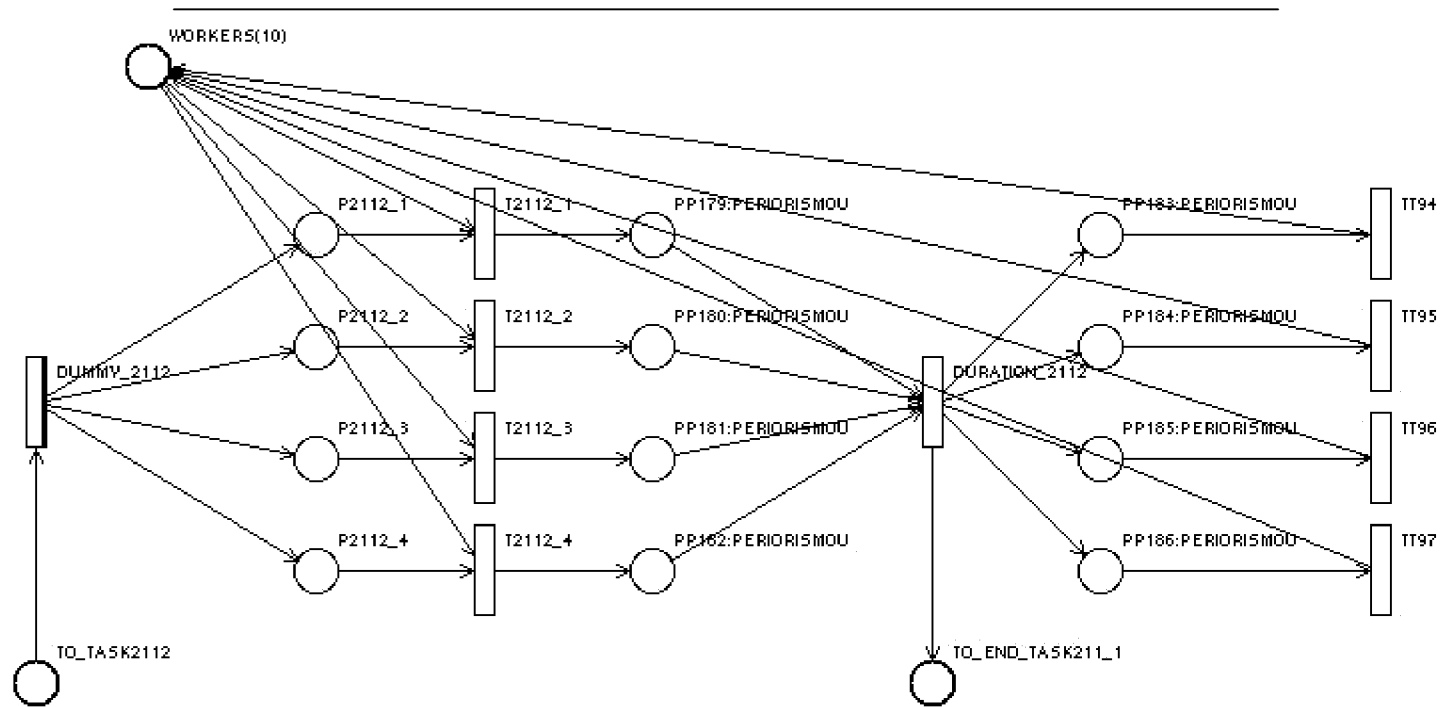


Σχήμα 6.55: Δραστηριότητα 2.10.6

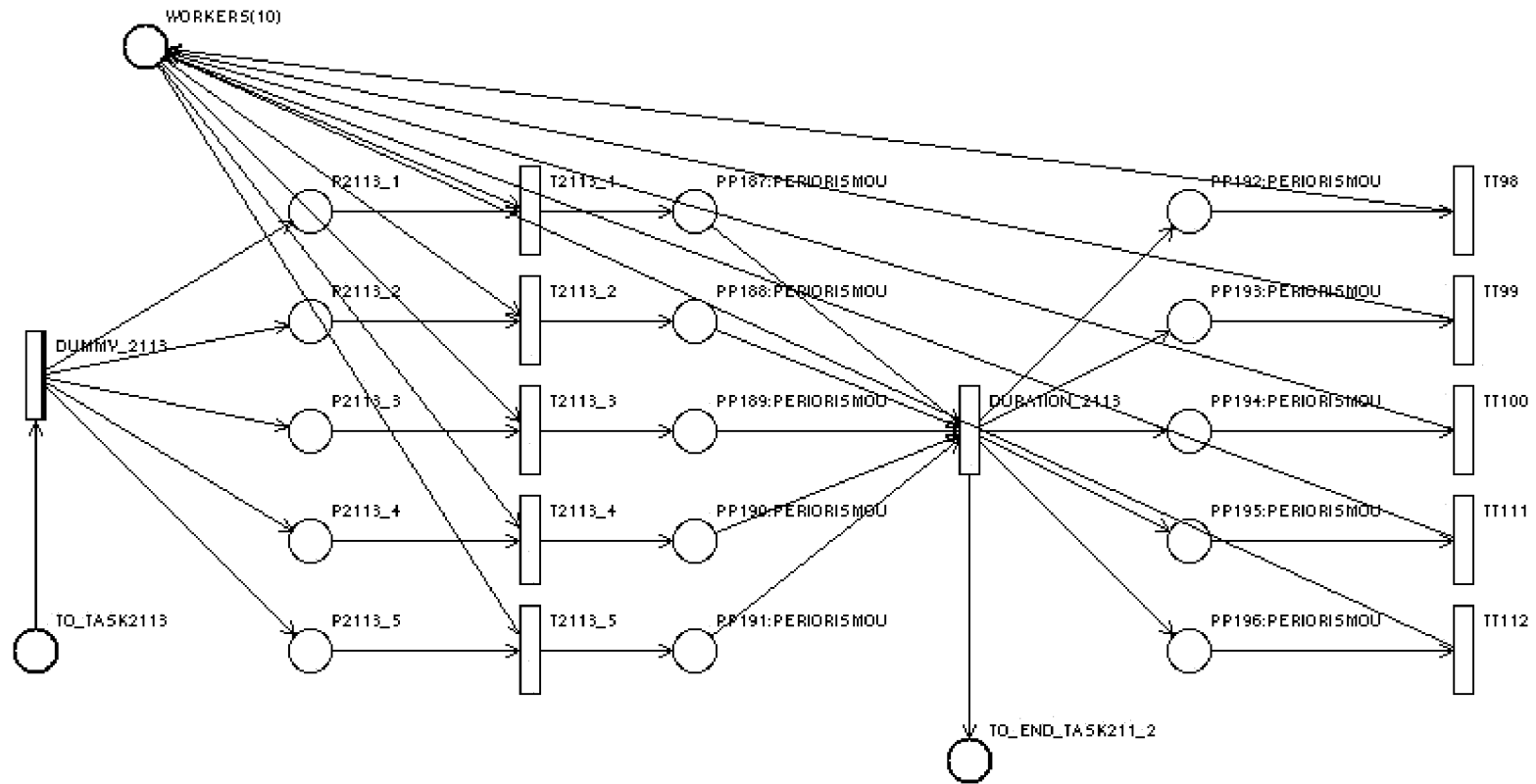




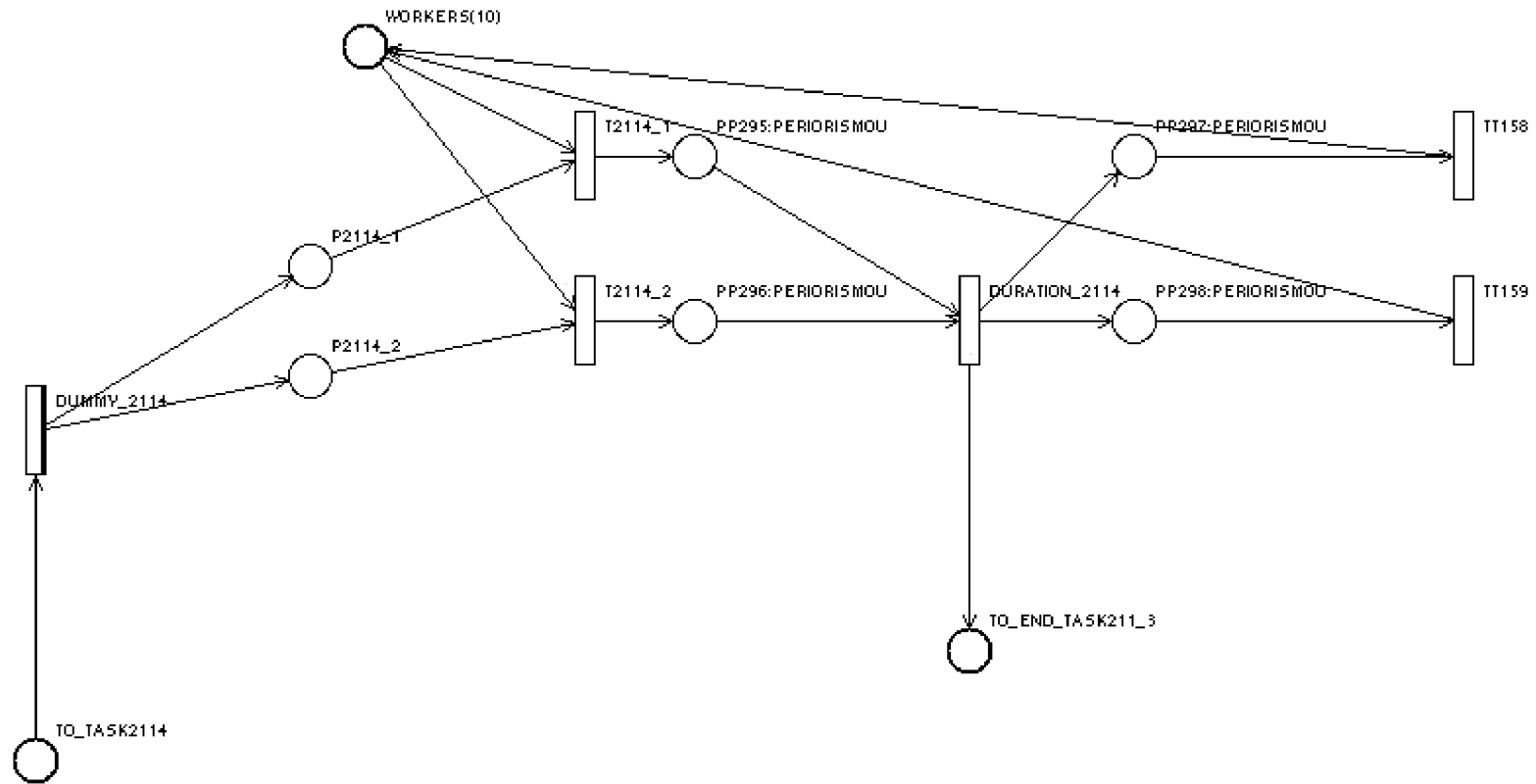
Σχήμα 6.56: Δραστηριότητα 2.11.1



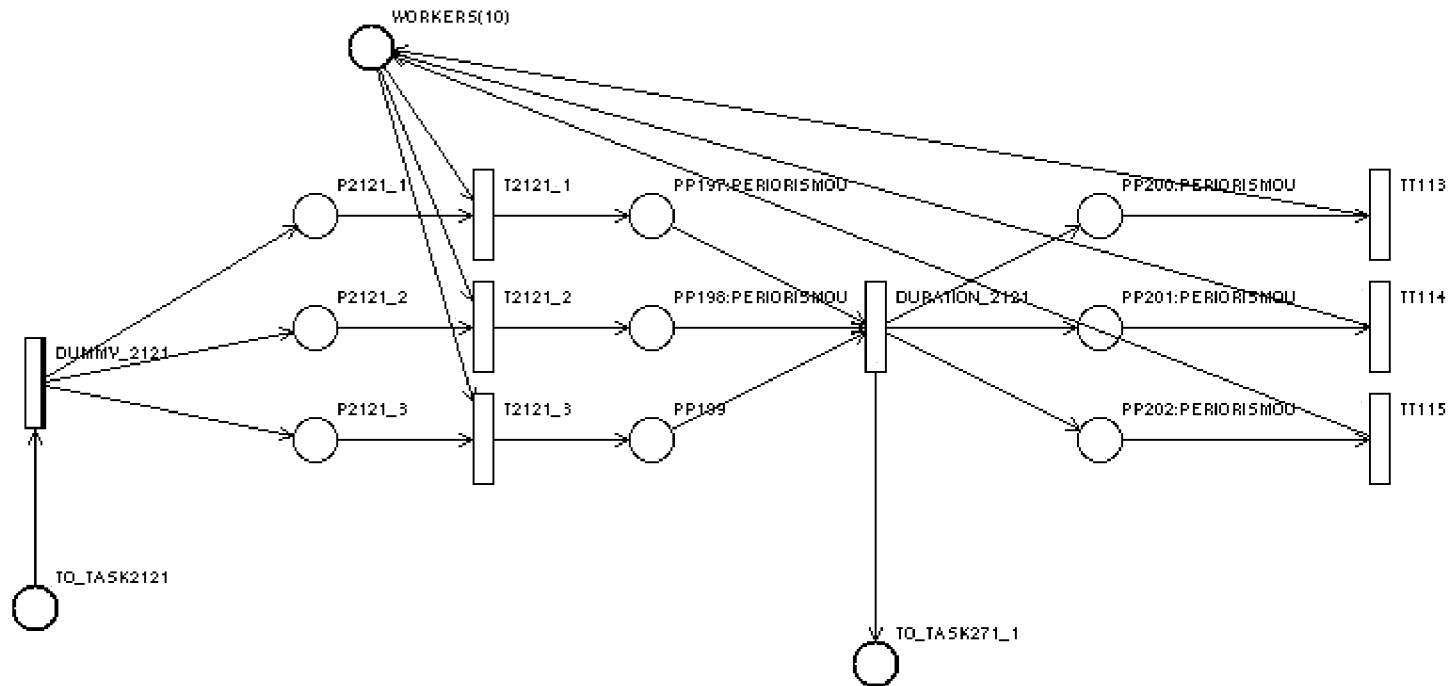
Σχήμα 6.57: Δραστηριότητα 2.11.2



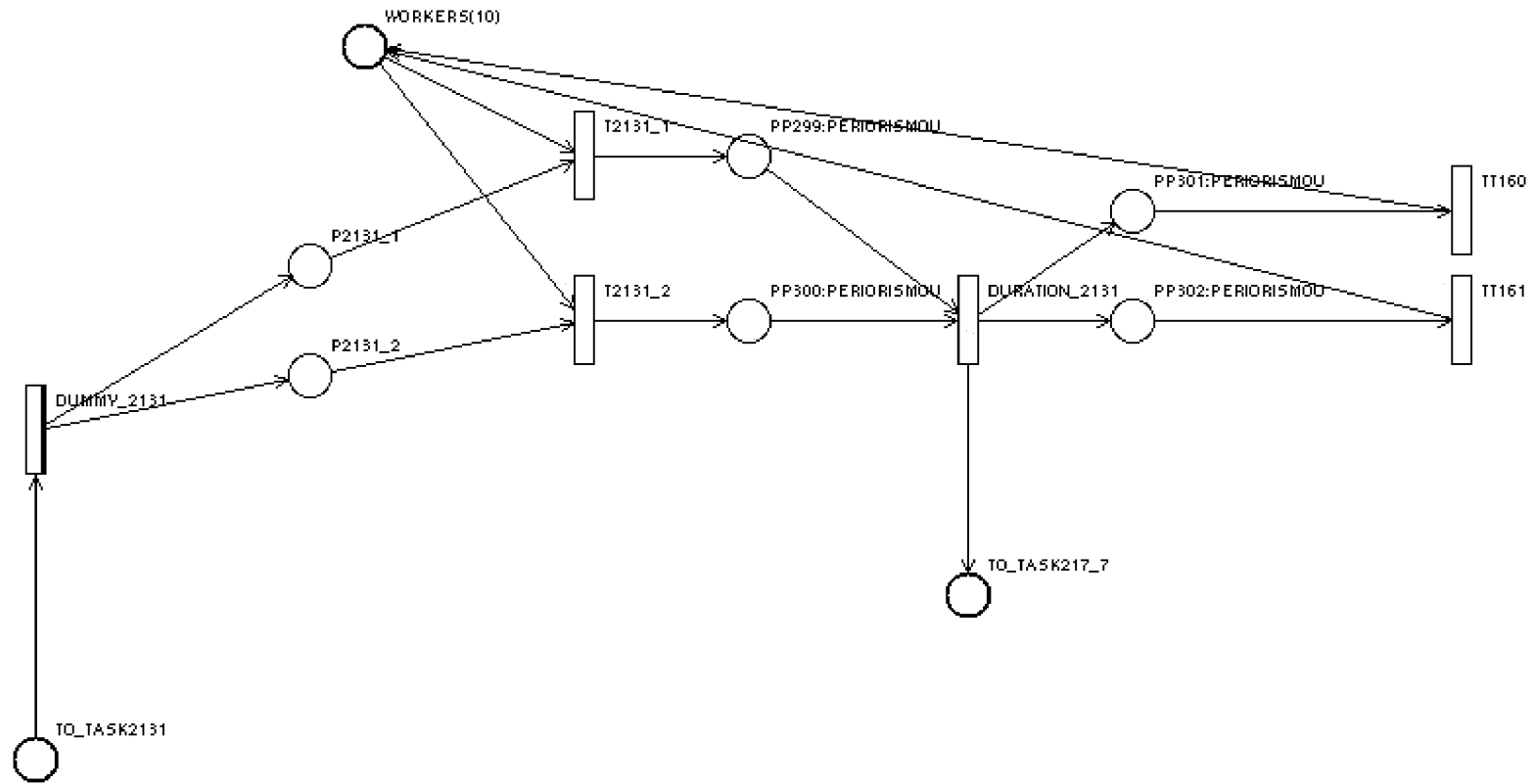
Σχήμα 6.58: Δραστηριότητα 2.11.3



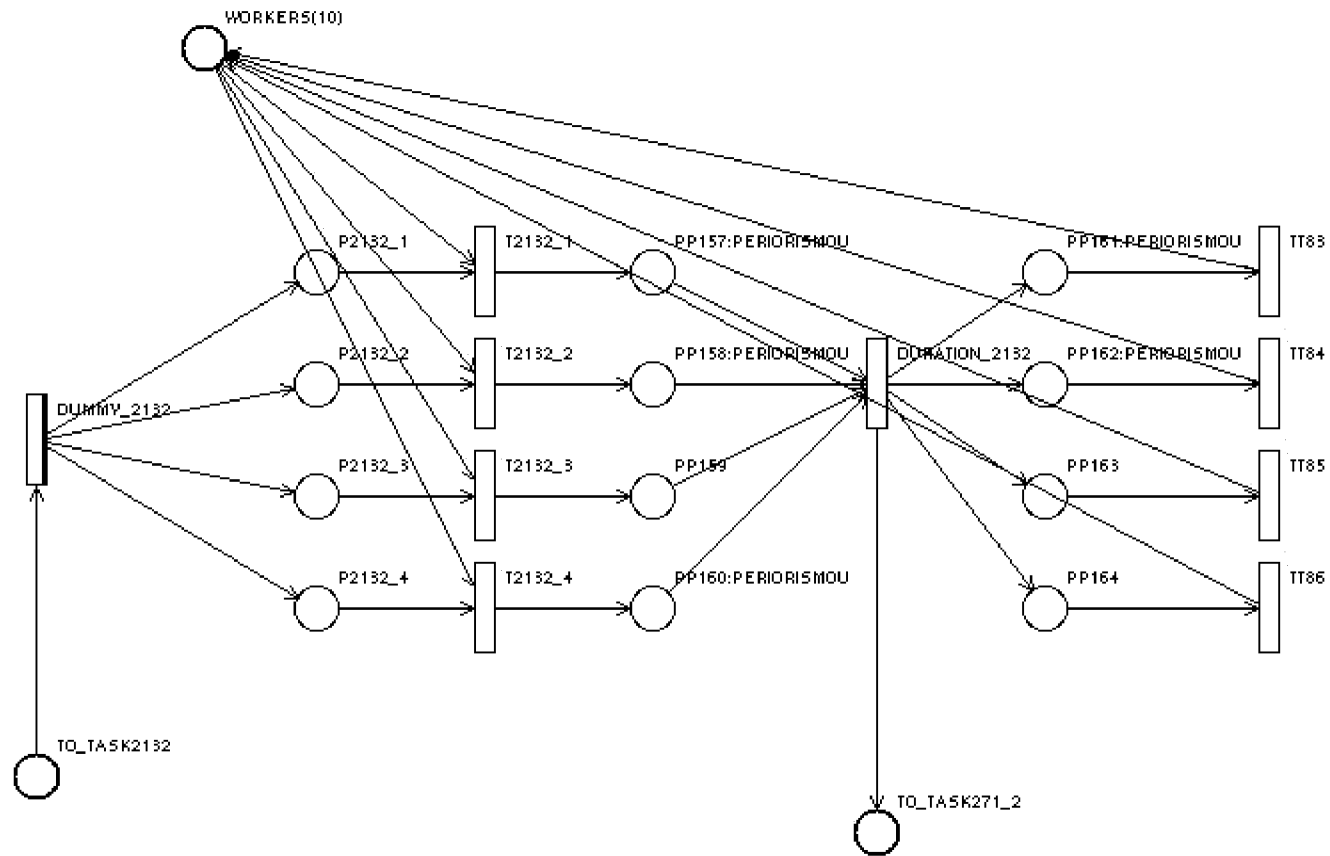
Σχήμα 6.59: Δραστηριότητα 2.11.4



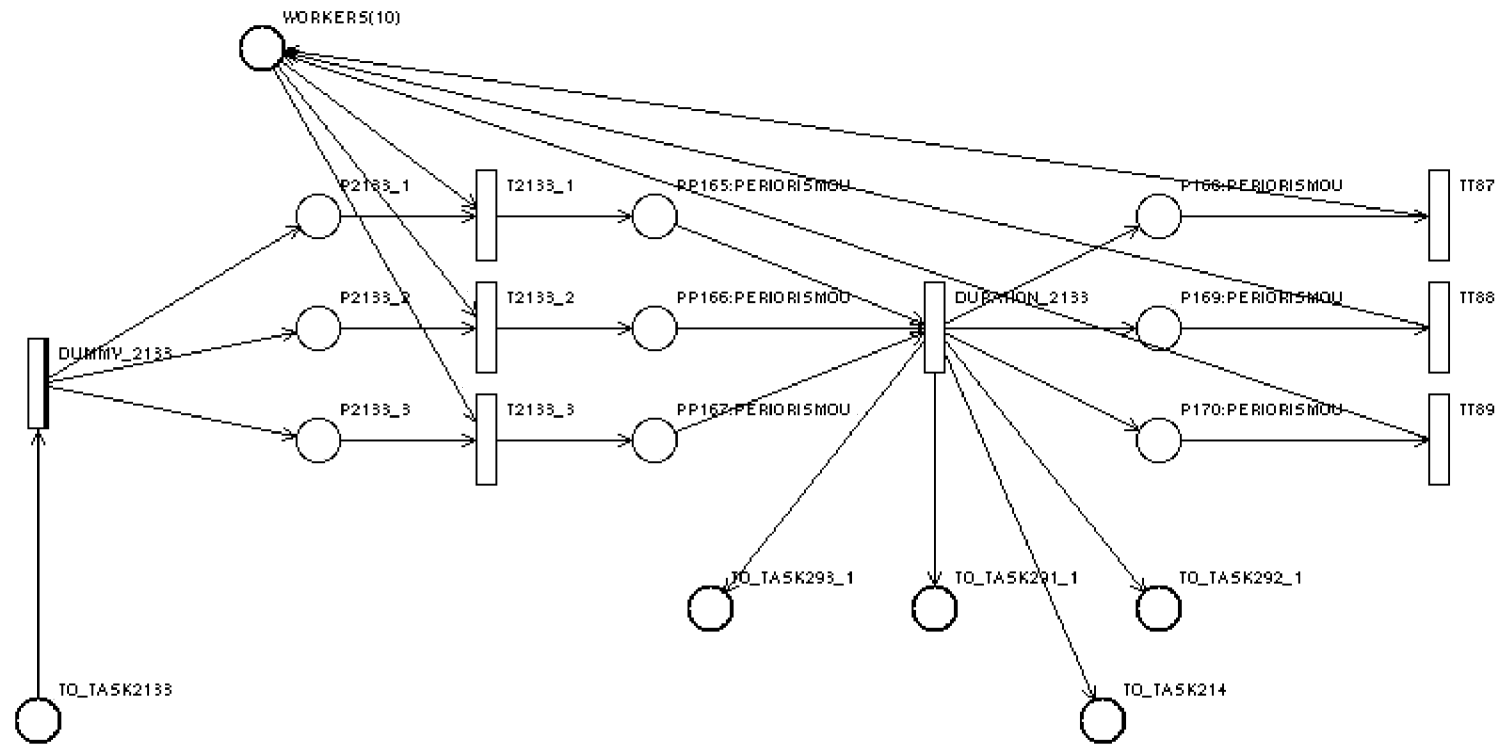
Σχήμα 6.60: Δραστηριότητα 2.12.1



Σχήμα 6.61: Δραστηριότητα 2.13.1

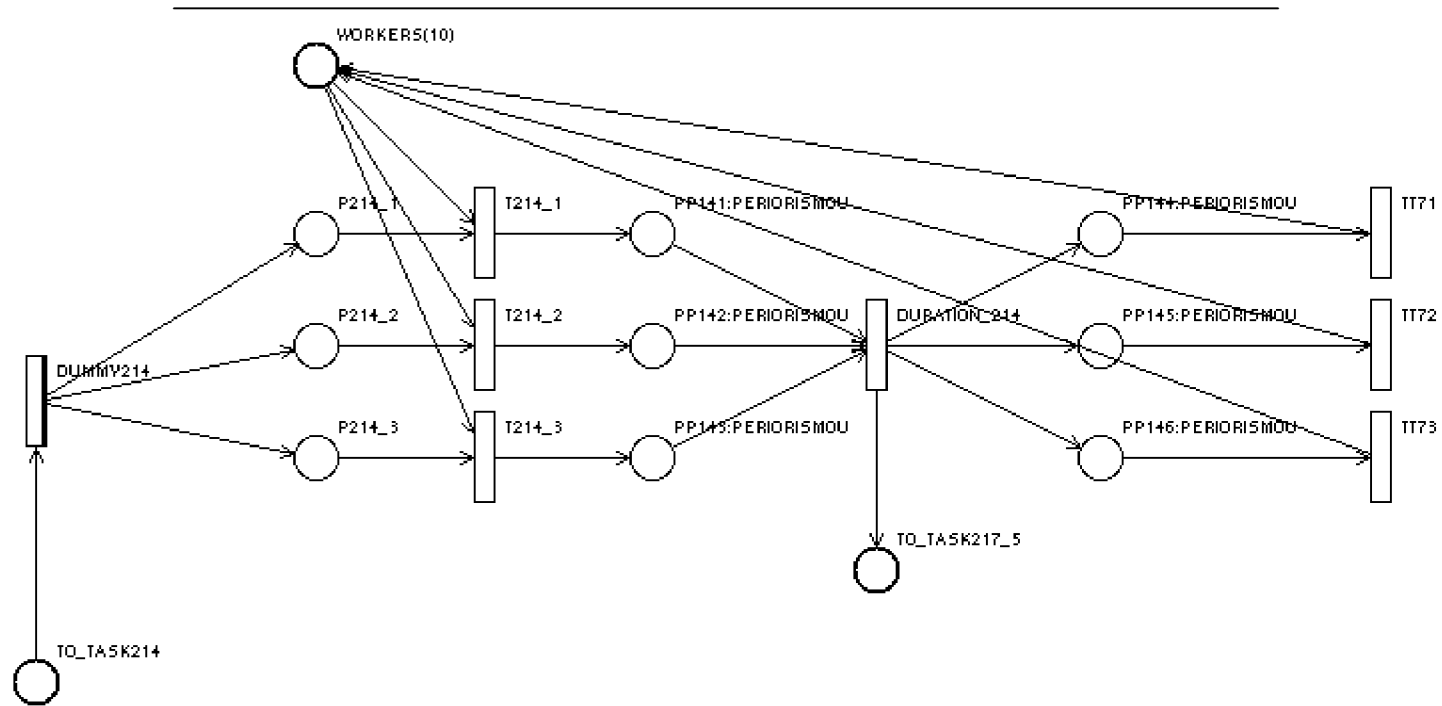


Σχήμα 6.62: Δραστηριότητα 2.13.2

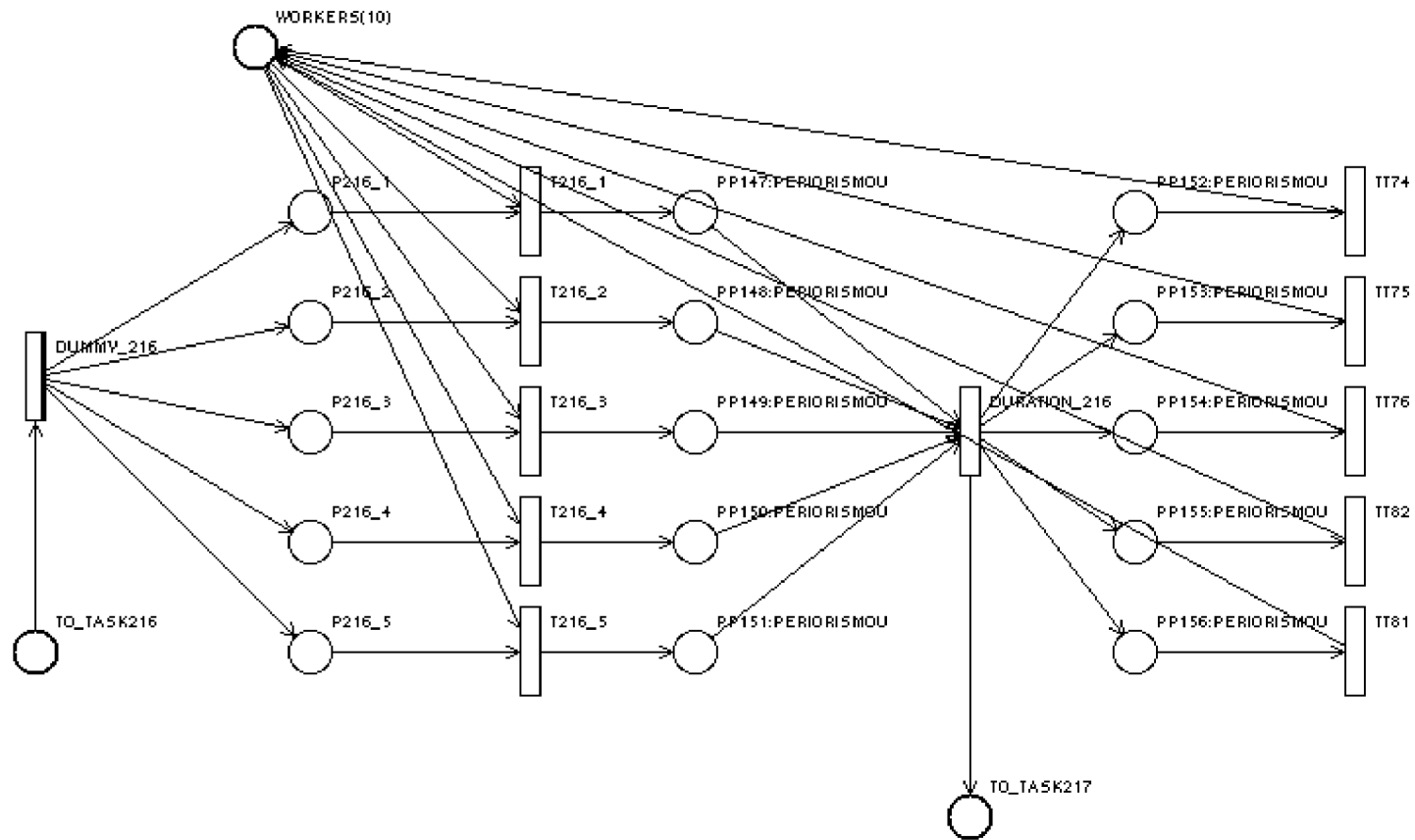


Σχήμα 6.63: Δραστηριότητα 2.13.3





Σχήμα 6.64: Δραστηριότητα 2.14



Σχήμα 6.64: Δραστηριότητα 2.16

## 7 Artifex

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση του λογισμικού Artifex, που προορίζεται για το σχεδιασμό, την προσομοίωση και τη δυναμική ανάλυση μοντέλων, με τη βοήθεια των δικτύων υψηλού επιπέδου. Το Artifex ενσωματώνεται πλέον στο λογισμικό Faber 2.1 της Faber Software.

Το βασικό χαρακτηριστικό του λογισμικού Artifex είναι η ικανότητά του να παρουσιάζει τη δυναμική ασύγχρονη συμπεριφορά ενός συστήματος με γραφικό τρόπο. Πολλές πληροφορίες για το σύστημα φαίνονται πάνω στο γράφο, ενώ άλλες είναι εγγεγραμμένες σε γλώσσα προγραμματισμού C και κάποιες άλλες υπάρχουν με τη μορφή πληροφοριών, συνδεδεμένες τα στοιχεία του δικτύου.

Το Artifex περιλαμβάνει τέσσερα εργαλεία που αφορούν το σκοπό αυτής της εργασίας και αφορούν τη διαχείριση του μοντέλου:

- Ένα σχεδιαστικό εργαλείο στο οποίο δημιουργείται ο γράφος και γράφεται ο κώδικας (Artifex.Model).
- Ένα εργαλείο που διαχειρίζεται την προσομοίωση του μοντέλου και παρέχει πολλές δυνατότητες επέμβασης στο μοντέλο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς και ανοιχτό παράθυρο επικοινωνίας με τον εξομοιωτή (Artifex.Validate).

Τέλος υπάρχει ένα εργαλείο που μετατρέπει το μοντέλο από τη μορφή που το δημιουργεί ο σχεδιαστής σε εφαρμογή που μπορεί να «τρέξει» ο υπολογιστής (Artifex.Deploy).

Τα εργαλεία αυτά συμβάλλουν στη δημιουργία ενός φιλικού προς το χρήστη περιβάλλοντος που δεν απαιτεί την εκμάθηση πολύπλοκων εντολών για τη δημιουργία του ολοκληρωμένου μοντέλου.

### 7.1 Βασικά στοιχεία της ιεραρχικής δομής

Όπως έχει ήδη ειπωθεί τα δίκτυα Petri υποστηρίζουν ιεραρχικές δομές. Οι ιεραρχικές δομές είναι απαραίτητες για να παρουσιαστούν σύνθετα και πολύπλοκα συστήματα όσο το δυνατό πιο οργανωμένα, κατανοητά και εύκολα στην ανάλυση τους. Συνήθως η μοντελοποίηση ξεκινάει από τα πιο βασικά στοιχεία του συστήματος και στη συνέχεια αναλύονται καθένα από αυτά, έως το επίπεδο της επιθυμητής λεπτομέρειας. Η μέθοδος αυτή λέγεται ανάλυση από πάνω προς τα κάτω (Top-Down Approach). Η πραγματοποίηση αυτής της δομής γίνεται με τη βοήθεια τεσσάρων στοιχείων:

### A. Τάξη (Class)

Η τάξη είναι το ανώτερο ιεραρχικά στοιχείο και δεν εμφανίζεται στο γράφο. Αποτελεί ένα σύνολο από αντικείμενα που έχουν την ίδια συμπεριφορά. Για παράδειγμα μηχανές που λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο μπορούν να ανήκουν στην ίδια τάξη. Ωστόσο επειδή έχουν διαφορετικό κάποιο στοιχείο τους, μοντελοποιούνται από διαφορετικά αντικείμενα. Ένα μοντέλο μπορεί να έχει, προφανώς περισσότερες από μία τάξεις.

### B. Αντικείμενο (Object)

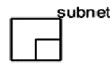
Το αντικείμενο είναι το δομικό στοιχείο της τάξης και φαίνεται στο γράφο. Αντικείμενα που ανήκουν στην ίδια τάξη μοιράζονται την ίδια συμπεριφορά, αν και καθένα έχει τις δικές του παραμέτρους. Συμβολίζεται με ένα διπλό τετράγωνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1. Στο σχήμα φαίνεται πως το αντικείμενο έχει δύο ονόματα, το όνομά του και το όνομα της τάξης στην οποία ανήκει. Δύο αντικείμενα μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια. Το αντικείμενο αναλύεται στη συνέχεια μέσω των υποδικτύων και των σελίδων.



**Σχήμα 7.1**

### Γ. Υποδίκτυο (Subnet)

Τα υποδίκτυα χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθούν λειτουργίες του ίδιου ιεραρχικού επιπέδου, έτσι ώστε να μην δημιουργούνται μεγάλα και πολύπλοκα δίκτυα, δύσκολα στην εποπτεία. Μπορούν να δημιουργηθούν περισσότερα από ένα υποδίκτυα, προφανώς, μέσα σε ένα αντικείμενο, καθώς και σε διαφορετικά ιεραρχικά επίπεδα. Για παράδειγμα ως υποδίκτυα μπορούν αναπαρασταθούν τα summary tasks. Τα υποδίκτυα συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοινών τόπων. Στο σχήμα 7.2 φαίνεται το σύμβολο του υποδικτύου.



**Σχήμα 7.2**

**Δ. Σελίδα (Page)**

Για να απλοποιηθεί η παρουσίαση ενός δικτύου, που δε χρειάζεται να υποδιαιρεθεί σε υποδίκτυα, δηλαδή ενός δικτύου που απεικονίζει μία μόνο λειτουργία, μπορεί να το υποδιαιρεθεί σε τμήματα, καθένα από τα οποία θα ανήκει σε διαφορετική σελίδα. Τα τμήματα αυτά ανήκουν στο ίδιο ιεραρχικό επίπεδο και συνδέονται μεταξύ τους με κοινούς τόπους. Το σύμβολο της σελίδας φαίνεται στο σχήμα 7.3.



**Σχήμα 7.3**

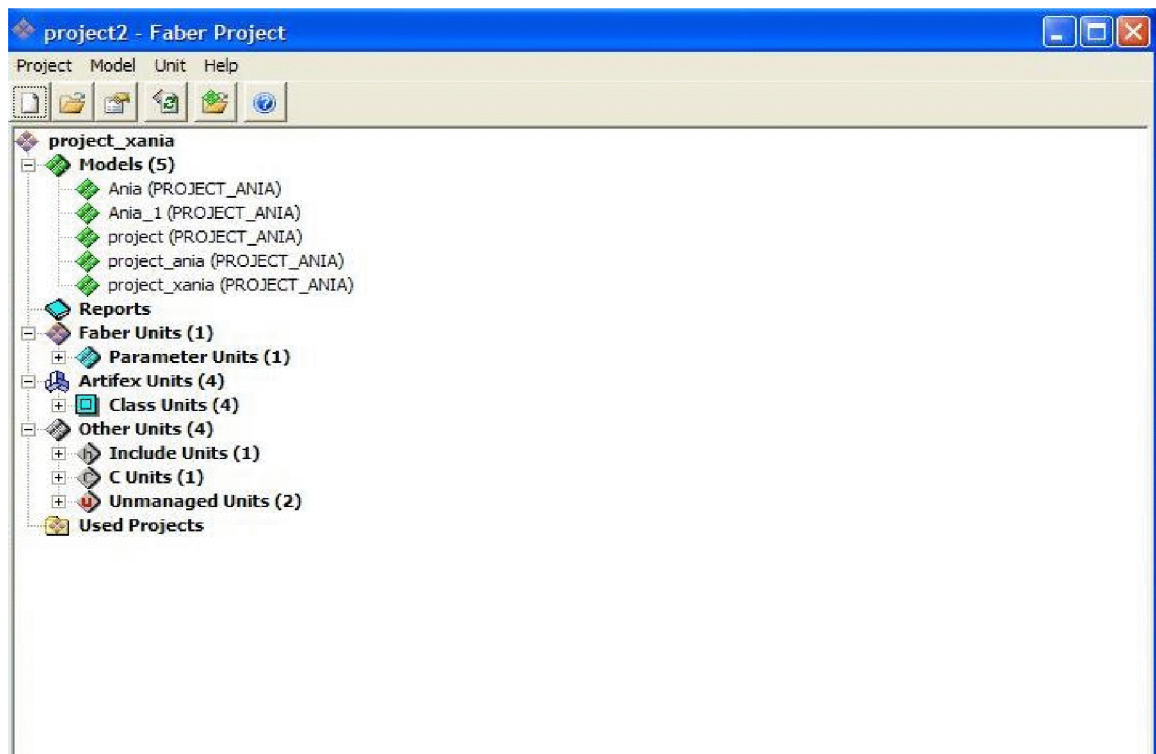
## **7.2 Το σχεδιαστικό εργαλείο**

Μόλις ανοίξει η εφαρμογή Faber 2.1, είτε θα επιλεγεί να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο (project), είτε να «ανοίξει» ένα παλιότερο, ή να εισαχθεί ένα μοντέλο το οποίο έχει συμπιεσθεί (package), ή να μετατραπεί ένα αρχείο παλιότερης έκδοσης Artifex, σε επεξεργάσιμη μορφή από το Faber (σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4

Αν επιλεγεί να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο τότε θα δοθεί στο χρήστη η δυνατότητα να επιλεγθεί το όνομά του, το όνομα της τάξης πρώτου επιπέδου και πληροφορίες για το μοντέλο. Αν επιλεγθεί το «άνοιγμα» ενός ήδη υπάρχοντος μοντέλου θα κληθεί ο χρήστης να επιλέξει από έναν κατάλογο από τα ήδη υπάρχοντα. Η επόμενη οθόνη θα βγάλει τις κλάσεις που υπάρχουν στο μοντέλο (σχήμα 7.5).

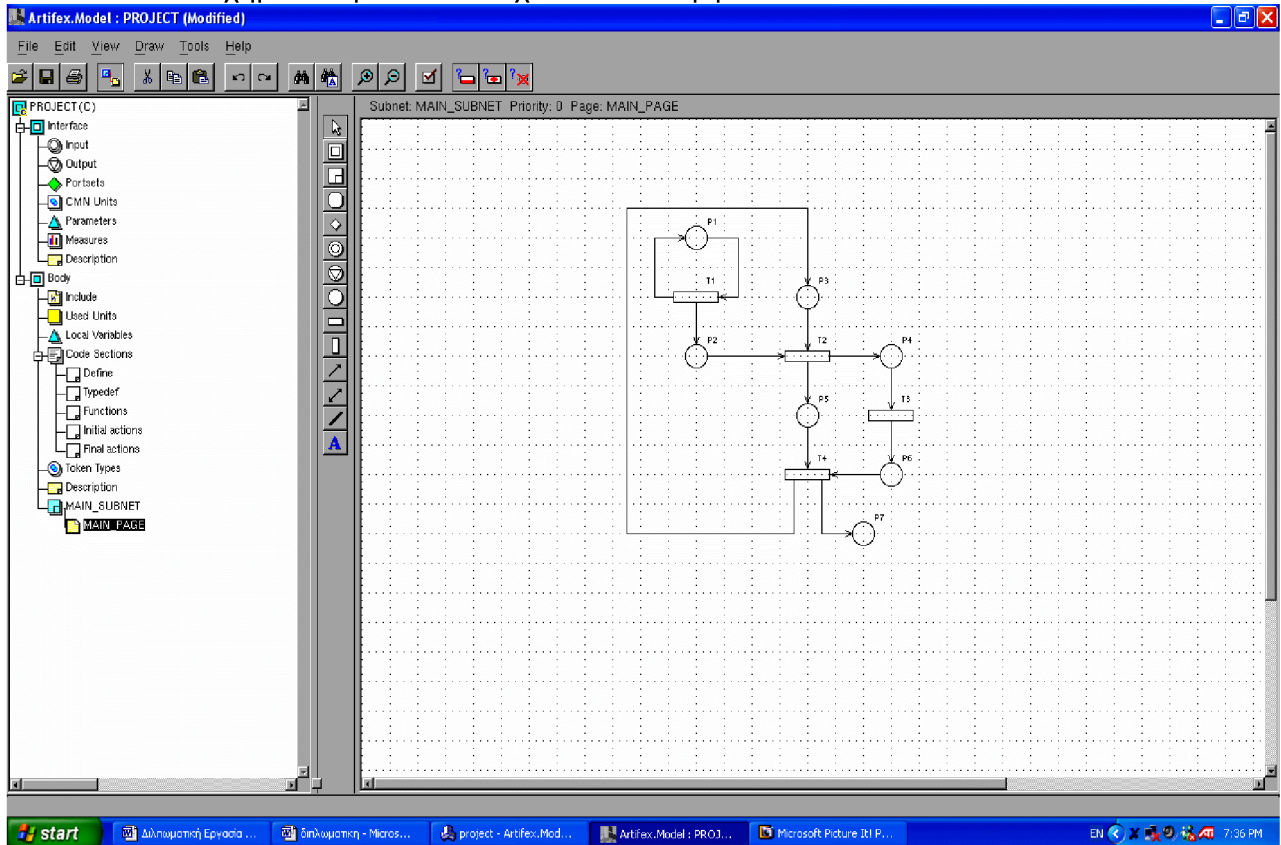


Σχήμα 7.5

Διπλοκλικάρωντας στην αντίστοιχη κλάση ανοίγει το σχεδιαστικό περιβάλλον του Artifex.

### 7.2.1 Παρουσίαση των στοιχείων σχεδιασμού των γράφων

Στο σχήμα 7.6 φαίνεται το σχεδιαστικό περιβάλλον του Artifex.



Σχήμα 7.6

Στην επάνω μπάρα υπάρχουν οι γνωστές εντολές, που υπάρχουν στα περισσότερα προγράμματα σχεδιασμού, αλλά κι άλλων χρήσεων. Έτσι φαίνονται, από αριστερά προς τα δεξιά, οι εξής εντολές:

- Αποθήκευση αρχείου.
- Εκτύπωση αρχείου.
- Επιλογή εμφάνισης των σελίδων και των υποδικτύων στο σώμα του δέντρου του αντικειμένου, που βρίσκεται στο αριστερό μέρος της σελίδας.
- Αποκοπή επιλεγμένων στοιχείων.
- Αντιγραφή επιλεγμένων στοιχείων.
- Επικόλληση επιλεγμένων στοιχείων.
- Τα δύο επόμενα στοιχεία είναι ακύρωση της τελευταίας πράξης κι αναίρεση της τελευταίας ακύρωσης.

- Με την επόμενη επιλογή γίνεται αναζήτηση του πού βρίσκεται κάποιο στοιχείο στο γράφο (π.χ. μια μετάβαση ή ένας τόπος), δίνοντας κάποιο από τα χαρακτηριστικά του στοιχείου.
- Αναζήτηση όπως και πριν, αλλά κάποιας λέξης.
- Στη συνέχεια υπάρχει zoom in και zoom out .
- Με το επόμενο στοιχείο γίνεται επιλογή για ποιες από τις παραβάσεις που κάνουμε κατά το σχεδιασμό του γράφου ώστε να προειδοποιεί το Artifex (για παράδειγμα για στοιχεία που έχουν συμπεριληφθεί στο γράφο αλλά δεν τα έχουν οριστεί).
- Με τις τρεις τελευταίες επιλογές, μπορούν να σημειωθούν διαφορετικά οι μεταβάσεις με κάποιες ενέργειες, αυτές με συνθήκες και όλα τα στοιχεία του γράφου που δεν έχουν οριστεί.

Στην μπάρα αριστερά του σχεδιαστικού χώρου φαίνονται τα στοιχεία σχεδιασμού που είναι από πάνω προς τα κάτω:

- Το πρώτο εικονίδιο είναι το εργαλείο χειρισμού και μετακίνησης των υπόλοιπων στοιχείων.
- Το δεύτερο σύμβολο είναι το σύμβολο του *αντικειμένου (object)*. Για να οριστεί ένα καινούργιο αντικείμενο πρέπει να δοθεί το όνομά του και το όνομα της τάξης που θα ανήκει. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιηθεί μια υπάρχουσα τάξη, κάνοντας χρήση της αναζήτησης (browse), οπότε το αντικείμενο έχει τη δομή του υπάρχοντος που επιλέχθηκε.
- Το τρίτο είναι το σύμβολο του *υποδικτύου (subnet)*. Για να οριστεί ένα νέο δίκτυο πρέπει να του δοθεί ένα όνομα που δε χρησιμοποιείται ήδη από άλλο στοιχείο του δικτύου. Μπορεί να γίνει συγχώνευση (merge) ενός δικτύου με κάποιο άλλο που ανήκει σε διαφορετική σελίδα της ίδιας τάξης. Μπορεί να δοθεί, προαιρετικά, προτεραιότητα σε ένα υποδίκτυο. Δηλαδή, αν ένας τόπος είναι κοινός σε δύο ή περισσότερες μεταβάσεις που ανήκουν σε διαφορετικά υποδίκτυα, τότε θα το στίγμα του τόπου θα δεσμευτεί από τη μετάβαση του υποδικτύου με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα.
- Το τέταρτο σύμβολο είναι το σύμβολο της *σελίδας (page)*. Μία σελίδα μπορεί να βρίσκεται μέσα σε ένα υποδίκτυο κι αντίστροφα, καθώς και μέσα σε ένα αντικείμενο κι αντίστροφα. Γενικά ο τρόπος που χρησιμοποιούνται τα διάφορα στοιχεία παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι σχεδιαστικές ανάγκες πολύπλοκων συστημάτων. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι το σύμβολο μιας



σελίδας πάνω στο γράφο είναι προαιρετικό κι έχει σκοπό κυρίως τη διευκόλυνση της κατανόησης του συστήματος. Δηλαδή, μια σελίδα μπορεί να υπάρχει στο σύστημα, χωρίς να εμφανίζεται το σύμβολό της στο γράφο, αφού μπορεί να δημιουργηθεί από το δέντρο της τάξης, στο δεξιά μέρος της οθόνης.

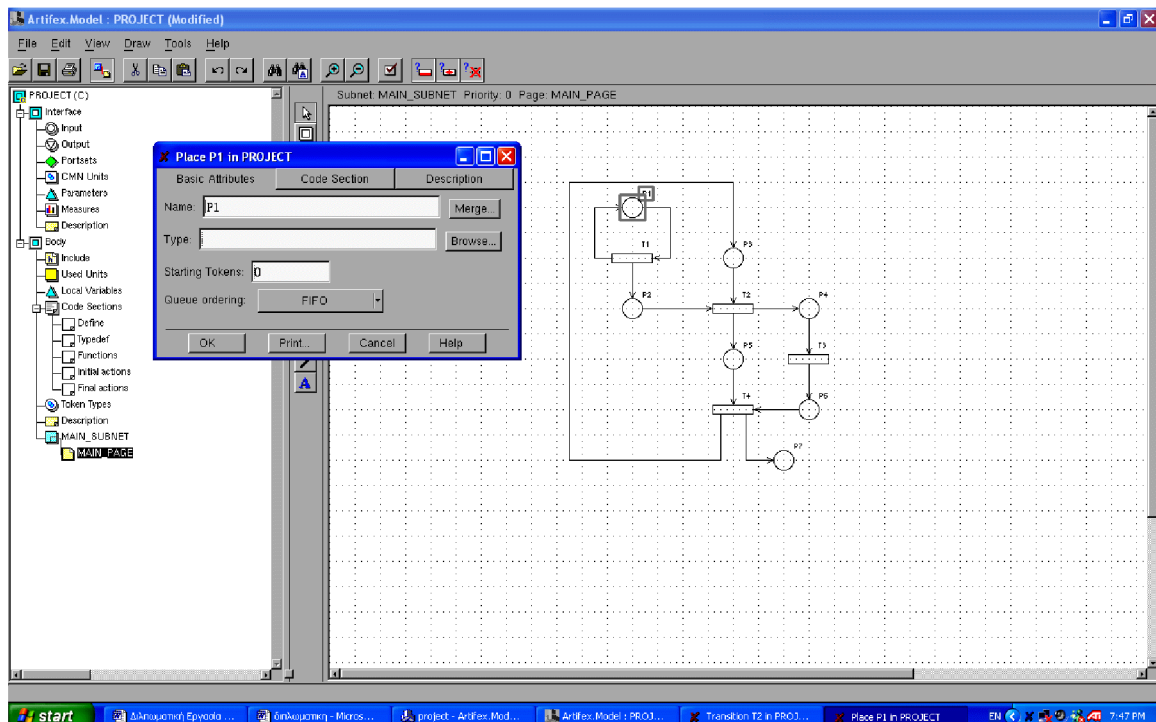
- Το πέμπτο σύμβολο είναι το σύμβολο των *θυρών (portsets)*. Οι θύρες, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, συνδέουν τα αντικείμενα. Για να ορισθεί μια καινούργια θύρα πρέπει να προσδιοριστεί το όνομά της καθώς και ποιους εισαγωγικούς και ποιους εξαγωγικούς τόπους περιέχει (στοιχεία που αναφέρονται στη συνέχεια). Το σύμβολο των θυρών είναι προαιρετικό στο γράφο. Αρκεί η θύρα να είναι ορισμένη στο δέντρο του αντικειμένου, στο δεξί τμήμα του παραθύρου.
- Το έκτο είναι το σύμβολο του *εισαγωγικού τόπου (input place)*. Με τη βοήθεια αυτού του στοιχείου ένα αντικείμενο μπορεί να δέχεται ένα σίγμα από κάποιο άλλο αντικείμενο. Αυτό γίνεται και με τη βοήθεια του επόμενου στοιχείου.
- Το έβδομο είναι το σύμβολο του *εξαγωγικού τόπου (output place)*, δηλαδή του τόπου ενός αντικειμένου που στέλνει το σίγμα του σε έναν εισαγωγικό τόπο ενός άλλου αντικειμένου. Συνδυάζοντας τα δύο παραπάνω είδη τόπων, επιτυγχάνεται η μεταφορά των στιγμάτων μεταξύ διαφορετικών αντικειμένων. Βασική προϋπόθεση για τη μεταφορά αυτή είναι οι δύο συνδεδεμένοι τόποι να δέχονται τον ίδιο τύπο σίγματος, διότι είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερους του ενός τύπους στιγμάτων, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια. Βέβαια τα δύο είδη αυτά τόπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μέσα στο ίδιο αντικείμενο. Ορίζονται δίνοντάς τους μοναδικό όνομα ή συγχωνεύοντάς τα με κάποιο υφιστάμενο τόπο του ίδιου τύπου. Σ' αυτήν την περίπτωση, η συγχώνευση σημαίνει ότι οι δύο τόποι είναι ουσιαστικά ένας που εμφανίζεται σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Στο σχήμα 7.7 φαίνονται τα σύμβολα των εισαγωγικών και εξαγωγικών τόπων πιο καθαρά.



---

**Σχήμα 7.7 Εισαγωγικός και εξαγωγικός τόπος**

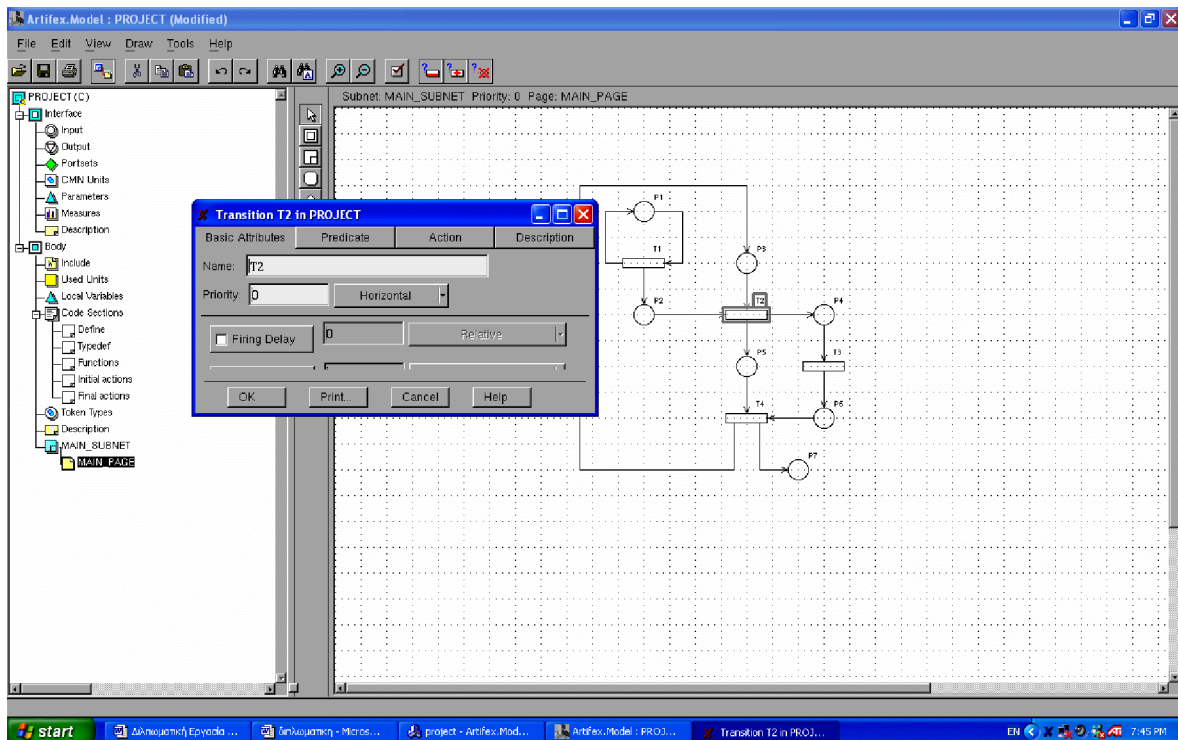
- Το όγδοο σύμβολο είναι το σύμβολο του *τόπου* (*place*). Για να ορισθεί ένας τόπος πρέπει να του δοθεί ένα μοναδικό όνομα (*name*) ή να γίνει συγχώνευση με κάποιον υπάρχοντα τόπο (*merge*). Στην τελευταία περίπτωση, οι δύο αυτοί τόποι γίνονται ουσιαστικά ένας που εμφανίζεται σε διαφορετικά σημεία του κυκλώματος και εμφανίζονται στο γράφο με πιο έντονο κύκλο. Το ίδιο ισχύει και για τους εισαγωγικούς και εξαγωγικούς τόπους που είναι συγχωνευμένοι. Επίσης, στο παράθυρο ορισμού που ανοίγεται κατά τη δημιουργία ενός τόπου (βλέπε σχήμα 7.8), μπορούμε να επιλέξουμε ποιόν τύπο σίγματος (*type*) θα δέχεται ο τόπος, εφόσον σε ένα δίκτυο μπορούν να κυκλοφορούν πολλά είδη σιγμάτων, καθένα από τα οποία μεταφέρει διαφορετικές πληροφορίες. Είναι δυνατόν είτε να πληκτρολογηθεί το είδος του σίγματος είτε να αναζητηθεί από έτοιμο κατάλογο, με τη βοήθεια του ειδικού κουμπιού αναζήτησης (*browse*). Επίσης μπορεί να οριστεί ο αριθμός των αρχικών σιγμάτων που θα έχει ο τόπος (*starting tokens*). Τα σίγματα στο περιβάλλον Artifex δε φαίνονται μέσα στους τόπους, αλλά αντί αυτού γράφεται το πλήθος τους μέσα σε μια παρένθεση δίπλα στο όνομα του τόπου. Εκτός από τις βασικές ιδιότητες (*basic attributes*) υπάρχει, ακόμα, ειδικό πεδίο στο οποίο μπορούν να οριστούν επιπλέον ιδιότητες (*extended attributes*), που αφορούν τα σίγματα και γράφονται με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού C. Τέλος, υπάρχει ειδικό πεδίο περιγραφής (*description*) στο οποίο μπορούν να δοθούν πληροφορίες σχετικά με τον τόπο αυτόν.



Σχήμα 7.8 Παράθυρο ορισμού τόπου

- Το ένατο και δέκατο σύμβολο είναι το σύμβολο της *μετάβασης (transition)*. Η ύπαρξη οριζόντιας και κάθετης μετάβασης διευκολύνει τη σχεδίαση. Για να οριστεί μια νέα μετάβαση πρέπει να της δοθεί ένα μοναδικό όνομα (name). Στο σχήμα 7.9 φαίνεται το παράθυρο ορισμού μιας μετάβασης. Η επιλογή της οριζόντιας ή κάθετης θέσης της μετάβασης μπορεί να γίνει κι από το κατάλληλο κουμπί του παραθύρου ορισμού (horizontal). Στις βασικές ιδιότητες ορίζεται η προτεραιότητα της μετάβασης (priority). Η προτεραιότητα χρησιμεύει σε περιπτώσεις ανταγωνισμού (conflict), σε περιπτώσεις δηλαδή, που δύο ή περισσότερες μεταβάσεις ζητούν ταυτόχρονα το στίγμα ενός τόπου. Τότε η μετάβαση με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα θα δεσμεύσει το στίγμα. Η προτεραιότητα μπορεί να είναι μηδέν ή ένας θετικός ακέραιος.
- Επίσης υπάρχει δυνατότητα να ανατεθεί στη μετάβαση καθυστέρηση όσον αφορά τον πυροβολισμό της. Η καθυστέρηση αυτή αναφέρεται στην προσομοίωση.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν δύο είδη καθυστερήσεων. Η *καθυστέρηση απελευθέρωσης (release delay)* δεσμεύει τα στίγματα που την καθιστούν ικανή και τα κρατά δεσμευμένα για όσο χρόνο της έχει ανατεθεί. Αντίθετα η *καθυστέρηση εκπυροσκόττησης (firing delay)* μόλις τεθεί ικανή να πυροβολήσει, μετρά το χρόνο που της έχει ανατεθεί και μόλις παρέλθει αυτός ο χρόνος, κι εφόσον εξακολουθεί να είναι ικανή να πυροβολήσει, δεσμεύει τα στίγματα των εισαγωγικών της τόπων και πυροβολεί. Αν στο χρόνο της καθυστέρησης κάποια άλλη μετάβαση δεσμεύσει ένα από τα στίγματα που τη θέτουν ικανή, τότε η μετάβαση σταματά να μετρά το χρόνο κι αν ένα καινούργιο στίγμα εμφανιστεί που τη καθιστά ικανή, τότε η χρονομέτρηση αρχίζει από την αρχή.

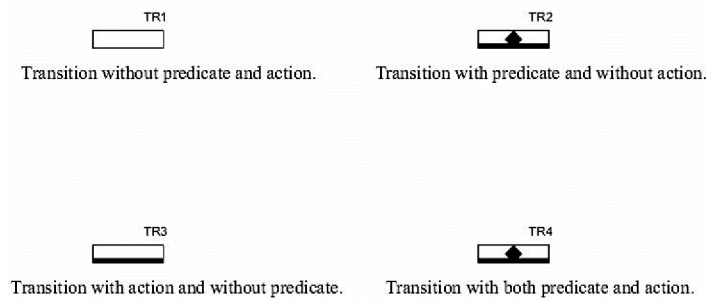


Σχήμα 7.9 Παράθυρο ορισμού μετάβασης

Στο πεδίο *συνθηκών ενεργοποίησης (predicate)* τοποθετούνται κανόνες, είτε αριθμητικούς είτε της λογικής Boole, οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούνται για να μπορέσει να πυροβολήσει μια μετάβαση. Αν δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες, κάθε φορά που φτάνει ένα νέο στίγμα σε κάποιο εισαγωγικό τόπο της μετάβασης, αυτές ελέγχονται ξανά, μέχρι να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός στιγμάτων που τις ικανοποιεί. Οι συνθήκες γράφονται σε γλώσσα προγραμματισμού C στο ειδικό χώρο του παραθύρου ορισμού της μετάβασης. Επίσης, στον ειδικό χώρο των ενεργειών της μετάβασης (*action*), γράφονται σε γλώσσα C, κάποιες ενέργειες που θα πραγματοποιηθούν μόλις πυροβολήσει η μετάβαση κι αφορούν τα στίγματα και την κατάσταση του αντικειμένου που ανήκει. Τέλος, υπάρχει ειδικός χώρος για την περιγραφή της μετάβασης (*description*), όπως και σε όλα τα στοιχεία.

Στο σχήμα 7.10 φαίνονται τα διάφορα σύμβολα της μετάβασης, ως εξής:

- (α) χωρίς συνθήκες και χωρίς ενέργειες
- (β) με συνθήκες
- (γ) με ενέργειες
- (δ) με συνθήκες κι ενέργειες.



**Σχήμα 7.10**

- Τα δύο επόμενα σύμβολα είναι τα σύμβολα των *βελών (arc)*. Το πρώτο από τα δύο είναι το σύμβολο του βέλους με μία μόνο κατεύθυνση (*directed connection tool*) και το δεύτερο είναι το *αμφίδρομο βέλος (bidirectional arc tool)*. Η κατεύθυνση των βελών αλλάζει εύκολα και μέσα στο σχεδιαστικό χώρο, για διευκόλυνση του σχεδιασμού. Προς αποφυγή λαθών, όταν επιλέγεται το πρώτο στοιχείο που θα συνδεθεί με το βέλος, το πρόγραμμα μειώνει τη φωτεινότητα των στοιχείων που δεν μπορούν να συνδεθούν με αυτό και δεν επιτρέπει τη σύνδεσή τους.
- Το δέκατο τρίτο σύμβολο είναι το σύμβολο του συνδέσμου *θυρών (linkset tool)*. Με αυτό συνδέονται οι θύρες των αντικειμένων μεταξύ τους. Στο παράθυρο ορισμού του συνδέσμου προσδιορίζεται ποια θύρα του ενός αντικειμένου ενώνεται με ποια θύρα του άλλου αντικειμένου. Οι σύνδεσμοι αυτοί δεν έχουν από την αρχή κάποια κατεύθυνση, αλλά αυτή προσδιορίζεται μέσα στο σχεδιαστικό χώρο, ώστε να υπάρχει λογική ροή των πληροφοριών.
- Το τελευταίο σύμβολο της στήλης εργαλείων χρησιμοποιείται για την εισαγωγή κειμένου πάνω στο γράφο. Παρέχεται δε, δυνατότητα μορφοποίησης του κειμένου κατά βούληση.

### 7.2.2 Παρουσίαση του δέντρου του αντικειμένου

Όπως προαναφέρθηκε, στο δεξί τμήμα της οθόνης του παραθύρου κατασκευής του μοντέλου, υπάρχει το δέντρο του αντικειμένου. Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των στοιχείων που εμφανίζονται σ' αυτό.

Στην κορυφή του δέντρου βρίσκεται το σύμβολο και το όνομα της τάξης. Το δέντρο περιλαμβάνει δύο βασικούς κλάδους: την *εξωτερική επιφάνεια (interface)* και

το σώμα (*body*). Η εξωτερική επιφάνεια περιλαμβάνει τα στοιχεία με τα οποία ένα αντικείμενο επικοινωνεί με άλλα αντικείμενα. Περιλαμβάνει τους εισαγωγικούς τόπους, τους εξαγωγικούς τόπους, τις θύρες, τις μονάδες επικοινωνίας, τις παραμέτρους και την περιγραφή της εξωτερικής επιφάνειας. Η ανάλυση των στοιχείων αυτών θα γίνει στη συνέχεια. Το σώμα περιλαμβάνει τα συμπεριλαμβανόμενα μέρη, τις χρησιμοποιούμενες μονάδες, τις τοπικές μεταβλητές, τους κώδικες, τους τύπους των στιγμάτων, το πεδίο για την περιγραφή του σώματος κι ένα χάρτη με την κεντρική σελίδα, τα υποδίκτυα και τις σελίδες του γράφου. Τα στοιχεία αυτά θα αναλυθούν στη συνέχεια.

#### A. Στοιχεία της εξωτερικής επιφάνειας

- Τα δύο πρώτα στοιχεία, οι *εισαγωγικοί (input place)* και οι *εξαγωγικοί τόποι (output place)* έχουν ήδη αναφερθεί. Πρόκειται για τόπους που λαμβάνουν και στέλνουν αντίστοιχα, στίγματα σε άλλα αντικείμενα. Έτσι συνδέονται μεταξύ τους τα αντικείμενα κι ανταλλάσσουν πληροφορίες. Όταν ορίζεται ένας καινούργιος εισαγωγικός ή εξαγωγικός τόπος, αυτός εμφανίζεται σαν υποκλάδος κάτω από τον αντίστοιχο κλάδο εισαγωγικών ή εξαγωγικών τόπων στο δέντρο του αντικειμένου.
- Το τρίτο στοιχείο είναι οι *θύρες (portsets)*. Κάθε φορά που δημιουργείται μία καινούργια θύρα, εμφανίζεται ένα εικονίδιο στη θέση αυτή, που αναφέρει το όνομα της θύρας. Οι θύρες χρησιμοποιούνται για να απλοποιήσουν τη μοντελοποίηση ως εξής: όταν ένα αντικείμενο έχει πολλούς εισαγωγικούς κι εξαγωγικούς τόπους και πρέπει να συνδεθούν με τους αντίστοιχους ενός άλλου αντικειμένου, αντί να δημιουργείται μία σύνδεση για κάθε τέτοιο ζευγάρι, δημιουργείται μία ομάδα τόπων (θύρα) για κάθε αντικείμενο και συνδέουμε τις ομάδες αυτές με ένα μόνο σύνδεσμο (σύνδεσμος θυρών). Υπάρχουν κανόνες για το πώς πρέπει να τοποθετούνται οι τόποι μέσα στις θύρες, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή σύνδεση μεταξύ τους.
- Το επόμενο στοιχείο είναι οι *μονάδες επικοινωνίας (CMN units* δηλαδή *communication units)*. Όταν στο κύκλωμα υπάρχουν πολλοί τύποι στιγμάτων και αυτοί χρησιμοποιούνται από πολλά αντικείμενα και μεταφέρονται από το ένα στο άλλο, θα πρέπει να ορίζονται οι τύποι αυτοί σε κάθε αντικείμενο που τους χρησιμοποιεί. Προς απλοποίηση αυτής της διαδικασίας, υπάρχουν οι μονάδες επικοινωνίας, δηλαδή τόποι στους οποίους ορίζονται μία φορά οι τύποι των στιγμάτων. Έτσι κάθε αντικείμενο που χρησιμοποιεί τους τύπους αυτούς ή κάποιους από αυτούς, δε χρειάζεται να τους ορίσει ξανά, αλλά αρκεί να δηλώσει ότι θα χρησιμοποιήσει τη συγκεκριμένη μονάδα επικοινωνίας που τους περιέχει.

- Το επόμενο στοιχείο είναι οι *παράμετροι (parameters)*. Οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να προστεθούν δεδομένα στο μοντέλο με πιο αποτελεσματικό τρόπο. Οι παράμετροι αυτές μπορεί να είναι όλων των τύπων που επιτρέπει η γλώσσα προγραμματισμού C (για παράδειγμα ακέραιοι ή χαρακτήρες).
- Η ανάθεση των τιμών στις παραμέτρους μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:
  - (α) με απευθείας ανάθεση των τιμών, μέσα σε κάποιο από τα πεδία προγραμματισμού που προσφέρονται από το Artifex, με χρήση κάποιων ειδικών εντολών και
    - (β) με ανάγνωση των τιμών από ένα αρχείο παραμέτρων (parameters file). Δημιουργείται ένα αρχείο και στη συνέχεια με κατάλληλη εντολή πραγματοποιείται η ανάγνωση του αρχείου και η ανάθεση των τιμών στις παραμέτρους που υπάρχουν στο αρχείο.
- Οι παράμετροι που ορίζονται ισχύουν σε όλο το αντικείμενο, εκτός από τον κώδικα Λειτουργιών (Functions code section).
- Το τελευταίο στοιχείο της εξωτερικής επιφάνειας είναι το πεδίο *περιγραφής (description)*, όπου προαιρετικά δίνονται πληροφορίες για την εξωτερική επιφάνεια και τα στοιχεία της.

#### B. Στοιχεία του σώματος

- Το πρώτο στοιχείο του σώματος είναι τα *συμπεριλαμβανόμενα μέρη (include)*, δηλαδή αρχεία που χρησιμοποιεί το μοντέλο και που δηλώνονται μέσα σε κάποιο πεδίο προγραμματισμού, με τη σύνταξη #include, της γλώσσας προγραμματισμού C. Για κάθε τέτοιο αρχείο εμφανίζεται κι ένα εικονίδιο με το όνομά του.
  - Το δεύτερο στοιχείο του σώματος είναι οι *χρησιμοποιούμενες μονάδες (used units)*, δηλαδή ένας κατάλογος με τα αρχεία που χρησιμοποιεί το μοντέλο και που δεν ορίζονται με τη βοήθεια της σύνταξης #include, αλλά με άλλες εντολές. Παράδειγμα τέτοιου αρχείου είναι το αρχείο των παραμέτρων που αναφέρθηκε προηγουμένως.
  - Το επόμενο στοιχείο είναι οι *τοπικές μεταβλητές (local variables)*. Αυτές, σε αντίθεση με τις παραμέτρους, ισχύουν σε όλη την τάξη. Μπορούν κι αυτές να είναι όλων των τύπων που επιτρέπει η γλώσσα προγραμματισμού C κι οι τιμές τους ορίζονται με κατάλληλη εντολή στο πεδίο αρχικές ενέργειες (initial actions) των κωδίκων (code section). Χρησιμοποιούν δε, σε υπολογισμούς, λογικές ή αριθμητικές συνθήκες κλπ.
  - Το τέταρτο στοιχείο είναι οι *κώδικες (code section)*. Οι ενέργειες κι οι συνθήκες που γράφονται εδώ αφορούν την προσομοίωση. Ο
-

προγραμματισμός γίνεται σε γλώσσα C. Περιλαμβάνει τους εξής τομείς, καθένας από τους οποίους αφορά διαφορετικές λειτουργίες που εκτελεί το μοντέλο:

- *Ορισμοί (define)* Σ' αυτό το πεδίο ορίζονται, αν χρειάζεται, νέοι τύποι για τις παραμέτρους, που δεν είναι από τους βασικούς της γλώσσας C. Είναι δυνατόν είτε να συμπεριληφθεί κάποια έτοιμη βιβλιοθήκη της γλώσσας C με την ψευδοεντολή (`#include`) είτε να οριστούν καινούργιες με την ψευδοεντολή (`#define`).
- *Ορισμοί τύπων (typedef δηλαδή type definitions)* Κι αυτό το πεδίο χρησιμοποιείται για τον ορισμό καινούργιων τύπων που θα χρησιμοποιηθούν είτε ως τύποι στιγμάτων, είτε ως τύποι μεταβλητών. Η σύνταξη των ορισμών εδώ είναι διαφορετική από αυτή του πεδίου ορισμών (`define`). Τα στοιχεία που ορίζονται και στα δύο αυτά πεδία είναι διαθέσιμα σε όλους τους τομείς των κωδίκων (`code section`) της συγκεκριμένης τάξης.
- *Συναρτήσεις (functions)* Στο πεδίο αυτό ορίζονται τις συναρτήσεις της γλώσσας C που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Ο ορισμός αυτός πρέπει να γίνεται για κάθε τάξη.

Η διαφορά μεταξύ των ενεργειών και των συνθηκών που γράφονται σ' αυτούς τους κώδικες και σ' αυτές που γράφονται στις μεταβάσεις είναι ότι οι πρώτες εκτελούνται μόνο μία φορά, στην αρχή ή στο τέλος της προσομοίωσης, ενώ οι δεύτερες εκτελούνται κάθε φορά που πυροβολεί η συγκεκριμένη μετάβαση.

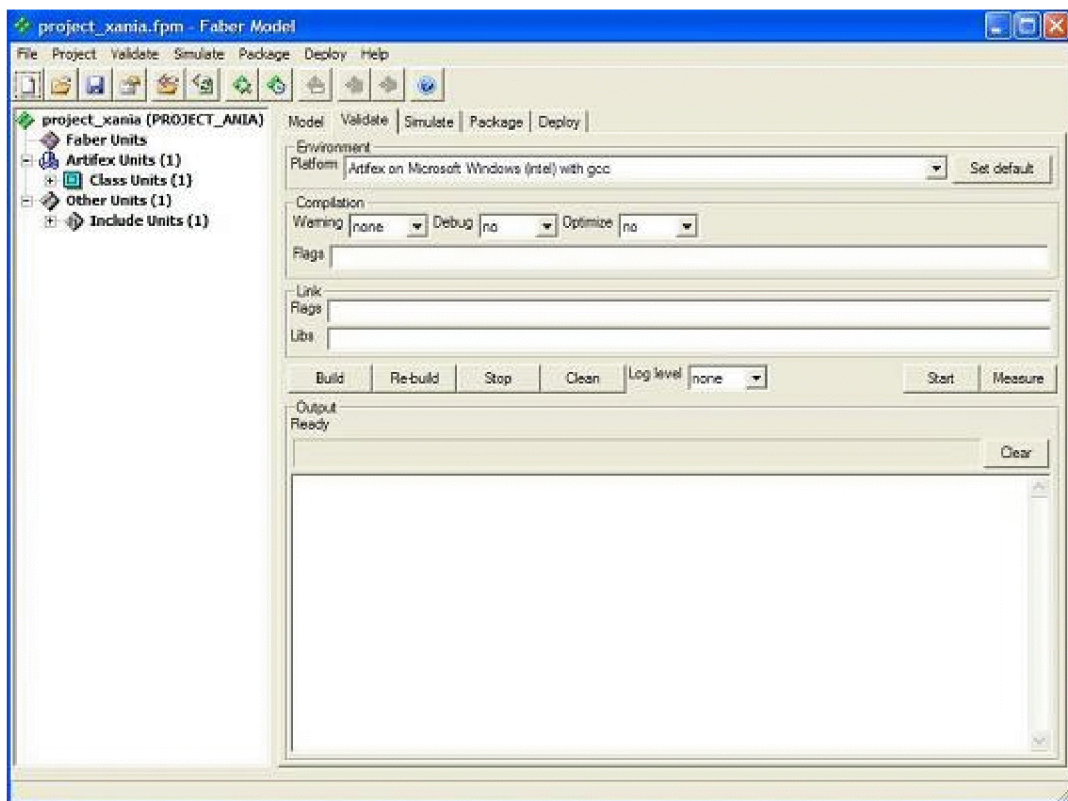
- Το επόμενο στοιχείο του σώματος είναι οι *τύποι των στιγμάτων (token types)*. Στο πεδίο αυτό ορίζονται οι τύποι των στιγμάτων που χρησιμοποιούνται από την τάξη. Ο τύπος που είναι διαθέσιμος εξ' ορισμού από το Artifex είναι ο *κενός τύπος (NUL)*, δηλαδή ένας τύπος που δεν περιέχει πληροφορίες, αλλά σηματοδοτεί απλώς την ύπαρξη στίγματος μέσα σε κάποιο τόπο. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο σχεδιαστής του μοντέλου μπορεί να ορίσει καινούργιους τύπους στιγμάτων, ορίζοντας το όνομα και τη δομή τους, έτσι ώστε να μεταφέρει τις επιθυμητές πληροφορίες.
- Το επόμενο στοιχείο είναι το πεδίο *περιγραφής (description)*, όπου μπορούμε να δώσουμε πληροφορίες για το σώμα της τάξης.
- Ο τελευταίος κλάδος του σώματος είναι ο χάρτης με τη βασική σελίδα, τα υποκυκλώματα και τις υπόλοιπες σελίδες. Επιλέγοντας κάποια από τις σελίδες ή τα υποκυκλώματα εμφανίζεται ο αντίστοιχος σχεδιαστικός χώρος. Από τη θέση αυτή μπορεί ο σχεδιαστής να επιλέγει κατά βούληση ποια από



τις σελίδες θα παίζει το ρόλο της *κεντρικής σελίδας (main page)*, δηλαδή ποια σελίδα θα εμφανίζεται ανοίγοντας το πρόγραμμα.

### 7.3 Το εργαλείο της προσομοίωσης

Μόλις τελειώσει ο σχεδιασμός του μοντέλου, το επόμενο βήμα είναι η *επικύρωση (validation)*. Η επικύρωση του μοντέλου γίνεται με *προσομοίωση* της λειτουργίας του, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εντοπισμών λαθών στη δομή και στη λειτουργία του μοντέλου, επιβεβαίωση της αναμενόμενης συμπεριφοράς, καθώς και στατιστική πρόβλεψη των διαφόρων χρόνων λειτουργίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το περιβάλλον του εργαλείου προσομοίωσης κι οι βασικές δυνατότητες που αυτό προσφέρει.



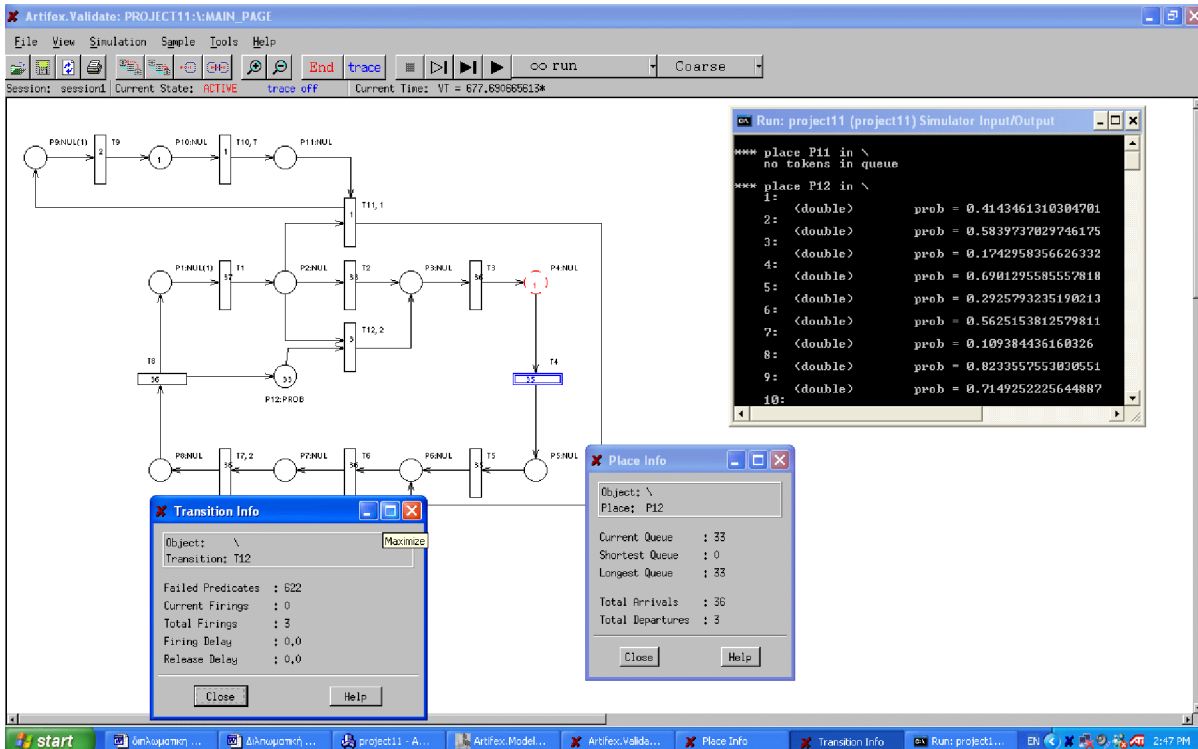
Σχήμα 7.11

Έχοντας δημιουργήσει το μοντέλο, πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία προκειμένου να προσομοιωθεί. Τα βήματα της διαδικασίας έχουν ως εξής :

**Βήμα 1:** Διπλοκλικάρεται το μοντέλο που θα προσομοιωθεί.

**Βήμα 2:** Στη συνέχεια επιλέγεται το *χτίσιμο (build)* του μοντέλου, δηλαδή τη δημιουργία των κατάλληλων αρχείων σε γλώσσα C, τη μετάφρασή τους και τη δημιουργία εκτελέσιμων προγραμμάτων που θα τρέξουν κατά την προσομοίωση ( σχήμα 7.11).

Έχοντας ακολουθήσει τα παραπάνω βήματα, μπορεί να εκκινήσει η προσομοίωση. Σε αντιστοιχία με το παράθυρο επικοινωνίας, κατά την προσομοίωση υπάρχει ένα παράθυρο εισόδου/ εξόδου του προσομοιωτή (*simulator I/O window*). Πάνω σ' αυτό εμφανίζονται αποτελέσματα από διάφορες εντολές κι από ενέργειες μεταβάσεων που είναι χρήσιμα στο χρήστη. Παρόμοιες πληροφορίες, αλλά με πιο συνοπτικό τρόπο μπορούμε να πάρουμε κάνοντας δεξί κλικ πάνω σε κάποια τοποθεσία του δικτύου και επιλέγοντας το info (βλέπε σχήμα 7.12).



Σχήμα 7.12 Περιβάλλον Προσομοίωσης

### 7.3.1 Το περιβάλλον της προσομοίωσης

Αποτελείται από το χώρο παρουσίασης του μοντέλου κι από την μπάρα εργαλείων. Με τη βοήθεια της μπάρας εκκινεί και τερματίζει η προσομοίωση. Επιλέγεται αν ο χρόνος θα τρέχει συνεχής (go), αν θα σταματά κάθε φορά που τίθεται ικανή μια μετάβαση κι όταν πυροβολεί μια μετάβαση (step coarse) ή αν θα σταματά ανά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ώστε να παρουσιάζει τη δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια (step fine). Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί ο συνεχής χρόνος, μπορεί να επιλεγθεί (με το τελευταίο από δεξιά κουμπί) αν το μοντέλο θα εμφανίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και κάθε πότε. Έτσι αν επιλεγθεί το On End θα εμφανιστεί μόνο η τελική κατάσταση του μοντέλου όταν θα πατηθεί το stop, και καμιά από τις ενδιάμεσες. Αν επιλεγθεί Fine ή Coarse τότε το μοντέλο θα εμφανίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε

να χρησιμοποιούνται οι εντολές αυτές, με τη διαφορά ότι δε χρειάζεται να παττέται το κουμπί τους πολλές φορές, αλλά μόνο μία το κουμπί Go στην αρχή.

Επίσης μπορούν να οριστούν εξ' αρχής πότε θα κάνει παύση η προσομοίωση. Υπάρχουν τέσσερις επιλογές:

- Ο χρόνος κυλάει συνεχώς μέχρι να πατηθεί κατά βούληση το κουμπί της παύσης ( $\infty$  run)
- Ο χρόνος σταματά ακριβώς πριν κι ακριβώς μετά από κάθε γεγονός (stop at  $T_1/T_+$ )
- Ο χρόνος σταματά μετά από ένα συγκεκριμένο διάστημα που ορίζεται από το χρήστη (stop at  $+\Delta T$ )
- Ο χρόνος σταματά ακριβώς τη χρονική στιγμή που ορίζεται από το χρήστη (stop at  $T_1$ ).

Η προσομοίωση μπορεί να πραγματοποιηθεί χρονικά με δύο τρόπους:

1. Με «*εικονικό χρόνο*» (*virtual-time*), όπου 25 μονάδες χρόνου, όπως ορίστηκαν στις καθυστερήσεις των μεταβάσεων, αντιστοιχούν σε 1 μονάδα καθυστέρησης της προσομοίωσης. Έτσι προσομοιώνεται κι ο χρόνος κι η προσομοίωση γίνεται πιο γρήγορη. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν μελετάται η ποιοτική συμπεριφορά του συστήματος κι όχι η απόλυτη διάρκειά του.
2. Με «*πραγματικό χρόνο*» (*true-time*), όπου κάθε μονάδα καθυστέρησης των μεταβάσεων αντιστοιχεί σε μία μονάδα καθυστέρησης της προσομοίωσης. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει επιλογή να οριστεί πόσα δευτερόλεπτα θα διαρκεί κάθε μονάδα χρόνου. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα να διαιρεθούν όλες οι καθυστερήσεις των μεταβάσεων με έναν αριθμό, έτσι ώστε να μειωθεί η συνολική διάρκεια της προσομοίωσης και ταυτόχρονα να διατηρηθεί η αναλογία ανάμεσα στους χρόνους των μεταβάσεων. Ο αριθμός αυτός λέγεται *παράγοντας συμπίεσης χρόνου* (*Time Compression Factor*) και βρίσκεται στο παράθυρο που ανοίγει με την εντολή *Timing* του μενού *Simulation*.

Η αλλαγή από τον εικονικό στον πραγματικό χρόνο κι αντίστροφα γίνεται από την εντολή *Timing* του μενού *Simulation*. Για την ένδειξη του είδους του χρόνου, υπάρχει ειδικός δείκτης στην επάνω μπάρα ως εξής: TT και VT για τον πραγματικό κι εικονικό χρόνο αντίστοιχα.

Επίσης στην μπάρα υπάρχουν επιλογές για να κάνουμε zoom in και zoom out, καθώς και να εμποπτέυεται όποιο ιεραρχικό επίπεδο επιλεχθεί. Υπάρχει ακόμα

---

μετρητής χρόνου κι η δυνατότητα του εντοπισμού (trace). Ένα αντικείμενο είναι εντοπισμένο σημαίνει ότι για κάθε δραστηριότητα που πραγματοποιείται σ' αυτό εμφανίζεται ένα μήνυμα στο παράθυρο εισόδου/ εξόδου του προσομοιωτή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις δυνατότητες επέμβασης στο μοντέλο πριν και κατά την προσομοίωση, ανά στοιχείο.

- Σ'ένα αντικείμενο (object), υπάρχει η δυνατότητα με την εντολή *Examine* να παρουσιάζεται στο παράθυρο εισόδου/ εξόδου του προσομοιωτή η κατάσταση του, το χρώμα του, τις παραμέτρους και τις μεταβλητές του. Παρόμοια με την εντολή *Info* ελέγχεται η κατάσταση και το χρώμα του. Στη συνέχεια υπάρχει μια σημαντική εντολή, με την οποία σταματά η προσομοίωση κάθε φορά που πραγματοποιείται κάποιο γεγονός. Η εντολή αυτή παρουσιάζεται με δύο μορφές. Ως *Break On Event* που σταματά την προσομοίωση κάθε φορά που συμβαίνει ένα γεγονός στο αντικείμενο και ως *Set Breakpoint* που σταματά την προσομοίωση υπό προκαθορισμένες προϋποθέσεις. Έτσι, μπορεί να οριστεί παύση κάθε φορά που αλλάζει η κατάσταση ή το χρώμα ή όταν η κατάσταση ή το χρώμα πάρουν μια συγκεκριμένη τιμή. Επίσης είναι δυνατόν αντί να σταματήσει η προσομοίωση, απλώς να παρουσιαστεί στο χρήστη μια ειδοποίηση χωρίς να διακοπεί η διαδικασία. Για να αφαιρεθούν οι εντολές αυτές χρησιμοποιείται η εντολή *Disable All Breakpoints* ή από την μπάρα την επιλογή *Simulation* και έπειτα *Breakpoints...*, οπότε εμφανίζεται μια λίστα με όλα τα *Breakpoints*, από όπου μπορούν να σβηστούν όσα δε χρειάζονται. Υπάρχει, ακόμα, η δυνατότητα εντοπισμού (trace), όπως αναφέρθηκε παραπάνω.
- Όταν πρόκειται για τόπο, υπάρχει επιλογή εμφάνισης του αριθμού των στιγμάτων που βρίσκονται σε σειρά αναμονής μέσα στον τόπο αυτό, τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η λίστα αυτή φαίνεται στο παράθυρο εισόδου/ εξόδου του προσομοιωτή με την εντολή *Examine Queue*. Με την εντολή εμφανίζεται ένας πίνακας με τις εξής πληροφορίες: παρούσα σειρά αναμονής, μεγαλύτερη και μικρότερη σειρά αναμονής, συνολικές αφίξεις και συνολικές αναχωρήσεις στιγμάτων από τον τόπο αυτό. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να παρουσιαστούν όλες οι μεταβάσεις που συνδέονται με τον εν λόγω τόπο, να ενεργοποιηθεί ο κώδικας που συνδέεται με τα στίγματα του τόπου, να τοποθετηθεί ένα στίγμα στον τόπο, καθώς και να τεθούν *Breakpoints*, όπως και στην περίπτωση του αντικειμένου, μόνο που τώρα η παράμετρος είναι ο αριθμός, οι αφίξεις ή οι αναχωρήσεις στιγμάτων.

- Όταν πρόκειται για μετάβαση, μπορούν να αντληθούν πληροφορίες με την εντολή *Info*, σχετικά με τον αριθμό των αποτυχημένων συνθηκών (predicates), τους παρόντες και τους συνολικούς εκπυρσοκρότησεις, καθώς και τα δύο είδη καθυστερήσεων της μετάβασης, την καθυστέρηση απελευθέρωσης (release delay) και την καθυστέρηση εκπυρσοκρότησης (firing delay). Υπάρχει, επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθούν οι ενέργειες και οι συνθήκες της μετάβασης με την εντολή *Display Action*. Όμοια με τους τόπους και τα αντικείμενα, μπορούν να τεθούν *Breakpoints*, κάθε φορά που πυροβολεί η μετάβαση ή ανά η εκπυρσοκρότησεις ή στον n-οστό πυροβολισμό.
- Όταν πρόκειται για εισαγωγικούς ή εξαγωγικούς τόπους, ισχύει ότι και για τους απλούς τόπους κι επιπλέον υπάρχει δυνατότητα να ελεγχθεί με ποιους εξαγωγικούς ή εισαγωγικούς τόπους, αντίστοιχα, συνδέονται.

Για να φαίνεται ανά πάσα στιγμή σε ποια αντικείμενα εκτελούνται κάποιες ενέργειες, χρησιμοποιούμε τα χρώματα. Έτσι, υπάρχει δυνατότητα, κάθε φορά που η μετάβαση, με την οποία εκκινεί μια διαδικασία, εκπυρσοκροτεί, να αλλάζει το χρώμα του αντικειμένου (color), υποδεικνύοντας έτσι, τη διαδικασία που βρίσκεται υπό εξέλιξη. Με τον ίδιο τρόπο, στην τελευταία μετάβαση της διαδικασίας μπορεί να οριστεί να επιστρέφει το αντικείμενο στο αρχικό του χρώμα.

Κατά την προσομοίωση τόσο τα αντικείμενα όσο οι τόποι κι οι μεταβάσεις αλλάζουν χρώματα. Επίσης αλλάζει ο αριθμός που περιέχουν. Για τα αντικείμενα αναφέρθηκε ήδη η σημασία των χρωμάτων και του αριθμού της κατάστασης. Όσον αφορά τις μεταβάσεις, με κόκκινη καμπυλωτή γραμμή συμβολίζονται οι μεταβάσεις που τίθενται ικανές να πυροβολήσουν. Με διπλή μπλε γραμμή συμβολίζεται η μετάβαση που θα πυροβολήσει τελικά, στην περίπτωση που ένα σύνολο στιγμάτων, δηλαδή ένα μαρκάρισμα, θέτει ικανές περισσότερες από μια μεταβάσεις. Με πράσινη γραμμή συμβολίζεται η μετάβαση που βρίσκεται υπό εκπυρσοκρότηση. Το αριστερά (για τις οριζόντιες) ή πάνω νούμερο (για τις κατακόρυφες), δείχνουν τον αριθμό των συνολικών εκπυρσοκρότησεων, μέχρι τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και το δεξιά ή κάτω νούμερο δείχνει τον αριθμό των εκπυρσοκρότησεων κατά τη δεδομένη χρονική στιγμή. Σημειώνεται πως αν μια μετάβαση καταστεί ικανή να πυροβολήσει, ενώ κρατά δεσμευμένο ένα άλλο σίγμα για διάστημα ίσο με τη καθυστέρηση απελευθέρωσης, τότε δεσμεύει και το καινούργιο σίγμα και μετρά καθυστέρηση απελευθέρωσης για κάθε σίγμα χωριστά. Αυτός είναι ο λόγος που μπορεί να εμφανιστεί στη θέση των παρόντων εκπυρσοκρότηση αριθμός μεγαλύτερος του 1.

---

Όσον αφορά τους τόπους, έχουν κόκκινη διακεκομμένη γραμμή όταν έχουν μόλις λάβει ένα σίγμα. Στο επόμενο στοιχειώδες χρονικό διάστημα η γραμμή γίνεται μαύρη και συνεχής. Στο εσωτερικό τους φαίνεται ο αριθμός των στιγμάτων που περιέχουν τη δεδομένη χρονική στιγμή.

## 8 Κώδικας C

```
double a;
double b;
double c;
double d;
double dx;
double delay;

a = x.0;
b = y.0;
c = z.0;
dx = xu_RndDouble();

if (dx <= 0.5) {
delay = a + sqrt(dx * (b-a) * (c-a));
}else{
a = 4.0;
b = 6.0;
c = 5.0;
delay = b - sqrt((-dx +1) * (b-a) * (b-c));
}
xx_rdelay ( XT_ONOMA_METABΑΣΗΣ, delay);
```

Ο κώδικας που φαίνεται παραπάνω χρησιμοποιήθηκε για την τριγωνική κατανομή των διαρκειών. Οι a,b,c είναι η πιο αισιόδοξη, η πιο πιθανή και η μέγιστη τιμή της διάρκειας μιας δραστηριότητας. Η μεταβλητή delay είναι η τελική διάρκεια της δραστηριότητας.