

Ατομική Διπλωματική Εργασία

**LAMSAT: ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΡΕΤΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΙΑΚΗΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ
ΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΔΡΑΣΗΣ**

Χαράλαμπος Κοπτίδης

ΠΕΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2011

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**LamSat: Ενοποίηση ευρετικής και προτασιακής αναζήτησης για
προβλήματα προγραμματισμού δράσης**

Χαράλαμπος Κοπτίδης

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Γιάννης Δημόπουλος

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου
Κύπρου

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2011

Ευχαριστίες

Με μεγάλη μου χαρά και ικανοποίηση φθάνω στο τέλος της διπλωματικής μου εργασίας και στο τέλος των σπουδών μου στο Τμήμα Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Κύπρου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ. Γιάννη Δημόπουλο για τη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Εύχομαι κάθε επιτυχία τόσο σε επαγγελματικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, με τους οποίους είχα τη χαρά να συνεργαστώ όλα αυτά τα χρόνια, για τη στήριξη και τη βοήθεια τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που πάντα με στηρίζει και που συνέβαλε με τον δικό της τρόπο σε αυτή τη προσπάθεια.

Περίληψη

Ο βασικός πυρήνας με βάση τον οποίο εκπονήθηκε αυτή η διπλωματική εργασία αφορά το πρόβλημα του προγραμματισμού δράσης, το οποίο συμπεριλαμβάνεται στον ερευνητικό τομέα της τεχνητής νοημοσύνης της επιστήμης των υπολογιστών. Ειδικότερα, δοθέντος ενός προβλήματος με μία αρχική και μία επιθυμητή κατάσταση ο προγραμματισμός δράσης καλείται να υπολογίσει μια ακολουθία από δράσεις ή το λεγόμενο πλάνο, η εκτέλεση του οποίου θα οδηγήσει από την αρχική στην κατάσταση-στόχος. Μέσα απ' αυτό γίνεται αντιληπτό ότι η εξαντλητική δοκιμασία όλων των συνδυασμών από δράσεις αυξάνει κατακόρυφα την πολυπλοκότητα ενός τέτοιου συστήματος με αποτέλεσμα να υστερεί σε επίπεδο απόδοσης και αποτελεσματικότητας. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε πόλο έλξης για πολλούς επιστήμονες που είχαν σαν σκοπό την έρευνα και την εύρεση ενός αποδοτικού αλγορίθμου για προβλήματα προγραμματισμού δράσης. Μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ανάλυση των βασικών αλγόριθμων που πρωτοχρησιμοποιήθηκαν για τέτοιου είδους προβλήματα όπως η προς τα εμπρός και προς τα πίσω αναζήτηση στο χώρο, η ευρετική αναζήτηση και ο προγραμματισμός με μερική διάταξη.

Σημαντικό βήμα για την βελτίωση της αποδοτικότητας ενός συστήματος προγραμματισμού δράσης αποτέλεσε η κωδικοποίηση του προβλήματος σε καταστάσεις, δράσεις και στόχους αφού πέτυχε την πλήρη εκμετάλλευση της λογικής δομής των προβλημάτων αυτών. Η διάσπαση αυτή πραγματοποιείται με την γλώσσα STRIPS η οποία είναι αρκετά εκφραστική και ικανή να περιγράψει πληθώρα προβλημάτων ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από πολλούς αλγόριθμους. Με το πέρασμα των χρόνων όμως η πολυπλοκότητα των προβλημάτων αυξανόταν ραγδαία με αποτέλεσμα οι μέχρι τότε αλγόριθμοι να απαιτούν μεγάλους χρόνους εκτέλεσης γεγονός που καθιστούσε την εφαρμογή τους μη εύχρηστη. Ως εκ τούτου αναπτύχθηκε το γράφημα δράσεων, ένας πρωτοποριακός αλγόριθμος, η λειτουργία του οποίου έχει ως αποτέλεσμα να εκτελούνται καλύτεροι και αποδοτικότεροι υπολογισμοί.

Γύρω στο 1992 οι Kautz και Selman ανέπτυξαν μια νέα προσέγγιση επίλυσης προβλημάτων προγραμματισμού δράσης σύμφωνα με την οποία ένα πλάνο μπορεί να

παραχθεί αν μεταφράσουμε τα δεδομένα και τους περιορισμούς σε πρόβλημα ικανοποιησιμότητας προτασιακής λογικής με σκοπό να εξεταστεί από ένα ανεξάρτητο προτασιακό επιλυτή. Η ιδέα αυτή κυριαρχεί σε μεγάλο βαθμό μέχρι σήμερα. Το πιο αντιπροσωπευτικό σύστημα της προσέγγισης αυτής είναι το SatPlan το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στη παρούσα διπλωματική εργασία για πειραματική μελέτη. Συγκεκριμένα η λειτουργία του βασίζεται πάνω στο γράφημα δράσεων προσπαθώντας να βρει λύσεις με βάση το μικρότερο παράλληλο μήκος με τη χρήση του επιλυτή για κάθε νέα κατάσταση. Η πολύ καλή απόδοση του συστήματος SatPlan οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη ραγδαία ανάπτυξη που σημείωσαν οι επιλυτές τα τελευταία χρόνια. Σημαντικοί αλγόριθμοι όπως ο DPPL και αργότερα η επέκταση του με τον CDCL αλλά και πρωτοποριακές τεχνικές όπως η επανεκκίνηση και η μετάδοση μοναδιαίας πρότασης, αποτελούν στοιχεία κλειδιά για την αποτελεσματικότητα του επιλυτή αλλά και του SatPlan παράλληλα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο συνδυασμός δύο προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις αφορούν τη μετατροπή σε πρόβλημα προτασιακής ικανοποιησιμότητας και την ευρετικής αναζήτησης οι οποίες αντιπροσωπεύονται από τα συστήματα SatPlan και LAMA αντίστοιχα. Συγκεκριμένα υλοποιήθηκε μια νέα λειτουργία στον SatPlan σύμφωνα με την οποία δέχεται κάποιες επιπλέον δράσεις που παράγονται από το ευρετικό σύστημα LAMA και τις οποίες θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη σε κάθε νέο επίπεδο. Για το πώς θα ενεργεί ο SatPlan παίρνοντας τις επιπλέον αυτές δράσεις δημιουργήθηκαν δύο τρόποι. Στο πρώτο τρόπο για κάθε κοινή δράση που υπάρχει μεταξύ των δικών του και των άλλων (LAMA) δημιουργεί μια νέα πρόταση που περιέχει τόσους όρους, όσος και ο αριθμός εμφανίσεων της δράσης αυτής στις διάφορες χρονικές στιγμές (εγκλεισμός δράσεων). Στο δεύτερο τρόπο για κάθε μη κοινή δράση δημιουργεί ένα αριθμό από αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις που είναι ίσος με τον αριθμό εμφανίσεων της δράσης αυτής στα διάφορα επίπεδα του SatPlan (αποκλεισμός δράσεων). Επίσης οι επιπλέον δράσεις που δέχεται ο SatPlan μπορεί να είναι ένα από τα παραγόμενα πλάνα του LAMA, είτε η ενοποίηση των μοναδικών δράσεων από όλα τα πλάνα η ακόμα και η ενοποίηση των μοναδικών δράσεων που προκύπτουν από τις εκτελέσεις του ευρετικού συστήματος με

είσοδο ένα σύνολο υποπροβλημάτων, δηλαδή προβλήματα ένα υποσύνολων στόχων από το αρχικό. Οι διαδικασίες αυτές υλοποιούνται σε ένα νέο σύστημα προγραμματισμού δράσης με την ονομασία LamSat. Σκοπός είναι η πειραματική αξιολόγηση από τον συνδυασμό των δύο αυτών προσεγγίσεων από ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων που αφορούν κυρίως το μήκος του πλάνου αλλά ασφαλώς και το χρόνο εκτέλεσης μέχρι να βρεθεί η λύση, αν βέβαια υπάρχει. Από τις πειραματικές μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται πως ο συνδυασμός συστημάτων για επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά για ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης σε πολλές κατηγορίες προβλημάτων. Επίσης η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των νέων προτάσεων (clauses) που δημιουργούνται στο αρχείο του επιλυτή. Τέλος ο βαθμός πολυπλοκότητας κάθε προβλήματος όπως και οι χρονικοί περιορισμοί που το χαρακτηρίζουν, αποτελούν σημαντική παράμετρο για την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα της κάθε τεχνικής.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή.....	1
	1.1 Εισαγωγή στην έννοια του προγραμματισμού δράσης	1
	1.2 Εξέλιξη του προγραμματισμού δράσης μέσα από το πέρασμα του χρόνου	2
	1.3 Στόχος – Περιεχόμενο διπλωματικής εργασίας	3
Κεφάλαιο 2	Ανάλυση των κύριων χαρακτηριστικών και παρουσίαση των σημαντικότερων αλγορίθμων που αφορούν το προγραμματισμό δράσης.....	5
	2.1 Εκτενής ανάλυση του προγραμματισμού δράσης	5
	2.2 Αναπαράσταση προβλήματος με τη γλώσσα STRIPS	7
	2.2.1 Κύρια χαρακτηρίστηκα της γλώσσας STRIPS	7
	2.2.2 Ανάλυση του σχήματος δράσης στη γλώσσα STRIPS	9
	2.3 Αλγόριθμοι προγραμματισμού δράσης	10
	2.3.1 Προς τα εμπρός αναζήτηση στο χώρο (Forward state-space search)	11
	2.3.2 Προς τα πίσω αναζήτηση στο χώρο (Backward state-space search)	12
	2.3.3 Ευρετική αναζήτηση στο χώρο (heuristic for state-space search)	14
	2.3.4 Προγραμματισμός με μερική διάταξη (Spatial- Order Planning)	15
	2.3.5 Ευρετικές συναρτήσεις για προγραμματισμό μερικής διάταξης	16

Κεφάλαιο 3	Περιγραφή και ανάλυση νέων σύγχρονων αλγορίθμων και συστημάτων για προβλήματα προγραμματισμού δράσης: Γράφημα Δράσεων, SatPlan και LAMA.....	18
3.1	Δομή του Γραφήματος Δράσεων	18
3.1.1	Ανάλυση αλγορίθμου Γραφήματος Δράσεων	21
3.1.2	Παράδειγμα γραφήματος δράσεων	22
3.2	Ο αλγόριθμος του SatPlan	24
3.2.1	Η εξέλιξη του SatPlan στο πέρασμα των χρόνων	24
3.2.2	Λειτουργία του SatPlan	25
3.2.3	Κωδικοποίηση γράφου δράσεων σε κανονική συζευκτική μορφή (cnf)	26
3.3	Το σύστημα προγραμματισμού δράσης LAMA	27
3.3.1	Η δομή του συστήματος LAMA	27
3.3.2	Τι είναι τα ορόσημα (landmarks) και η χρησιμότητά τους στο LAMA	29
Κεφάλαιο 4	Το πρόβλημα της Προτασιακής Ικανοποιησιμότητας.....	31
4.1	Εισαγωγή	31
4.2	Τεχνικές επίλυσης προτασιακής ικανοποιησιμότητας	32
4.2.1	Δέντρο αναζήτησης	32
4.2.2	Ο αλγόριθμος Davis Putman Logemann Loveland	33
4.2.3	Ο αλγόριθμος Conflict Driven Clause Learning	34
4.3	Κύρια συστατικά του επιλυτή	35
4.3.1	Ευρετικά απόφασης	35
4.3.2	Διάδοση μοναδιαίας πρότασης	36
4.3.3	Διαγραφή	36
4.3.4	Προεπεξεργασία	37
4.3.5	Επανεκκίνηση	38
4.4	Η τεχνική της επανεκκίνησης στον Precosat	39

Κεφάλαιο 5	Συνδυασμός ευρετικής και προτασιακής αναζήτησης για προβλήματα προγραμματισμού δράσης.....	41
5.1	Σημασία προβλημάτων προγραμματισμού δράσης	41
5.2	Γνωστά προβλήματα προγραμματισμού δράσης	43
5.3	Προσαρμογή της λειτουργίας του συστήματος προγραμματισμού δράσης SatPlan με βάση την έξοδο του LAMA	46
5.3.1	Εκτέλεση SatPlan με βάση εγκλεισμό δράσεων	47
5.3.2	Εκτέλεση SatPlan με βάση αποκλεισμό δράσεων	49
5.3.3	Ενοποίηση όλων των παραγόμενων πλάνων του LAMA	51
5.3.4	Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων	52
5.3.5	Ενοποίηση των δύο συστημάτων σε ένα νέο σύστημα	53
Κεφάλαιο 6	Πειραματική ανάλυση.....	55
6.1	Μέτρηση χρόνου εκτέλεσης του LamSat με τη χρήση ενός παραγόμενου πλάνου από το LAMA	55
6.2	Επίλυση προβλημάτων και μετρήσεις με την ενοποίηση όλων των παραγόμενων πλάνων του LAMA	66
6.3	Συνδυασμός ευρετικής αναζήτησης και προτασιακής ικανοποιησιμότητας με χρήση υποσυνόλων στόχων	72
Κεφάλαιο 7	Συμπεράσματα.....	100
7.1	Σύνοψη και συμπεράσματα από τη διπλωματική εργασία	100
7.2	Επεκτάσεις και Μελλοντική εργασία	107
	Βιβλιογραφία.....	109

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στην έννοια του προγραμματισμού δράσης	1
1.2 Εξέλιξη του προγραμματισμού δράσης μέσα από το πέρασμα του χρόνου	2
1.3 Στόχος – Περιεχόμενο διπλωματικής εργασίας	3

1.1 Εισαγωγή στην έννοια του προγραμματισμού δράσης

Ο προγραμματισμός δράσης είναι ένας τομέας της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence) της επιστήμης των υπολογιστών που έχει ως απώτερο σκοπό τη δημιουργία αυτόνομου ελέγχου σε περίπλοκα συστήματα [2]. Ειδικότερα στοχεύει στην μετάβαση από μία αρχική κατάσταση σε μια τελική (τις οποίες ήδη γνωρίζει) εκτελώντας μια ακολουθία από δράσεις, το λεγόμενο πλάνο. Μια εύκολη λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι η εύρεση μονοπατιών από την αρχική στην τελική κατάσταση, που επιτυγχάνεται πολύ απλά με τον αλγόριθμο του Dijkstra. Παρ' όλα αυτά η εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων για τα προβλήματα αυτά δεν θα είχε τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Αυτό γιατί ένα σύστημα το οποίο βασίζεται πάνω σε προγραμματισμό δράσης είναι πιθανόν να έχει να επιλύσει ένα πρόβλημα όπου μπορούν να εκτελεστούν αρκετές εκατοντάδες δράσεις. Όπως είναι φυσικό η εκτέλεση όλων των πιθανών συνδυασμών από τις διαθέσιμες δράσεις αυξάνει κατακόρυφα το κόστος επίλυσης και μειώνει την αποτελεσματικότητα του συστήματος χωρίς να μπορεί να εφαρμοστεί σε κάποιο τομέα. Έτσι η υλοποίηση μιας έξυπνης μεθόδου που να καταλήγει σ' ένα πλάνο (σύνολο από δράσεις) σε αποδοτικό χρόνο, χωρίς την εξαντλητική εκτέλεση όλων των συνδυασμών από δράσεις αποτελεί αναγκαιότητα για να είναι δυνατό το σύστημα να

εφαρμοστεί με επιτυχία. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε πρόκληση για τους επιστήμονες που ασχολούνται με το συγκεκριμένο πεδίο έρευνας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρκετών αλγορίθμων όπου, μερικοί εξ' αυτών, τους οποίους θα δούμε στη συνέχεια αποδείχθηκαν αρκετά αποτελεσματικοί.

1.2 Εξέλιξη του προγραμματισμού δράσης μέσα από το πέρασμα του χρόνου

Όταν πρωτοεμφανίστηκε ο τομέας αυτός της τεχνητής νοημοσύνης και η όλη θεωρία που βρισκόταν από πίσω άρχισε να μεταβαίνει σε πιο πρακτικό επίπεδο γινόταν χρήση κάποιων βασικών αλγορίθμων. Με το πέρασμα του χρόνου, η χρήση των αλγορίθμων αυτών ασθενούσε σε πολλές περιπτώσεις. Κύριος λόγος ήταν ότι με τους προαναφερθέντες αλγόριθμους έπρεπε να εξεταστούν όλα τα πιθανά μονοπάτια που οδηγούν από την αρχική στην επιθυμητή κατάσταση. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αύξηση της πολυπλοκότητας των προβλημάτων οδηγούσε σε υποχρεωτική αλλαγή τους.

Η προσπάθεια αυτή για την υλοποίηση ενός αποδοτικού αλγορίθμου συνεχίστηκε και μετέπειτα. Αυτή τη φορά όμως, η έρευνα κατευθυνόταν με διαφορετική πορεία πλεύσης και συγκεκριμένα σε πιο εξειδικευμένους αλγορίθμους, απομακρυνόμενη από τους βασικούς που είδαμε πιο πάνω. Το γεγονός αυτό οφείλεται και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας η οποία συνέτεινε στο να ξεφύγουμε από τους φυσικούς περιορισμούς των υπολογιστών, όπως για παράδειγμα η μνήμη και η ταχύτητα του επεξεργαστή. Έτσι εμφανίστηκαν αποδοτικοί αλγόριθμοι οι οποίοι είχαν τη δυνατότητα να επιλύσουν προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας. Επιπλέον ένα ακόμα στοιχείο που οδήγησε στην αποδοτική εκτέλεση τέτοιων συστημάτων ήταν η κωδικοποίηση των προβλημάτων σε καταστάσεις, πράξεις και στόχους. Αυτό βοηθούσε τους αλγορίθμους να εκμεταλλεύονται πλήρως την λογική δομή του προβλήματος. Βοηθητικό εργαλείο για την πιο πάνω διάσπαση συνετέλεσε η γλώσσα STRIPS και αργότερα η PDDL. Οι γλώσσες αυτές είναι αρκετά εκφραστικές και μπορούν να αναπαραστήσουν ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων.

Είναι δομημένες γλώσσες, γεγονός που επιτρέπει σε αποδοτικούς αλγορίθμους να τις διαχειρίζονται.

Μέσα από το πέρασμα των χρόνων δημιουργήθηκαν αρκετοί αλγόριθμοι και υπήρξαν προσπάθειες με σκοπό την εύρεση αποδοτικών λύσεων σε προβλήματα προγραμματισμού δράσης. Μια από αυτές ανήκει και στους Kautz και Selman [7], οποίοι ισχυρίστηκαν ότι το πρόβλημα του προγραμματισμού δράσης μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα ικανοποιησιμότητας προτασιακής λογικής (Boolean satisfiability problem). Μέσα από την ιδέα αυτή προήλθε το σύστημα SatPlan, το οποίο επιλύει προβλήματα προγραμματισμού δράσης βασιζόμενο σε προτασιακή λογική [1]. Οι επιδόσεις του ήταν πολύ καλές χωρίς υστερεί σε κάποιο τομέα από τα υπόλοιπα συστήματα επίλυσης προβλημάτων δράσεων.

Το πρόβλημα του προγραμματισμού δράσεων είναι ένα πρόβλημα «ανοικτό» μέχρι σήμερα. Αρκετοί ερευνητές, μελετούν το πρόβλημα και αναπτύσσουν διάφορα εργαλεία και τεχνικές προτασιακής ικανοποιησιμότητας, ευελπιστώντας ότι θα επιτύχουν ταχύτερες και πιο αποτελεσματικές λύσεις. Δημιουργούνται συνεχώς νέοι προτασιακοί επιλυτές, οι οποίοι μέσω κοινής αναπαράστασης επικοινωνούν με τον SatPlan και μπορούν να δώσουν κάποιο αποτέλεσμα στο πρόβλημα, δηλαδή αν υπάρχει λύση και ποια είναι αυτή. Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας μεταξύ διαφορετικών αλγορίθμων - προτασιακών επιλυτών.

1.3 Στόχος – Περιεχόμενο διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο το συνδυασμό δύο προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις είναι η ευρετική αναζήτηση και η αναγωγή του προβλήματος σε πρόβλημα προτασιακής ικανοποιησιμότητας το οποίο στη συνέχεια λύνεται από ένα ανεξάρτητο επιλυτή. Για την μελέτη του συνδυασμού αυτού χρησιμοποιήθηκαν δύο συστήματα, ένα για την κάθε μεθοδολογία. Για την ευρετική αναζήτηση έγινε χρήση του συστήματος LAMA ενώ για την αναγωγή σε πρόβλημα προτασιακής ικανοποιησιμότητας έγινε χρήση του συστήματος SatPlan

που είναι και το πιο διαδεδομένο στη κατηγορία αυτή. Ο τρόπος συνδυασμού των δύο αυτών συστημάτων πραγματοποιήθηκε με την προσαρμογή της εκτέλεσης του συστήματος SatPlan με βάση το πλάνο εξόδου του LAMA. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκε μια νέα λειτουργία στον SatPlan σύμφωνα με την οποία δέχεται ένα υποσύνολο δράσεων εκτός από αυτές που ο ίδιος παράγει και που λαμβάνει υπόψη σε κάθε νέο επίπεδο. Για το πώς επεξεργάζεται τις δράσεις αυτές ο SatPlan αναπτύχθηκαν δύο τεχνικές. Στη πρώτη τεχνική για κάθε κοινή δράση που υπάρχει μεταξύ των δικών του και των άλλων (LAMA) δημιουργεί μια νέα πρόταση (clause) που περιέχει τόσους όρους, όσος και ο αριθμός εμφανίσεων της δράσης αυτής στις διάφορες χρονικές στιγμές. Στο δεύτερο τρόπο για κάθε μη κοινή δράση δημιουργεί ένα αριθμό από αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις που είναι ίσος με τον αριθμό εμφανίσεων της δράσης αυτής στα διάφορα επίπεδα του SatPlan. Συνεπώς με τις τεχνικές αυτές δίνεται μια κατεύθυνση στον SatPlan για να δέχεται υποχρεωτικά κάποιες δράσεις και να απορρίπτει κάποιες άλλες με βάση το παραγόμενο πλάνο του LAMA.

Ο LAMA κατά την εκτέλεση του παράγει, (αν αυτό είναι δυνατό) περισσότερα από ένα πλάνα με το τελευταίο να αποτελείται από τις λιγότερες δράσεις. Στη πιο απλή έκδοση της λειτουργίας που προστέθηκε, ο SatPlan δέχεται σαν είσοδο ένα από τα παραγόμενα πλάνα του LAMA. Για την περαιτέρω μελέτη του συνδυασμού των δύο αυτών μεθοδολογιών αναπτύχθηκαν ακόμα δυο τρόποι που αφορούν το σύνολο των εισαγόμενων δράσεων στον SatPlan. Στο πρώτο τρόπο γίνεται μία ενοποίηση όλων των μοναδικών δράσεων από όλες τις λύσεις που δίνει το ευρετικό σύστημα στη έξοδο. Στο δεύτερο τρόπο υλοποιήθηκε μια νέα διαδικασία η οποία δημιουργεί ένα αριθμό νέων υποπροβλημάτων με μικρότερη πολυπλοκότητα (λιγότερους στόχους) και αφού επιλυθούν όλα μαζί στον LAMA μαζί με το αρχικό γίνεται και πάλι ενοποίηση των μοναδικών δράσεων. Επίσης έγινε μία ενοποίηση των δύο αυτών προσεγγίσεων και διαδικασιών που αναφέρθηκαν προηγουμένως σε ένα νέο σύστημα που ονομάστηκε “LamSat”. Η πειραματική ανάλυση του συστήματος LamSat, ήταν εκτενής τόσο σε σχέση με το χρόνο εκτέλεσης όσο και στην ποιότητα των λύσεων που παράγει.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση των κύριων χαρακτηριστικών και παρουσίαση των σημαντικότερων αλγορίθμων που αφορούν το προγραμματισμό δράσης

2.1 Εκτενής ανάλυση του προγραμματισμού δράσης	5
2.2 Αναπαράσταση προβλήματος με τη γλώσσα STRIPS	7
2.2.1 Κύρια χαρακτηριστικά της γλώσσας STRIPS	7
2.2.2 Ανάλυση του σχήματος δράσης στη γλώσσα STRIPS	9
2.3 Αλγόριθμοι προγραμματισμού δράσης	10
2.3.1 Προς τα εμπρός αναζήτηση στο χώρο (Forward state-space search)	11
2.3.2 Προς τα πίσω αναζήτηση στο χώρο (Backward state-space search)	12
2.3.3 Ευρετική αναζήτηση στο χώρο (heuristic for state-space search)	14
2.3.4 Προγραμματισμός με μερική διάταξη (Spatial- Order Planning)	15
2.3.5 Ευρετικές συναρτήσεις για προγραμματισμό μερικής διάταξης	16

2.1 Εκτενής ανάλυση του προγραμματισμού δράσης

Ο κύριος σκοπός ενός συστήματος προγραμματισμού δράσης (planning), είναι η επιλογή μιας ακολουθίας από δράσεις που θα μας οδηγήσουν από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική που αποτελεί και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στα προβλήματα αυτά η αρχική κατάσταση δηλώνεται ρητά και άμεσα ενώ η τελική έμμεσα. Αν δηλ το σύστημα καταλήξει σε ένα πλάνο του οποίου η τελική κατάσταση αποτελεί υποσύνολο, το πλάνο αυτό εξακολουθεί να είναι λύση για το πρόβλημα [2]. Γενικά κάθε πλάνο το οποίο ικανοποιεί την τελική κατάσταση είναι λύση, αν και μπορεί να διαφέρει σε σημαντικό βαθμό από το βέλτιστο πλάνο δηλ το πλάνο με τις λιγότερες δράσεις.

Κάθε ενδιάμεση κατάσταση από την αρχική στην τελική περιγράφεται από ένα πεπερασμένο σύνολο μεταβλητών με τιμές ανάθεσης true ή false που είναι γνωστές ως “μεταβλητές κατάστασης”. Οι μεταβλητές αυτές αλλάζουν τιμή ανάλογα με την επίδραση που έχει το αποτέλεσμα μιας δράσης. Έτσι η μετάβαση από μια κατάσταση σε κάποια άλλη επιτυγχάνεται με την εκτέλεση τουλάχιστον μιας δράσης και την ανάθεση νέων τιμών στις μεταβλητές κατάστασης. Για να είναι ικανό το σύστημα να καταλήξει σε ένα επιθυμητό πλάνο θα πρέπει ή κάθε ενδιάμεση κατάσταση να είναι μοναδική έτσι ώστε να μην κάνει κύκλους μέσα στο χώρο αναζήτησης. Οι δράσεις σε προβλήματα προγραμματισμού δράσης αποτελούνται από δύο κύρια χαρακτηριστικά: Τις προϋποθέσεις (precondition) και το αποτέλεσμα (effect). Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης που θα πρέπει να ισχύουν έτσι ώστε να μπορεί να εκτελεστεί η συγκεκριμένη δράση και το δεύτερο είναι το αποτέλεσμα από την εκτέλεση της εν λόγω δράσης και κατ’ επέκταση η νέα κατάσταση που δημιουργείται από την νέα ανάθεση τιμών στις μεταβλητές κατάστασης. Ένα σύστημα προγραμματισμού δράσης αποτελείται από δύο εισόδους. Το τομέα του προβλήματος και το στιγμιότυπο. Όταν αναφερόμαστε στο τομέα εννοούμε την περιγραφή του κόσμου που είναι στην ουσία οι μεταβλητές κατάστασης και οι πιθανές δράσεις που μπορούν να εκτελεστούν μαζί με τα κύρια χαρακτηριστικά τους (precondition και effects). Το στιγμιότυπο του προβλήματος περιλαμβάνει όπως προαναφέραμε την περιγραφή της αρχικής κατάστασης και τις προδιαγραφές του επιθυμητού αποτελέσματος. Στην έξοδο (αν υπάρχει) βρίσκεται η ακολουθία των δράσεων που όταν εκτελεστεί μας οδηγεί στο στόχο.

Ένα απλό παράδειγμα εκτέλεσης μιας δράσης είναι αυτό της εικόνας 1. Στην αρχική κατάσταση βλέπουμε τους κύβους A και B να βρίσκονται στο πάτωμα ενώ ο κύβος C βρίσκεται πάνω στον A. Οι μεταβλητές κατάστασης θα πρέπει να περιγράφουν την κατάσταση ως εξής: Τη θέση του κάθε κύβου και συγκεκριμένα αν βρίσκεται ή όχι στο πάτωμα πχ η μεταβλητή $s(\text{AonFLOOR})$ είναι ίση με 1. Επίσης τους πιθανούς συνδυασμούς όταν κάποιος κύβος βρίσκεται πάνω από κάποιον άλλο πχ αν ο κύβος B βρίσκεται πάνω από τον κύβο A τότε θα πρέπει η μεταβλητή $s(\text{BonA})$ να έχει τιμή 1. Τέλος θα πρέπει να

υπάρχουν μεταβλητές που να περιγράφουν αν πάνω από κάποιον κύβο βρίσκεται κάποιος άλλος πχ $s(\text{clearC})$ ισούται με 1. Για μπορεί ένα σύστημα προγραμματισμού δράσης να μεταβεί από την κατάσταση στα αριστερά στην κατάσταση που βρίσκεται δεξιά με βάση την εικόνα 1 θα πρέπει να υπάρχει η δράση: $\langle \text{BonA} \wedge \text{clearB} \wedge \text{clearC}, \{ \text{BonC}, \text{clearA}, (\text{NOT})\text{BonA}, (\text{NOT})\text{clearC} \} \rangle$. Το μέρος που καθορίζει την εκτέλεση (effect) και το αποτέλεσμα της δράσης είναι οι όροι που βρίσκονται μέσα στις αγκύλες ενώ οι τρεις πρώτοι αποτελούν τις προϋποθέσεις (precondition).



Εικόνα 1: Παράδειγμα εκτέλεσης δράσης

2.2 Αναπαράσταση προβλήματος με τη γλώσσα STRIPS

2.2.1 Κύρια χαρακτηριστικά της γλώσσας STRIPS

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως η κωδικοποίηση ενός προβλήματος σε καταστάσεις, δράσεις και στόχους αποτέλεσε ένα ισχυρό όπλο για την βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων προγραμματισμού δράσης, αφού είχαν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται πλήρως τη λογική δομή του προβλήματος [3,5]. Για να ισχύει όμως αυτό θα πρέπει η γλώσσα που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση να είναι αρκετά εκφραστική, ώστε να μπορεί να περιγράψει πληθώρα προβλημάτων αλλά και περιοριστική, ώστε να επιτρέπει σε αποδοτικούς αλγόριθμους να την χρησιμοποιήσουν. Όλα αυτά τα κριτήρια τα ικανοποιεί η

γλώσσα STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver), η οποία δημιουργήθηκε το 1971 από τους Fikes και Nilsson.

Για το σωστό χειρισμό της γλώσσας STRIPS ο αναγνώστης θα πρέπει να γνωρίζει τις ακόλουθες έννοιες:

- Κόσμος (Domain): Περιέχει κατηγορήματα και δράσεις που πιθανόν να εφαρμοστούν πάνω στα κατηγορήματα και να αλλάξουν με τα αποτελέσματα τους, την κατάσταση που βρίσκεται ο κόσμος.
- Καταστάσεις (States): Μπορούμε να σκεφτούμε μια κατάσταση στην οποία βρισκόμαστε, σαν ένα στιγμιότυπο του κόσμου (domain), στον οποίο λαμβάνει χώρα το πρόβλημα για το οποίο προσπαθούμε να βρούμε κάποιο σχέδιο δράσης, ούτως ώστε να φτάσουμε τον στόχο. Δηλαδή σε κάθε κατάσταση που βρισκόμαστε, ισχύουν διαφορετικά "στοιχεία" από τα οποία αποτελείτε ο κόσμος του προβλήματος που τέθηκε. Με την εκτέλεση κάποιας δράσης μεταβαίνουμε από μια κατάσταση σε κάποια άλλη ή μπορούμε να παραμείνουμε στην ίδια. Μια κατάσταση αναπαρίσταται σαν μια σύζευξη από αληθή κατηγορήματα. Επίσης, θεωρούμε ότι ισχύει η υπόθεση του κλειστού κόσμου (closed-world-assumption) δηλαδή τα κατηγορήματα τα οποία υπάρχουν στον κόσμο (domain), αλλά δεν γίνεται αναφορά σε αυτά στην αναπαράσταση κάποιας κατάστασης, θεωρούνται ότι είναι ψευδή για την συγκεκριμένη κατάσταση.
- Στόχοι (Goals): Οι στόχοι θεωρούνται σαν μερικές καταστάσεις. Αναπαρίστανται σαν μια σύζευξη από αληθή κατηγορήματα. Μια κατάσταση s ικανοποιεί κάποιο στόχο g , εάν η s περιέχει όλα τα μέλη του κατηγορήματος (και πιθανόν άλλα), τα οποία ανήκουν στην g . Παραδείγματος χάριν, η κατάσταση που αναπαρίσταται με το κατηγορήμα Πλούσιος $\wedge$ Διάσημος $\wedge$ Επιτυχημένος ικανοποιεί τον στόχο Επιτυχημένος $\wedge$ Διάσημος.

- Δράσεις (Actions): Μια δράση χωρίζεται σε δύο μέρη: τις συνθήκες οι οποίες πρέπει να ισχύουν ούτως ώστε η δράση να μπορεί να εκτελεστεί (preconditions) και τα αποτελέσματα (effects) της εκτέλεσης της συγκεκριμένης δράσης. Για παράδειγμα, για να εκφράσουμε την δράση του ταξιδιού με ένα αυτοκίνητο από ένα μέρος σε ένα άλλο χρησιμοποιούμε την ακόλουθη δράση - Travel (Σχήμα 2.1), η οποία έχει σαν προϋπόθεση (precondition) τα κατηγορήματα: $At(c, from)$ το οποίο αντιπροσωπεύει την ύπαρξη του αυτοκινήτου c στο μέρος εκκίνησης $from$, $Car(c)$ το οποίο αντιπροσωπεύει την ύπαρξη του αυτοκινήτου c , $Begin_place(from)$ το οποίο αντιπροσωπεύει την ύπαρξη του μέρους εκκίνησης c και $Destination_place(to)$ το οποίο αντιπροσωπεύει την ύπαρξη του μέρους προορισμού.

Action (Travel($c, from, to$),

Precond: $At(c, from) \wedge Car(c) \wedge Begin_place(from) \wedge Destination_place(to)$

Effect: $\neg At(c, from) \wedge at(c, to)$)

Σχήμα 2.1 Σχήμα δράσης travel

2.2.2 Ανάλυση του σχήματος δράσης στη γλώσσα STRIPS

Ένα σχήμα δράσης στην γλώσσα STRIPS αποτελείται από τρία μέρη

- a. Το όνομα της δράσης και την λίστα παραμέτρων, τα οποία χρησιμεύουν ως αναγνωριστικά για την δράση.
- b. Τις προαπαιτούμενες συνθήκες (precondition), οι οποίες αναπαρίστανται με την μορφή συζεύξεως από θετικά κατηγορήματα τα οποία καθορίζουν τι πρέπει να ισχύει σε κάποια κατάσταση πριν την εκτέλεση κάποιας δράσης. Μεταβλητές οι οποίες εμφανίζονται στις προαπαιτούμενες συνθήκες θα πρέπει να προστεθούν στην λίστα παραμέτρων της δράσης.

- c. Τα αποτελέσματα (effects) της εκτέλεσης της συγκεκριμένης δράσης, τα οποία αναπαρίστανται με την μορφή συζεύξεως από θετικά κατηγορήματα, περιγράφοντας έτσι το πώς περνάμε από μια κατάσταση σε κάποια άλλη μέσω της δράσης. Μεταβλητές οι οποίες εμφανίζονται στα αποτελέσματα της δράσης θα πρέπει να προστεθούν στην λίστα παραμέτρων της δράσης. Ένα θετικό κατηγορήμα P το οποίο εμφανίζεται στο αποτέλεσμα της δράσης θα ισχύει και στην κατάσταση στην οποία μεταβαίνουμε με την εκτέλεση της δράσης. Ένα ψευδές κατηγορήμα $\neg P$ το οποίο εμφανίζεται στο αποτέλεσμα της δράσης θα είναι ψευδές και στην κατάσταση στην οποία μεταβαίνουμε με την εκτέλεση της δράσης.
- Μια δράση είναι εφαρμόσιμη σε κάποια κατάσταση εάν ικανοποιούνται οι προαπαιτούμενες συνθήκες, αλλιώς η δράση δεν έχει αποτελέσματα.
 - Υπόθεση STRIPS (STRIPS assumption): κάθε κατηγορήμα το οποίο δεν αναφέρεται στα αποτελέσματα δεν μεταβάλλετε μετά το πέρας της δράσης .

2.3 Αλγόριθμοι προγραμματισμού δράσης

Στα πλαίσια επίλυσης προβλημάτων προγραμματισμού δράσης έχουν δημιουργηθεί πολλοί αλγόριθμοι οι οποίοι μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την υλοποίηση τους ως προς τρόπο αναζήτησης της λύσης στο χώρο καταστάσεων. Οι αλγόριθμοι μπορεί να αναζητούν τη λύση εμπρόσθια από την αρχική κατάσταση προς την τελική ή αντίστροφα από το στόχο (τελική κατάσταση) προς την αρχική κατάσταση, λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη τις προϋποθέσεις και τις συνέπειες κάθε δυνατής δράσης. Πιο κάτω περιγράφουμε μερικούς από τους πιο γνωστούς αλγόριθμους.

2.3.1 Προς τα εμπρός αναζήτηση στο χώρο (Forward state-space search)

Ο αλγόριθμος αυτός λέγεται και “προοδευτικός προγραμματισμός δράσης” (progression planning) αφού η κατεύθυνση του ξεκινά από την αρχική και καταλήγει στην τελική κατάσταση. Σε κάθε επανάληψη ο αλγόριθμος αναζητά τις δράσεις που μπορούν να εκτελεστούν με βάση τις προϋποθέσεις (precondition) και ανάλογα δημιουργεί το χώρο αναζήτησης. Ο χώρος αυτό είναι πεπερασμένος και έτσι είναι σίγουρο ότι ο αλγόριθμος θα τερματίσει επιστρέφοντας ένα πλάνο το οποίο χαρακτηρίζεται σαν μια καλή λύση.

Ο αλγόριθμός της μπρος τα εμπρός αναζήτησης στο χώρο με βάση τα πιο πάνω είναι:

param: s_0, O, g

$states = \{s_0\}$

$h(s_0) = h_i$

$E(s_0) = \{a \mid a \text{ is a ground instance of an operation } \in O \text{ such that } PRECOND(a) \text{ is satisfied in } s_0 \}$

while true **do**

if $states = \emptyset$ **then return** failure **end if**

choose a state $s \in states$

if $s \in g$ **then return** $h(s)$ **end if**

if $E(s) = \emptyset$ **then**

remove s from $states$

else

choose and **remove** an action $a \in E(s)$

$s' \leftarrow (s, a)$

if $s' \notin states$ **then**

$h(s') = h(s).a$

$E(s') = \{a \mid a \text{ is a ground instance of an operation } \in O \text{ such that } PRECOND(a) \text{ is satisfied in } s' \}$

end if

end if

end while

Παρ' όλα αυτά παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα. Το πιο σημαντικό είναι ότι δεν μπορεί να επιλύσει προβλήματα που συνδυάζουν ασύνδετες δράσεις, αφού όλες οι δράσεις που εκτελούνται σχετίζονται με την τρέχουσα κατάσταση. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι σε ένα πρόβλημα υπάρχουν 10 αεροδρόμια τα οποία έχουν στη διάθεση τους 5 αεροπλάνα το κάθε ένα, ενώ υπάρχουν και 20 φορτία. Ο στόχος είναι να μεταφέρουμε τα φορτία αυτά από το αεροδρόμιο Α στο αεροδρόμιο Β. Μια απλή λύση στο πρόβλημα είναι να φορτώσουμε τα φορτία αυτά σε κάποιο από τα 5 αεροπλάνα του Α. Στη συνέχεια το συγκεκριμένο αεροπλάνο να πετάξει στο Β και να ξεφορτώσει τα 20 φορτία. Η εύρεση της λύσης όμως στο πρόβλημα αυτό με τέτοιου είδους αλγόριθμους είναι αρκετά χρονοβόρα. Αυτό γιατί δημιουργείται τεράστιος χώρος αναζήτησης [2]. Κάθε ένα από τα 50 αεροπλάνα μπορεί να πετάξει σε 9 άλλα αεροδρόμια και κάθε ένα από τα 20 φορτία μπορεί να φορτωθεί από ή να ξεφορτωθεί (αν ήδη φορτώθηκε) σε οποιοδήποτε αεροπλάνο. Έτσι το γεγονός αυτό μπορεί να δημιουργήσει μέχρι και 1000^{41} ενδιάμεσες καταστάσεις. Γι' αυτό οι αλγόριθμοι αυτοί συνδυάζονται με κάποια ευρετικά τα οποία κάνουν την αναζήτηση πιο αποδοτική.

2.3.2 Προς τα πίσω αναζήτηση στο χώρο (Backward state-space search)

Στον αλγόριθμο αυτό ορίζεται ως αρχική κατάσταση η τελική κατάσταση του προβλήματος και το αντίθετο για την τελική κατάσταση [8]. Έτσι το σύστημα προγραμματισμού δράσης προσπαθεί, εκτελώντας μια αλληλουχία πράξεων να φθάσει από την τελική στην αρχική κατάσταση. Η αναζήτηση προς τα πίσω (Backward State Space Search) είναι δύσκολό να υλοποιηθεί όταν η κατάσταση του στόχου περιγράφεται με ένα σύνολο από περιορισμούς και όχι ρητά. Επίσης δεν είναι πάντοτε εμφανής η δημιουργία των προηγούμενων καταστάσεων που οδηγούν σε μια κατάσταση στόχου. Το κύριο πλεονέκτημα της αναζήτησης είναι ότι αποφεύγει αχρείαστες πράξεις και εξετάζει μόνο αυτές οι οποίες σχετίζονται με το στόχο, δηλαδή πετυχαίνουν ένα μέρος του στόχου. Έτσι, ο χώρος αναζήτησης είναι κατά πολύ μικρότερος σε σχέση με το χώρο αναζήτησης της εμπρόσθιας αναζήτησης στο χώρο. Αρκετές φορές όμως μη συσχετιζόμενες πράξεις μπορεί να οδηγήσουν στη λύση, όμως αν ο αλγόριθμος εξέταζε και αυτές τις πράξεις δεν θα ήταν πλέον αποδοτικός.

Ο αλγόριθμος της προς τα πίσω αναζήτησης στο χώρο με βάση τα πιο πάνω είναι:

param: s_0, O, g

$statesets = \{g\}$

$_(g) = h_i$

$E(g) = \{a \mid a \text{ is a ground instance of an operation } \in O \text{ such that } (a, g)^{-1} \neq \emptyset \text{ and}$

$(a, g)^{-1} * g\}$

while true **do**

if $statesets = \emptyset$ **then return** failure **end if**

choose a state set $S \in statesets$

if $s_0 \in S$ **then return** $_(S)$ **end if**

if $E(S) = \emptyset$ **then**

remove S from $statesets$

else

choose and **remove** an action $a \in E(S)$

$S' \leftarrow -1(S, a)$

if $S' \notin statesets$ **then**

$_(S') = a._(S)$

$E(S') = \{a \mid a \text{ is a ground instance of an operation } \in O \text{ such that}$

$(a, S')^{-1} \neq \emptyset \text{ and } (a, S')^{-1} * S'\}$

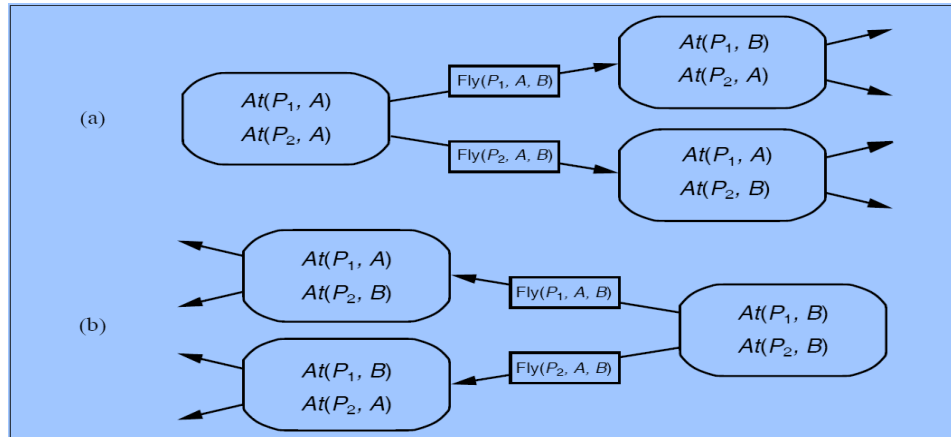
end if

end if

end while

Η κατεύθυνση του αλγόριθμου προς τα πίσω γίνεται με το εξής τρόπο: Ξεκινώντας από την επιθυμητή κατάσταση διαγράφει το αποτέλεσμα (effect) της δράσης που ήταν η αιτία να φθάσει στην κατάσταση αυτή ενώ παράλληλα προσθέτει τις προϋποθέσεις (preconditions) της εν λόγω δράσης στη παρούσα κατάσταση. Έτσι με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται προηγούμενες καταστάσεις και ο αλγόριθμός συνεχίζει. Η αναζήτηση τελειώνει όταν μια από τις προηγούμενες καταστάσεις ικανοποιείται από την αρχική. Για παράδειγμα αν

είχαμε μία δράση A (ApplyImage, Precondition: screenClear, Effect screenImage) ο αλγόριθμός θα άλλαζε την κατάσταση S από screenImage σε screenClear. Όπως και στον αλγόριθμο εμπρόσθιας αναζήτησης στο χώρο έτσι και εδώ ο χώρος αναζήτησης είναι πεπερασμένος γι' αυτό είναι σίγουρο ότι θα τερματίσει επιστρέφοντας ένα καλό πλάνο.



Εικόνα 1: Οι δυο προσεγγίσεις αναζήτησης στο χώρο

a) Προς τα εμπρός αναζήτηση στο χώρο

b) Προς τα πίσω αναζήτηση στο χώρο

2.3.3 Ευρετική αναζήτηση στο χώρο (heuristic for state-space search)

Όπως προαναφέραμε για να είναι ικανό ένα σύστημα προγραμματισμού δράσης να εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς της τεχνολογίας θα πρέπει να επιλύει δύσκολα προβλήματα σε λογικά σύντομο χρόνο. Έτσι απαιτείται μια έξυπνη μέθοδος, με τη βοήθεια της οποίας θα καταλήγει σε ένα πλάνο χωρίς ο αλγόριθμος να χρειάζεται να εξερευνήσει όλο το χώρο αναζήτησης αφού η μέθοδος θα του διαγράφει κάποιες αχρείαστες δράσεις, κατευθύνοντας τον παράλληλα προς το στόχο. Το ρόλο αυτό της έξυπνης μεθόδου καλείται να εκτελέσει η ευρετική συνάρτηση [2]. Μια σημαντική ευρετική συνάρτηση είναι η εκτίμηση του αριθμού των δράσεων από μια κατάσταση στην τελική. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να γίνει συνδυάζοντας τα αποτελέσματα (effects) κάθε δράσης με τους στόχους του προβλήματος και μαντεύοντας πόσες δράσεις χρειάζονται ακόμα μέχρι την τελική κατάσταση.

Δύο σημαντικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την ευρετική αναζήτηση είναι η “χαλάρωση” του προβλήματος και η διάσπαση του προβλήματος σε υποστόχους. Κατά την πρώτη προσέγγιση δημιουργείται ένα νέο πρόβλημα με λιγότερες προϋποθέσεις (precondition) στις δράσεις του. Πίσω από την προσέγγιση αυτή βρίσκεται η ιδέα ότι το κόστος μίας βέλτιστης λύσης για το απλουστευμένο πρόβλημα αποτελεί ένα αποδεκτό ευρετικό για το αρχικό πρόβλημα. Αυτό γιατί η βέλτιστη λύση στο αρχικό πρόβλημα, αποτελεί εξ ορισμού λύση και για το πιο απλό πρόβλημα και έτσι το κόστος της θα πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο και το κόστος της αντίστοιχης λύσης στο απλό πρόβλημα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την “χαλάρωση” του προβλήματος. Ένας τρόπος είναι η σύζευξη όλων των προϋποθέσεων (precondition) μιας δράσης, έτσι ώστε να μην είναι αναγκαίο να τηρούνται όλες οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή της δράσης αλλά τουλάχιστον μία. Επίσης ένας άλλος τρόπος είναι η διαγραφή από την περιγραφή της κατάστασης κάποιων προϋποθέσεων που θα έπρεπε να έχουν τιμή 1 με την εφαρμογή μιας δράσης ενώ δεν έχουν.

2.3.4 Προγραμματισμός με μερική διάταξη (Partial-Order Planning)

Αυτό που διακρίνει τον αλγόριθμό αυτό από τους προηγούμενους δύο είναι ότι η σειρά με την οποία θα εκτελεστούν οι δράσεις δεν είναι αυστηρά ακολουθιακή, σε σύγκριση με τους forward και backward όπου η σειρά καθορίζεται αυστηρά από το μονοπάτι που ξεκινά από την αρχική κατάσταση και καταλήγει στην τελική [8]. Το γεγονός αυτό του δίνει το πλεονέκτημα να διασπά το πρόβλημα σε υποπροβλήματα και ακολούθως να συνενώνει τις μερικές λύσεις ενώ από την άλλη ο αλγόριθμος έχει την ευελιξία επιλύει αρχικά σημαντικές αποφάσεις παρά να δουλεύει σε συγκεκριμένα βήματα με χρονολογική σειρά .

Κάθε πιθανό σχέδιο λύσης αποτελείται από τέσσερα μέρη. Στο πρώτο μέρος είναι οι δράσεις που αφορούν το κάθε σχέδιο. Ένα άδειο σχέδιο περιλαμβάνει μόνο την αρχή και το τέλος. Στο δεύτερο μέρος περιλαμβάνονται οι διάφοροι περιορισμοί σχετικά με τη σειρά εκτέλεσης ορισμένων δράσεων. Οι περιορισμοί αυτοί είναι απαραίτητοι ώστε να μην γίνονται αναιρέσεις μεταξύ τους και να μη δημιουργούνται αχρείαστοι κύκλοι ανάμεσα στις εκτελέσεις των δράσεων. Το τρίτο μέρος αφορά τους συνδέσμους αιτιότητας (causal

links). Οι σύνδεσμοι αιτιότητας συσχετίζουν δύο καταστάσεις, μέσω της συνέπειας που δημιουργείται από την πρώτη κατάσταση π.χ. $A \wedge (p) B$, δηλαδή το A επιτυγχάνει το p για το B. Τέλος το τέταρτο μέρος αφορά το σύνολο των ανοιχτών προϋποθέσεων, όπου ανοικτή προϋπόθεση είναι οποιαδήποτε προϋπόθεση δεν έχει ικανοποιηθεί από καμία δράση που περιέχεται στο σχέδιο λύσης.

Το αρχικό σχέδιο περιλαμβάνει τις δράσεις Start και Finish, περιορισμούς διάταξης (ordering constraints) το $Start < Finish$, δεν έχει συνδέσμους αιτιότητας και έχει ανοικτές προϋποθέσεις τις συνέπειες της δράσης finish. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου επιλέγεται να εκτελεστεί μια δράση η οποία έχει ως συνέπεια αυτή την προϋπόθεση. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν το σύνολο των ανοικτών προϋποθέσεων είναι κενό.

Συνεπές είναι το σχέδιο στο οποίο δεν παρουσιάζονται κύκλοι κατά την εκτέλεση και δεν υπάρχουν συγκρούσεις ανάμεσα στα συνδέσμους αιτιότητας. Ταυτόχρονα συνεπές είναι το πλάνο που δεν έχει ανοιχτές προϋποθέσεις. Ένα συνεπές πλάνο αποτελεί λύση του προβλήματος.

2.3.5 Ευρετικές συναρτήσεις για προγραμματισμό μερικής διάταξης

Λόγω του ότι ο αλγόριθμος της μερικής διάταξης δεν κάνει αναζήτηση στο χώρο με τις πιθανές καταστάσεις (state-space search) αλλά στον χώρο των πλάνων (plan space) τα οποία προέκυψαν από την διάσπαση των υποπροβλημάτων, αδυνατεί να αναπαραστήσει τις καταστάσεις πράγμα που καθιστά αδύνατο τον υπολογισμό της απόστασης που βρίσκεται ο αλγόριθμος από την τελική κατάσταση. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση μιας ευρετικής μεθόδου. Μια πιθανή υλοποίηση θα ήταν το αποτέλεσμα της αφαίρεσης του αριθμού των ανοιχτών προϋποθέσεων από τις αντίστοιχες που ικανοποιούνται από την τελική κατάσταση. Το γεγονός αυτό όμως θα προκαλούσε υπερεκτίμηση του κόστους για τις δράσεις που επιτυγχάνουν πολλαπλούς στόχους και η υποτίμηση του κόστους όταν υπάρχουν αρνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των καταστάσεων του σχεδίου. Μια δεύτερη προσέγγιση για την εύρεση της απόστασης από την τελική κατάσταση είναι η επιλογή μιας από τις ανοικτές προϋποθέσεις, η οποία μπορεί να ικανοποιηθεί από τις πιο λίγες σε αριθμό

δράσεις. Το πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να εντοπιστεί γρήγορα η μη δυνατότητα ικανοποίησης.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή και ανάλυση νέων σύγχρονων αλγορίθμων και συστημάτων για προβλήματα προγραμματισμού δράσης: Γράφημα Δράσεων, SatPlan και LAMA

3.1 Δομή του Γραφήματος Δράσεων	18
3.1.1 Ανάλυση αλγορίθμου Γραφήματος Δράσεων	21
3.1.2 Παράδειγμα γραφήματος δράσεων	22
3.2 Ο αλγόριθμος του SatPlan	24
3.2.1 Η εξέλιξη του SatPlan στο πέρασμα των χρόνων	24
3.2.2 Λειτουργία του SatPlan	25
3.2.3 Κωδικοποίηση γράφου δράσεων σε κανονική συζευκτική μορφή (cnf)	26
3.3 Το σύστημα προγραμματισμού δράσης LAMA	27
3.3.1 Η δομή του συστήματος LAMA	27
3.3.2 Τι είναι τα ορόσημα (landmarks) και η χρησιμότητά τους στο LAMA	29

3.1 Δομή του Γραφήματος Δράσεων

Ο αλγόριθμος του γραφήματος δράσεων (Graphplan) έκανε την εμφάνισή του γύρω στο 1995 από τους Avrim Blum και Merrick Furst [9]. Η ανάγκη για ανάπτυξη νέων αλγορίθμων στο πρόβλημα προγραμματισμού δράσης προήλθε από το γεγονός ότι οι προηγούμενοι αλγόριθμοι για τους οποίους έχουμε αναφερθεί δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα που ήταν NP-complete αφού απαιτούσαν μεγάλους χρόνους εκτέλεσης. Από την άλλη ο προγραμματισμός δράσης άρχισε να έχει πρακτικές εφαρμογές όπως για παράδειγμα την εγκατάσταση δορυφόρων στο διάστημα και έτσι

χρειαζόταν η δημιουργία μιας νέας, αποτελεσματικής δομής η οποία να δίνει ένα πλάνο σε σύντομο χρόνο.

Ειδικότερα ένα γράφημα δράσεων αποτελείται από επίπεδα (levels) που αντιστοιχούν σε χρονικά βήματα στο πλάνο [9]. Η αρχική κατάσταση βρίσκεται στο επίπεδο 0 ή στην χρονική στιγμή 0. Το κάθε επίπεδο περιέχει ένα σύνολο από δράσεις των οποίων οι προϋποθέσεις ικανοποιούνται τη δεδομένη χρονική στιγμή και όρους (literals) που έχουν τιμή true. Οι όροι αυτοί δεν υπήρχαν εξ αρχής αλλά δημιουργούνται από τη δράση που εκτελείται τη προηγούμενη χρονική στιγμή ή το προηγούμενο επίπεδο.

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό του γραφήματος δράσεων είναι οι επίμονες δράσεις (persistence actions). Για κάθε νέο επίπεδο που δημιουργείται θα πρέπει να έχουμε εκτός από τους νέους όρους που δημιουργούνται από την εφαρμογή των διαθέσιμων δράσεων και τους όρους που δημιουργήθηκαν στα προηγούμενα επίπεδα είτε αυτοί έχουν θετική είτε αρνητική τιμή. Έτσι αφού ένα νέο επίπεδο δημιουργείται μόνο από την εφαρμογή δράσεων θα πρέπει να έχουμε μια δράση για το κάθε όρο η οποία να περιγράφει ότι δεν υπάρχει αλλαγή στην τιμή του όρου (no operation action). Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η κατάσταση του κάθε όρου και στο επόμενο επίπεδο.

Σημαντική έννοια στο αλγόριθμό του γραφήματος δράσεων αποτελεί και ο αμοιβαίος αποκλεισμός μεταξύ δύο δράσεων ή μεταξύ δύο όρων. Με την έννοια αυτή εννοούμε ότι σε κάθε επίπεδο μπορεί να υπάρχουν κάποια ζευγάρια δράσεων ή όρων που δεν μπορούν να εκτελεστούν αφού το ένα αναιρεί το άλλο με κάποιο τρόπο όπως θα δούμε στη συνέχεια. Απαραίτητη προϋπόθεση έτσι ώστε η κατάσταση ενός επιπέδου να ικανοποιεί τη κατάσταση-στόχος είναι οι συγκεκριμένοι όροι της τελικής κατάστασης να μην αποτελούν αμοιβαίο αποκλεισμό μεταξύ τους για το συγκεκριμένο επίπεδο. Ο αριθμός αυτός των αμοιβαίων αποκλειόμενων όρων ή δράσεων είναι μεγάλος για τα αρχικά επίπεδα ενώ καθώς προχωράμε μέσα στο γράφημα ο αριθμός αυτός μειώνεται. Ακόμα δεν μπορεί δύο μη αποκλειόμενοι όροι ή δράσεις να αποτελέσουν μετέπειτα αμοιβαίο αποκλεισμό.

Ο αμοιβαίος αποκλεισμός μεταξύ δύο δράσεων υπάρχει αν ικανοποιείται μια από τις ακόλουθες συνθήκες:

- i. Αντιφατικά αποτελέσματα (Inconsistent effects): Όταν το αποτέλεσμα μίας δράσης αναιρεί το αποτέλεσμα μιας άλλης δράσης.
- ii. Παρεμβολή (Interference): Όταν κάποιο από τα αποτελέσματα μίας δράσης αναιρεί μία από τις προϋποθέσεις μίας άλλης δράσης.
- iii. Ανταγωνιστικές ανάγκες (Competing needs): Όταν η προϋπόθεση μίας δράσης αναιρεί την προϋπόθεση μίας άλλης δράσης.

Ο αμοιβαίος αποκλεισμός μεταξύ δύο όρων (literals) υπάρχει αν ικανοποιείται μια από τις ακόλουθες συνθήκες:

- i. Αν ο ένας όρος αναιρεί τον άλλο (θετικός - αρνητικός).
- ii. Αν το αντίστοιχο ζεύγος δράσεων από τις οποίες δημιουργούνται οι όροι αυτοί αποτελούν μεταξύ τους αμοιβαίο αποκλεισμό.

Σε κάθε επίπεδο στο γράφημα δράσεων γίνεται έλεγχος αν η τελική κατάσταση αποτελεί υποσύνολο της παρούσας κατάστασης και δεν υπάρχει αμοιβαίος αποκλεισμός μεταξύ τους. Αν δεν ικανοποιούνται οι πιο πάνω συνθήκες τότε αυξάνεται το επίπεδο κατά ένα συνεχίζοντας την ίδια διαδικασία. Καθώς όμως τα επίπεδα αυξάνονται υπάρχει πιθανότητα οι καταστάσεις δύο διαδοχικών επιπέδων να είναι ακριβώς οι ίδιες (ίδιοι όροι και ίδιες τιμές, ίδιοι αμοιβαίοι αποκλεισμοί). Το σημείο αυτό ονομάζεται fix point και ο αλγόριθμος σταματά να τρέχει χωρίς να επιστρέψει πλάνο αφού εξάντλησε όλα τα περιθώρια και οποιαδήποτε άλλη επανάληψη θα έχει τα ίδια αποτελέσματα με την προηγούμενη. Θα μπορούσε ο αλγόριθμος να έτρεχε μέχρι το fix point χωρίς να ελέγχει σε κάθε επίπεδο αν ικανοποιείται η τελική κατάσταση, όμως αυτό θα έχει μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης αφού η λύση μπορεί να βρίσκεται πολύ πιο πριν από το fix point.

Είναι αποδεδειγμένο ότι ο χώρος αναζήτησης του αλγορίθμου γραφήματος δράσεων είναι πεπερασμένος και έτσι είναι σίγουρο ότι ο αλγόριθμός τερματίζει. Αυτό οφείλεται κυρίως σε τρεις λόγους.

1. Οι όροι σε κάθε επίπεδο αυξάνονται μονοτονικά.
2. Οι δράσεις σε κάθε επίπεδο αυξάνονται μονοτονικά.
3. Οι αμοιβαίοι αποκλεισμοί μεταξύ δύο δράσεων ή δυο όρων μειώνονται μονοτονικά.

3.1.1 Ανάλυση αλγορίθμου Γραφήματος Δράσεων

Ο αλγόριθμος του γράφου δράσεων γίνεται ουσιαστικά σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση προσπαθεί να διαπιστωθεί κατά πόσο υπάρχει ή όχι λύση για ένα δεδομένο πρόβλημα. Στη δεύτερη φάση και εφόσον υπάρχει κάποια λύση, δηλαδή το πρόβλημα μπορεί να ικανοποιηθεί, υπολογίζει την ίδια τη λύση. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του αλγορίθμου περιγράφεται πιο κάτω.

Αρχικοποιεί τον γράφο με την αρχική κατάσταση και προσδιορίζει το στόχο. Στη συνέχεια επαναλαμβάνει για ένα συγκεκριμένο αριθμό επιπέδων το εξής: σε κάθε επίπεδο έστω k ελέγχει αν εμφανίζονται οι όροι του στόχου και αν δεν υπάρχει αμοιβαίος αποκλεισμός μεταξύ οποιονδήποτε δυο. Εάν αυτό ισχύει, τότε εξάγει τη λύση από το τρέχον γράφημα αν υπάρχει, αλλιώς επεκτείνει το γράφημα στο επόμενο επίπεδο, έστω $k+1$ (εφαρμόζει δηλαδή τις δράσεις που μπορούν να εκτελεστούν στην τρέχουσα κατάσταση).

Εάν και εφόσον υπάρχει λύση αυτή εξάγεται με τρόπο ανάλογο του αλγορίθμου αναζήτησης προς τα πίσω στο χώρο, δηλαδή ξεκινάμε από το τελευταίο επίπεδο που είναι ο στόχος και πάμε στην αρχική κατάσταση, εφαρμόζοντας τις αντίστοιχες δράσεις [8]. Επίσης κατά την εξαγωγή της λύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρετικά για την επιλογή των δράσεων κατά τη διαδικασία της αναζήτησης προς τα πίσω όπως: ικανοποίηση πρώτα του όρου με το μεγαλύτερο κόστος επιπέδου ή επιλογή δράσης της οποίας οι προϋποθέσεις της έχουν το μικρότερο συνολικό άθροισμα του κόστους όλων των επιπέδων.

Με βάση τα πιο πάνω ο αλγόριθμός του Γραφήματος Δράσεων είναι:

Function GRAPHPLAN (problem)

//returns solution or failure

Graph $\leftarrow$ Initial-Planning-Graph (problem)

Goals $\leftarrow$ Goals [problem]

Do

 If goals all non-mutex in last level of graph

```

then do
    solution  $\leftarrow$  Extract-Solution (graph)
    if solution not equal failure then return solution
    else if No-solution-Possible (graph)
        then return failure
    graph  $\leftarrow$  Expand-Graph (graph, problem)

```

3.1.2 Παράδειγμα Γραφήματος Δράσεων

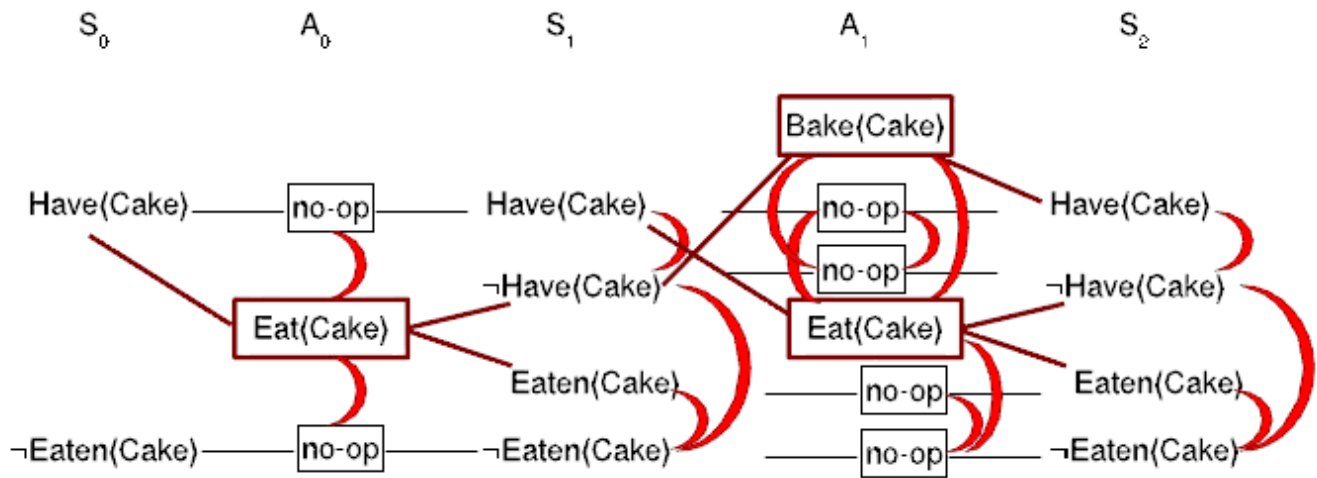
Πιο κάτω παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου γραφήματος δράσεων.

Αρχική κατάσταση: Have(Cake)

Τελική κατάσταση: Have(Cake) $\wedge$ Eaten(cake)

Οι δράσεις που μπορούν να εκτελεστούν (STRIPS) είναι:

- i. Op(ACTION: Eat(Cake),
PRECOND: Have (Cake),
EFFECT: Eaten (Cake) $\wedge$ $\neg$ Have (Cake))
- ii. Op(ACTION: Bake(Cake),
PRECOND: $\neg$ Have (Cake),
EFFECT: Have (Cake))



Σχήμα 3.1 Γράφημα Δράσεων

Το σχήμα 3.1.2. αναπαριστά ένα Γράφο Δράσεων για το συγκεκριμένο πρόβλημα με αρχική κατάσταση την S_0 . Τα A_i συμβολίζουν τις δράσεις των οποίων οι προϋποθέσεις τους ικανοποιούνται τη δεδομένη χρονική στιγμή ενώ τα S_i συμβολίζουν την κατάσταση του κάθε επιπέδου όταν εφαρμοστούν όλες οι δράσεις που επιτρέπονται με τις τιμές που παίρνουν οι διάφοροι όροι (literals). Οι δράσεις που χρησιμεύουν για να διατηρούν την κατάσταση του κάθε όρου και στο επόμενο επίπεδο (persistence actions) συμβολίζονται με “no-op” ενώ τα ημικύκλια υποδηλώνουν αμοιβαίο αποκλεισμό μεταξύ των δύο δράσεων ή των δύο όρων και έτσι δεν μπορούν να εκτελεστούν την ίδια χρονική στιγμή. Επίσης παρατηρείται ότι στο επίπεδο S_1 οι όροι ικανοποιούν την τελική κατάσταση αλλά δεν μπορεί να υπάρξει πλάνο αφού είναι αμοιβαία αποκλειόμενοι. Αν εξετάσουμε το κάθε αμοιβαίο αποκλεισμό ξεχωριστά βλέπουμε ότι το αποτέλεσμα της επίμονης δράσης (persistence actions) $\text{Have}(\text{Cake})$ αναιρεί το αποτέλεσμα της δράση $\text{Eat}(\text{Cake})$. Το ίδιο συμβαίνει αν πάρουμε το αποτέλεσμα της δράσης $\text{Eat}(\text{Cake})$, και το αποτέλεσμα της επίμονης δράσης $\neg\text{Eaten}(\text{Cake})$ αλλά και από τις υπόλοιπες επίμονες δράσεις του A_1 . Επιπλέον στις δράσεις $\text{Bake}(\text{Cake})$ και $\text{Eat}(\text{Cake})$ υπάρχει αμοιβαίος αποκλεισμός λόγω του ότι η προϋπόθεση της μιας αναιρεί την προϋπόθεση της άλλη ($\text{Have}(\text{Cake})$, $\neg\text{Have}(\text{Cake})$). Τέλος όλοι οι όροι στους οποίους υπάρχει μεταξύ τους αμοιβαίος αποκλεισμός οφείλεται στο γεγονός ότι στο αντίστοιχο ζεύγος δράσεων από τις οποίες δημιουργούνται οι όροι αυτοί υπάρχει μεταξύ τους αμοιβαίο αποκλεισμό.

3.1 Ο αλγόριθμος του SatPlan

Η ιδέα για την δημιουργία του αλγορίθμου SatPlan πρωτοεμφανίστηκε το 1992 από τους Kautz και Selman [7]. Το πρωτοποριακό της ιδέας αυτής, που την κάνει να διαφέρει από τον αλγόριθμο γραφήματος δράσεων ήταν ότι ένα πρόβλημα προγραμματισμού δράσης μπορεί να λυθεί αν το ανάγουμε σε πρόβλημα ικανοποιησιμότητας προτασιακής λογικής (Boolean Satisfiability Problem) [1]. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα πλάνο για το πρόβλημα μας με εξίσου καλές επιδόσεις με τις υπόλοιπες τεχνολογίες προγραμματισμού δράσης [7]. Η ιδέα αυτή πηγάζει από το γεγονός ότι εκείνο τον καιρό έκαναν την εμφάνιση τους πολλοί νέοι επιλυτές (solver) που είχαν πολύ καλή απόδοση. Μπορούσαν να πάρουν σαν είσοδο μεγάλα στιγμιότυπα του προβλήματος και να βρουν λύση σε σχετικά σύντομο χρόνο. Λόγω της κατάστασης αυτής δημιουργήθηκε η ανάγκη να βρεθεί ένας τρόπος για να εκμεταλλευθούν την τεράστια αυτή ικανότητα των επιλυτών. Στα προηγούμενα χρόνια δεν ήταν τόσο αποδοτική η μετατροπή αυτή λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος ικανοποιησιμότητας προτασιακής λογικής. Αλλά στην πορεία διαπιστώθηκε ότι πολλά από τα προβλήματα αυτά μπορούν να λυθούν με αποδοτικό τρόπο ενώ αυτά που δεν λύνονται εύκολα δεν εμφανίζονται και τόσο συχνά.

3.2.1 Η εξέλιξη του SatPlan στο πέρασμα των χρόνων

Το αρχικό SatPlan σύστημα ήταν στην πραγματικότητα ένα σύνολο συμβάσεων για την κωδικοποίηση προβλημάτων γραμμικού περιορισμού της μορφής STRIPS, σε προτασιακό σχήμα δράσεων. Η βασική ανάπτυξη της θεωρίας αυτής ήταν η εισαγωγή των παράλληλων κωδικοποιήσεων. Αυτό σήμαινε ότι πολλές πράξεις οι οποίες δεν παρεμβάλλονταν μεταξύ τους, μπορούσαν να συμβούν στο ίδιο χρονικό πλαίσιο. Ακολούθησε μετά το BLACKBOX το οποίο υλοποιούσε επιπλέον διάχυση πληροφορίας αμοιβαίου αποκλεισμού (mutex propagation) που είναι μια μορφή τοπικής-συνέπεια με πολύ καλές επιδόσεις. Μετέπειτα, εμφανίστηκε το Satplan2004 σύστημα όπου ήταν το ταχύτερο και πιο ισχυρό σύστημα επίλυσης προβλημάτων προγραμματισμού δράσεων σε πέντε διαφορετικά πεδία ορισμού και δεύτερο καλύτερο σύστημα σε δύο πεδία ορισμού.

Η επόμενη αναβαθμισμένη έκδοση την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε ήταν η SatPlan-2006. Η έκδοση SatPlan-2006 παίρνει σαν είσοδο το υποσύνολο STRIPS της PDDL(Planning Domain Definition Language) γλώσσας. Σκοπός του είναι να βρίσκει λύσεις με βάση το μικρότερο παράλληλο μήκος. Έχει την λειτουργικότητα αυτή γιατί πρέπει να υπολογίζει το μικρότερο σύνολο χρονικών βημάτων μέσα από τις πολλές πράξεις που μπορεί να εμφανίζονται παράλληλα σε κάθε χρονικό διάστημα [7]. Μέχρι σήμερα το SatPlan-2006 παραμένει ένα από τα κορυφαία συστήματα όσο αφορά την επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης και διάφοροι ερευνητές προσπαθούν να το επεκτείνουν βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του με την εφαρμογή νέων μεθόδων ή την τροποποίηση των απλούστερων υπολογιστικών «κομματιών» του.

3.2.2 Λειτουργία του SatPlan

Η λειτουργία του SatPlan όπως προαναφέραμε βασίζεται πάνω στο γράφημα δράσεων με την διαφορά ότι ο SatPlan κωδικοποιεί το κάθε επίπεδο στο οποίο βρίσκεται μαζί με τους περιορισμούς του προβλήματος σε μία συζευκτική κανονική μορφή (cnf) έτσι ώστε να το δώσει σαν στιγμιότυπο εισόδου σε ένα ανεξάρτητο προτασιακό επιλυτή (solver) [1]. Το γεγονός αυτό πραγματοποιείται αφού πρώτα ο SatPlan κατασκευάσει το γράφημα δράσεων μέχρι κάποιο επίπεδο K. Στην cnf μορφή η κάθε πρόταση περιλαμβάνει ένα σύνολο από όρους που είναι στην ουσία μεταβλητές που αποτιμούνται σε true ή false και αντιπροσωπεύουν τους ίδιους τους περιορισμούς σε κάθε βήμα. Ο ρόλος του επιλυτή είναι να εξετάσει κατά πόσο υπάρχει λύση, δηλαδή αν είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν αυτές οι προτάσεις (clauses) και αν ναι να βρει μια τέτοια ανάθεση στις μεταβλητές (ποιες θα πάρουν true και ποιες θα πάρουν false) έτσι ώστε όλες οι προτάσεις να αποτιμούνται σε true. Αν το πρόβλημα μπορεί να ικανοποιηθεί, τότε επιστρέφει SAT μαζί με τη λύση στον SatPlan. Εφόσον ο SatPlan παίρνει τη λύση, εκτελεί μια ακόμη επιπλέον επεξεργασία αφαιρώντας αχρείαστες δράσεις. Η λειτουργία αυτή είναι αναγκαία για το λόγο ότι η μια δράση μπορεί να μην είναι απαραίτητη για την επίτευξη των στόχου του αρχικού προβλήματος. Αν το πρόβλημα δεν μπορεί να ικανοποιηθεί ο επιλυτής επιστρέφει UNSAT στον SatPlan και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για το επόμενο επίπεδο του γράφου [7].

Με βάση τα πιο πάνω ο αλγόριθμος του SatPlan είναι ο ακόλουθος:

```
function SATPLAN(problem, T max) // returns solution or failure
    inputs: problem, a planning problem
    T max, an upper limit for plan length
    for T = 0 to T max do
        cnf ← TRANSLATE-TO-SAT(problem, T)
        assignment SAT-SOLVER(cnf)
        if assignment is not null
            then
                return EXTRACT-SOLUTION(assignment, mapping)
    end for
    return failure
```

3.2.3 Κωδικοποίηση γράφου δράσεων σε κανονική συζευκτική μορφή (cnf)

Καθώς το γράφημα δράσεων κτίζεται σε κάθε επίπεδο μπορούν να εξαχθούν από την αναπαράσταση αυτή, οι διάφορες μορφές από διαζευκτικές προτάσεις. Οι προτάσεις αυτές αποτελούν την άμεση κωδικοποίηση από το ίδιο το γράφημα. Έχουν δημιουργηθεί κατά καιρούς διάφορες κωδικοποιήσεις. Οι κωδικοποιήσεις στηρίζονται στα ακόλουθα αξιώματα:

1. Αξιώματα που περιγράφουν την αρχική κατάσταση στο επίπεδο 0.
2. Αξιώματα που περιγράφουν το στόχο του προβλήματος για κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο Tmax.
3. Αξιώματα αποκλεισμού εκτέλεσης δράσεων έτσι ώστε μια δράση να εφαρμόζεται κάθε φορά αποκλείοντας έτσι ταυτόχρονες εκτελέσεις δράσεων.
4. Αξιώματα προϋποθέσεων δράσεων για κάθε επίπεδο στο γράφημα δράσεων. Με τον τρόπο αυτό όταν μία δράση εκτελείται να ισχύουν οι προϋποθέσεις της στο ίδιο επίπεδο για το οποίο εκτελείται και η δράση.

5. Αξιώματα για κάθε πιθανή δράση σε κάθε χρονική στιγμή του γραφήματος απαριθμώντας τα αποτελέσματα των δράσεων.
6. Προαιρετικοί περιορισμοί του κάθε επιπέδου.

3.3 Το σύστημα προγραμματισμού δράσης LAMA

Ένα άλλο σύστημα προγραμματισμού δράσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία και το οποίο συνδυάστηκε, όσο αφορά τα παραγόμενα πλάνα με το σύστημα SMP είναι ο LAMA 2011 το οποίο αναπτύχθηκε από τη Sylvia Richter και Matthias Westphal [10]. Ο LAMA ήταν ένας από τους νικητές στον παγκόσμιο διαγωνισμό προγραμματισμού δράσης.

Η αναζήτηση που πραγματοποιείται στο σύστημα αυτό, για να καταλήξει σε ένα πλάνο που να ικανοποιεί την τελική κατάσταση βασίζεται κυρίως σε ευρετικά (heuristic state space search). Τα ευρετικά αυτά είναι η «γρήγορη αναζήτηση προς τα εμπρός» (Fast Forward) και η «γρήγορη αναζήτηση προς τα κάτω» (Fast Downward). Κύριο πλεονέκτημα τους είναι ο ταχύς ρυθμός αναζήτησης μέσα στο χώρο με διάφορες αποδοτικές μεθόδους [10]. Μετά την εύρεση κάποιου πλάνου χρησιμοποιείται επίσης και ο ευρετικός αλγόριθμος A^* , έτσι ώστε το σύστημα να συνεχίσει να αναζητά πλάνα καλύτερης ποιότητας από τα προηγούμενα μέχρι να τελειώσει ο χώρος αναζήτησης. Το κύριο όμως χαρακτηριστικό του είναι η χρήση των οροσήμων (landmarks) ως ψευδό-ευρετικά.

3.3.1 Η δομή του συστήματος LAMA

Ο LAMA αποτελείται από τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις προγραμμάτων:

1. Ο μεταφραστής (γραμμένο σε Python).
2. Τη μονάδα συλλογής γνώσης (γραμμένο σε C++).
3. Τη μηχανή αναζήτησης (γραμμένο σε C++).

Για την επίλυση ενός προβλήματος προγραμματισμού δράσης, τα τρία αυτά προγράμματα εκτελούνται με διαδοχική σειρά και επικοινωνούν μέσω αρχείων κειμένου.

Ο σκοπός του μεταφραστή είναι η μετατροπή του στιγμιότυπου ενός προβλήματος το οποίο είναι σε γλώσσα PDDL σε μία αναπαράσταση καταστάσεων με πολλαπλές τιμές παρόμοια με τη μορφή SAS⁺. Τα κύρια συστατικά του μεταφραστή είναι οι αλγόριθμοι αφαίρεσης μεταβλητών (grounding algorithm) που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συντελεστών και αξιωμάτων και οι αλγόριθμοι εξαγωγής αμετάβλητων (invariant synthesis algorithm), για τον καθορισμό ομάδων ζευγών από γεγονότα τα οποία αποτελούν μεταξύ τους αμοιβαίο αποκλεισμό [10]. Τα ζεύγη αυτά αντικαθιστώνται από πλειότιμες μεταβλητές καταστάσεων, κωδικοποιώντας με τον τρόπο αυτό ποια γεγονότα (αν υπάρχουν) από τα ζεύγη ικανοποιούνται από την δοθείσα κατάσταση του κόσμου. Τα ζεύγη αυτά επίσης εξυπηρετούν ένα σημαντικό σκοπό που είναι η σειρά προτεραιότητας μεταξύ των οροσήμων (landmarks).

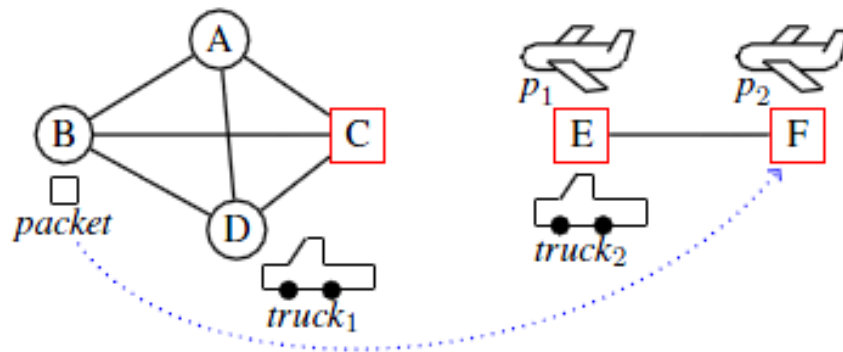
Η μονάδα συλλογής γνώσεων χρησιμοποιεί την αναπαράσταση των πλειότιμων μεταβλητών καταστάσεων που δημιουργούνται από τον μεταφραστή έτσι ώστε να σχηματίσει ένα σύνολο από δομές δεδομένων, οι οποίες παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην παραγωγή των οροσήμων. Ειδικότερα η μονάδα συλλογής γνώσεων δημιουργεί γραφήματα μετάβασης (domain transition graphs) για κάθε μεταβλητή κατάσταση αναπαριστώντας τους τρόπους από τους οποίους μπορεί να επέλθει αλλαγή στη τιμή της μεταβλητής από την εφαρμογή διαφόρων συντελεστών. Επιπλέον κατασκευάζει δομές δεδομένων για τον αποδοτικό καθορισμό του συνόλου των εφαρμόσιμων δράσεων για κάθε κατάσταση που λαμβάνει μέρος στη διαδικασία εύρεσης ενός πλάνου καθώς και για την αξιολόγηση των τιμών των μεταβλητών καταστάσεων [10].

Η μηχανή αναζήτησης χρησιμοποιώντας τις δομές δεδομένων που κατασκευάστηκαν από τη μονάδα συλλογής γνώσεων, προσπαθεί να βρει ένα ικανοποιητικό πλάνο με τη χρήση διαφόρων ευρετικών αναζητήσεων και κάποιες βελτιώσεις πάνω σε αυτές. Ο LAMA αρχικά εκτελεί ένα άπληστο αλγόριθμο που είναι αρκετά γρήγορος με σκοπό να βρει μία λύση όσο το δυνατό πιο γρήγορα. Μόλις παραχθεί το πλάνο, γίνεται αναζήτηση για καλύτερης ποιότητας πλάνα (με πιο λίγες δράσεις) πραγματοποιώντας διαδοχικές εκτελέσεις του αλγορίθμου A* με μειωμένα βάρη. Επίσης η μηχανή αναζήτησης είναι υλοποιημένη με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμοποιεί διάφορους ευρετικούς εκτιμητές (Fast

Forward heuristic, landmarks pseudo-heuristic). Η προσέγγιση αυτή λέγεται πολλαπλό-ευρετική αναζήτηση [10]. Η τεχνική αυτή προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα του ευρετικού που εκτελείται τη δεδομένη στιγμή σε διάφορα μέρη του χώρου αναζήτησης. Έτσι για το σκοπό αυτό αποθηκεύει ξεχωριστά τα αποτελέσματα του κάθε ευρετικού.

3.3.2 Τι είναι τα ορόσημα (Landmarks) και η χρησιμότητά τους στο LAMA

Τα ορόσημα (Landmarks) είναι γεγονότα τα οποία πρέπει να έχουν θετική τιμή σε κάθε παραγόμενο πλάνο του LAMA αφού χωρίς αυτά δεν μπορεί να παραχθεί ένα σύνολο δράσεων που να ικανοποιούν την τελική κατάσταση [12]. Όταν είναι γνωστά επίσης μειώνεται αισθητά ο χρόνος αναζήτησης αφού γίνονται γνωστές και οι δράσεις που πρέπει να εκτελεστούν, ενώ από την άλλη δίνεται και μια κατεύθυνση στους ευρετικούς αλγόριθμους για την παραγωγή του κάθε πλάνου.



Σχ. 4.1 Στιγμιότυπο προβλήματος προγραμματισμού δράσης

Το σχήμα 4.1 αποτελεί ένα πρόβλημα όπου ο στόχος είναι να μεταφέρουμε το πακέτο από τη τοποθεσία B στη τοποθεσία F. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος το πακέτο πρέπει να φορτωθεί στο φορτηγό 1 (truck1) και να ξεφορτωθεί στο αεροδρόμιο C έτσι ώστε να φορτωθούν στη συνέχεια σε ένα από τα αεροπλάνα p1, p2. Ως εκ τούτου τα γεγονότα (facts) «Το πακέτο μέσα στο φορτηγό 1» ,«το πακέτο στο αεροδρόμιο C» αποτελούν ορόσημα για το πρόβλημα αυτό. Επιπλέον όπως βλέπουμε μπορεί να υπάρχει και σειρά προτεραιότητας μεταξύ των οροσήμων αφού το γεγονός «Το πακέτο μέσα στο φορτηγό 1»

πρέπει να πάρει θετική τιμή πριν το γεγονός «το πακέτο στο αεροδρόμιο C» πάρει θετική τιμή.

Οι κανόνες εύρεσης των οροσήμων αρχίζουν από τους στόχους του προβλήματος οι οποίοι αποτελούν όλοι ορόσημα εξ ορισμού (πρέπει να έχουν θετική τιμή σε κάθε παραγόμενο πλάνο). Επιπλέον αν ένα γεγονός είναι ορόσημο και οι όλες δράσεις με τις οποίες επιτυγχάνεται το συγκεκριμένο ορόσημο έχουν μία ή περισσότερες κοινές προϋποθέσεις, αποτελούν και αυτές με τη σειρά τους ορόσημα. Αν οι προϋποθέσεις είναι περισσότερες από μία, το ορόσημο είναι η διάζευξη όλων των προϋποθέσεων. Το γεγονός αυτό όμως για τον καθορισμό όλως των δράσεων που αναθέτουν θετική τιμή σε ένα ορόσημο έχει πολυπλοκότητα PSPACE-hard. Για το λόγο αυτό η εύρεση των οροσήμων επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τα γραφήματα μετάβασης (domain transition graphs), τα οποία δημιουργούνται από τη μονάδα συλλογής γνώσης.

Στο σύστημα LAMA τα ορόσημα χρησιμοποιούνται σαν ψευδό-ευρετικά [10]. Η εκτίμηση της απόστασης του στόχου από την παρούσα κατάσταση υπολογίζεται από τον αριθμό των οροσήμων που πρέπει να επιτευχθούν από τη συγκεκριμένη κατάσταση και μετέπειτα. Ειδικότερα ο αριθμός αυτός υπολογίζεται αφαιρώντας τον συνολικό αριθμό οροσήμων από τον αντίστοιχο αριθμό που είναι αποδεκτά (accepted) και προσθέτοντας στο αποτέλεσμα αυτό τον αριθμό των οροσήμων που απαιτούνται και πάλι (required again). Με την έννοια «αποδεκτό ορόσημο» εννοούμε όταν ένα ορόσημο B έχει θετική τιμή στη παρούσα κατάσταση και όλα τα υπόλοιπα ορόσημα που έχουν σειρά πριν από το B, είναι αποδεκτά στην προηγούμενη κατάσταση από την οποία παράχθηκε η παρούσα κατάσταση. Ένα ορόσημο απαιτείται και πάλι αν δεν έχει θετική τιμή στη παρούσα κατάσταση και αποτελεί άμεση προϋπόθεση για κάποια άλλα που είναι μη αποδεκτά ορόσημα.

Κεφάλαιο 4

Το πρόβλημα της Προτασιακής Ικανοποιησιμότητας

4.1 Εισαγωγή	31
4.2 Τεχνικές επίλυσης προτασιακής ικανοποιησιμότητας	32
4.2.1 Δέντρο αναζήτησης	32
4.2.2 Ο αλγόριθμος Davis Putman Logemann Loveland	33
4.2.3 Ο αλγόριθμός Conflict Driven Clause Learning	34
4.3 Κύρια συστατικά του επιλυτή	35
4.3.1 Ευρετικά απόφασης	35
4.3.2 Διάδοση μοναδιαίας πρότασης	36
4.3.3 Διαγραφή	36
4.3.4 Προεπεξεργασία	37
4.3.5 Επανεκκίνηση	38
4.4 Η τεχνική της επανεκκίνησης στον Precosat	39

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής αναφορά σε μια προσέγγιση επίλυσης προβλημάτων προγραμματισμού δράσης η οποία μετατρέπει το γράφημα δράσεων σε προτάσεις (clauses) έτσι ώστε να δοθεί σαν στιγμιότυπο εισόδου σε ένα ανεξάρτητο επιλυτή (solver) για να βρει μια ανάθεση τιμών στις μεταβλητές (αν υπάρχει). Ένα σύστημα που λειτουργεί με το πιο πάνω τρόπο με αρκετά καλές επιδόσεις είναι το SatPlan.

Το πρόβλημα της προτασιακής ικανοποιησιμότητας αποτελεί θέμα εντατικής έρευνας εδώ και δεκαετίες. Τα τελευταία όμως χρόνια τα εργαλεία αυτά (SAT Solvers) γνώρισαν

μεγάλη ανάπτυξη ενώ άρχισαν να εφαρμόζονται σε πολλούς τομείς. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα να γίνεται ευρεία χρήση τους για επίλυση πρακτικών προβλημάτων καθώς και σε λογισμικά μοντέλα ελέγχου. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά των προτασιακών επιλυτών και θα περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας τους. Το στιγμιότυπο ενός προβλήματος προτασιακής ικανοποιησιμότητας αποτελείται από ένα σύνολο με δυαδικές μεταβλητές και ένα σύνολο με περιορισμούς που είναι διατυπωμένοι σε κανονική διαζευκτική μορφή (Conjunctive Normal Form). Στόχος είναι η εύρεση μιας ανάθεσης τιμών που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς ή την απόδειξη αδυναμίας εύρεσης μιας τέτοιας ανάθεσης.

4.2 Τεχνικές επίλυσης προτασιακής ικανοποιησιμότητας

Στα σύγχρονα προβλήματα ο αριθμός των μεταβλητών σε ένα πρόβλημα SAT (Satisfiability) μπορεί να είναι τεράστιος έτσι η εξαντλητική εξέταση όλων των συνδυασμών είναι εντελώς αδύνατη. Έτσι, για την βελτίωση της διαδικασίας εύρεσης μίας φόρμουλας χρησιμοποιούνται μερικές αναθέσεις (partial assignments). Οι μερικές αυτές αναθέσεις μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα δυαδικό δέντρο. Για την προσπέλαση μέσα στο δυαδικό δέντρο χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Davis Putman Logemann Loveland (DPLL) [13]. Οι σύγχρονοι επιλυτές χρησιμοποιούν μια τροποποιημένη έκδοση του DPLL που ονομάζεται Conflict Driven Clause Learning Procedure (CDCL).

4.2.1 Δέντρο αναζήτησης

Το δέντρο αναζήτησης που χρησιμοποιείται στα προβλήματα SAT είναι ένα δυαδικό δέντρο δηλ ο κάθε κόμβος έχει δύο παιδιά. Στις δύο ακμές του κόμβου σημειώνονται κάποιο όροι (literals), οι οποίοι στη αντιπροσωπεύουν την θετική και αρνητική τιμή της μεταβλητής. Επίσης ο κάθε κόμβος βρίσκεται σε κάποιο επίπεδο το οποίο υπολογίζεται από τον αριθμό των διακλαδώσεων του μονοπατιού στο συγκεκριμένο κόμβο. Το μονοπάτι από ένα κόμβο στη ρίζα αντιπροσωπεύει μια μερική ανάθεση η οποία περιέχει όλους τους όρους (literals) του μονοπατιού αυτού. Αφού ο σκοπός είναι να βρούμε μία λύση που να ικανοποιεί το πρόβλημα, ένα μονοπάτι θεωρείται «κλειστό» αν οποιαδήποτε μερική

ανάθεση περιέχει μια πρόταση (clause) που παίρνει αρνητική τιμή. Από το γεγονός αυτό προκύπτει ότι η πρόσθεση περισσότερων όρων στη μερική αυτή ανάθεση θα ήταν ανούσιο αφού δεν πρόκειται να καταλήξει σε μία τελική ανάθεση. Για το λόγο αυτό η επέκταση του μονοπατιού σταματά και γίνεται προσπάθεια για εύρεση κάποιου άλλου μονοπατιού. Από την άλλη αν μια διακλάδωση δεν μπορεί να κλείσει από οποιαδήποτε πρόταση, τότε το μονοπάτι αυτό αντιπροσωπεύει μία ικανοποιητική ανάθεση. Έτσι το δυαδικό δέντρο επεκτείνεται προσθέτοντας καινούργιους κόμβους-παιδιά στους υπάρχον κόμβους, μέχρι το μονοπάτι να περιέχει όλες τις μεταβλητές ή μέχρι όλα τα μονοπάτια να είναι κλειστά.

4.2.2 Ο αλγόριθμος Davis Putman Logemann Loveland

Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί το δέντρο αναζήτησης εφαρμόζοντας κάποιους αποδοτικούς κανόνες για να το προσπελάσει. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι αναδρομικός και έτσι μπορεί να διαχωριστεί σε διάφορους κανόνες [13]. Κατά την διαδικασία εύρεσης μιας μερικής ανάθεσης, διαγράφονται οι προτάσεις που ικανοποιούν έστω και ένα όρο, ενώ για τις εναπομείναντες διαγράφονται οι όροι που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν. Έτσι αν το μονοπάτι μιας μερικής ανάθεσης είναι «κλειστό» τότε με βάση τα πιο πάνω θα περιέχει μια ή περισσότερες άδειες προτάσεις χωρίς όρους (empty clauses), ενώ από την άλλη αν η μερική ανάθεση δεν περιέχει καθόλου προτάσεις (empty formula) τότε ικανοποιείται. Ο πρώτος κανόνας του αλγορίθμου αυτού επιστρέφει SAT δηλαδή ικανοποιείται αν η φόρμουλα δεν περιέχει καθόλου προτάσεις. Ο δεύτερος κανόνας επιστρέφει UNSAT δηλαδή δεν ικανοποιείται και προκύπτει αν η φόρμουλα περιέχει άδειες προτάσεις (empty clauses). Η άδεια πρόταση λέγεται και conflict clause. Ο επόμενος κανόνας είναι ο πιο σημαντικός του αλγορίθμου αυτού. Το κύριο πλεονέκτημα του βασίζεται στο γεγονός ότι δεν διακλαδώνεται πάντοτε αλλά πρώτα αναζητά μοναδιαίες προτάσεις δηλαδή προτάσεις με ένα όρο (unit clause) ,στους οποίους η τιμή ανάθεσης είναι μοναδική. Ο κανόνας αυτός που λέγεται και μοναδιαίος έχει ως αποτέλεσμα, πολλές φορές να αποκόπτεται μεγάλο μέρος του υπάρχον υπόδεντρου μειώνοντας παράλληλα την αναζήτηση. Έτσι με την εφαρμογή του κανόνα αυτού αποφεύγεται η προσπέλαση ενός μονοπατιού το οποίο είναι πάντοτε κλειστό. Ο επόμενος κανόνας ελέγχει στην φόρμουλα αν υπάρχουν όροι που μπορούν να εμφανίζονται μόνο με μία τιμή, είτε αυτή είναι θετική

είτε αρνητική. Τέλος ο τελευταίος κανόνας επεκτείνει τον υπάρχον κόμβο κατά ένα όρο στον οποίο δεν έχει γίνει ακόμα ανάθεση. Λέγεται και κανόνας οπισθοδρόμησης (backtracking) λόγω του ότι μπορεί να επιστρέψει στον υπάρχον κόμβο πριν την επέκταση αν δεν υπάρχει ικανοποιητική ανάθεση.

Με βάση τα πιο πάνω ο αλγόριθμος DPLL είναι:

Algorithm DPLL (F, α)

```
if  $F|\alpha$  empty then
  return SATISFIABLE
end if
if  $F|\alpha$  contains an empty clause then
  return UNSATISFIABLE
end if
if  $F|\alpha$  contains a unit clause  $[l]$  then
  return DPLL ( $F|\alpha$ )
end if
if  $F|\alpha$  contains a pure literal  $l$  then
  return DPLL ( $F|\alpha$ )
end if
if DPLL ( $F|\alpha$ ) = SATISFIABLE then
  return SATISFIABLE
else
  return DPLL ( $F|\alpha \neg l$ )
end if
```

4.2.3 Ο αλγόριθμός Conflict Driven Clause Learning

Ο αλγόριθμος αυτός είναι από τους πιο νέους που αναπτύχθηκε για προβλήματα ικανοποιησιμότητας. Αποτελεί βασικά επέκταση του αλγορίθμου DPLL. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι προσπαθεί να επωφεληθεί από την χρησιμότητα των

συγκρούσεων (conflict clauses) σε σύγκριση με την DPLL διαδικασία που απλά εκτελεί οπισθοδρόμηση όταν εμφανιστεί στη φόρμουλα μια σύγκρουση [4]. Έτσι ο CDCL όταν εμφανιστεί ένα conflict clause το αναλύει, μαθαίνει μια καινούργια πρόταση και εκτελεί άλματα προς τα πίσω (backjumping) αναιρώντας αρκετές από τις αποφάσεις που έχει πάρει. Από την αναίρεση των αποφάσεων όμως προκύπτει, όπως είναι λογικό μια αλλαγή στη σειρά των μεταβλητών στο δέντρο αναζήτησης. Για το λόγο αυτό όταν γίνεται αναίρεση αποφάσεων στον CDCL εκτελείται και μία οπισθοδρόμηση με τον ανάλογο αριθμό επιπέδων. Εκτός από τα πιο πάνω ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρουσιάζει και άλλα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τον DPLL. Ειδικότερα, τα άλματα προς τα πίσω που εκτελεί ο CDCL έχουν ως αποτέλεσμα η αναζήτηση να ξεφεύγει πιο γρήγορα από τα υπόδεντρα που δεν αποτελούν λύση ενώ οι νέες προτάσεις (learned clause) αποτρέπουν την αναζήτηση να εισέλθει ξανά σε παρόμοια υπόδεντρα που δεν αποφέρουν οποιαδήποτε λύση. Από την άλλη ο CDCL είναι πιο σύνθετος αφού δεν μπορεί να εκτελεστεί αναδρομικά με εύκολο τρόπο και επίσης χρειάζονται περισσότερες μεταβλητές για την περιγραφή της κάθε κατάστασης καθώς γίνεται η αναζήτηση στο δέντρο.

4.3 Κύρια συστατικά του επιλυτή

Μέχρι τώρα έγινε μια αναφορά σε σημαντικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για προβλήματα προτασιακής ικανοποιησιμότητας. Στην συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή κάποιων κύριων συστατικών τους τα οποία έχουν αποτελεσματική συνεισφορά στην αύξηση της απόδοσης των σημερινών επιλυτών. Τα συστατικά αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως στα σημερινά εργαλεία προτασιακής ικανοποιησιμότητας και θεωρούνται σημαντική αιτία για την ραγδαία τους ανάπτυξη. Ονομάζονται και τεχνικές “state of the art” λόγω του είναι οι πιο ψηλού επιπέδου τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν μέχρι σήμερα.

4.3.1 Ευρετικά απόφασης

Τα ευρετικά απόφασης αποτελούν ένα σημαντικό συστατικό για τους επιλυτές αφού αποφασίζουν σε ποιο κομμάτι του δέντρου θα συνεχίσει η αναζήτηση για το επόμενο βήμα. Πιο συγκεκριμένα όταν δεν μπορεί να εφαρμοστεί ένας κανόνας σύμφωνα με την μέθοδο

DPLL εκτελείται το ευρετικό παίρνοντας δύο αποφάσεις. Η πρώτη αφορά την επιλογή της επόμενης μεταβλητής στην οποία θα γίνει ανάθεση. Το πιο διαδεδομένο ευρετικό που χρησιμοποιείται για την απόφαση αυτή είναι το VSIDS [11]. Σύμφωνα με αυτό, κάθε μεταβλητή σχετίζεται με ένα βαθμό συμμετοχής ο οποίος υποδηλώνει πόσο συχνά η μεταβλητή αυτή έχει συμμετάσχει σε σύγκρουση (conflict). Όσο πιο συχνά έχει εμπλακεί η εν λόγω μεταβλητή (με βάση ένα χρονικό παράθυρο) τόσο πιο μεγάλος είναι ο βαθμός συμμετοχής της και έτσι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγεί. Η δεύτερη απόφαση αφορά την τιμή (θετική ή αρνητική) που θα ανατεθεί στην μεταβλητή η οποία επιλέγηκε βάση της προηγούμενης απόφασης. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις όσο αφορά το ευρετικό αυτό. Μία από αυτές είναι ο ρυθμός εμφάνισης των θετικών και αρνητικών όρων στην φόρμουλα ή ακόμα και η τιμή της τελευταίας ανάθεσης μεταβλητής. Τέλος η ανάθεση μπορεί να είναι τυχαία.

4.3.2 Διάδοση μοναδιαίας πρότασης

Η τεχνική αυτή (unit propagation) είναι υπεύθυνη για την εύρεση όλων των μοναδιαίων προτάσεων (unit clauses) για την τρέχουσα μερική ανάθεση καθώς και για την διάδοση των αντίστοιχων μοναδιαίων όρων στη συγκεκριμένη μερική ανάθεση. Επιπλέον η διάδοση μοναδιαίας πρότασης δηλώνει πότε μία μερική ανάθεση είναι ασυνεπής δηλαδή περιέχει άδεια πρόταση (unit clause). Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η άδεια πρόταση να επιστρέφεται για ανάλυση έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια καινούργια πρόταση (learned clause) και η διαδικασία της μετάδοσης να σταματά. Σε αντίθετη περίπτωση η μετάδοση συνεχίζεται μέχρι ενός καθοριστικού σημείου (fix point) όπου δεν υπάρχουν άλλες μοναδιαίες προτάσεις. Το περισσότερο ποσοστό του χρόνου εκτέλεσης των επιλυτών ξοδεύεται σε αυτή την τεχνική [6].

4.3.3 Διαγραφή

Η ανάλυση μιας σύγκρουσης και η παραγόμενη πρόταση που προκύπτει αυξάνει σημαντικά την απόδοση του αλγορίθμου DPLL [13]. Από την άλλη το μέγεθος του συνόλου των προτάσεων θα πρέπει να προσπελάζεται με ευκολία, δηλαδή να μην έχει τεράστιο μέγεθος γιατί θα υπάρχουν αρνητικές συνέπειες όσο αφορά το χρόνο εκτέλεσης

της διάδοσης μοναδιαίας πρότασης, που όπως προαναφέρθηκε είναι η πιο χρονοβόρα τεχνική. Για το λόγο αυτό το σύνολο των προτάσεων διαχωρίζεται σε δύο υποσύνολα. Το πρώτο υποσύνολο αποτελείται από τις προτάσεις της αρχικής φόρμουλας και το δεύτερο από τις νέες προτάσεις που προκύπτουν από την ανάλυση των συγκρούσεων. Οι νέοι επιλυτές χρησιμοποιούν τη τεχνική της διαγραφής (removal) προτάσεων από το δεύτερο σύνολο για να διατηρούν την ψηλή απόδοση της διαδικασίας μετάδοσης. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται με διάφορα ευρετικά. Από την άλλη ο CDCL αλγόριθμος χρειάζεται να θυμάται όλες τις νέες προτάσεις που προκύπτουν από τις συγκρούσεις αφού σε αντίθετη περίπτωση θα τον οδηγήσει σε μονοπάτια αναζήτησης στα οποία βρισκόταν και προηγουμένως και θεωρούνταν κλειστά. Έτσι η τεχνική της διαγραφής είναι προγραμματισμένη κατά τακτά χρονικά διαστήματα.

4.3.4 Προεπεξεργασία

Θεωρητικά η χρονική πολυπλοκότητα του προβλήματος προτασιακής ικανοποιησιμότητας είναι $O(2^n)$ δηλαδή ο χρόνος εκτέλεσης εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των μεταβλητών και όχι από τον αριθμό των προτάσεων. Έτσι μειώνοντας τον αριθμό των μεταβλητών η αναζήτηση θα γίνει πιο γρήγορη. Πρακτικά όμως αυτό δεν συμβαίνει πάντα. Ο αριθμός αυτός δεν σχετίζεται με το χρόνο εκτέλεσης αφού ενδεχόμενη μείωση του θα προκαλέσει αύξηση στον αριθμό των προτάσεων με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του επιλυτή λόγω του ότι θα υπάρχουν περισσότερες συγκρούσεις, άλματα προς τα πίσω (backjumping) διάδοση κ.α. Έτσι η προεπεξεργασία (preprocessing) βοηθά στη μείωση του μεγέθους της φόρμουλας αφαιρώντας μεταβλητές και προτάσεις που δεν είναι απαραίτητες για την εύρεση ενός μοντέλου για την φόρμουλα. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές εφαρμογής της προεπεξεργασίας οι οποίες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη αφορά στη διατήρηση του μοντέλου (model preserving) και η δεύτερη στη μη διατήρηση (non-model preserving).

4.3.5 Επανεκκίνηση

Με τον όρο επανεκκίνηση (restart) σε αυτού του είδους το πρόβλημα εννοούμε να σταματήσουμε την αναζήτηση διαγράφοντας παράλληλα όλες τις τιμές της τρέχουσας μερικής ανάθεσης. Η αιτία μιας επανεκκίνησης οφείλεται στο ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου η αναζήτηση “κολλά” σε κάποιες σύνθετες διακλαδώσεις και ο μόνος τρόπος να ξεφύγει από αυτές είναι να ξαναρχίσει την αναζήτηση αφού με τα άλματα προς τα πίσω δεν θα έχει ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Επίσης ο ντετερμινιστικός αλγόριθμος DPLL που χρησιμοποιείται, χαρακτηρίζεται από μια heavy-tail συμπεριφορά. Υπάρχουν δηλαδή στιγμιότυπα τα οποία αν και είναι εύκολο να ικανοποιηθούν (ή να απαντήσει όχι) εν τούτοις ο χώρος αναζήτησης μπορεί να γίνει πολύπλοκός με αποτέλεσμα να χάνεται μέσα σε αυτόν. Ακόμα υπάρχουν στιγμιότυπα τα οποία είναι παρόμοια μεταξύ τους αλλά σημειώνουν μεγάλες διαφορές ως προς το χρόνο εκτέλεσης τους και έτσι η επανεκκίνηση αποτελεί μια καλή λύση στην βελτίωση του χρόνου αυτού. Με την πραγματοποίηση μίας επανεκκίνησης η αναζήτηση ξεκινά και πάλι από την ρίζα του δέντρου και μπορεί να γίνει οποιαδήποτε επιλογή μεταβλητής. Έτσι η πιθανότητα να εξεταστεί ένα διαφορετικό μονοπάτι από προηγούμενως είναι πολύ μεγάλη.

Οι πιο σημαντικές κατηγορίες επανεκκίνησης είναι:

1. Στατική: Η επανεκκίνηση συμβαίνει μετά από κάποιο αριθμό βημάτων συνήθως τον αριθμό των συγκρούσεων. Υπάρχουν τρεις σημαντικοί τρόποι που χρησιμοποιούνται στην κατηγορία αυτή:
 - I. Γεωμετρική επανεκκίνηση: Υπάρχει ένα κατώφλι και κάθε φορά που ο αριθμός των συγκρούσεων ξεπερνά το κατώφλι γίνεται επανεκκίνηση και η νέα τιμή του κατωφλίου ισούται με το γινόμενο της προηγούμενης τιμής επί ένα σταθερό παράγοντα.
 - II. Βασιζόμενη στην ακολουθία luby: Η τιμή του κατωφλίου ακολουθεί την ακολουθία luby που είναι 1 2 1 1 2 4 1 1 2 4 8 1 1 2... πολλαπλασιαζόμενο με ένα σταθερό παράγοντα. Όταν υπάρχει επανεκκίνηση η προηγούμενη τιμή του κατωφλίου προστίθεται πάνω στη νέα τιμή.

III. Φωλιασμένη επανεκκίνηση: Υπάρχουν δύο κατώφλια ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό με μια αρχική τιμή. Όταν ο αριθμός των συγκρούσεων ξεπεράσει τη τιμή του εσωτερικού κατωφλίου τότε γίνεται επανεκκίνηση και η νέα τιμή του εσωτερικού κατωφλίου αυξάνεται κατά ένα ποσοστό πχ 10%. Όταν όμως η τιμή του εσωτερικού κατωφλίου ισούται με την αντίστοιχη του εξωτερικού, τότε το εσωτερικό παίρνει τιμή ίση με την αρχική ενώ το εξωτερικό αυξάνεται κατά ένα σταθερό ποσοστό.

2. Δυναμική: Η επανεκκίνηση δεν λαμβάνει υπόψη μόνο τον αριθμό των conflicts αλλά και άλλους παράγοντες. Έτσι η συχνότητα των επανεκκινήσεων δεν είναι σταθερή όπως γίνεται με τις στατικές μεθόδους. Ο βασικότερος τρόπος επανεκκίνησης που χρησιμοποιείται στη κατηγορία αυτή είναι η «επανεκκίνηση ανάλογα με το ποσοστό ευκινησίας» [14]. Η συχνότητα της επανεκκίνησης εξαρτάται από τη μέτρηση της ευκινησίας (agility) η οποία βασίζεται στη συχνότητα των διαφορετικών αναθέσεων (flipped assignments) δηλαδή τις μεταβλητές των οποίων γίνεται ανάθεση και η ανάθεση αυτή είναι διαφορετική από την προηγούμενη. Όταν η συχνότητα των διαφορετικών αναθέσεων είναι μικρή τότε ο αλγόριθμος δεν κινείται γρήγορα (χαμηλή ευκινησία) και έτσι γίνεται επανεκκίνηση ενώ από την άλλη όταν είναι μεγάλη, (υψηλή ευκινησία) τότε δεν υπάρχει λόγος να γίνει η επανεκκίνηση [14]. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει ένα κατώφλι που όταν το ποσοστό ευκινησίας το ξεπεράσει δεν γίνεται επανεκκίνηση.

4.4 Η τεχνική της επανεκκίνησης στον Precosat

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας πραγματοποιήθηκε μία μελέτη της επανεκκίνησης σε ένα εργαλείο επίλυσης προτασιακής ικανοποιησιμότητας τον precosat και την έκδοση 570. Η τεχνική που χρησιμοποιείται στον συγκεκριμένο επιλυτή ανήκει στην δυναμική κατηγορία των επανεκκινήσεων, δηλ εκτός από τον αριθμό των συγκρούσεων λαμβάνεται υπόψη και την ευστροφία (agility). Συγκεκριμένα η απόφαση για επανεκκίνηση στον precosat εξαρτάται από τον έλεγχο τριών παραγόντων. Για να μπορεί ο δεύτερος παράγοντας να δώσει θετική απάντηση θα πρέπει να απαντήσει θετικά ο πρώτος,

ενώ στη περίπτωση του τρίτου θα πρέπει να απαντήσουν και οι δύο θετικά. Η τελική απόφαση για το αν θα γίνει επανεκκίνηση εξαρτάται από την απάντηση του τρίτου. Ειδικότερα ο πρώτος παράγοντας ελέγχει αν το επίπεδο απόφασης (decision level) το οποίο αυξάνεται κάθε φορά που παίρνεται μια απόφαση (με τη χρήση ευρετικών) για ανάθεση τιμών σε κάποιες μεταβλητές είναι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι (restartminlevel), το οποίο στον precosat ισούται με 10. Εφόσον ο πρώτος παράγοντας απαντήσει θετικά ο δεύτερος παράγοντας ελέγχει αν ο αριθμός των συγκρούσεων είναι μεγαλύτερος από ένα όριο το οποίο αυξάνεται κάθε φορά που γίνεται επανεκκίνηση. Αν ο αριθμός αυτός των συγκρούσεων είναι όντως μεγαλύτερος από το όριο τότε ο τρίτος ελέγχει το agility που όπως προαναφέρθηκε είναι το ποσοστό των διαφορετικών αναθέσεων (flipped assignments). Έτσι για να γίνει επανεκκίνηση θα πρέπει το ποσοστό αυτό να μην ξεπεράσει το δικό του κατώφλι που στην προκειμένη περίπτωση ισούται με 2500000.

Όταν σημειώνεται επανεκκίνηση η αύξηση της τιμής του κατωφλίου η οποία ελέγχεται κάθε φορά με τον αριθμό των conflicts (έλεγχος 2^{ου} παράγοντα), υλοποιείται με δύο τρόπους στον precosat. Στο πρώτο τρόπο υπολογίζεται μια διαφορά (δέλτα) η οποία βασίζεται στην ακολουθία luby πολλαπλασιαζόμενη με ένα σταθερό παράγοντα (restartint) που ισούται με 10. Το νέο κατώφλι ισούται με την πρόσθεση του αριθμού των conflicts και του δέλτα. Ο δεύτερος τρόπος βασίζεται στην φωλιασμένη επανεκκίνηση. Η διαφορά (δέλτα) ισούται με το νέο αυξανόμενο εσωτερικό κατώφλι (restartinner) ή με την αρχική τιμή όταν το εσωτερικό κατώφλι ισούται με το εξωτερικό (restartouter) ενώ και πάλι το νέο κατώφλι ισούται με την πρόσθεση του δέλτα και του αριθμού των συγκρούσεων. Στον precosat οι αρχικές τιμές του εσωτερικού και εξωτερικού κατωφλίου ισούνται με 10 και κάθε φορά αυξάνονται κατά 10%. Η ανανέωση της τιμής του κατωφλίου με τους δύο τρόπους που προαναφέρθηκαν συμβαίνει κάθε φορά όταν ο έλεγχος του δεύτερου παράγοντα επιστρέψει θετική απάντηση, έστω και αν ο τρίτος παράγοντας αποφασίσει πως δεν θα γίνει επανεκκίνηση. Αυτό είναι λογικό αφού κάθε φορά που ο αριθμός των συγκρούσεων φθάνει το κατώφλι θα πρέπει να αυξάνεται.

Κεφάλαιο 5

Συνδυασμός ευρετικής και προτασιακής αναζήτησης για προβλήματα προγραμματισμού δράσης

5.1 Σημασία προβλημάτων προγραμματισμού δράσης	41
5.2 Γνωστά προβλήματα προγραμματισμού δράσης	43
5.3 Προσαρμογή της λειτουργίας του συστήματος προγραμματισμού δράσης SatPlan με βάση την έξοδο του LAMA	46
5.3.1 Εκτέλεση SatPlan με βάση εγκλεισμό δράσεων	47
5.3.2 Εκτέλεση SatPlan με βάση αποκλεισμό δράσεων	49
5.3.3 Ενοποίηση όλων των παραγόμενων πλάνων του LAMA	51
5.3.4 Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων	52
5.3.5 Ενοποίηση των δύο συστημάτων σε ένα νέο σύστημα	53

5.1 Σημασία προβλημάτων προγραμματισμού δράσης

Η εύρεση των κατάλληλων δράσεων για ένα πρόβλημα προγραμματισμού δράσης είναι σημαντικό πρόβλημα της τεχνητής νοημοσύνης. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας τόσο σε υλικό όσο και σε λογισμικό, καθώς επίσης και οι αυξανόμενες απαιτήσεις στο χώρο εργασίας του ανθρώπου καθιστούν την αποδοτική και αποτελεσματική επίλυση τέτοιων προβλημάτων επιτακτική ανάγκη.

Πριν κάποια χρόνια σκοπός για ένα οποιοδήποτε πρόβλημα, ήταν ουσιαστικά η εύρεση μιας σχετικά ικανοποιητικής λύσης, χωρίς να δίνεται μεγάλη έμφαση στο κόστος που θα είχε αυτή η λύση. Οι έρευνες όμως που γίνονται τις τελευταίες δεκαετίες, έδωσαν ώθηση

ώστε να λαμβάνεται υπόψη ο μηχανισμός με τον οποίο ένα εργαλείο επίλυσης οδηγεί στη λύση συγκεκριμένου προβλήματος. Με απλά λόγια δε μας ενδιαφέρει να βρούμε απλά μια λύση αλλά να βρούμε τη βέλτιστη σε χρόνο και κόστος. Θέλουμε να αποφύγουμε στις λύσεις μας τους οποιουσδήποτε πλεονασμούς, οι οποίοι οδηγούν σε άσκοπη σπατάλη των διαθέσιμων πόρων του συστήματός μας. Χρειάζεται συγκεκριμένη μεθοδολογία και μηχανισμοί, οι οποίοι θα εξασφαλίζουν μια αποδοτική και αποτελεσματική σειρά από δράσεις που θα οδηγούν στην τελική λύση του προβλήματος.

Τα προβλήματα με τα οποία έχει να διαπραγματευτεί ο άνθρωπος έχουν ως κρίσιμες παραμέτρους το χρόνο και το κόστος (μνήμη, επεξεργαστές). Είναι προβλήματα με αρκετά μεγάλη πολυπλοκότητα, τα οποία απαιτούν μεγάλο ποσοστό από τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος. Το να καταφέρεις για παράδειγμα να επιλύσεις ένα πρόβλημα σε 5 ώρες το οποίο χρειαζόταν 8-10 ώρες να επιλυθεί, αποκτά προφανώς μεγάλη σημασία. Πόσο μάλλον όταν το χρονικό πλαίσιο των προβλημάτων αυτών διεκπεραιώνεται όχι μόνο μέσα σε ώρες αλλά και σε ημέρες ή ακόμα και μήνες. Έτσι, σε προβλήματα που έχουν μεγάλο όγκο δεδομένων να επεξεργαστούν και συνδυασμούς περιπτώσεων, έχει μεγάλη απήχηση η εύρεση μιας ακολουθίας από ενέργειες - δράσεις τέτοιας ώστε η εφαρμογή της να οδηγεί στο στόχο του προβλήματος βελτιώνοντας ασφαλώς τις κρίσιμες παραμέτρους που αναφέραμε (χρόνος, κόστος).

Τα πιο πάνω αποτέλεσαν τη σημαντικότερη αιτία ώστε να πραγματοποιηθούν πολλές έρευνες τη προηγούμενη δεκαετία με κύριο άξονα τους παράγοντες του χρόνου και του κόστους. Όλα αυτά είχαν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία νέων συστημάτων τα οποία ήταν ικανά να δεχθούν στιγμιότυπα εισόδου μεγάλης πολυπλοκότητας σε σύγκριση με τα προηγούμενα συστήματα της δεκαετίας του 90. Η τεράστια αυτή ανάπτυξη έγινε κατορθωτή κυρίως από τρεις νέες προσεγγίσεις για την παραγωγή των πλάνων τα οποία αναλύθηκαν εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Αυτά είναι το γράφημα δράσεων, η προτασιακή ικανοποιησιμότητα και η ευρετική αναζήτηση στο χώρο.

5.2 Γνωστά προβλήματα προγραμματισμού δράσης

Όπως προαναφέρθηκε η μεγάλη ανάπτυξη του προγραμματισμού δράσης τα τελευταία χρόνια είχε σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή του σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας για λήψη σημαντικών αποφάσεων. Συγκεκριμένα έχουν τη δυνατότητα να επιλυθούν θέματα αποθήκευσης, μεταφορών με φορτηγά, διαβάσεις, χρονοπρογραμματισμού με αποδοτικό τρόπο όπου το ανθρώπινο μυαλό φαντάζει δύσκολο να τα επιλύσει λόγω των πολλών περιπτώσεων που προκύπτουν. Ειδικότερα οι κατηγορίες των προβλημάτων αφορούν τη περιγραφή του κόσμου με τις επιτρεπόμενες για εκτέλεση δράσεις μαζί με τις προϋποθέσεις της κάθε μίας τα οποία όλα μαζί κωδικοποιούνται με την γλώσσα STRIPS για να δεχθεί σαν είσοδο το σύστημα. Ακολουθεί μια περιγραφή των χαρακτηριστικών προβλημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται σε διαγωνισμούς προγραμματισμού δράσης και τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για πειραματικές μετρήσεις και εξαγωγή συμπερασμάτων.

1. Προβλήματα μεταφοράς (transport)

Στη κατηγορία αυτή των προβλημάτων υπάρχουν διάφορες πόλεις, η κάθε μία η οποία διαθέτει πολλές τοποθεσίες όπως αεροδρόμια. Στις πόλεις αυτές υπάρχουν επίσης φορτηγά τα οποία μπορούν να κινηθούν μόνο μέσα στη συγκεκριμένη πόλη που βρίσκονται, καθώς και αεροπλάνα τα οποία χρησιμοποιούνται για να πετάξουν από το ένα αεροδρόμιο στο άλλο. Η αρχική κατάσταση στα προβλήματα αυτά αποτελείται από διάφορα προϊόντα τα οποία βρίσκονται σε μια αρχική τοποθεσία μια πόλης. Ο σκοπός είναι η μεταφορά των προϊόντων από την αρχική τοποθεσία σε ένα άλλο προσδιορισμένο προορισμό που μπορεί να βρίσκεται και σε άλλη πόλη. Η δυσκολία έγκειται στους περιορισμούς του προβλήματος όπως για παράδειγμα το ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθούν όλες οι πτήσεις μεταξύ των αεροδρομίων ενώ μπορεί να υπάρχει και περιορισμός στον αριθμό των πακέτων που μεταφέρονται μέσα στα φορτηγά και στα αεροπλάνα.

2. Προβλήματα Driver log

Τα προβλήματα μεταφοράς περιλαμβάνουν ένα σύνολο από φορτηγά τα οποία κινούνται μέσα στους δρόμους που ενώνουν τις διάφορες τοποθεσίες της συγκεκριμένης πόλης. Κάθε πακέτο μπορεί να παραληφθεί ή να παραδοθεί στη τρέχουσα τοποθεσία. Η κατηγορία Driverlog διευρύνει τα προβλήματα αυτά με την πρόσθεση οδηγών, οι οποίοι έχουν ο κάθε ένας το δικό του δρομολόγιο για την μετακίνηση τους από τη μία τοποθεσία στην άλλη. Τα φορτηγά στη κατηγορία αυτή κινούνται μόνο όταν υπάρχει ένας οδηγός γι' αυτά ενώ η κατάσταση-στόχος περιλαμβάνει εκτός από τη τοποθεσία και ένα σύνολο από οδηγούς και φορτηγά. Έτσι με τον τρόπο αυτό, απομακρύνεται από το παραδοσιακό μοντέλο της παράδοσης/παραλαβής. Στα προβλήματα αυτά τέλος υπάρχουν περισσότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν για την μεταφορά των πακέτων όπως επιπρόσθετους στόχους και ζευγάρια φορτηγού-οδηγού.

3. Προβλήματα Freecell

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ένα παιχνίδι πασιέντζας όπου η αρχική κατάσταση της τράπουλα είναι σε μη διατεταγμένη σειρά (τυχαία) και θα πρέπει να οργανωθεί σε μία ταξινομημένη σειρά. Η μεγάλη δυσκολία του παιχνιδιού αυτού βρίσκεται στο γεγονός ότι υπάρχει όριο για το διαθέσιμο χώρο μετακίνησης καρτών της τράπουλας όπως επίσης και διάφορους άλλους περιορισμούς που αφορούν ποιες κάρτες θα τοποθετηθούν πάνω από ποιες άλλες. Οι κάρτες ακόμα μπορούν να μετακινηθούν σε ένα περιορισμένο αριθμό από κελιά στα οποία μόνο μια κάρτα θα βρίσκεται κάθε φορά μέσα.

4. Προβλήματα δορυφόρων (Satellite)

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει διάφορα στοιχεία που καταγράφουν οι δορυφόροι στο διάστημα και τα οποία πρέπει να χρονοπρογραμματιστούν. Ειδικότερα τα προβλήματα αυτά αφορούν τη συλλογή και αποθήκευση πληροφοριών από δορυφόρους οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικά μέσα για να παρατηρήσουν την επιλογή του στόχου.

5. Προβλήματα αποθήκευσης (Storage)

Τα προβλήματα προγραμματισμού δράσης Storage, σχετίζονται με τη μετακίνηση και αποθήκευση πακέτων που περιέχουν αγαθά, μέσω των ανελκυστήρων από τα εμπορευματοκιβώτια στις αποθήκες σύμφωνα με κάποιους χάρτες. Συγκεκριμένα μέσα σε μια αποθήκη, κάθε ανελκυστήρας μπορεί να κινηθεί σύμφωνα με ένα δεδομένο χωρικό χάρτη που συνδέει τις διαφορετικές περιοχές της αποθήκης. Η διερεύνηση αυτού του προβλήματος γίνεται με βάση διαφορετικούς αριθμούς αποθηκών, ανελκυστήρων, πακέτων, εμπορευματοκιβωτίων, και περιοχών αποθηκών [15]. Για κάθε πρόβλημα, δίνουμε ως είσοδο το χωρικό χάρτη των περιοχών των αποθηκών. Το ζητούμενο για κάθε περιοχή όπως είναι αναμενόμενο είναι να παραχθεί ένα σχέδιο καλής ποιότητας, ωστόσο σε κάποια προβλήματα είναι δύσκολη απλά και μόνο η προσπάθεια να εξαχθεί η οποιαδήποτε λύση.

6. Προβλήματα βιολογικών μονοπατιών (Pathways)

Σκοπός στα προβλήματα προγραμματισμού δράσης Pathways είναι να βρεθεί μια ακολουθία - μονοπάτι βιοχημικών αντιδράσεων σε έναν οργανισμό που παράγει ορισμένες ουσίες. Τα προβλήματα έχουν τη βάση τους στη μοριακή βιολογία. Ένα μονοπάτι είναι μια ακολουθία χημικών αντιδράσεων σε έναν βιολογικό οργανισμό. Αυτά τα μονοπάτια περιγράφουν τους μηχανισμούς που εξηγούν πώς τα κύτταρα πραγματοποιούν σημαντικές από τις λειτουργίες τους με τη βοήθεια των μορίων και των αντιδράσεων που παράγουν τις φυσιολογικές αλλαγές. Ατέλειες στα μονοπάτια μπορούν να εξηγήσουν πολλές από τις ασθένειες. Περαιτέρω έρευνες περιλαμβάνουν συχνά την εύρεση των φαρμάκων τα οποία διορθώνουν τις ατέλειες αυτές στα μονοπάτια [15].

7. Προβλήματα διαστημικών οχημάτων (Rovers)

Τα προβλήματα προγραμματισμού δράσης Rovers σχετίζονται με οχήματα τα οποία μεταβαίνουν σε κάποιον πλανήτη. Εκεί περιπλανώνται με σκοπό τη συλλογή στοιχείων και

την αποστολή δειγμάτων στη γη. Στα οχήματα αυτά δεν μπαίνουν άνθρωποι για να τα καθοδηγούν [15].

5.3 Προσαρμογή της λειτουργίας του συστήματος προγραμματισμού δράσης SatPlan με βάση την έξοδο του LAMA

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε να γίνει ένας συνδυασμός δύο διαφορετικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται στην επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις είναι η ευρετική αναζήτηση και η προσαρμογή σε πρόβλημα ικανοποιησιμότητας προτασιακής λογικής. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση δύο συστημάτων προγραμματισμού δράσης που αντιπροσωπεύουν τη κάθε κατηγορία. Για την ευρετική αναζήτηση χρησιμοποιήθηκε το σύστημα LAMA ενώ για την κατηγορία της ικανοποιησιμότητας προτασιακής λογικής χρησιμοποιήθηκε το σύστημα SatPlan-2006 με την κωδικοποίηση SMP [16].

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια ο SatPlan υπολογίζει τις λύσεις με βάση το μικρότερο παράλληλο μήκος. Αρχικά κατασκευάζει το γράφημα δράσεων μέχρι ένα συγκεκριμένο επίπεδο και ακολούθως κωδικοποιεί την κατάσταση που βρίσκεται μαζί με τους περιορισμούς του προβλήματος σε μια συζευκτική κανονική μορφή (cnf) έτσι ώστε να το δώσει σαν στιγμιότυπο εισόδου σε ένα ανεξάρτητο προτασιακό επιλυτή. Ο ρόλος του επιλυτή είναι να εξετάσει αν είναι δυνατό να ικανοποιηθούν όλες οι προτάσεις και αν ναι να βρει μια τέτοια ανάθεση στις μεταβλητές. Ο LAMA από την άλλη υπολογίζει μία λύση αρχικά όσο το δυνατό πιο γρήγορα με τη χρήση ενός αποδοτικού αλγορίθμου και στη συνέχεια γίνεται αναζήτηση για μικρότερου μήκους πλάνα πραγματοποιώντας διαδοχικές εκτελέσεις του A^* με μειωμένα βάρη.

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους μπορεί κανείς να συνδυάσει τα δύο αυτά συστήματα. Ο ένας τρόπος αφορά την προσαρμογή της λειτουργίας του ευρετικού συστήματος LAMA με βάση το παραγόμενο πλάνο του SatPlan. Συνεπώς η παραγόμενη έξοδος του SatPlan μετατρέπεται σε είσοδο για τον LAMA και έτσι σε κάθε ενδιάμεση κατάσταση που δημιουργεί θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις δράσεις του SatPlan. Ο

δεύτερος τρόπος αποτελεί την αντίθετη μεθοδολογία από αυτή που περιγράφηκε πιο πάνω. Ο SatPlan δηλαδή δέχεται σαν επιπλέον είσοδο το παραγόμενο πλάνο του LAMA, οι δράσεις του οποίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε επίπεδο του γραφήματος δράσεων. Έτσι με τον τρόπο αυτό θα αλλάξει και το αρχείο σε κανονική συζευκτική μορφή που θα δεχθεί ο ανεξάρτητος προτασιακός επιλυτής και συνεπώς και η λύση.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μεθοδολογία, δηλαδή γίνεται προσαρμογή της λειτουργίας του SatPlan με βάση την έξοδο του LAMA. Ο κύριος λόγος της επιλογής της μεθοδολογίας αυτής είναι επειδή το SatPlan όσο αφορά απόδοση είναι συγκριτικά καλύτερο από το LAMA και έτσι θα έδινε περισσότερα κίνητρα και ενδιαφέρον η έρευνα του συστήματος SatPlan αντί του LAMA. Τέλος είναι γνωστό ότι ο SatPlan παράγει το καλύτερο πλάνο με βάση τις επιτρεπόμενες δράσεις που έχει στη διάθεση του. Έτσι είναι πιο χρήσιμη η εξαγωγή συμπερασμάτων αν γίνει επεξεργασία στο σύστημα του SatPlan.

5.3.1 Εκτέλεση SatPlan με βάση εγκλεισμό δράσεων

Η πρώτη τεχνική που εφαρμόστηκε για την προσαρμογή της λειτουργίας του συστήματος SatPlan με βάση την έξοδο του LAMA αφορά τις κοινές τους δράσεις. Δηλαδή για ένα οποιοδήποτε πλάνο παράγει το ευρετικό σύστημα γίνεται ένας έλεγχος της κάθε δράσης με τις αντίστοιχες του SatPlan για τη κάθε χρονική στιγμή του γράφου (επίπεδο). Αν μία από αυτές τις δράσεις αποτελεί μέρος της λύσης του LAMA, αλλά υπάρχει και σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο του SatPlan σχηματίζεται μία επιπλέον πρόταση (clause) με σκοπό να προστεθεί στο αρχείο που παίρνει σαν είσοδο ο επιλυτής. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του γραφήματος δράσεων είναι οι επίμονες δράσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν τους όρους που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενα επίπεδα με σκοπό την διατήρηση της κατάστασης τους. Συνεπώς μια δράση πιθανόν να εμφανίζεται σε πολλά επίπεδα. Έτσι αν η συγκεκριμένη δράση είναι κοινή και στα δύο συστήματα τότε η νέα πρόταση που θα δημιουργηθεί θα περιέχει τόσο τους όρους, όσους και ο αριθμός εμφανίσεων της μέχρι τη χρονική στιγμή που εξετάζεται.

Η τεχνική αυτή μπορεί να αλλάζει το περιεχόμενο του αρχείου που δέχεται σαν είσοδο ο επιλυτής, αφού προσθέτει νέες προτάσεις αλλά το γεγονός αυτό δεν προκαλεί αλλαγές στον ορισμό του αρχικού προβλήματος που έχει να επιλύσει ο SatPlan. Αυτό γίνεται γιατί το σύνολο των επιπλέον δράσεων που πρέπει να λαμβάνει υπόψη ο SatPlan σε κάθε επίπεδο αποτελούν σίγουρα λύση για το ίδιο πρόβλημα που θα επιλύσει ο ίδιος και όχι κάποιες άγνωστες δράσεις που θα του δώσουν εντελώς διαφορετική κατεύθυνση. Ο βασικός σκοπός που επιτελεί η τεχνική αυτή είναι στην ουσία να «υποχρεώνει» το SatPlan να περιέχει μέσα στη λύση τις δράσεις που είναι κοινές και στα δύο συστήματα αφού οι νέες προτάσεις που δημιουργούνται, θα πρέπει ο επιλυτής να ικανοποιήσει ένα όρο από τη κάθε μία που όλες μαζί αποτελούν τις κοινές τους δράσεις. Το πλάνο που παράγει ο SatPlan μπορεί να περιέχει εκτός από τις κοινές δράσεις και κάποιες άλλες τις οποίες εντόπισε ο ίδιος. Το γεγονός αυτό όμως δεν αποτελεί κανόνα ότι η νέα λύση θα είναι μεγαλύτερου μήκους από την προκαθορισμένη αφού ο SatPlan έχει την δυνατότητα να εκτελεί κάποιες δράσεις παράλληλα.

Η τεχνική αυτή μπορούσε να υλοποιηθεί κατά την διαδικασία διαμόρφωσης του γραφήματος δράσεων. Έτσι για κάθε νέο επίπεδο θα γινόταν ένας έλεγχος αν υπάρχουν κοινές δράσεις μεταξύ των δύο συστημάτων. Ο τρόπος αυτός όμως είναι πιθανόν να αυξήσει την πολυπλοκότητα του συστήματος και έτσι ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση. Μετά τη δημιουργία του κάθε επιπέδου ο SatPlan δημιουργεί ένα αρχείο (χρησιμοποιώντας τη παράμετρο -V) όπου μέσα υπάρχουν όλες οι δράσεις, το επίπεδο στο οποίο βρίσκονται καθώς και η μεταβλητή που θα τις αντιπροσωπεύει στον επιλυτή. Έτσι αφού όλες οι απαραίτητες πληροφορίες υπήρχαν σε ένα αρχείο η εύρεση των κοινών δράσεων γινόταν μέσα από αυτό ενώ στο τέλος γινόταν συμπλήρωση του αρχείου cnf με βάση τα αποτελέσματα της σύγκρισης. Για την χρησιμοποίηση της τεχνικής αυτής προστέθηκε ακόμα μία παράμετρος στον SatPlan με το όνομα “-lama” και μετά το αρχείο εξόδου του LAMA.

5.3.2 Εκτέλεση SatPlan με βάση αποκλεισμό δράσεων

Η τεχνική αυτή αποτελεί το δεύτερο τρόπο προσαρμογής της λειτουργίας του συστήματος SatPlan με βάση την έξοδο του LAMA. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι αντίθετη σε σύγκριση με την πρώτη τεχνική. Ειδικότερα για κάθε νέο επίπεδο που σχηματίζεται στο γράφημα δράσεων του SatPlan γίνεται ένας έλεγχος αν οι δράσεις αυτές υπάρχουν και σε ένα συγκεκριμένο πλάνο που παρήγαγε ο LAMA. Για το σύνολο των δράσεων που δεν εμφανίζονται στην έξοδο του ευρετικού συστήματος, δημιουργείται ο ανάλογος αριθμός από αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις (unit clause) για να προστεθούν ακολούθως στο αρχείο που θα πάρει σαν είσοδο ο επιλυτής. Λόγω και πάλι των επίμονων δράσεων που υπάρχουν στον γράφο αν μία δράση του SatPlan δεν εμφανίζεται στο πλάνο του LAMA τότε θα δημιουργηθούν τόσες αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις όσες και ο αριθμός εμφανίσεων τους για όλες τις χρονικές στιγμές του γραφήματος δράσεων μέχρι το σημείο που εξετάζεται.

Η τεχνική αυτή και πάλι όπως και η πρώτη διατηρεί τον ορισμό του αρχικού προβλήματος αναλλοίωτο ανεξάρτητα με την αλλαγή του αρχείου που δέχεται σαν είσοδο ο επιλυτής. Αυτό δικαιολογείται αφού το πλάνο του LAMA αποτελεί σίγουρα μια λύση για το αρχικό πρόβλημα. Έτσι με δημιουργία μοναδιαίων προτάσεων για όλες τις δράσεις που υπάρχουν στον SatPlan και δεν εμφανίζονται στον LAMA «υποχρεώνουμε» ουσιαστικά τον επιλυτή να λάβει λιγότερες δράσεις υπόψη του σε σύγκριση με την προκαθορισμένη εκτέλεση. Το αποτέλεσμα της τεχνικής αυτής δεν είναι βέβαιο ότι θα δώσει ένα πλάνο με την ίδια σειρά εκτέλεσης των δράσεων σαν και αυτό του LAMA γιατί ο SatPlan μπορεί να βρήκε μια δική του ακολουθία εκτέλεσης των δράσεων. Επίσης όπως προαναφέρθηκε δεν αποτελεί κανόνα ότι η νέα λύση θα είναι μεγαλύτερου μήκους από την προκαθορισμένη αφού ο SatPlan έχει την δυνατότητα να εκτελεί κάποιες δράσεις παράλληλα. Τέλος για την υλοποίηση της τεχνικής αυτής χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαδικασία με την πρώτη τεχνική, δηλαδή με τη χρήση του αρχείου που περιγράφει όλες τις δράσεις και τις χρονικές στιγμές τους. Για την χρησιμοποίηση της προστέθηκε μια νέα παράμετρος με όνομα “-lama1” και μετά το αρχείο εξόδου του LAMA.

```

c VARS:
c var 1 fact      (CAPACITY(TRUCK-1 CAPACITY-3)) 0
c var 2 fact      (CAPACITY(TRUCK-2 CAPACITY-4)) 0
c var 3 fact      (AT(PACKAGE-1 CITY-LOC-10)) 0
c var 4 fact      (AT(PACKAGE-4 CITY-LOC-5)) 0
c var 5 fact      (AT(PACKAGE-3 CITY-LOC-6)) 0
c var 6 fact      (AT(PACKAGE-2 CITY-LOC-8)) 0
c var 7 fact      (AT(TRUCK-1 CITY-LOC-6)) 0
c var 8 fact      (AT(TRUCK-2 CITY-LOC-6)) 0
c var 9 action    (PICK-UP TRUCK-1 CITY-LOC-6 PACKAGE-3 CAPACITY-2 CAPACITY-3) 0
c var 10 action   (PICK-UP TRUCK-2 CITY-LOC-6 PACKAGE-3 CAPACITY-3 CAPACITY-4) 0
c var 11 action   (DRIVE TRUCK-1 CITY-LOC-6 CITY-LOC-1) 0
c var 12 action   (DRIVE TRUCK-2 CITY-LOC-6 CITY-LOC-1) 0
c var 13 action   (DRIVE TRUCK-1 CITY-LOC-6 CITY-LOC-4) 0
c var 14 action   (DRIVE TRUCK-2 CITY-LOC-6 CITY-LOC-4) 0
c var 15 action   (DRIVE TRUCK-1 CITY-LOC-6 CITY-LOC-5) 0
c var 16 action   (DRIVE TRUCK-2 CITY-LOC-6 CITY-LOC-5) 0
c var 17 action   (DRIVE TRUCK-1 CITY-LOC-6 CITY-LOC-9) 0
c var 18 action   (DRIVE TRUCK-2 CITY-LOC-6 CITY-LOC-9) 0
c var 19 actionNOOP (NOOP-CAPACITY(TRUCK-1 CAPACITY-3)) 0
c var 20 actionNOOP (NOOP-CAPACITY(TRUCK-2 CAPACITY-4)) 0
c var 21 actionNOOP (NOOP-AT(PACKAGE-1 CITY-LOC-10)) 0
c var 22 actionNOOP (NOOP-AT(PACKAGE-4 CITY-LOC-5)) 0
c var 23 actionNOOP (NOOP-AT(PACKAGE-3 CITY-LOC-6)) 0
c var 24 actionNOOP (NOOP-AT(PACKAGE-2 CITY-LOC-8)) 0
c var 25 actionNOOP (NOOP-AT(TRUCK-1 CITY-LOC-6)) 0
c var 26 actionNOOP (NOOP-AT(TRUCK-2 CITY-LOC-6)) 0
c var 27 fact      (AT(TRUCK-2 CITY-LOC-9)) 1
c var 28 fact      (AT(TRUCK-1 CITY-LOC-9)) 1
c var 29 fact      (AT(TRUCK-2 CITY-LOC-5)) 1
c var 30 fact      (AT(TRUCK-1 CITY-LOC-5)) 1
c var 31 fact      (AT(TRUCK-2 CITY-LOC-4)) 1

```

```

(pick-up truck-1 city-loc-6 package-3 capacity-2 capacity-3)
(drive truck-1 city-loc-6 city-loc-4)
(drive truck-1 city-loc-4 city-loc-8)
(pick-up truck-1 city-loc-8 package-2 capacity-1 capacity-2)
(drive truck-1 city-loc-8 city-loc-3)
(drive truck-2 city-loc-6 city-loc-5)
(pick-up truck-2 city-loc-5 package-4 capacity-3 capacity-4)
(drive truck-1 city-loc-3 city-loc-7)
(drop truck-1 city-loc-7 package-2 capacity-1 capacity-2)
(drive truck-1 city-loc-7 city-loc-10)
(pick-up truck-1 city-loc-10 package-1 capacity-1 capacity-2)
(drive truck-1 city-loc-10 city-loc-8)
(drive truck-1 city-loc-8 city-loc-4)
(drive truck-1 city-loc-4 city-loc-9)
(drive truck-1 city-loc-9 city-loc-5)
(drop truck-1 city-loc-5 package-3 capacity-1 capacity-2)
(drop truck-1 city-loc-5 package-1 capacity-2 capacity-3)
(drive truck-2 city-loc-5 city-loc-9)
(drive truck-2 city-loc-9 city-loc-4)
(drive truck-2 city-loc-4 city-loc-8)
(drive truck-2 city-loc-8 city-loc-3)
(drop truck-2 city-loc-3 package-4 capacity-3 capacity-4)

```

Σχ. 5.1 Αρχείο VARFILE στον SatPlan και πλάνο του LAMA

Το σχήμα 5.1 αποτελεί ένα παράδειγμα αρχείου VARFILE, αντιστοιχίας δηλαδή μεταβλητών και δράσεων για κάθε χρονική στιγμή (αριστερή εικόνα) και δίπλα το τελικό πλάνο που προκύπτει για το ευρετικό σύστημα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η πρώτη τεχνική, θα δημιουργηθούν δύο νέες προτάσεις (clause) όπου η μία θα περιέχει τη μεταβλητή 13 και η άλλη την 15 αφού οι δράσεις (drive truck-1 city-loc-6 city-loc-4) (drive truck-2 city-loc-6 city-loc-5) είναι κοινές. Στη περίπτωση της δεύτερης τεχνικής θα δημιουργηθούν αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις για όλες τις δράσεις του VARFILE εκτός από την 13 και 15 μέχρι αυτό το επίπεδο 9 που εξετάζεται.

5.3.3 Ενοποίηση όλων των παραγόμενων πλάνων του LAMA

Η διαδικασία αυτή υλοποιήθηκε με σκοπό να εκμεταλλευτούμε στο μέγιστο ποσοστό την απόδοση και τη λειτουργικότητα του ευρετικού συστήματος LAMA. Όπως είναι γνωστό το σύστημα αυτό υπολογίζει μία λύση αρχικά όσο το δυνατό πιο γρήγορα με τη χρήση ενός αποδοτικού αλγορίθμου και στη συνέχεια γίνεται αναζήτηση για μικρότερου μήκους πλάνα πραγματοποιώντας διαδοχικές εκτελέσεις του A^* με μειωμένα βάρη. Στις περισσότερες περιπτώσεις το σύστημα παράγει περισσότερα από ένα πλάνα όπου τα κάθε ένα διαθέτει μικρότερο μήκος δράσεων από το προηγούμενο. Το γεγονός αυτό όμως δεν αποτελεί κανόνα ότι τα πλάνα που ακολουθούν είναι υποσύνολα των προηγούμενων πλάνων αφού επιτυγχάνουν την τελική κατάσταση με πιο λίγες δράσεις. Μετά την έξοδο της πρώτης λύσης το σύστημα λειτουργεί με διαφορετικά ευρετικά και έτσι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να ανακαλύψει διαφορετικές δράσεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του πρώτου πλάνου. Συνεπώς στην προσπάθεια για περαιτέρω μελέτη του συνδυασμού των δύο αυτών προσεγγίσεων υλοποιήθηκε η διαδικασία αυτή η οποία δημιουργεί ένα αρχείο με όλες τις μοναδικές δράσεις που παρήγαγε ο LAMA σε όλα τα πλάνα του. Με τη χρήση της μεθόδου αυτής όσο αφορά τη πρώτη προσέγγιση προσαρμογής της λειτουργίας του συστήματος SatPlan με βάση την έξοδο του LAMA θα υπάρχουν περισσότερες νέες προτάσεις, ενώ με τη δεύτερη προσέγγιση θα υπάρχουν λιγότερες αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω του τρόπου λειτουργίας του γραφήματος δράσεων στο SatPlan, αφού για κάθε νέο επίπεδο ο αλγόριθμος εντοπίζει όλες τις δυνατές δράσεις που μπορούν να εκτελεστούν. Έτσι από κάποιο επίπεδο και μετά οι δράσεις στην έξοδο του LAMA θα αποτελούν υποσύνολο των αντίστοιχων στον SatPlan. Ως εκ τούτου για την πρώτη προσέγγιση οι νέες προτάσεις που θα δημιουργηθούν θα είναι ίσες με τον αριθμό των ενοποιημένων δράσεων στο LAMA και για την δεύτερη προσέγγιση αφού θα υπάρχουν περισσότερες κοινές δράσεις συνεπάγεται λιγότερα αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις.

5.3.4 Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων

Η διαδικασία αυτή υλοποιήθηκε με σκοπό τη περαιτέρω μελέτη του συνδυασμού ευρετικής αναζήτησης και προσαρμογής σε πρόβλημα προτασιακής ικανοποιησιμότητας αφού θα πραγματοποιηθεί πειραματική σύγκριση που αφορά τον αριθμό των επιπλέον δράσεων που δέχεται ο SatPlan σαν είσοδο με την χρήση των δύο βασικών τεχνικών (παράμετροι lama και lama1 στον SatPlan). Όπως προαναφέρθηκε στη πρώτη υλοποίηση των δύο τεχνικών η παράμετρος του αρχείου που δεχόταν σαν στιγμιότυπο εισόδου ο SatPlan ήταν ένα από τα παραγόμενα πλάνα του LAMA. Στη συνέχεια επιθυμώντας την πλήρη εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων του ευρετικού συστήματος υλοποιήσαμε τη διαδικασία ενοποίησης όλων των παραγόμενων πλάνων. Ακολούθως προχωρώντας ένα βήμα περαιτέρω τέθηκε σαν στόχος η αύξηση των επιπλέον δράσεων που θα δέχεται ο SatPlan. Μια πρώτη ιδέα για την υλοποίηση της αύξηση αυτής θα μπορούσε να ήταν η τυχαία παραγωγή δράσεων με βάση το αρχείο domain. Το γεγονός αυτό όμως έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλης πολυπλοκότητας μέθοδο αφού ο συνδυασμός δράσεων που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν μπορεί να είναι πολύ μεγάλος. Από την άλλη οι δράσεις που θα επιλεγθούν, των οποίων ο αριθμός είναι άγνωστος μπορεί να μην έχουν σχέση με το πρόβλημα και έτσι να μην υπάρχει κανένα αντίκτυπο στη χρήση των δύο τεχνικών.

Έτσι ακολουθήθηκε μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε μια διαδικασία η οποία παίρνει σαν είσοδο ένα πρόβλημα μαζί με ένα ποσοστό (1-100) και έναν αριθμό παραγόμενων υποπροβλημάτων. Με βάση το πρόβλημα που δέχεται δημιουργεί ένα αριθμό νέων υποπροβλημάτων με την ίδια αρχική κατάσταση αλλά με λιγότερους στόχους από το αρχικό πρόβλημα και συγκεκριμένα οι στόχοι είναι ίσοι με το ποσοστό που δέχεται σαν είσοδο. Η επιλογή των στόχων για τα νέα προβλήματα γίνεται τυχαία και ομοιόμορφα. Ο αριθμός των στόχων είναι για όλα τα υποπροβλήματα ο ίδιος (σύμφωνα με το ποσοστό) ενώ δεν γίνεται επιλογή του ίδιου στόχου για το ίδιο υποπρόβλημα. Επίσης αν ο συνδυασμός από δράσεις με βάση το ποσοστό εισόδου είναι μεγαλύτερος από τα νέα υποπροβλήματα τότε θα είναι όλα διαφορετικά μεταξύ τους. Όταν η μέθοδος επιστρέψει τα νέα υποπροβλήματα και μετά την εκτέλεση του αρχικού

προβλήματος τότε αυτά εκτελούνται στον LAMA ενώ τέλος ακολουθεί ενοποίηση των μοναδικών δράσεων για όλα τα παραγόμενα πλάνα όλων των προβλημάτων.

5.3.5 Ενοποίηση των δύο συστημάτων σε ένα νέο σύστημα

Όπως προαναφέρθηκε προηγουμένως, αναπτύχθηκαν τρεις τρόποι εφαρμογής των δύο τεχνικών που συνδυάζουν ευρετική αναζήτηση και προσαρμογή προβλήματος σε προτασιακή ικανοποιησιμότητα. Οι τρεις αυτοί τρόποι αφορούν τις επιπλέον δράσεις που δέχεται σαν είσοδο ο SatPlan προερχόμενες από τον LAMA. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιεί ένα οποιοδήποτε από τα παραγόμενα πλάνα του LAMA, ο δεύτερος συνδυάζει όλες τις εξόδους ενώ ο τρίτος παράγει επιπλέον προβλήματα με λιγότερους στόχους έτσι ώστε να αυξηθούν οι εισαγόμενες δράσεις. Οι τρόποι αυτοί αποτελούν η κάθε μία ανεξάρτητη προγραμματιστική διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό η μελέτη των δύο προσεγγίσεων γίνεται σχεδόν ακατόρθωτη αφού για να χρησιμοποιήσουμε πχ τη πρώτη τεχνική συνδυασμού και οι εισαγόμενες δράσεις προκύπτουν από τα νέα υποπροβλήματα θα πρέπει πρώτα να εκτελέσουμε την αντίστοιχη διαδικασία παραγωγής υποπροβλημάτων. Ακολουθώντας πρέπει να εκτελέσουμε το ευρετικό σύστημα για κάθε ένα από τα νέα υποπροβλήματα αλλά και για το αρχικό και στη συνέχεια να ενοποιήσουμε όλες τις μοναδικές δράσεις που παράχθηκαν, ενώ τέλος να εκτελέσουμε το SatPlan. Το γεγονός αυτό δεν παρέχει καθόλου ευχρηστία και ως εκ τούτου ήταν αναγκαία η ανάπτυξη μιας εφαρμογής η οποία να δέχεται παραμέτρους από τον χρήστη και να αυτοματοποιεί όλη τη διαδικασία του συνδυασμού των δύο προσεγγίσεων.

Έτσι για να είναι πιο αποδοτική η μελέτη αλλά και για να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί από οποιονδήποτε χρήστη αναπτύχθηκε το σύστημα LamSat το οποίο υλοποιεί όλα τα πιο πάνω. Υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν όλοι οι τρόποι με τους οποίους παράγεται το νέο αρχείο που θα εισαχθεί στον SatPlan αλλά και η δυνατότητα εκτέλεσης μόνο του SatPlan. Επιπλέον μπορεί να εισαχθούν και παράμετροι που παίρνει και ο SatPlan όπως το “-level” που θέτει ένα όριο μέχρι ποιο επίπεδο να φθάσει το γράφημα δράσεων. Τέλος για οποιοδήποτε πρόβλημα ο SatPlan δώσει ένα πλάνο η εφαρμογή δημιουργεί μια νέα διεύθυνση (directory) με όλα τα παραγόμενα αρχεία. Ο LamSat χρησιμοποιήθηκε και

για την πειραματική μελέτη των διαφόρων προβλημάτων στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 6

Πειραματική ανάλυση

6.1 Μέτρηση χρόνου εκτέλεσης του LamSat με τη χρήση ενός παραγόμενου πλάνου από το LAMA	55
6.2 Επίλυση προβλημάτων και μετρήσεις με την ενοποίηση όλων των παραγόμενων πλάνων του LAMA	66
6.3 Συνδυασμός ευρετικής αναζήτησης και προτασιακής ικανοποιησιμότητας με χρήση υποσυνόλων στόχων	72

6.1 Μέτρηση χρόνου εκτέλεσης του LamSat με τη χρήση ενός παραγόμενου πλάνου από το LAMA

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων όπου οι επιπλέον δράσεις που εισάγονται στον SatPlan αφορούν ένα παραγόμενο πλάνο του LAMA, έγινε χρήση και των δύο τεχνικών που αναπτύχθηκαν για τη μελέτη των δύο προσεγγίσεων με σκοπό να γίνει μια σύγκριση και να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για το τρόπο λειτουργία τους. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του πρώτου πλάνου εξόδου που δίνει ο LAMA, δηλαδή το πλάνο με τις πιο πολλές δράσεις. Αυτό έγινε για να παρατηρηθεί πως λειτουργούν οι δύο αυτές τεχνικές με χαμηλής ποιότητας πλάνα. Το χρονικό περιθώριο που δόθηκε στον LAMA ήταν 5 λεπτά . Οι μετρήσεις έγιναν με βάση τα προβλήματα Driverlog, Transport, Storage, Depots, Satellite ενώ το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το LamSat το οποίο αποτελεί μια ενοποίηση των δύο προσεγγίσεων. Έτσι ο χρόνος εκτέλεσης μετριέται από την στιγμή που θα αρχίσει να εκτελείται ο LAMA μέχρι να τερματίσει ο SatPlan. Τέλος οι συγκρίσεις έγιναν με βάση το προκαθορισμένο πλάνο του SatPlan το οποίο είναι και το βέλτιστο.

Στα προβλήματα Driverlog παρατηρούμε ότι ο SatPlan παρέχει καλύτερης ποιότητας πλάνα σε όλα τα προβλήματα. Υπάρχει διαφορά μέχρι και 23 (πρόβλημα 16) επίπεδα ενώ τα προβλήματα όπου η διαφορά αυτή είναι μικρή είναι πολύ λίγα. Μεγάλη απόκλιση παρατηρείται και στους χρόνους εκτέλεσης αν συγκρίνουμε τα δύο συστήματα. Αυτό οφείλεται στην εκτέλεση του LAMA και στην περαιτέρω προσπάθεια του να παράξει καλύτερης ποιότητα πλάνα ενώ απ' ότι φαίνεται οι επιπλέον δράσεις που εισάγονται στον SatPlan δεν επιφέρουν θετικά αποτελέσματα για μεγάλης πολυπλοκότητα προβλήματα. Επίσης, με την χρήση της πρώτης τεχνικής ήταν αδύνατη η εύρεση ικανοποιητικών πλάνων για τα τελευταία 6 προβλήματα και με τη δεύτερη για τα τελευταία 4, μέσα στο χρονικό περιθώριο της μίας ώρας σε σύγκριση με τον SatPlan ο οποίος δεν έδωσε λύση για τα τελευταία τρία προβλήματα. Αν συγκρίνουμε τις δύο τεχνικές μεταξύ τους βλέπουμε η δεύτερη επίλυσε περισσότερα προβλήματα, ενώ η ποιότητα της λύσης ήταν παρόμοια χωρίς μεγάλες διαφορές. Το σημείο όμως που φαίνεται ότι η δεύτερη τεχνική δηλαδή με τον αποκλεισμό δράσεων, υπερτερεί σε μικρό βαθμό είναι στους χρόνους εκτέλεσης αφού για τον ίδιο αριθμό επιπέδων η τεχνική αυτή παράγει σε πιο σύντομο χρόνο τη λύση του προβλήματος.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama				
Domain: Driverlog				
SatPlan παράμετρος -lama			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	7	0.25	6	0
P02	10	26.41	9	0.06
P03	8	1.87	7	0.03
P04	12	175.15	7	0.02
P05	10	150.77	8	0.10
P06	7	176.82	5	0.01
P07	10	132.26	6	0.02
P08	10	104.94	7	0.12
P09	22	140.26	10	0.11
P10	10	103.19	7	0.36
P11	11	102.43	9	0.28
P12	22	122.03	16	4.12
P13	18	124.24	12	2.13
P14	21	78.11	11	0.97

P15	-	-	11	8.47
P16	-	-	18	536
P17	-	-	13	224
P18	-	-	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.1 Μέθοδος ενός πλάνου με την πρώτη τεχνική
για προβλήματα Driverlog

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama1				
Domain: Driverlog				
SatPlan παράμετρος –lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	7	0.08	6	0
P02	10	25.31	9	0.06
P03	8	2.03	7	0.03
P04	11	174.29	7	0.02
P05	10	143.42	8	0.10
P06	7	177.66	5	0.01
P07	10	143.37	6	0.02
P08	10	115.60	7	0.12
P09	15	112.14	10	0.11
P10	9	99.15	7	0.36
P11	11	119.09	9	0.28
P12	23	117.48	16	4.12
P13	18	132.72	12	2.13
P14	20	69.99	11	0.97
P15	25	192.39	11	8.47
P16	41	2079.33	18	536
P17	-	-	13	224
P18	-	-	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.2 Μέθοδος ενός πλάνου με την δεύτερη τεχνική
για προβλήματα Driverlog

Στα προβλήματα transport φαίνεται ξεκάθαρα ότι ούτε ο SatPlan αλλά ούτε και η χρησιμοποίηση των δύο τεχνικών που αναπτύχθηκαν δεν ήταν ικανά να επιλύσουν αρκετά από τα προβλήματα αυτά μέσα στα χρονικά όρια που εφαρμόστηκαν. Η δυσκολία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει προβλήματα με περισσότερους συνδυασμούς περιπτώσεων και γενικά πιο πολλούς περιορισμούς ανάμεσα στις διάφορες μορφές προτάσεων. Όσο αφορά τη ποιότητα της λύσης του LamSat βλέπουμε ότι υπάρχουν προβλήματα όπου η διαφοράς είναι μεγάλη σε σύγκριση με την βέλτιστη λύση ενώ για αυτά όπου η λύση εντοπίζεται σε μικρό αριθμό επιπέδων (μικρότερη από 9) η λύση του LamSat βρίσκεται κοντά στη λύση του SatPlan. Για τον χρόνο εκτέλεσης βλέπουμε και πάλι μεγάλες διαφορές μεταξύ LamSat και SatPlan και αυτό κυρίως λόγω της εκτέλεσης του LAMA και των δράσεων που εισάγονται στον SatPlan αφού δεν είναι βοηθητικές. Τέλος όσο αφορά τις δύο τεχνικές πετυχαίνουν παρόμοιας ποιότητας πλάνα με καλύτερο χρόνο εκτέλεσης να σημειώνεται από την πρώτη τεχνική αλλά η δεύτερη επιλύει περισσότερα προβλήματα.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama				
Domain: Transport				
SatPlan παράμετρος -lama			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	6	0.05	4	0
P02	15	113.10	11	0.14
P03	17	181.96	11	4.62
P04	29	479.32	14	44
P05	30	1006.77	19	1281
P06	28	4294.45	-	-
P07	-	-	-	-
P08	-	-	-	-
P09	-	-	-	-
P10	-	-	-	-
P11	11	0.07	9	0.01
P12	18	115.66	13	0.20
P13	34	298.35	18	5.48
P14	10	2053.21	19	299
P15	-	-	-	-
P16	-	-	-	-

P17	-	-	-	-
P18	-	-	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.3 Μέθοδος ενός πλάνου με την πρώτη τεχνική
για προβλήματα Transport

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με την ενοποίηση όλων των πλάνων - παράμετρος lama1				
Domain: Transport				
Ενοποίηση όλων των πλάνων παράμετρος –lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	6	0.14	4	0
P02	12	122.28	11	0.14
P03	15	169.99	11	4.62
P04	26	390.86	14	44
P05	30	866.46	19	1281
P06	24	4051.11	-	-
P07	-	-	-	-
P08	-	-	-	-
P09	-	-	-	-
P10	-	-	-	-
P11	11	0.05	9	0.01
P12	13	143.07	13	0.20
P13	28	262.33	18	5.48
P14	39	841.47	19	299
P15	43	2753	-	-
P16	-	-	-	-
P17	-	-	-	-
P18	-	-	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.4 Μέθοδος ενός πλάνου με την δεύτερη τεχνική
για προβλήματα Transport

Στα προβλήματα Storage βλέπουμε ότι ο LamSat έχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις προηγούμενες δύο κατηγορίες προβλημάτων αφού στα περισσότερα από αυτά τα δύο συστήματα παράγουν την ίδια ποιότητας λύση ενώ στα υπόλοιπα η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή. Το γεγονός αυτό παρατηρείται και σε προβλήματα όπου ο αριθμός των επιπέδων στον οποίο εντοπίζεται η λύση είναι πέραν των δεκαπέντε. Όσο αφορά τους χρόνους εκτέλεσης που παρατηρούνται, ο SatPlan υπερέχει σημαντικά στα περισσότερα προβλήματα εκτός από τα 7 πρώτα. Επιπλέον όπως και στις προηγούμενες δύο κατηγορίες ο LamSat δεν παράγει σε κανένα από τα προβλήματα πλάνα λιγότερων επιπέδων αλλά ούτε και μικρότερους χρόνους εκτέλεσης. Όσο αφορά τις διαφορές ανάμεσα στις δύο τεχνικές η πρώτη τεχνική υπερέχει αφού επιτυγχάνει καλύτερης ποιότητας λύση και καλύτερους χρόνους εκτέλεσης αλλά η δεύτερη επιλύει περισσότερα προβλήματα.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama				
Domain: Storage				
SatPlan παράμετρος –lama			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	3	0.01	3	0
P02	3	0.06	3	0
P03	3	0.06	3	0.01
P04	8	0.04	8	0.03
P05	6	0.14	6	0.01
P06	6	0.20	6	0
P07	14	0.18	14	0.10
P08	8	1.63	8	0.06
P09	7	4.90	7	0.11
P10	18	1.74	18	1.53
P11	14	50.57	11	1.84
P12	9	149.27	9	0.72
P13	20	85.72	18	9.94
P14	20	138.17	11	1.74
P15	13	58.75	9	1.33
P16	18	157.86	11	474.82
P17	-	-	12	3407.46
P18	-	-	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.5 Μέθοδος ενός πλάνου με την πρώτη τεχνική για προβλήματα Storage

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama1				
Domain: Storage				
SatPlan παράμετρος –lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	3	0.10	3	0
P02	3	0.04	3	0
P03	3	0.02	3	0.01
P04	8	0.06	8	0.03
P05	6	0.05	6	0.01
P06	6	0.03	6	0
P07	14	0.16	14	0.10
P08	8	0.89	8	0.06
P09	7	7.81	7	0.11
P10	18	1.04	18	1.53
P11	15	13.42	11	1.84
P12	9	154.04	9	0.72
P13	18	25.11	18	9.94
P14	18	178.20	11	1.74
P15	18	81.65	9	1.33
P16	17	127.39	11	474.82
P17	19	147.94	12	3407.46
P18	24	207.64	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.6 Μέθοδος ενός πλάνου με την δεύτερη τεχνική για προβλήματα Storage

Στα προβλήματα Satellite παρατηρείται και πάλι μια σημαντική διαφορά στη ποιότητα των λύσεων ανάμεσα στον SatPlan και στον LamSat και για τις δύο τεχνικές. Το γεγονός αυτό φαίνεται έντονα στα προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας. Υπάρχει διαφορά μέχρι και 31 επίπεδα (πρόβλημα 13) γεγονός που καταδεικνύει πως οι τεχνικές αυτές θα πρέπει να συνδυαστούν ή να βελτιστοποιηθούν για να επιφέρουν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των βέλτιστων λύσεων. Επίσης και πάλι από τη σύγκριση των δύο τεχνικών φαίνεται πως η πρώτη αδυνατεί να επιλύσει μερικά προβλήματα σε σύγκριση με την δεύτερη η οποία έχει βρει πλάνο σε δύο περισσότερα από τον SatPlan. Οι χρόνοι εκτέλεσης σε πολλά από τα προβλήματα απέχουν σε μεγάλο βαθμό από τους βέλτιστους όπως πχ στο πρόβλημα 17 με τον SatPlan ανιχνεύει λύση σε 60 δευτερόλεπτα και τον LamSat σε 1028. Τέλος η δεύτερη τεχνική σημειώνει καλύτερους χρόνους από την πρώτη και αποτελεί το λόγο για τον οποίο

η πρώτη επιλύει λιγότερα προβλήματα αφού υπάρχει καθυστέρηση στην απόφαση του επιλυτή.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama				
Domain: Satellite				
SatPlan παράμετρος –lama			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	8	0.13	8	0
P02	12	0.96	12	0.62
P03	12	6.75	6	0.21
P04	17	245.28	10	0.68
P05	16	158.08	7	0.82
P06	13	167.70	8	0.76
P07	15	124.27	6	0.98
P08	19	123.52	8	10.22
P09	17	22.33	6	2.96
P10	17	63.00	8	12.94
P11	14	27.11	8	12.87
P12	-	-	14	166.75
P13	-	-	13	228.58
P14	-	-	8	73.07
P15	-	-	8	115.54
P16	-	-	-	-
P17	-	-	6	141.95
P18	19	491.80	8	33.91
P19	18	602.58	12	1589.69
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.7 Μέθοδος ενός πλάνου με την πρώτη τεχνική για προβλήματα Satellite

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama1				
Domain: Satellite				
SatPlan παράμετρος –lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	8	0.04	8	0
P02	12	0.83	12	0.62
P03	12	7.71	6	0.21
P04	17	239.05	10	0.68
P05	16	167.86	7	0.82
P06	13	154.08	8	0.76
P07	15	163.43	6	0.98
P08	19	41.53	8	10.22
P09	17	30.50	6	2.96
P10	17	31.44	8	12.94
P11	14	57.68	8	12.87
P12	22	121.74	14	166.75
P13	44	1212.67	13	228.58
P14	25	254.39	8	73.07
P15	32	874.58	8	115.54
P16	26	1100.36	-	-
P17	22	1258.44	6	141.95
P18	19	112.36	8	33.91
P19	17	172.20	12	1589.69
P20	24	485.47	-	-

Πίνακας 6.1.8 Μέθοδος ενός πλάνου με την δεύτερη τεχνική για προβλήματα Satellite

Για τα προβλήματα Depots βλέπουμε όπως και στις προηγούμενες κατηγορίες τις διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στα δύο συστήματα που αφορούν τα προβλήματα μικρής και μεγάλης πολυπλοκότητας. Επιπλέον, και σε αυτή τη κατηγορία για όλα τα προβλήματα υπερτερεί το σύστημα του SatPlan όπως επίσης και ο αριθμός των προβλημάτων που έχει επιλύσει ο SatPlan ο οποίος είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του LamSat. Οι κύριες διαφορές που παρατηρούνται στη κατηγορία προβλημάτων αυτή αφορά τις δύο τεχνικές συνδυασμού. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι για μικρής πολυπλοκότητας προβλήματα η πρώτη τεχνική που αναπτύχθηκε είναι πιο κοντά στη βέλτιστη λύση σε σύγκριση με τη δεύτερη τεχνική. Το γεγονός αυτό όμως δεν συμβαίνει και για μεγάλης πολυπλοκότητας προβλήματα αφού η δεύτερη τεχνική υπερτερεί. Χαρακτηριστικά είναι τα προβλήματα 5

και 14. Στο πρόβλημα 5 η βέλτιστη τιμή είναι 20 επίπεδα και η πρώτη τεχνική το επιλύει σε 34 ενώ η δεύτερη τεχνική σε 25. Για το πρόβλημα 14 η λύση του SatPlan εντοπίζεται στα 12 επίπεδα και η λύση με την πρώτη τεχνική στα 17 επίπεδα. Με τη χρήση της δεύτερης όμως η λύση εντοπίζεται στα 22 επίπεδα.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama				
Domain: Depots				
SatPlan παράμετρος –lama			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	8	0.09	5	0
P02	12	5.76	8	0.10
P03	18	171.46	12	0.26
P04	32	122.28	14	0.70
P05	34	476.30	20	4.92
P06	-	-	26	34.74
P07	11	176.43	10	0.26
P08	15	147.08	14	3.10
P09	-	-	23	283.62
P10	14	155.36	10	0.80
P11	-	-	20	112.46
P12	-	-	-	-
P13	14	205.87	9	0.36
P14	17	186.79	12	6.42
P15	-	-	22	1121.26
P16	10	189.59	8	0.76
P17	9	148.05	7	2.32
P18	15	216.06	12	63.56
P19	15	154.73	10	4.62
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.9 Μέθοδος ενός πλάνου με την πρώτη τεχνική για προβλήματα Depots

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με τη χρήση ενός πλάνου – παράμετρος lama1				
Domain: Depots				
SatPlan παράμετρος –lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	8	0.18	5	0
P02	12	7.25	8	0.10
P03	19	191.83	12	0.26
P04	22	130.16	14	0.70
P05	25	138.48	20	4.92
P06	-	-	26	34.74
P07	11	170.22	10	0.26
P08	15	145.65	14	3.10
P09	40	397.07	23	283.62
P10	13	152.99	10	0.80
P11	30	241.02	20	112.46
P12	42	822.73	-	-
P13	14	178.88	9	0.36
P14	22	193.63	12	6.42
P15	25	389.19	22	1121.26
P16	10	117.85	8	0.76
P17	9	107.64	7	2.32
P18	17	274.18	12	63.56
P19	17	163.99	10	4.62
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.1.10 Μέθοδος ενός πλάνου με την δεύτερη τεχνική
για προβλήματα Depots

6.2 Επίλυση προβλημάτων και μετρήσεις με την ενοποίηση όλων των παραγόμενων πλάνων του LAMA

Για την ενοποίηση όλων των παραγόμενων πλάνων σε ένα αρχείο έτσι ώστε να δοθεί σαν είσοδος στον SatPlan υλοποιήθηκε μια ανεξάρτητη διαδικασία η οποία εκτελείται στον LamSat. Η ενοποίηση όλων των ανεξάρτητων δράσεων αποτελεί το δεύτερο από τους τρεις τρόπους εισαγωγής δράσεων στο σύστημα του SatPlan. Αναπτύχθηκε με σκοπό να παρθούν κάποιες μετρήσεις και να εξαχθούν συμπεράσματα για το πώς λειτουργεί ο SatPlan με την αύξηση των εισαγομένων δράσεων. Το χρονικό περιθώριο που δόθηκε στον SatPlan για την εύρεση μιας λύσης είναι μία ώρα και το αντίστοιχο στον LAMA 5 λεπτά. Οι μετρήσεις έγιναν με βάση τα προβλήματα Driverlog, Transport, Storage, Depots, Satellite. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και πάλι το σύστημα LamSat και συνεπώς οι χρόνοι εκτέλεσης πάρθηκαν από τις εκτελέσεις τόσο του LAMA όσο και του SatPlan. Τέλος για την διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών έγινε χρήση μόνο της δεύτερης τεχνικής που αναπτύχθηκε, για το συνδυασμό των προσεγγίσεων της ευρετικής αναζήτησης και της προτασιακής ικανοποιησιμότητας.

Στα προβλήματα Driverlog βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση με τα προηγούμενα όπου γίνεται χρήση του πρώτου πλάνου εξόδου. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι για τα πλείστα προβλήματα το πλάνο το οποίο παράγει ο LamSat δεν έχει πολύ μεγάλη διαφορά στον αριθμό των επιπέδων με το αντίστοιχο της βέλτιστης λύσης εκτός από τα προβλήματα 15 16 και 17 όπου αποκλίνει σημαντικά από τα πλάνα που δίδει ο SatPlan. Άλλο ένα σημαντικό στοιχείο όπου παρατηρείται πρόοδος σε σύγκριση με τον προηγούμενο τρόπο είναι στον αριθμό των προβλημάτων που κατορθώνουν να επιλύσουν. Ειδικότερα για τα προβλήματα όπου ο LamSat αδυνατούσε να βρει μια λύση προηγουμένως μέσα στο διάστημα της μίας ώρας ενώ ο SatPlan τα κατάφερε, με τη ενοποίηση όλων των πλάνων τα προβλήματα αυτά τα έχει επιλύσει. Επιπλέον κατάφερε να βρει πλάνο και για ένα πρόβλημα μεγάλης πολυπλοκότητας το οποίο δεν κατάφερε ο SatPlan λόγω του χρονικού περιορισμού. Τέλος όσο αφορά τους χρόνους εκτέλεσης γενικά ο SatPlan πετυχαίνει σημαντικά καλύτερους σε σχέση με αυτούς που κάνει ο LamSat και ιδιαίτερα για προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με την ενοποίηση όλων των πλάνων - παράμετρος lama1				
Domain: Driverlog				
Ενοποίηση όλως των πλάνων παράμετρος –lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	7	0.70	6	0
P02	9	24.71	9	0.06
P03	7	1.89	7	0.03
P04	11	163.52	7	0.02
P05	8	155.80	8	0.10
P06	5	179.36	5	0.01
P07	7	136.62	6	0.02
P08	10	108.68	7	0.12
P09	13	134.07	10	0.11
P10	9	97.88	7	0.36
P11	9	103.55	9	0.28
P12	17	121.85	16	4.12
P13	18	122.15	12	2.13
P14	15	69.18	11	0.97
P15	25	177.04	11	8.47
P16	41	2154.25	18	536
P17	29	1345.12	13	224
P18	22	2408.45	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.2.1: Μέθοδος ενοποιημένου πλάνου για προβλήματα Driverlog

Στα προβλήματα transport παρατηρούμε πως και πάλι υπάρχει μια βελτίωση που αφορά το επίπεδο εύρεσης του πλάνου σε σύγκριση με τον προηγούμενο τρόπο υπάρχουν λύσεις που είναι κοντά στη βέλτιστη. Γενικά αυτό που διαφαίνεται από τις μετρήσεις είναι ότι τα παραγόμενα πλάνα είτε είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη είτε πολύ μακριά από αυτή. Επίσης βλέπουμε και πάλι πως η αύξηση των εισαγόμενων δράσεων έχει θετικό αντίκτυπο για προβλήματα πολύ μεγάλης πολυπλοκότητας και αυτό γιατί υπάρχουν δύο προβλήματα τα οποία δεν κατόρθωσε να λύσει ο SatPlan μέσα σε μία ώρα ενώ τα κατέφερε ο LamSat. Η μεγάλη πολυπλοκότητα των δύο αυτών προβλημάτων φαίνεται και από το γεγονός ότι απαιτούν μεγάλους χρόνους εκτέλεσης και πολλά βήματα για να φθάσουν στη λύση. Τέλος

όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσης παρατηρούνται μεγάλες διαφορές σε όλα τα προβλήματα και ιδιαίτερα σε αυτά όπου υπάρχει μεγάλη απόκλιση στη ποιότητα της λύσης.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με την ενοποίηση όλων των πλάνων - παράμετρος lama1				
Domain: Transport				
Ενοποίηση όλων των πλάνων παράμετρος -lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	6	0.20	4	0
P02	12	119.41	11	0.14
P03	15	160.86	11	4.62
P04	26	369.52	14	44
P05	30	857.33	19	1281
P06	24	2681	-	-
P07	-	-	-	-
P08	-	-	-	-
P09	-	-	-	-
P10	-	-	-	-
P11	11	0.13	9	0.01
P12	13	123.40	13	0.20
P13	28	199.04	18	5.48
P14	39	843.53	19	299
P15	43	2995.37	-	-
P16	-	-	-	-
P17	-	-	-	-
P18	-	-	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.2.2: Μέθοδος ενοποιημένου πλάνου για προβλήματα Transport

Τα προβλήματα storage αφορούν μόνο αποθήκευση προϊόντων σε σύγκριση με τα προβλήματα transport και Driverlog στα οποία εμπλέκονται και άλλοι παράγοντες όπως φορτηγά, αεροπλάνα και οδηγοί. Έτσι στη κατηγορία αυτή παρατηρούμε μικρούς χρόνους εκτέλεσης τόσο με τη μέθοδο του ενός πλάνου όσο και με τη μέθοδο του ενοποιημένου, κάτι που δεν είδαμε στις δύο προηγούμενες κατηγορίες αφού γενικά η ένωση όλων των

δράσεων υπερτερούσε έναντι του ενός πλάνου. Συνεπώς το ίδιο παρατηρείται και για την ποιότητα του κάθε πλάνου αν τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα βέλτιστα. Επίσης βλέπουμε να σημειώνεται σημαντική διαφορά όσο αφορά τους χρόνους εκτέλεσης. Τέλος βλέπουμε και πάλι πως ο τρόπος του ενοποιημένου πλάνου υπερτερεί στον αριθμό προβλημάτων που έχουν επιλυθεί σε σύγκριση με τον SatPlan.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με την ενοποίηση όλων των πλάνων - παράμετρος lama1				
Domain: Storage				
Ενοποίηση όλων των πλάνων παράμετρος -lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	3	0.07	3	0
P02	3	0.02	3	0
P03	3	0.06	3	0.01
P04	8	0.04	8	0.03
P05	6	0.10	6	0.01
P06	6	0.10	6	0
P07	14	0.13	14	0.10
P08	8	1.32	8	0.06
P09	7	7.45	7	0.11
P10	18	3.51	18	1.53
P11	11	48.76	11	1.84
P12	9	132.02	9	0.72
P13	18	91.00	18	9.94
P14	11	130.57	11	1.74
P15	11	104.19	9	1.33
P16	13	127.77	11	474.82
P17	15	142.10	12	3407.46
P18	18	182.72	-	-
P19	-	-	-	-
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.2.3: Μέθοδος ενοποιημένου πλάνου για προβλήματα Storage

Η μέθοδος του ενοποιημένου πλάνου φαίνεται πως δεν επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα ούτε και για τα προβλήματα satellite. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι τα προβλήματα αυτά διέπονται από αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς αφού η επίλυση τους

στοχεύει στον χρονοπρογραμματισμό των παρατηρήσεων του κάθε δορυφόρου. Έτσι παρατηρείται σχεδόν για όλα τα προβλήματα ότι το επίπεδο εύρεσης της λύσης απέχει σημαντικά από το βέλτιστο επίπεδο του κάθε προβλήματος. Αντίθετα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων κατηγοριών βλέπουμε ότι η ποιότητα των πλάνων με τη μέθοδο του ενοποιημένου συγκλίνει περισσότερο με τη μέθοδο τους ενός πλάνου. Όσο αφορά τους χρόνους εκτέλεσης, υπάρχει βελτίωση σε σχέση με τη προηγούμενη μέθοδο, αλλά για πολλά από τα προβλήματα απέχει σημαντικά από τους χρόνους του SatPlan και ιδιαίτερα για αυτά με μεγάλη πολυπλοκότητα. Το θετικό αποτέλεσμα με τη χρήση της μεθόδου αυτής είναι ότι έχει βρει λύση για δυο επιπλέον προβλήματα για τα οποία δεν κατόρθωσε ο SatPlan μέσα σε μία ώρα.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με την ενοποίηση όλων των πλάνων - παράμετρος lama1				
Domain: Satellite				
Ενοποίηση όλων των πλάνων παράμετρος -lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	8	0.05	8	0
P02	12	0.87	12	0.62
P03	8	6.24	6	0.21
P04	16	242.19	10	0.68
P05	15	133.56	7	0.82
P06	12	153.39	8	0.76
P07	15	108.97	6	0.98
P08	19	62.75	8	10.22
P09	11	32.88	6	2.96
P10	17	75.39	8	12.94
P11	10	15.45	8	12.87
P12	22	123.97	14	166.75
P13	34	672.92	13	228.58
P14	25	253.28	8	73.07
P15	31	864.43	8	115.54
P16	25	1003.82	-	-
P17	22	1242.19	6	141.95
P18	19	114.39	8	33.91
P19	17	122.73	12	1589.69
P20	24	479.12	-	-

Πίνακας 6.2.4: Μέθοδος ενοποιημένου πλάνου
για προβλήματα Satellite

Για τα προβλήματα depots παρατηρείται μια βελτίωση που αφορά την ποιότητα των παραγόμενων πλάνων σε σύγκριση με τη προηγούμενη μέθοδο με το ένα πλάνο. Γενικά σχεδόν για όλα τα προβλήματα το επίπεδο εύρεσης της λύσης είναι πολύ κοντά στο βέλτιστο. Επίσης ο LamSat έχει επιλύσει περισσότερα προβλήματα με τη χρήση του ενοποιημένου πλάνου, σχεδόν τα ίδια με αυτά που έχει επιλύσει ο SatPlan. Για ακόμα μια φορά βλέπουμε επίσης μεγάλες διαφορές στους χρόνους εκτέλεσης μεταξύ των δύο συστημάτων και αυτό γιατί προηγείται η εκτέλεση του LAMA. Ακόμα φαίνεται πως σε αρκετά προβλήματα οι επιπλέον δράσεις που εισάγονται στον SatPlan δεν του επιτρέπουν να βρει πιο γρήγορα λύση.

Συνδυασμός δράσεων SatPlan και Lama με την ενοποίηση όλων των πλάνων - παράμετρος lama1				
Domain: Depots				
Ενοποίηση όλων των πλάνων παράμετρος -lama1			SMP	
	Level	Time (s)	Level	Time (s)
P01	8	0.22	5	0
P02	12	7.74	8	0.10
P03	14	179.82	12	0.26
P04	14	127.07	14	0.70
P05	20	131.24	20	4.92
P06	-	-	26	34.74
P07	10	169.81	10	0.26
P08	16	139.13	14	3.10
P09	23	199.87	23	283.62
P10	11	162.13	10	0.80
P11	30	176.47	20	112.46
P12	28	363.09	-	-
P13	14	205.30	9	0.36
P14	14	181.68	12	6.42
P15	26	1194.55	22	1121.26
P16	10	192.30	8	0.76
P17	9	176.63	7	2.32
P18	14	289.39	12	63.56
P19	17	162.78	10	4.62
P20	-	-	-	-

Πίνακας 6.2.4: Μέθοδος ενοποιημένου πλάνου για προβλήματα Depots

6.3 Συνδυασμός ευρετικής αναζήτησης και προτασιακής ικανοποιησιμότητας με χρήση υποσυνόλων στόχων

Η διαδικασία αυτή αποτελεί το τρίτο τρόπο εισαγωγής δράσεων στο σύστημα του SatPlan. Αναπτύχθηκε με σκοπό την περαιτέρω αύξηση των επιπλέον δράσεων που δέχεται ο SatPlan από τον LAMA έτσι ώστε να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις και να εξαχθούν συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας του ενοποιημένου συστήματος LamSat. Ειδικότερα υλοποιήθηκε μια ανεξάρτητη διαδικασία σύμφωνα με την οποία δημιουργείται ένας νέος αριθμός υποπροβλημάτων τα οποία έχουν την ίδια αρχική κατάσταση αλλά λιγότερους στόχους με βάση πάντα το αρχικό πρόβλημα. Ο αριθμός των υποπροβλημάτων και του ποσοστού των στόχων καθορίζονται από τις παραμέτρους εισαγωγής ενώ ο τρόπος επιλογής των δράσεων για τα νέα προβλήματα είναι τυχαίος και ομοιόμορφος. Όταν δημιουργηθούν τα νέα αυτά προβλήματα εκτελείται το κάθε ένα στον LAMA μαζί με το αρχικό και αφού γίνει ενοποίηση των δράσεων για όλα τα πλάνα όλων των προβλημάτων εισάγονται στον SatPlan για να χρησιμοποιηθούν με μία εκ των δύο τεχνικών. Ο χρόνος εκτέλεσης του ευρετικού συστήματος στη διαδικασία αυτή εξαρτάται από το ποσοστό των νέων των στόχων. Συγκεκριμένα αν το ποσοστό είναι μέχρι 30 ο χρόνος είναι 1.5 λεπτά, αν είναι από 31 μέχρι 70 2.5 λεπτά ενώ πέραν αυτού ο το όριο είναι 3 λεπτά. Για την μελέτη της μεθόδου αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι περισσότερες κατηγορίες προβλημάτων. Επιπλέον οι μετρήσεις έγιναν εκτελώντας όλους τους συνδυασμούς που προκύπτουν από τα ποσοστά των στόχων να είναι 50, 60 και 75 και τον αριθμό των νέων υποπροβλημάτων 5, 10 και 15. Τέλος, έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι όσο το δυνατό πιο ακριβής πάρθηκε ο μέσος όρος για 5 διαφορετικές εκτελέσεις, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή καθώς και η τυπική απόκλιση, τόσο για τον αριθμό των επιπέδων όσο και για τον χρόνο εκτέλεσης. Οι πιο κάτω πίνακες δείχνουν τις μετρήσεις που έγιναν για τις διάφορες κατηγορίες προβλημάτων.

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	7	8	6	1.09545	420.63	426.56	415.85	5.3863	6	1.16
p11	8	8	6	0.89447	334.93	419.72	262.72	61.136	6	1.97
p12	9	9	9	0	418.25	419.36	417.33	0.7529	6	2.06
p13	9	11	8	1.14015	421.65	424.5	418.26	2.6372	7	3.73
p14	10	10	10	0	499.90	515.98	493.54	9.1970	6	31.69
p15	10	12	8	1.64318	576.61	714.49	492.87	92.535	7	84.44
p16	10	11	9	0.89447	875.61	991.05	732.47	97.707	7	755.57
p17	19	19	19	8.49708	4237.8	4561.01	3856.68	255.56	-	-
p18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	7	8	6	1.095445	711.90	712.84	708.42	2.266038	6	1.16
p11	7	8	6	0.894427	588.43	713.21	499	85.25796	6	1.97
p12	9	9	9	0	715.00	716.9	713.58	1.241137	6	2.06
p13	8	9	8	0.547723	716.66	717.14	716.1	0.415788	7	3.73
p14	9	10	9	0.547723	791.14	805.06	778.15	11.82108	6	31.69
p15	9	10	8	1	841.74	896.13	798.22	47.5574	7	84.44
p16	10	11	9	0.83666	1127.3	1187.42	1053.9	75.19834	7	755.57
p17	17	18	16	0.707107	3554.4	3902.38	3019.74	326.293	-	-
p18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	7	8	6	1.095445	1010.3	1012.11	1008	1.904382	6	1.16
p11	7	8	6	0.894427	872.91	957.45	804.83	58.45879	6	1.97
p12	9	9	9	0	1012.3	1014.02	1010.42	3.197959	6	2.06
p13	8	8	8	0	1013.9	1015.25	1011.41	3.237084	7	3.73
p14	9	9	9	0	1090.5	1108.68	1083.9	21.86831	6	31.69
p15	8	9	8	0.947214	1129.5	1155.58	1107.72	19.25624	7	84.44
p16	10	11	9	62.37545	1422.6	1509.06	1347.77	128.4465	7	755.57
p17	15	19	13	3.19089	3457.2	5184.57	2523.09	1362.317	-	-
p18	13	13	13	0	3261.4	32641.4	3261.4	0	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	7	8	6	0.894427	416.76	417.68	415.49	0.798392	6	1.16
p11	7	8	6	1	368.53	371.4	362.93	3.673516	6	1.97
p12	9	9	9	0	419.7	421.7	418.57	1.257589	6	2.06
p13	9	11	8	1.095445	421.62	505.33	493.75	4.274734	7	3.73
p14	10	10	10	0	498.37	654.84	547.88	39.2729	6	31.69
p15	10	11	10	0.547723	594	547.88	788.66	39.2729	7	84.44
p16	11	11	9	0.894427	929.29	1042.81	788.66	91.11769	7	755.57
p17	19	20	19	0.707107	4124.2	4417.97	3830.51	415.3969	-	-
p18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	6	8	6	0.894427	711.42	711.92	710.47	0.580129	6	1.16
p11	7	8	6	1.095445	633.99	716.28	509.68	79.37266	6	1.97
p12	9	9	9	0	715.85	717.97	713.96	1.470432	6	2.06
p13	8	9	8	0.447214	718.21	719.33	716.1	2.812806	7	3.73
p14	10	10	9	0.447214	808.92	825.27	798.08	10.72306	6	31.69
p15	9	10	8	1	843.2	883.73	798.5	34.14838	7	84.44
p16	9	10	9	0.447214	1068	1179.98	1021.91	65.10957	7	755.57
p17	15	18	14	1.67332	2879.8	3690.02	2469.86	504.832	-	-
p18	13	13	13	0	2922	2936.89	2908.48	20.0889	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	6	6	6	0	1007.6	1008.95	1006.06	1.03302	6	1.16
p11	7	8	6	0.894427	841.23	872.08	814.1	25.96679	6	1.97
p12	9	9	9	0	1012.3	1013.49	1010.94	1.255038	6	2.06
p13	8	8	8	0	1015.7	1018.67	1013.68	2.065047	7	3.73
p14	9	10	9	0.447214	1096.2	1122.68	1086.98	14.86117	6	31.69
p15	9	10	8	0.894427	1137.3	1199.86	1110.09	36.66034	7	84.44
p16	9	10	9	0.447214	1388.8	1447.92	1348.35	38.05485	7	755.57
p17	14	16	13	1.140175	2970.7	3558.58	2383.56	491.3213	-	-
p18	13	13	13	0	3238.1	3643.22	2940.82	267.3698	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	7	6	8	1	416.01	417.1	415.04	0.782483	6	1.16
p11	7	6	8	1.095445	417.91	419.75	416.94	1.133014	6	1.97
p12	9	9	9	0	419.6	421.01	419.18	0.763433	6	2.06
p13	9	10	8	1	421.14	422.79	419.5	1.517768	7	3.73
p14	10	10	9	0.547723	491.09	498.22	479.22	8.378737	6	31.69
p15	10	12	9	1.516575	573.56	645.53	519.59	58.24718	7	84.44
p16	10	11	9	1.095445	811.45	930.54	714.23	109.7433	7	755.57
p17	17	80	14	2.236068	3229.3	3970.91	2197.79	790.4488	-	-
p18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	6	6	6	0	711.27	712.43	709.47	1.116835	6	1.16
p11	7	8	6	1	714.89	716.15	712.71	1.449369	6	1.97
p12	9	9	9	0	715.9	717.28	713.92	1.368046	6	2.06
p13	9	9	8	0.547723	718.62	720.58	716.68	1.497421	7	3.73
p14	10	10	9	0.447214	805.23	813.4	798.9	6.278728	6	31.69
p15	10	10	9	0.547723	860.43	885.62	830.93	26.02566	7	84.44
p16	9	10	9	0.547723	1097.1	1151.42	1039.67	45.83006	7	755.57
p17	14	15	13	0.707107	2581.3	2867.55	2371.42	197.1133	-	-
p18	13	13	13	0	2972.3	3123.58	2871.6	111.9518	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Zenotravel										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	6	6	6	0	1008.3	1009.07	1007.38	0.72127	6	1.16
p11	6	6	6	0	1148.3	1185.73	1114.74	35.18767	6	1.97
p12	9	9	9	0	1013.7	1015.3	1011.24	1.563112	6	2.06
p13	8	9	8	0.447214	1015.2	1113.23	1072.37	14.58254	7	3.73
p14	9	10	8	0.83666	1094.1	1113.23	1072.37	14.58254	6	31.69
p15	9	10	8	0.83666	1148.3	1185.73	1114.74	35.18767	7	84.44
p16	9	9	8	0.447214	1363.7	1414.55	1282.1	54.72664	7	755.57
p17	13	14	12	0.894427	2702.3	3000.24	2376.39	247.1014	-	-
p18	12	13	11	0.894427	3151.4	3470.69	2577.93	345.3378	-	-

Από τους πιο πάνω πίνακες που αφορούν την κατηγορία Zenotravel βλέπουμε πως η ποιότητα των λύσεων σε πολλούς από τους συνδυασμούς είναι καλύτερη σε σύγκριση με τις προηγούμενες δύο τεχνικές όπως επίσης και οι χρόνοι εκτέλεσης. Αν ομαδοποιήσουμε τους πίνακες με βάση το ποσοστό των στόχων βλέπουμε πως όταν το ποσοστό αυτό είναι μικρό χωρίς να αντιπροσωπεύει σε μεγάλο βαθμό το αρχικό πρόβλημα η ποιότητα της λύσης που προκύπτει αποκλίνει αρκετά από τη βέλτιστη. Επίσης φαίνεται ότι όταν το κάθε υποπρόβλημα προσεγγίζει το αρχικό οι χρόνοι εκτέλεσης είναι μικρότεροι σε σύγκριση με υποπροβλήματα με λίγους στόχους. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι ο LAMA παράγει περισσότερες δράσεις οι οποίες υπάρχουν και στον SatPlan σε σύγκριση με τα υποπροβλήματα πολύ λίγων υποστόχων. Αν ομαδοποιήσουμε με βάση των αριθμών των νέων προβλημάτων οι χρόνοι εκτέλεσης είναι καλύτεροι όταν ο αριθμός αυτός είναι μικρός. Αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού όσο πιο πολλά είναι τα προβλήματα τόσο πιο πολλές εκτελέσεις του LAMA θα υπάρχουν. Αλλά από την άλλη όταν είναι μεγάλος υπάρχει η δυνατότητα να επιλυθούν περισσότερα προβλήματα από αυτά που επιλύει ο SatPlan ενώ ο αριθμός των επιπέδων είναι συγκριτικά καλύτερος. Συνεπώς ο καλύτερο συνδυασμό που αφορά τον χρόνο εκτέλεσης είναι όταν το ποσοστό είναι 75% και 60% και ο αριθμός των προβλημάτων 5. Για την ποιότητα της λύσης ο αντίστοιχος συνδυασμός είναι 75% 15 και 65% 15.

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	14	18	10	3.193744	405.94	489.11	351.9	115.3741	8	12.94
p11	13	15	10	2.280351	515.9	613.75	438.39	68.51885	8	12.87
p12	22	22	22	0	654.95	680.54	576.35	45.79053	14	166.75
p13	20	31	15	6.655825	933.39	1519.33	617.97	353.0308	13	228.58
p14	13	15	12	1.30384	534.98	635.36	451.95	68.28628	8	73.07
p15	17	24	12	4.549725	651.1	879.77	537.14	146.2819	8	115.54
p16	13	15	11	1.516575	636.55	766.25	519.58	88.69342	-	-
p17	20	22	14	3.464102	1438.1	1776.03	926.3	338.2091	6	141.95
p18	13	14	11	1.095445	464.97	583.37	362.62	96.94513	8	33.91
p19	16	17	14	1.30384	634.3	700.75	509.49	75.08938	12	1589.69
p20	24	24	24	0	1158.7	1218.55	1105.7	50.00417	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	12	17	10	3.03315	735.16	791.31	696.84	35.72922	8	12.94
p11	11	13	9	1.81659	809.79	1038.88	641.76	153.3526	8	12.87
p12	21	22	17	2.236068	1023.8	1088.48	917.63	68.13063	14	166.75
p13	15	21	14	3.130495	1172.5	1444.09	1008.29	161.8072	13	228.58
p14	13	13	12	0.447214	776.33	817.98	756.67	25.02029	8	73.07
p15	15	21	12	3.701351	910.3	1116.61	814.43	119.7007	8	115.54
p16	10	10	9	0.547723	844.07	983.66	743.25	109.0854	-	-
p17	18	22	12	4.242641	1622.3	2246.22	989.49	587.1136	6	141.95
p18	10	11	9	0.707107	835.31	912.09	663.92	97.82734	8	33.91
p19	15	16	14	0.83666	943.45	1076.66	790.7	101.616	12	1589.69
p20	24	24	24	0	1639.9	1833.7	1383.68	188.7769	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	10	11	8	1.516575	1025.4	1225.11	912.73	123.6705	8	12.94
p11	9	11	9	0.894427	1121.1	1304.44	937.93	132.9515	8	12.87
p12	21	22	17	2.236068	1394.3	1503.27	1317.61	78.86205	14	166.75
p13	14	16	13	1.30384	1637.0	1813.06	1349.59	185.9166	13	228.58
p14	10	11	10	0.547723	1088.3	1234.08	965.79	113.8826	8	73.07
p15	14	20	10	4.242641	1099	1265.65	918.81	145.4184	8	115.54
p16	9	9	8	0.547723	1061.3	1142.62	1009.31	57.79085	-	-
p17	14	18	10	3.361547	1309.5	1565.02	1055.57	235.2175	6	141.95
p18	9	10	8	0.83666	1165.9	1323.31	1087.36	109.4605	8	33.91
p19	14	15	14	0.447214	1282.0	1532.62	1154.07	146.2047	12	1589.69
p20	23	24	22	1	2424.3	2226.18	2105.71	77.48793	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	12	17	9	3.563706	446.97	474.73	399.91	28.71131	8	12.94
p11	10	11	9	0.83666	413.33	458.3	354.13	41.01429	8	12.87
p12	22	22	22	0	640.78	801.55	573.81	92.30391	14	166.75
p13	17	19	14	2.073644	786.18	925.02	553.5	140.5375	13	228.58
p14	13	18	11	2.792848	515.24	641.9	428.56	86.71559	8	73.07
p15	15	19	11	2.880972	606.93	880.71	443.57	163.3846	8	115.54
p16	12	14	11	1.30384	627.66	685.42	587.13	41.02966	-	-
p17	21	22	18	1.788854	1554.5	1730.3	1193.45	208.9891	6	141.95
p18	12	12	11	0.447214	477.03	539.62	396.54	62.76392	8	33.91
p19	16	17	15	1	647.89	691.23	604.81	42.67427	12	1589.69
p20	24	24	24	0	1161.9	1249.82	1051.02	84.17829	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	12	17	9	3.209361	772.12	831.17	715.48	53.55967	8	12.94
p11	9	10	9	0.547723	714.72	923.64	639.6	117.8444	8	12.87
p12	19	22	14	3.577709	988.58	1102.28	797.05	120.1345	14	166.75
p13	14	15	13	0.707107	1166.8	1334.68	1086.62	99.20131	13	228.58
p14	10	11	10	0.547723	880.05	1028.48	819.71	90.65062	8	73.07
p15	11	13	10	1.140175	862.71	930.43	770.59	57.65487	8	115.54
p16	10	11	9	0.83666	883.36	952.78	756.67	81.78741	-	-
p17	20	22	14	3.898718	1692.1	2150.58	1174.96	443.6312	6	141.95
p18	10	13	9	1.643168	831.2	893.36	779.17	49.7441	8	33.91
p19	16	18	15	1.30384	1057.7	1127.22	954.57	63.27271	12	1589.69
p20	24	24	24	0	1763.0	2003.83	1650.64	141.6792	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	9	10	8	0.707107	1053.1	1210.68	918.94	116.5343	8	12.94
p11	10	12	9	1.224745	1097.3	1326.79	954.51	147.8552	8	12.87
p12	22	22	22	0	1334.0	1488.29	1210.68	118.1913	14	166.75
p13	14	15	13	1	1656.4	1813.51	1546.83	106.5063	13	228.58
p14	10	12	10	0.894427	1260.9	1380.11	1152.08	106.0326	8	73.07
p15	11	12	10	0.894427	1133.9	1207.38	983.37	87.93676	8	115.54
p16	8	9	8	0.547723	1214.4	1315.86	1020.49	124.2065	-	-
p17	15	22	10	5.01996	1608.8	1621.88	1089.8	527.0289	6	141.95
p18	11	12	10	1	1065.5	1149.33	984.73	73.12229	8	33.91
p19	14	15	13	1	1329.8	1512.58	1131.79	142.6632	12	1589.69
p20	23	24	22	1	2257.3	2440.15	1947.02	195.1124	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	12	12	11	0.547723	389.75	419.64	357.26	23.90865	8	12.94
p11	10	12	9	1.30384	385.62	453.83	337.77	46.94126	8	12.87
p12	22	22	22	0	655.27	716.45	569.06	59.51997	14	166.75
p13	16	17	16	0.447214	752.83	851.13	661.18	90.08226	13	228.58
p14	12	13	11	0.83666	596.88	657.86	543.41	41.89959	8	73.07
p15	16	22	12	3.898718	723.89	1161.82	513.5	262.332	8	115.54
p16	11	12	10	1	680.26	777.94	512.52	103.1445	-	-
p17	17	22	14	4.38178	1270.8	1850.97	886.96	497.9901	6	141.95
p18	12	14	10	1.81659	515.04	592.52	459.98	57.3439	8	33.91
p19	16	17	14	1.30384	723.42	810.06	645.09	75.67523	12	1589.69
p20	24	24	24	0	1290	1468.47	1211.1	103.8444	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	11	13	11	0.894427	700	839.85	543.31	132.3581	8	12.94
p11	9	9	9	0	770.42	1006.09	605.84	153.3346	8	12.87
p12	22	22	22	0	1076.2	1177.84	952.95	108.0795	14	166.75
p13	17	29	13	6.580274	1282.5	1740.01	1063.85	263.6154	13	228.58
p14	11	12	10	1	880.97	956.02	816.36	56.34256	8	73.07
p15	12	14	10	1.48324	1009.8	1229.67	802.3	169.3853	8	115.54
p16	10	10	9	0.547723	1016.5	1075.55	927.24	62.06932	-	-
p17	15	22	10	5.176872	1428.3	1870.05	900.63	475.283	6	141.95
p18	9	10	8	0.83666	847.12	936.08	740.73	77.79123	8	33.91
p19	15	16	14	1	1061.1	1329.07	972.18	151.1364	12	1589.69
p20	24	24	24	0	1897.3	2092.44	1771.98	126.9649	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Satellite										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	10	10	8	0.894427	973.13	1215.52	853.74	150.599	8	12.94
p11	10	12	9	1.5	1022.0	1244.18	877.21	158.7504	8	12.87
p12	22	22	22	0	1420.4	1541.21	1337.82	76.61673	14	166.75
p13	14	16	13	1.30384	1506.6	1629.09	1326.17	120.871	13	228.58
p14	10	11	9	0.894427	1485.6	1595.12	1351.19	96.44537	8	73.07
p15	9	10	9	0.547723	1148.4	1203.02	1020.68	133.6091	8	115.54
p16	8	9	8	0.547723	1364.4	1498.78	1211.21	105.7976	-	-
p17	13	18	10	3.271085	1503.2	1712.71	1307.1	166.3884	6	141.95
p18	10	9	10	0.447214	1333.9	1464.13	1200	112.8392	8	33.91
p19	14	17	13	1.516575	1374.7	1545.33	1232.96	115.4549	12	1589.69
p20	24	24	24	0	2468.1	2548.99	2428.34	47.50637	-	-

Στα προβλήματα Satellite όπως και προηγουμένως, παρατηρείται πως όταν το ποσοστό των νέων στόχων είναι χαμηλό ο LAMA αποτυγχάνει να παράξει δράσεις οι οποίες θα βοηθήσουν τον SatPlan να φθάσει σε ένα πλάνο σε πιο γρήγορο χρονικό διάστημα. Αυτό φαίνεται από τους τρεις πίνακες όταν το ποσοστό αυτό είναι στο 50%. Το γεγονός αυτό όμως αλλάζει αν τα νέα προβλήματα έχουν το 60% του αριθμού των αρχικών στόχων. Στους συγκεκριμένους πίνακες φαίνεται καθαρά πως τόσο η ποιότητα της λύσης όσο και ο χρόνος εκτέλεσης υπερέχει σε σύγκριση με το προηγούμενο ποσοστό του 50%. Επίσης παρατηρείται πως όταν ο αριθμός των υποπροβλημάτων είναι στο 15, ο LamSat επιτυγχάνει το μικρότερο μήκος λύσης ενώ όταν ο αντίστοιχος αριθμός είναι 5 σημειώνονται οι μικρότεροι χρόνοι εκτέλεσης. Επίσης στο πρόβλημα με τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα (19) ο LamSat επιτυγχάνει καλύτερο χρόνο εκτέλεσης από τον SatPlan ενώ η διαφορά του αριθμού επιπέδων είναι πολύ μικρή. Για τα υπόλοιπα προβλήματα ο SatPlan υπερέχει το οποίο είναι πολύ λογικό αφού δεν χρειάζεται μεγάλο χρόνο να επιλυθούν. Τέλος βλέπουμε πως όταν ποσοστό είναι 75% και τα νέα υποπροβλήματα 5 παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με το συνδυασμό του 60% 5 ενώ το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και για τους συνδυασμούς 60% 15 και 75 %15.

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	12	12	12	0	5.39	6.87	4.2	1.204919	11	0.56
p02	14	14	14	0	11.25	13.37	8.93	2.071058	14	1.77
p03	16	16	16	0	45.34	54.16	35.1	8.537551	16	8.98
p04	18	18	18	0	369.37	419.22	316.76	44.22656	18	23.22
p05	19	19	19	0	455.35	472.98	442.37	14.33415	19	85.42
p06	23	24	23	0.447214	517.53	566.66	487.72	34.3723	23	292.06
p07	19	19	19	0	427.27	454.65	411.17	18.89621	18	37.68
p08	19	19	19	0	563.57	616.93	530.12	33.60854	19	176.60
p09	26	27	23	1.732051	789.6	854.04	649.97	82.78954	21	292.88
p10	30	33	26	2.863564	994.31	1208.88	771.04	168.5838	26	2034.10
p11	33	34	32	1	2660.7	2898.88	2210.75	271.9919	-	-
p14	34	35	33	0.83666	3934.7	4606.41	3219.69	677.7892	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	12	12	12	0	9.86	14.23	7.16	3.691765	11	0.56
p02	14	14	14	0	19.54	26.79	14.57	6.167756	14	1.77
p03	16	16	16	0	77.09	95.63	60.19	16.83974	16	8.98
p04	18	18	18	0	557.75	623.65	513.81	56.16605	18	23.22
p05	19	19	19	0	695.83	728.78	675.34	24.62131	19	85.42
p06	23	24	23	0.447214	760.35	812.72	722.52	43.70963	23	292.06
p07	19	19	19	0	667.85	704.87	641.41	25.97596	18	37.68
p08	19	19	19	0	845.68	892.42	805.16	31.8657	19	176.60
p09	25	30	23	2.880972	1362.9	1370.55	945.9	311.2007	21	292.88
p10	29	30	27	1.414214	1362.9	1592.69	1260.42	140.0629	26	2034.10
p11	32	34	31	1.140175	2989.1	3322.28	2552.08	362.6304	-	-
p14	33	34	33	0.547723	4033.3	4598.35	3621.76	446.1198	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	12	12	12	0	12.7	18.89	10.86	3.464957	11	0.56
p02	14	14	14	0	26.84	35.91	20.79	6.725183	14	1.77
p03	16	16	16	0	91.32	127.86	76.42	20.89742	16	8.98
p04	18	18	18	0	729.39	818.95	664.65	66.27703	18	23.22
p05	19	19	19	0	917.7	948.04	899.44	20.6193	19	85.42
p06	23	23	23	0	971.85	1025.39	945.91	31.06713	23	292.06
p07	19	19	18	0.547723	886.05	938.95	863.84	30.96563	18	37.68
p08	19	19	19	0	1124.1	1240.89	1070.69	72.74095	19	176.60
p09	23	25	23	0.894427	1277.6	1421.75	1234.89	223.9741	21	292.88
p10	29	30	26	1.095445	1546.3	1725.72	1399.94	143.128	26	2034.10
p11	32	34	31	1.224745	3216.1	3675.11	2869.44	291.3398	-	-
p14	34	35	33		4504.6	5123.9	4177.84	380.177	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	12	12	12	0	4.79	6.66	4.14	1.056707	11	0.56
p02	14	14	14	0	9.25	9.75	8.59	0.418234	14	1.77
p03	16	17	16	0.447214	63.07	73.28	52.73	8.274523	16	8.98
p04	18	18	18	0	341.89	362.79	323.71	14.04113	18	23.22
p05	19	19	19	0	445.25	454.43	440.77	5.743334	19	85.42
p06	24	24	23	0.547723	505.43	516.29	490.32	10.69672	23	292.06
p07	19	19	19	0	418.79	432.58	409.66	8.55902	18	37.68
p08	19	19	19	0	566.15	587.33	539.52	22.83824	19	176.60
p09	23	23	23	0	648.69	768.65	661.25	55.27664	21	292.88
p10	29	30	27	1.30384	1136.2	1365.2	924.64	162.3104	26	2034.10
p11	32	33	31	1.414214	2391.7	3017.63	1971.41	395.957	-	-
p14	34	35	33	1.095445	3476.3	3828.22	3220.41	226.6527	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	12	12	12	0	8.38	9.45	7.34	0.750513	11	0.56
p02	14	14	14	0	19.5	26.79	15.43	4.713479	14	1.77
p03	16	16	16	0	116.92	160.85	103.39	24.60395	16	8.98
p04	18	18	18	0	544.02	590.67	515.01	28.82518	18	23.22
p05	19	19	19	0	685.54	717	668.04	19.27254	19	85.42
p06	24	24	23	0.547723	765.08	839.51	729.84	43.29221	23	292.06
p07	19	19	19	0	664.44	690.38	643.08	21.32306	18	37.68
p08	19	19	19	0	856.46	927.87	814.49	46.83804	19	176.60
p09	24	26	23	1.414214	1029.3	1083.18	949.69	57.57956	21	292.88
p10	30	30	28	0.894427	1272.8	1389.68	1115.2	114.8141	26	2034.10
p11	32	33	29	1.732051	2845.5	3197.43	2245.23	369.2736	-	-
p14	34	35	33	1	3991.4	4877.16	3593.67	514.1614	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	12	12	12	0	13.36	16.76	10.29	3.420358	11	0.56
p02	14	14	14	0	26.69	36.02	21.92	6.15677	14	1.77
p03	16	16	16	0	172.21	210.18	145.27	23.70803	16	8.98
p04	18	18	18	0	745.76	850.03	684.17	63.41211	18	23.22
p05	19	19	19	0	914.37	964.02	892.73	30.71785	19	85.42
p06	23	23	23	0	994.81	1081.03	952.53	53.90639	23	292.06
p07	19	19	18	0.447214	903.19	940.25	866.64	31.95074	18	37.68
p08	19	19	19	0	1152.1	1229.97	1095.47	55.39874	19	176.60
p09	23	25	23	0.894427	1310.3	1419.76	1229.64	79.30751	21	292.88
p10	29	31	26	2	1579.0	1782.35	1441.45	136.0488	26	2034.10
p11	32	33	29	1.67332	3096.8	3220.85	2672.25	309.9743	-	-
p14	34	35	33	1.095445	4387.5	5066.13	3954.6	490.6279	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	11	11	11	0	6.16	8.32	5.14	1.270228	11	0.56
p02	16	16	16	0	11.71	14.48	10.24	1.637736	14	1.77
p03	16	16	16	0	65.02	69.49	60.14	3.682639	16	8.98
p04	18	18	18	0	378.78	410.13	367.78	17.61946	18	23.22
p05	19	19	19	0	460.18	475.69	449.76	11.21144	19	85.42
p06	24	24	23	0.547723	519.75	536.08	504.83	12.71471	23	292.06
p07	19	19	19	0	437.26	449.15	421.33	11.03695	18	37.68
p08	18	18	18	0	578.36	607.4	569.9	16.28689	19	176.60
p09	24	26	23	1.341641	694.77	749.14	664.6	37.21672	21	292.88
p10	28	30	26	1.414214	905.3	961.48	790.86	69.35388	26	2034.10
p11	33	34	32	0.83666	2493.8	2709.36	2308.23	182.8334	-	-
p14	34	35	34	0.547723	3692.1	3945.47	3478.69	170.3808	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	11	11	11	0	12	16.09	8.9	3.371568	11	0.56
p02	15	15	15	0	25.24	30.77	19.81	5.119351	14	1.77
p03	16	16	16	0	117.74	131.18	99.65	15.76421	16	8.98
p04	18	18	18	0	616.24	633.04	571.56	25.77901	18	23.22
p05	19	19	19	0	701.68	730.58	678.34	20.94921	19	85.42
p06	23	24	23	0.547723	755.97	778.43	727.16	19.91311	23	292.06
p07	19	19	19	0	662.81	695.61	639.04	23.67454	18	37.68
p08	19	19	19	0	862.17	912.58	807.98	46.53075	19	176.60
p09	23.4	25	23	0.894427	991.09	1049.9	932.26	55.17899	21	292.88
p10	29	30	27	1.095445	1288	1430.27	1221.92	112.3432	26	2034.10
p11	32	33	30	1.140175	2815.6	3233.17	2371.4	369.1524	-	-
p14	34	35	33	0.894427	4284.1	5097.92	3637.42	575.7142	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Trucks										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	11	11	11	0	16.25	18.32	12.97	2.480659	11	0.56
p02	15	15	15	0	31.89	36.93	26.62	4.800675	14	1.77
p03	16	16	16	0	169.33	222.41	143.86	30.63864	16	8.98
p04	18	18	18	0	820.24	844.5	792.73	22.7799	18	23.22
p05	19	19	19	0	928.48	957.02	904.31	23.56223	19	85.42
p06	23	23	23	0	990.12	1047.88	950.15	39.70752	23	292.06
p07	19	19	18	0.547723	897.06	951.63	858.14	39.1882	18	37.68
p08	19	19	19	0	1111.3	1213.65	1047.69	61.84348	19	176.60
p09	24	25	23	1.095445	1340.7	1486.69	1206.21	112.7213	21	292.88
p10	27	28	26	1.095445	1509.0	1669.75	1393.2	115.8738	26	2034.10
p11	32	33	30	1.30384	3214.3	3807.12	2802.91	435.6503	-	-
p14	34	35	34	0.707107	4291.9	4731.46	3860.07	399.3096	-	-

Στα προβλήματα Trucks παρατηρούμε από τους πίνακες ότι τα αποτελέσματα για όλους τους συνδυασμούς όσο αφορά τη ποιότητα της λύσης είναι σχεδόν τα ίδια. Το γεγονός αυτό παρατηρείται και όταν τα νέα υποπροβλήματα δεν προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό το αρχικό δηλαδή όταν το ποσοστό είναι στο 50%. Αυτό συμβαίνει γιατί τα αρχικά προβλήματα έχουν μικρό αριθμό στόχων και έτσι υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που δημιουργούνται υποπροβλήματα με ίδιους στόχους και ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των νέων υποπροβλημάτων είναι μεγάλος. Το φαινόμενο αυτό βεβαιώνεται και από τις τυπικές αποκλίσεις οι περισσότερες από τις οποίες έχουν τιμή 0. Παρόμοια κατάσταση συμβαίνει όπως είναι λογικό και στους χρόνους εκτέλεσης με λίγο μεγαλύτερες διαφορές. Ο συνδυασμός που επιτυγχάνει τους πιο μικρούς χρόνους εκτέλεσης και τα καλύτερα πλάνα είναι ο 60% 15. Το μήκος της κάθε λύσης που καταγράφει ο SatPlan στο προηγούμενο συνδυασμό είναι σχεδόν το ίδιο χωρίς όμως αυτό να συμβαίνει και για τους χρόνους εκτέλεσης εκτός από τη περίπτωση του προβλήματος 10 που έχει την μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από τα υπόλοιπα και όπου ο LamSat σημειώνει καλύτερο χρόνο. Τέλος με τη μέθοδο αυτή επιλύονται 2 δύσκολα προβλήματα που ο SatPlan αδυνατεί να επιλύσει.

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	6	6	6	0	3.606	4.95	3.2	0.753611	5	0.22
p02	11	11	11	0	256.69	320.34	224.09	40.05882	8	2.38
p03	9	10	9	0.447214	732.66	759.64	715.87	20.13714	7	1.33
p04	15	16	15	0.447214	847.34	881.5	814.3	30.73979	13	32.88
p05	22	22	22	0	1030.9	1087.95	994.16	38.424	16	385.90
p06	21	21	21	0	1129.9	1228.5	1089.23	57.54773	15	337.09
p07	32	34	29	274.4761	1988.5	2354.34	1635.23	274.4761	-	-
p08	36	38	36	0.894427	3015.7	3542.21	2675.14	394.501	-	-
p09	30	31	29	0.707107	2314.3	2533.23	2142.07	150.8139	-	-
p12	28	29	28	0.447214	2774.1	3083.26	2477.6	287.1981	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	6	6	6	0	6.148	8.35	4.84	1.634188	5	0.22
p02	11	11	11	0	304.33	386.95	261.39	49.11105	8	2.38
p03	9	9	9	0	1291.3	1352.5	1219.76	48.31477	7	1.33
p04	15	15	15	0	1391.6	1419.01	1353.86	31.26297	13	32.88
p05	22	22	22	0	1607.2	1633.9	1592.82	17.43002	16	385.90
p06	21	21	21	0	1724.0	1831.67	1685.54	62.20196	15	337.09
p07	31	32	28	1.788854	2457.0	2758.23	2347.4	172.7006	-	-
p08	36	36	36	0	3427.3	3855.09	3204.42	286.5577	-	-
p09	29	30	28	1.095445	2956.9	3198.17	2720.8	180.3875	-	-
p12	28	28	28	0	3541.7	3892.69	3245.42	275.7667	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	6	6	6	0	8.702	11.18	6.82	2.105474	5	0.22
p02	11	11	11	0	382.27	456.09	327.37	48.8699	8	2.38
p03	9	9	9	0	1864.4	1927.87	1742.96	76.33769	7	1.33
p04	15	15	15	0	1915.6	1991.47	1858.77	57.09218	13	32.88
p05	22	22	22	0	2229.2	2270.29	2194.65	30.13021	16	385.90
p06	21	21	21	0	2325.0	2408.46	2294.85	47.13311	15	337.09
p07	32	32	32	0	3073.9	3321.08	2982.12	143.6071	-	-
p08	37	37	36	0.547723	4385.5	4911.93	4058.38	372.8694	-	-
p09	28	29	28	0.447214	3538.8	4167.39	3238.59	388.6586	-	-
p12	28	28	28	0	4135.1	4377.65	3828.52	280.1383	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	6	6	6	0	4.33	5.4	3.11	1.093641	5	0.22
p02	11	11	11	0	258.85	328.32	232.07	41.37435	8	2.38
p03	9	9	9	0	765.88	820.09	722.06	46.90547	7	1.33
p04	15	16	15	0.547723	821.44	847.52	806.75	15.3467	13	32.88
p05	22	22	22	0	1017.4	1074.46	988.66	33.74496	16	385.90
p06	21	21	21	0	1121.1	1222.57	1076.62	59.84805	15	337.09
p07	31	33	28	1.949359	1819.8	2040.48	1671.82	179.012	-	-
p08	37	38	36	1.095445	3037.0	3580.79	2732.5	326.0202	-	-
p09	30	31	29	0.83666	2224.3	2400.27	2114.17	112.0282	-	-
p12	28	29	28	8	2488.0	2614.76	2412.25	110.449	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	6	6	6	0	6.208	8.3	4.76	1.766655	5	0.22
p02	11	11	11	0	322.89	426.51	273.83	65.19319	8	2.38
p03	9	9	9	0	1277.7	1290.86	1264.25	11.18135	7	1.33
p04	15	15	15	0	1412.9	1454.59	1349.47	39.41253	13	32.88
p05	22	22	22	0	1615.0	1636.34	1595.47	19.66373	16	385.90
p06	21	21	21	0	1737.4	1796.98	1682.01	46.6671	15	337.09
p07	31	32	28	1.788854	2481.6	2656.95	2343.52	137.9085	-	-
p08	36	36	36	0	3473.3	3934.91	3170.18	292.1542	-	-
p09	29	30	28	1	2787.6	3057.85	2514.2	246.9146	-	-
p12	28	28	28	0	3563.1	3894.98	3235.25	336.7416	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	6	6	6	0	9.022	11.12	6.43	2.335299	5	0.22
p02	11	11	11	0	361.63	419.81	334.86	33.48964	8	2.38
p03	9	9	9	0	1795.1	1846.15	1694.1	62.22307	7	1.33
p04	15	15	15	0	1950.8	2026.59	1910.51	47.14271	13	32.88
p05	22	22	22	0	2231.6	2262.4	2207.86	28.08961	16	385.90
p06	21	21	21	0	2326.9	2373.56	2292.77	30.16161	15	337.09
p07	32	32	32	0	3130.0	3371.52	2967.8	148.1939	-	-
p08	37	38	36	0.894427	4225.7	4799.48	3854.96	351.1702	-	-
p09	29	30	28	0.894427	3459.7	3800.14	3168.4	278.7602	-	-
p12	28	28	28	0	4153.8	4600.11	3766.49	370.7534	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	5	5	5	0	7.284	8.87	6.25	1.227428	5	0.22
p02	11	11	11	0	489.01	574.43	439.92	55.73413	8	2.38
p03	10	10	9	0.547723	843.88	846.5	842.27	1.633025	7	1.33
p04	15	15	14	0.547723	861.45	864.19	857.53	2.462072	13	32.88
p05	21	22	20	1.095445	992.88	1077.11	955.88	50.11726	16	385.90
p06	21	21	21	0	1109.1	1163.52	1071.46	47.84125	15	337.09
p07	35	37	28	4.024922	2355.2	2764.22	1624.73	450.046	-	-
p08	37	39	36	1.643168	2992.5	3260.42	2484.55	305.0447	-	-
p09	31	31	31	0	2252.2	2527.22	2060.58	176.4903	-	-
p12	29	29	29	0	2980.7	3649.17	2735.4	380.8548	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	5	5	5	0	14.004	18.26	10.97	3.373808	5	0.22
p02	11	11	11	0	808.33	875.68	663.5	96.20892	8	2.38
p03	10	10	9	0.547723	1445.2	1447.85	1441.5	2.710061	7	1.33
p04	14	15	14	0.547723	1463.1	1468.32	1457.34	4.48704	13	32.88
p05	20	20	20	0	1579.6	1629.1	1552.68	30.11537	16	385.90
p06	21	21	21	0	1710.8	1785.13	1658.97	50.46458	15	337.09
p07	37	37	37	0	3213.7	3510.78	2828.04	301.8758	-	-
p08	34	36	32	1.48324	3339.4	3993.85	2814.74	474.456	-	-
p09	31	31	30	0.447214	2970.7	3318.05	2567.69	290.7626	-	-
p12	29	29	29	0	3470.7	3847.96	3216.08	266.7222	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Freecell										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p01	5	5	5	0	22.276	26.65	16.15	5.220017	5	0.22
p02	11	11	11	0	1154.6	1361.82	992.67	135.3315	8	2.38
p03	10	10	9	0.547723	2044.5	2049.05	2038.89	3.789806	7	1.33
p04	14	15	14	0.447214	2062.4	2073.19	2058.47	6.182465	13	32.88
p05	20	20	20	0	2175.7	2215	2159.72	22.36599	16	385.90
p06	21	21	21	0	2328.3	2412.9	2280.72	53.49168	15	337.09
p07	37	37	37	0	3722.3	3981.75	3548.54	216.7433	-	-
p08	33	34	31	1.224745	3751.4	4145.71	3449.56	301.4904	-	-
p09	31	31	30	0.447214	3614.7	3903.06	3303.76	288.1372	-	-
p12	29	29	29	0	4238.3	4707.18	3880.42	344.941	-	-

Όπως και στη κατηγορία Trucks έτσι και στη κατηγορία Freecell δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των διαφόρων συνδυασμών όσο αφορά τη ποιότητα των πλάνων των προβλημάτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται και πάλι στο μικρό αριθμό των στόχων που αποτελούνται τα αρχικά προβλήματα καθιστώντας αδύνατη τη δημιουργία αρκετών νέων υποπροβλημάτων με διαφορετική τελική κατάσταση. Η τιμή της τυπικής απόκλισης για τους περισσότερους πίνακες έχει τιμή 0 πράγμα το οποίο πιστοποιεί τη προηγούμενη παρατήρηση. Παρόλα αυτά ο συνδυασμός που δίνει τη καλύτερη λύση είναι ο 60% 15 ενώ τους καλύτερους χρόνους εκτέλεσης ο 60% 15. Παρόμοια όμως αποτελέσματα επιτυγχάνονται και όταν οι συνδυασμοί είναι 75% 5 και 75% 15. Σε σύγκριση με τον SatPlan οι διαφορές στη κατηγορία αυτή για τον αριθμό των επιπέδων είναι μεγαλύτερες από τη προηγούμενη κατηγορία. Για τους χρόνους εκτέλεσης δεν μπορεί να εξαχθεί κάποια παρατήρηση αφού όλα τα προβλήματα απαιτούν μικρό χρόνο εκτέλεσης ενώ ο LamSat χρησιμοποιείται κυρίως για σύγκριση με προβλήματα όπου παίρνουν μεγάλο χρονικό διάστημα για να επιλυθούν.

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	17	18	17	0.57735	1336	1419.3	1223.57	101.0642	15	2.51
p11	19	22	18	1.788854	1444.2	1574.1	1207.97	147.1915	17	86.29
p12	26	29	24	2	1508.2	1641.19	1386.65	112.0038	19	1904.08
p13	23	27	20	2.915476	1435.1	1569.25	1312.9	104.1089	18	430.44
p14	25	28	22	2.387467	1474.9	1592.71	1321.62	118.8256	-	-
p15	23	25	21	1.581139	1445.6	1598.05	1360	89.928	18	32.71
p16	26	28	25	1.095445	1438.5	1484.43	1399.08	40.02184	21	525.32
p17	32	32	31	0.547723	2260.7	3563.8	1725.41	776.1286	21	655
p18	30	32	28	1.67332	1892.2	3182.71	1524.34	722.0434	-	-
p19	26	29	24	2.073644	1487.3	1593.62	1341.11	95.35908	-	-
p20	28	30	26	1.581139	1685.6	2806.14	1325.02	629.8682	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	17	18	16	0.816497	2424.2	2508.95	2267.78	110.4056	15	2.51
p11	20	21	18	1.095445	2593.7	2734.08	2457.93	114.1377	17	86.29
p12	22	23	19	1.788854	2550.3	2638.58	2422.17	85.32823	19	1904.08
p13	21	24	19	2.345208	2509.9	2670.21	2384.85	109.4858	18	430.44
p14	21	25	20	2.380476	3519.1	6370.79	2465.97	1905.943	-	-
p15	22	24	20	1.516575	2575.8	2805.68	2441.39	146.7019	18	32.71
p16	25	26	23	1.30384	2495.7	2686.59	2362.7	136.8812	21	525.32
p17	28	31	25	3	3761.0	7104.63	2411.37	2236.397	21	655
p18	28	34	24	4.349329	2814.4	3633.64	2449.18	550.0233	-	-
p19	22	23	22	0.547723	2452.8	2653.13	2319.87	131.0832	-	-
p20	27	28	26	1	3003.9	4635.57	2349.59	936.3424	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	16	17	16	0.547723	3539.5	3680.97	3412.54	104.6016	15	2.51
p11	21	22	20	1.154701	3478.4	3835.34	281.3403	281.3403	17	86.29
p12	21	24	19	1.923538	3690.9	3842.85	117.4987	117.4987	19	1904.08
p13	20	25	18	2.774887	3667.9	3817.88	125.5053	125.5053	18	430.44
p14	20	22	19	1.290994	4110.3	5049.09	704.7604	704.7604	-	-
p15	22	24	20	1.516575	3686.4	3951.26	157.2706	157.2706	18	32.71
p16	23	24	22	0.83666	3558.0	3874.74	198.4925	198.4925	21	525.32
p17	25	32	23	4.5	3759.6	4393.25	464.2764	464.2764	21	655
p18	26	28	23	2.302173	4210.5	5850.64	938.7822	938.7822	-	-
p19	23	24	22	0.894427	3593.5	3916.42	205.8821	205.8821	-	-
p20	27	28	26	1.154701	3997.5	4029.83	38.31921	38.31921	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	17	20	16	1.516575	1335.3	1522.91	1225.07	113.3033	15	2.51
p11	20	24	18	2.516611	1395.5	1505.41	1313.52	81.05696	17	86.29
p12	21	22	21	0.57735	1374.0	1376.6	1369.82	3.71453	19	1904.08
p13	21	22	19	1.414214	1385.4	1487.28	1338.38	63.88199	18	430.44
p14	23	27	21	2.345208	1742.1	2970.94	1401.34	687.5524	-	-
p15	23	25	21	1.81659	1452.1	1515.05	1411.5	44.02013	18	32.71
p16	26	27	25	1.095445	1408.9	1464.23	1314.38	67.95557	21	525.32
p17	28	32	24	3.286335	1524.0	1804.16	1386.57	161.7669	21	655
p18	27	29	26	1.5	1487.7	1737.09	1365.02	170.8986	-	-
p19	26	31	23	3.162278	1474.2	1662.79	1361.82	124.5106	-	-
p20	27	29	26	2.12132	1810.4	2196.1	1424.88	545.3349	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	17	18	16	0.816497	2446.9	2508.39	2396.34	48.88074	15	2.51
p11	19	20	18	0.957427	2515.0	2593.94	2419.96	89.25745	17	86.29
p12	21	26	20	2.607681	2532.9	2742.09	2446.04	122.6407	19	1904.08
p13	20	25	18	2.915476	2501.5	2662.43	2417.08	107.8131	18	430.44
p14	22	30	20	4.38178	2561.4	2822	2428.03	152.2942	-	-
p15	22	24	21	1.341641	2562.4	2701.69	2487.61	88.66514	18	32.71
p16	24	25	23	0.894427	2502.6	2771.4	2364.28	168.0175	21	525.32
p17	26	31	22	4.725816	2673.7	2947.42	2412.29	267.7743	21	655
p18	26	28	25	1.140175	2584.0	2919.33	2474.49	188.109	-	-
p19	24	30	22	3.361547	2482.9	2960.04	2351.81	267.0041	-	-
p20	26	27	26	0.5	2831.1	3733.97	2470.22	605.4735	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	17	19	15	1.707825	3547.6	3801.65	3375.43	183.4706	15	2.51
p11	20	20	18	0.894427	3723.3	3926.54	3456.45	172.4829	17	86.29
p12	21	22	19	1.140175	3726.3	3900.56	3602.28	124.6788	19	1904.08
p13	19	20	19	0.547723	3668.5	3796.58	3538.68	95.98249	18	430.44
p14	21	23	20	1.732051	3701.1	3805.1	3565.85	108.8153	-	-
p15	21	22	20	0.707107	3706.7	3787.49	3596.04	100.4412	18	32.71
p16	24	26	23	1.095445	3731.9	3894.37	3497.72	183.0519	21	525.32
p17	23	25	22	1.258306	3705.0	3873.32	3457.38	202.2061	21	655
p18	25	27	24	1.224745	3718.6	3885.56	3545.47	126.0301	-	-
p19	23	24	22	1	3686.1	3845.03	3374.23	185.505	-	-
p20	26	26	26	0	3739.4	3739.44	3739.44	0	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	18	20	17	1.30384	1385.7	1513.7	1253.73	110.5132	15	2.51
p11	19	22	18	1.892969	1422.4	1538.76	1350.37	82.98854	17	86.29
p12	22	25	20	2.081666	1415.6	1514.51	1346.19	72.71058	19	1904.08
p13	21	21	20	0.547723	1400.4	1555.87	1279.95	110.633	18	430.44
p14	24	30	20	3.962323	1470.3	1635.32	1366.05	99.68098	-	-
p15	22	25	20	1.923538	1431.6	1645.36	1333.54	122.9275	18	32.71
p16	28	31	25	2.302173	1529.4	1717.47	1397.67	122.2114	21	525.32
p17	25	31	22	3.420526	1466.3	1672.48	1372.57	122.336	21	655
p18	29	33	26	3.114482	2030.0	3617.87	1487.8	893.5347	-	-
p19	24	26	23	1.224745	1463.1	1532.65	1313.87	90.63712	-	-
p20	26	26	26	0	1698.0	1986.05	1409.96	407.3571	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	17	19	16	1.290994	2468.8	2630.76	2381.57	110.7237	15	2.51
p11	19	20	18	1.095445	2590.9	2648.44	2506.89	52.72795	17	86.29
p12	20	21	19	0.83666	2598.4	2685.22	2513.94	77.41993	19	1904.08
p13	19	20	19	0.447214	2526.0	2609.44	2431.45	78.82674	18	430.44
p14	20	21	19	0.83666	2619.8	2933.66	2396.63	206.4457	-	-
p15	21	22	20	1.095445	2524.2	2622.51	2438.06	65.51737	18	32.71
p16	24	27	23	1.732051	2487.5	2623.16	2325.32	113.4304	21	525.32
p17	23	23	23	0	2554.3	2584.85	2498.66	48.32286	21	655
p18	27	32	25	3.193744	2715.6	2951.75	2498.14	190.2738	-	-
p19	23	24	22	0.83666	2514.6	2608.66	2393.1	85.65234	-	-
p20	25	26	25	0.707107	2653.3	2952.08	2354.64	422.4539	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Pathways										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	17	20	16	1.516575	3588.6	3856.62	3424.61	164.6171	15	2.51
p11	19	22	18	1.788854	3641.1	3775.95	3573.45	82.2275	17	86.29
p12	20	21	19	0.707107	3690.5	3864.97	3512.69	147.3105	19	1904.08
p13	19	22	18	1.643168	3622.1	3888.52	3422.7	190.8428	18	430.44
p14	20	21	19	1.095445	3694.1	3784.41	3491.55	118.3633	-	-
p15	21	23	19	1.516575	3767.6	3945.81	3581.49	159.2656	18	32.71
p16	23	25	22	1.140175	3686.1	3907.02	3422.72	188.4788	21	525.32
p17	24	26	21	1.81659	3750.4	4016.63	3512.5	212.7606	21	655
p18	25	28	23	1.949359	3831.3	3923.92	3700.64	111.161	-	-
p19	22	22	21	0.447214	3509.9	3793.1	3328.94	187.9619	-	-
p20	25	27	25	1.154701	4643.1	6165.37	3566.46	1355.521	-	-

Στα προβλήματα Pathways σε αντίθεση με τα Trucks και Freecell παρατηρούμε διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε συνδυασμό και αυτό γιατί το κάθε πρόβλημα αποτελείται από μεγάλο αριθμό στόχων επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία αρκετών νέων υποπροβλημάτων. Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως όταν ο αριθμός των νέων προβλημάτων είναι 15, ανεξάρτητα από το ποσοστό, επιτυγχάνονται τα μικρότερης ποιότητας πλάνα ενώ από την άλλη όταν ο αριθμός αυτό είναι 5 βλέπουμε τους καλύτερους χρόνους εκτέλεσης. Ο συνδυασμός όμως που φαίνεται ότι υπερνικά τους υπόλοιπους όσο αφορά την ποιότητα λύσης είναι ο 75% 15 ενώ ο αντίστοιχος για το χρόνο εκτέλεσης ο 75 5. Συγκρίνοντας επίσης το πλάνο του SatPlan για κάθε πρόβλημα με τον συνδυασμό 75 15 παρατηρούμε πως ο SatPlan υπερέχει αλλά με πολύ μικρές διαφορές, με τη μεγαλύτερη να φθάνει στα 3 επίπεδα. Για τους χρόνους εκτέλεσης ακόμα βλέπουμε πως και πάλι ο SatPlan σημειώνει καλύτερους από τον LamSat εκτός από το πρόβλημα 12 όπου απαιτεί το μεγαλύτερο χρόνο από τα υπόλοιπα. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα βλέπουμε πως οι συνδυασμοί 50% 15 60% 15 και 75% 15 το επιλύουν πιο σύντομα από ότι ο SatPlan. Τέλος βλέπουμε πως ο LamSat έχει επιλύσει 4 προβλήματα περισσότερα από ότι ο SatPlan.

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	24	24	23	0.5	881.42	883.88	876.25	3.485809	22	206.62
p11	23	25	22	1.290994	883.11	891.84	878.16	6.474046	21	176.61
p12	25	27	24	1.5	932.39	973.64	912.11	28.34439	21	312
p13	21	22	21	0.5	922.27	926.72	917.38	4.533037	19	186.12
p14	30	31	29	0.816497	1249.9	1323.24	1160.47	69.72047	-	-
p15	37	40	34	3.05505	2380.3	3638.75	1527.07	1112.585	-	-
p16	30	31	30	0.5	1584.5	1731.47	1485.84	113.9128	-	-
p17	34	35	34	0.57735	3277.6	4165.19	2466.91	705.4113	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	23	23	0	1478.1	1481.59	1475.62	2.742687	22	206.62
p11	22	22	22	0	1478.7	1494.16	1471.86	10.37489	21	176.61
p12	25	27	24	1.290994	1534.7	1549.73	1519.55	12.65023	21	312
p13	20	21	20	0.57735	1519.1	1529.02	1512.96	7.263504	19	186.12
p14	29	29	28	0.5	2329.2	2630.44	2151.86	210.7129	-	-
p15	35	35	34	0.57735	4208.2	6394.46	3028.21	1895.316	-	-
p16	29	30	29	0.57735	3614.2	4991.49	2914.52	972.6736	-	-
p17	33	33	32	0.5	6388.8	9560.34	4871.41	2155.024	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 50% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	24	23	0.5	2082.9	2092.28	2077.16	6.71361	22	206.62
p11	22	22	22	0	2070.2	2076.81	2067.6	4.378206	21	176.61
p12	25	27	24	1.414214	2124.0	2150.47	2103.87	21.3087	21	312
p13	20	21	20	0.5	2114.0	2125.94	2104.75	8.864147	19	186.12
p14	28	29	28	0.57735	3203.0	3827.86	2754.85	460.4682	-	-
p15	34	34	34	0	7902.7	7902.78	7902.78	0	-	-
p16	29	30	29	0.707107	4402.6	4597.53	4207.79	275.5878	-	-
p17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	24	23	0.5	881.23	889.07	876.34	5.469095	22	206.62
p11	23	24	22	0.816497	879.71	882.05	876.36	2.445417	21	176.61
p12	27	29	24	2.061553	946.30	988.74	914.44	31.61561	21	312
p13	21	22	21	0.5	925.41	935.92	913.99	10.66154	19	186.12
p14	29	30	28	0.957427	1242.9	1355.93	1118.85	97.86907	-	-
p15	38	40	36	2.061553	3364.2	6705.38	1961.33	2242.28	-	-
p16	30	31	30	0.5	2180.3	3355.67	1564.67	802.7439	-	-
p17	34	35	34	0.5	3631.3	7296.21	2210.53	2453.136	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	23	23	0	1484.3	1489.06	1476.06	5.71949	22	206.62
p11	22	22	22	0	1471.1	1477.22	1468.63	4.085057	21	176.61
p12	24	26	23	1.414214	1511.3	1525.32	1502.11	9.949789	21	312
p13	20	20	20	0	1513.7	1518.92	1509.89	4.315301	19	186.12
p14	29	29	28	0.5	2519.6	3352.24	1895.25	684.9773	-	-
p15	34	35	33	1	6158.3	7805.21	4008.33	1886.294	-	-
p16	30	30	30	0	2946.1	4022.84	2287.35	802.6471	-	-
p17	32	33	32	0.57735	6628.7	9337.91	4603.26	1982.841	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 60% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	23	23	0	2075.6	2080.61	2070.77	4.018436	22	206.62
p11	22	22	22	0	2067.8	2074.25	2064.44	4.390877	21	176.61
p12	24	25	22	1.414214	2124.0	2150.6	2099.03	21.13365	21	312
p13	20	20	20	0	2115.1	2117.81	2111.51	3.063696	19	186.12
p14	28	29	28	0.5	3062.9	3764.27	2579.19	502.6273	-	-
p15	33	34	33	0.707107	9130.5	10074.52	8186.55	1334.996	-	-
p16	30	30	29	0.5	4942.4	8465.21	3664.06	2350.839	-	-
p17	32	32	32	0	5087.5	5087.5	5087.5	0	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 5										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	24	23	0.5	880.65	884.37	873.35	5.002846	22	206.62
p11	24	28	22	2.708013	882.97	904.25	874.71	14.22916	21	176.61
p12	26	28	25	1.258306	929.75	949.3	914.66	14.59966	21	312
p13	20	21	20	0.57735	917.28	924.18	909.98	7.943641	19	186.12
p14	29	31	29	1	1475.4	1660.45	1313.69	170.052	-	-
p15	36	38	35	1.5	4116.7	5878.31	2786.01	1384.932	-	-
p16	30	31	30	0.57735	2080.1	3065.05	1684.5	660.5436	-	-
p17	34	34	33	0.5	2967.5	4715.35	2197.27	1173.241	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 10										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	23	23	0	1487.2	1491.84	1484.23	3.631541	22	206.62
p11	22	22	22	0	1470.0	1471.38	1468.23	1.316586	21	176.61
p12	25	26	23	1.258306	1518.7	1540.75	1498.74	17.29352	21	312
p13	20	20	20	0	1514.0	1518.5	1509.78	3.64458	19	186.12
p14	28	29	28	0.5	2505.0	3351.24	2069.4	580.4444	-	-
p15	34	34	34	0	5857.3	8475.96	4070.67	2317.488	-	-
p16	30	30	29	0.5	6605.7	8404.95	4340.89	1791.05	-	-
p17	32	33	32	0.5	4686.0	6856.4	3533.11	1505.611	-	-

Μέθοδος χρήσης υποσυνόλων στόχων – παράμετρος lama1										
Domain: Elevator										
Ποσοστό μείωσης της πολυπλοκότητας 75% Αριθμός νέων προβλημάτων 15										
Αριθμός Επιπέδων					Χρόνος εκτέλεσης (seconds)				SMP	
	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Μέσος	Μέγιστος	Ελάχιστος	Τυπική απόκλιση	Επίπεδο	Χρόνος Εκτέλεσης
p10	23	23	23	0	2082.4	2085.35	2077.84	3.579119	22	206.62
p11	22	23	22	0.5	2066.9	2071.45	2064.61	3.038578	21	176.61
p12	25	26	25	0.5	2122.4	2125.76	2113.86	5.720117	21	312
p13	20	20	20	0	2114.4	2121.81	2110.63	5.17914	19	186.12
p14	28	28	28	0	3397.5	4621.07	2587.58	902.4522	-	-
p15	34	34	34	0	7481.6	7481.67	7481.67	0	-	-
p16	30	31	29	0.957427	4980.3	5214.75	4757.31	230.831	-	-
p17	32	32	32	0	7661.4	7661.4	7661.4	0	-	-

Για την κατηγορία προβλημάτων Elevator οι διάφοροι συνδυασμοί μας δίνουν μερικώς διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό γιατί ο αριθμός των στόχων για κάποια από τα προβλήματα είναι αρκετός, ενώ για κάποια άλλα είναι μικρός. Βλέποντας τους πιο πάνω πίνακες ο συνδυασμός που σημειώνει τα μικρότερα μήκη λύσεων είναι ο 60% 5 ενώ ο αντίστοιχος για τους χρόνους εκτέλεσης είναι ο 60% 15. Συνοπτικά αν λάβουμε υπόψη και τους δύο παράγοντες τότε ο καλύτερος συνδυασμός είναι ο 60% 10. Επίσης, για την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ LamSat και SatPlan δεν μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες παρατηρήσεις λόγω του ότι οι χρόνοι που απαιτούνται για τα επιλυμένα προβλήματα του SatPlan είναι μικροί και έτσι υπερέχει σε μεγάλο βαθμό. Από την άλλη όμως βλέπουμε πως ο LamSat κατόρθωσε να επιλύσει 4 προβλήματα περισσότερα από τον SatPlan τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα από τη διπλωματική εργασία	100
7.2 Επεκτάσεις και Μελλοντική εργασία	107

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα από τη διπλωματική εργασία

Το πρόβλημα του προγραμματισμού δράσεων ξεκίνησε από πολύ παλιά και αποτελεί μέχρι και σήμερα ένα ενδιαφέρον θέμα προς έρευνα. Ο Προγραμματισμός Δράσης δεν ασχολείται απλά με την εύρεση μιας λύσης, αλλά με την εύρεση μιας αποδοτικής λύσης σε χρόνο. Δηλαδή μιας συγκεκριμένης ακολουθίας από δράσεις, οι οποίες όταν εφαρμοστούν να οδηγούν σε κάποιο στόχο, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το κόστος σε χρόνο και υλικό (πόροι του συστήματος). Οι διάφοροι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια αλλά και η ραγδαία και συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας, ήταν το έναυσμα για τα προβλήματα προγραμματισμού δράσης. Σημαντική ήταν και η συνεισφορά της τεχνητής νοημοσύνης, με την ανάπτυξη διάφορων αλγοριθμικών και ευρετικών μεθόδων που στοχεύουν στο να φτάσουν σε μια ικανοποιητική λύση.

Μέσα στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν αρχικά οι πρώτοι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για προβλήματα προγραμματισμού δράσης. Η επίλυση των προβλημάτων με αυτούς τους αλγορίθμους μπορεί να ξεκινούσε από την αρχική κατάσταση μέχρι να φτάσει στο στόχο (Forward state-space search) ή αντίστροφα (Backward state-space search). Τέτοιου είδους αλγόριθμοι ονομάζονται αλγόριθμοι προγραμματισμού δράσης με ολική διάταξη, αφού ο τρόπος με τον επιλύουν το

πρόβλημα χαρακτηρίζεται από γραμμικότητα, δηλαδή η κάθε επόμενη δράση σχετίζεται με την προηγούμενη. Ακολούθως αναπτύχθηκαν οι λεγόμενοι αλγόριθμοι προγραμματισμού δράσης με μερική διάταξη, καθώς και πολλά ευρετικά τα οποία έκαναν μια εκτίμηση της απόστασης της εκάστοτε κατάστασης από το στόχο. Στη συνέχεια και λόγω της περιορισμένης εμβέλειας των ευρετικών δημιουργήθηκε μια πιο ολοκληρωμένη δομή, το λεγόμενο γράφημα δράσεων, μέσα από το οποίο η αναζήτηση και η οργάνωση πληροφοριών γίνεται με πιο δομημένο τρόπο - καθορίζονται επακριβώς οι δράσεις που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν σε κάθε χρονική στιγμή, οι αμοιβαία αποκλειόμενες δράσεις καθώς και οι συνέπειες των δράσεων. Παράλληλα ως γλώσσα αναπαράστασης των προβλημάτων προγραμματισμού δράσης αναπτύχθηκε η γλώσσα PDDL.

Σταθμός στον προγραμματισμό δράσης θεωρείται στη συνέχεια η ανάπτυξη του ολοκληρωμένου συστήματος SatPlan, το οποίο μπορούσε να επιλύσει ένα πρόβλημα που ήταν σε μορφή προτασιακής λογικής. Το SatPlan είναι από τα πιο ανταγωνιστικά συστήματα Προγραμματισμού Δράσεων μέχρι σήμερα καθώς μπορεί να υποστηρίξει πληθώρα κωδικοποιήσεων που περιλαμβάνουν η καθεμία διαφορετικές συζευκτικές κανονικές μορφές. Πιο αποδοτική κωδικοποίηση είναι η SAT-MAX-PLAN (SMP), η οποία αφαιρεί όλους τους πλεονασμούς από τις προτάσεις και στηρίζεται στην μετάφραση των περιορισμών ενός προβλήματος που προκύπτουν από το γράφημα δράσεων σε μορφή προτασιακής λογικής. Οι διάφοροι προτασιακοί επιλυτές όπως Precosat που αναπτύχθηκαν αποτελούν το «εκτελεστικό» κομμάτι του Satplan. Λαμβάνουν δηλαδή ως είσοδο την κάθε κωδικοποίηση η οποία περιγράφει τους περιορισμούς του προβλήματος και δίνουν ως έξοδο τη λύση σε αυτούς τους περιορισμούς εάν και εφόσον υπάρχει. Ένα άλλο σύστημα προγραμματισμού δράσης του οποίου η λειτουργία έχει μελετηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο LAMA που βασίζεται πάνω σε ευρετική αναζήτηση. Συγκεκριμένα υπολογίζει μία λύση αρχικά όσο το δυνατό πιο γρήγορα με τη χρήση ενός αποδοτικού αλγορίθμου και στη συνέχεια γίνεται αναζήτηση για μικρότερου μήκους πλάνα πραγματοποιώντας διαδοχικές εκτελέσεις του A^* με μειωμένα βάρη.

Η διπλωματική εργασία εστιάζεται στην ενοποίηση δύο προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για επίλυση προβλημάτων προγραμματισμού δράσης. Την ευρετική αναζήτηση και την προτασιακή ικανοποιησιμότητα οι οποίες αντιπροσωπεύονται από τα συστήματα LAMA και SatPlan αντίστοιχα. Ο συνδυασμός αυτός έχει σαν κύριο άξονα λειτουργίας του ένα σύνολο δράσεων οι οποίες παράγονται από τον LAMA για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα και που εισάγονται στον Satplan ο οποίος θα πρέπει να τις λαμβάνει υπόψη σε κάθε νέο επίπεδο. Για το πώς το σύστημα του Satplan ενεργεί με τις επιπλέον αυτές δράσεις αναπτύχθηκαν δύο τεχνικές. Στο πρώτο τρόπο για κάθε κοινή δράση που υπάρχει μεταξύ των δικών του και των άλλων (LAMA) δημιουργεί μια νέα πρόταση που περιέχει τόσους όρους, όσος και ο αριθμός εμφανίσεων της δράσης αυτής στις διάφορες χρονικές στιγμές. Στο δεύτερο τρόπο για κάθε μη κοινή δράση δημιουργεί ένα αριθμό από αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις που είναι ίσος με τον αριθμό εμφανίσεων της δράσης αυτής στα διάφορα επίπεδα του SatPlan. Επίσης οι επιπλέον δράσεις που δέχεται ο SatPlan μπορεί να είναι ένα από τα παραγόμενα πλάνα είτε η ενοποίηση των μοναδικών δράσεων από όλα τα πλάνα ή ακόμα και η ενοποίηση των μοναδικών δράσεων που προκύπτουν από τις εκτελέσεις του ευρετικού συστήματος με είσοδο ένα σύνολο υποπροβλημάτων, δηλαδή προβλήματα με λιγότερους στόχους από το αρχικό. Για να είναι δυνατή η χρήση του συνδυασμού των δύο αυτών προσεγγίσεων αλλά και των μεθόδων ενοποίησης και δημιουργίας υποπροβλημάτων υλοποιήθηκε ένα νέο σύστημα, το LamSat το οποίος λειτουργεί βάσει των όσων προαναφέρθηκαν. Όλες οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν με τη χρήση του LamSat, από ένα ευρύ φάσμα πραγματικών προβλημάτων που αφορούν κυρίως το μήκος του πλάνου αλλά ασφαλώς και το χρόνο εκτέλεσης μέχρι να βρεθεί η λύση, αν βέβαια υπάρχει.

Από τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν με βάση τα πιο πάνω με τη χρήση του εργαλείου LamSat προκύπτουν κάποια συμπεράσματα που συνδέονται με τη χρονική πολυπλοκότητα και τους χρονικούς αλλά και χωρικούς περιορισμούς των προβλημάτων, τα οποία σαφώς επηρεάζουν την αποδοτικότητα της λύσης.

Από τη πειραματική μελέτη των τριών μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για εισαγωγή παραγόμενων δράσεων του LAMA στον SatPlan, το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως η απόδοση του SatPlan και κατ' επέκταση η ποιότητα της λύσης που θα προκύψει εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα πλάνα που θα δώσει στην έξοδο του ο LAMA. Όπως προαναφέρθηκε η λειτουργία του συστήματος αυτού βασίζεται πάνω σε διάφορα ευρετικά. Συνεπώς η διαδοχική εκτέλεση του με το ίδιο πρόβλημα δεν δίνει το ίδιο αποτέλεσμα και έτσι κάποιες φορές οι δράσεις που εισάγονται στον SatPlan μπορεί να είναι βοηθητικές για τον επιλυτή ώστε να αποφασίσει σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα αν υπάρχει ικανοποιητικό πλάνο και κάποιες φορές όχι.

Με τη μέθοδο του ενός πλάνου και τη χρήση της πρώτης τεχνικής κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη οι κοινές δράσεις των δύο συστημάτων παρατηρούμε πως το μήκος του πλάνου που παράγεται αποκλίνει σημαντικά από το βέλτιστο του SatPlan. Παρόμοια αποτελέσματα υπάρχουν και στους χρόνους εκτέλεσης εκτός από τα προβλήματα όπου ο SatPlan χρειάζεται πάνω από 1000 δευτερόλεπτα για να τα επιλύσει. Στη περίπτωση αυτή βλέπουμε πως LamSat επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα. Η τεχνική αυτή όμως μειονεκτεί στον αριθμό προβλημάτων που έχει επιλύσει τα οποία είναι λιγότερα από τα αντίστοιχα του SatPlan σε όλες τις κατηγορίες προβλημάτων που εξετάστηκαν. Με τη μέθοδο του ενός πλάνου και τη χρήση της δεύτερης τεχνικής όπου δηλαδή, ο αριθμός των νέων προτάσεων που δημιουργούνται στον SatPlan είναι ίσος με τον αριθμό εμφανίσεων των μη κοινών δράσεων των δύο συστημάτων τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση με τη πρώτη τεχνική. Έτσι, βλέπουμε μεγάλες αποκλίσεις όσο αφορά την ποιότητα της λύσης αλλά και στους χρόνους εκτέλεσης εκτός βέβαια από τα προβλήματα που απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα εκτέλεσης από τον SatPlan. Η μεγάλη διαφορά της τεχνικής αυτής με τη προηγούμενη παρατηρείται στον αριθμό προβλημάτων που κατόρθωσαν να επιλύσουν αφού με τη χρήση της δεύτερης τεχνικής είναι περισσότερα.

Με τη μέθοδο του ενοποιημένου πλάνου όπου γίνεται ενοποίηση όλων των μοναδικών δράσεων του LAMA από όλα τα πλάνα και τη χρήση της δεύτερης τεχνικής υπάρχει μία σχετική βελτίωση στον μήκος του παραγόμενου πλάνου που προκύπτει σε σύγκριση με την

προηγούμενη μέθοδο του ενός πλάνου. Επίσης στα προβλήματα όπου ο SatPlan υπερτερούσε στο χρόνο εκτέλεσης συνεχίζει να είναι καλύτερος αλλά με μειωμένη διαφορά από ότι προηγουμένως ενώ σε αυτά όπου ο LamSat ήταν καλύτερος η διαφορά αυξήθηκε. Στη τρίτη και τελευταία μέθοδο, όπου δημιουργούνται νέα υποπροβλήματα λιγότερων στόχων (με βάση ένα ποσοστό) και γίνεται ενοποίηση όλων των πλάνων μαζί με το αρχικό χρησιμοποιώντας τη δεύτερη τεχνική τα αποτελέσματα για την ποιότητα του παραγόμενου πλάνου είναι ακόμα καλύτερα. Συγκεκριμένα υπάρχουν συνδυασμοί όπου η μέγιστη διαφορά στον αριθμό των επιπέδων μεταξύ του LamSat και του SatPlan δεν ξεπερνά τα τρία επίπεδα. Επίσης με τη μέθοδο αυτή επιλύονται περισσότερα προβλήματα από ότι προηγουμένως. Για τους χρόνους εκτέλεσης βλέπουμε ότι για μεγάλης πολυπλοκότητας προβλήματα ο LamSat συνεχίζει να εκτελείται πιο γρήγορα και πιο αργά για τα υπόλοιπα προβλήματα. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού με τη μέθοδο αυτή επιλύεται ένας αριθμός υποπροβλημάτων στον LAMA και έτσι καθυστερεί η εύρεση της λύσης. Όμως η μέθοδος αυτή βοηθά στη εύρεση πλάνου με λιγότερα επίπεδα σε σύγκριση με τις προηγούμενες μεθόδους.

Με βάση τα πιο πάνω αν γίνει χρήση της πρώτης τεχνικής είναι φανερό πως όσο πιο πολλές δράσεις υπάρχουν μέσα σε ένα πλάνο του LAMA ή στο ενοποιημένο θα υπάρχουν και περισσότερες νέες προτάσεις στον επιλυτή. Η εξήγηση της προηγούμενης φράσης συμβαδίζει με τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου του SatPlan. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμός κάνει εύρεση σε κάθε επίπεδο όλων τις πιθανών δράσεων που μπορεί να εκτελέσει. Συνεπώς θα φθάσει σε ένα επίπεδο σε κάποια χρονική στιγμή όπου όλες οι δράσεις του πλάνου από τον LAMA θα υπάρχουν μέσα στον SatPlan με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ο ανάλογος αριθμός από νέες προτάσεις. Στη δεύτερη τεχνική αφού λαμβάνονται υπόψη οι μη κοινές δράσεις συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Συγκεκριμένα όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των δράσεων τόσο λιγότερες αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις δημιουργούνται. Για τις μεθόδους όπου αναλύθηκαν προηγουμένως βλέπουμε, ότι στη περίπτωση του ενός πλάνου δημιουργήθηκαν οι περισσότερες νέες προτάσεις (λιγότερες δράσεις). Στη δεύτερη μέθοδο είναι μειωμένες, ενώ στην τρίτη είναι οι πιο λίγες. Έτσι το συμπέρασμα που απορρέει είναι ότι δεν πρέπει να δημιουργείται ένας υπερβολικά μεγάλος αριθμός από νέες προτάσεις αφού το γεγονός αυτό περιορίζει

σημαντικά τον επιλυτή ως προς τις δράσεις που πρέπει να λάβει υπόψη καθιστώντας τον αδύνατο να βρει μια ικανοποιητική ανάθεση. Για το λόγο αυτό είναι που βλέπουμε με τις μεθόδους του ενοποιημένου πλάνου και της δημιουργίας υποπροβλημάτων όπου οι δράσεις είναι περισσότερες, καλύτερους χρόνους εκτέλεσης και μικρότερα μήκη πλάνων.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από τη χρήση της δεύτερης τεχνικής τόσο με τη μέθοδο του ενοποιημένου πλάνου όσο και με τη μέθοδο της χρήσης υποσυνόλου στόχων αφορά το ρόλο των μοναδιαίων προτάσεων στον επιλυτή. Ειδικότερα βλέπουμε στα προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας ότι ενώ στον LamSat εκτελούνται και ο SatPlan και ο LAMA με το μήκος του παραγόμενου πλάνου να είναι μεγαλύτερο από το προκαθορισμένο του SatPlan εν τούτοις ο χρόνος εκτέλεσης στον LamSat είναι μικρότερος. Αυτό οφείλεται κυρίως στις νέες αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις που εισάγονται στον αρχείο του επιλυτή. Έτσι με τον τρόπο αυτό μπορεί να κάνει αμέσως την ανάθεση στις αντίστοιχες μεταβλητές με την τιμή False και να εξετάσει για τις υπόλοιπες. Με τον τρόπο αυτό η απόφαση σε κάθε επίπεδο αν υπάρχει ικανοποιητική ανάθεση γίνεται πιο γρήγορα από ότι ήταν προηγουμένως και έτσι υπάρχει βελτίωση του συνολικού χρόνου.

Από την πειραματική μελέτη της μεθόδου της χρήσης υποσυνόλου στόχων εξάγεται το συμπέρασμα ότι για να επιτυγχάνονται βελτιωμένοι χρόνοι εκτέλεσης αλλά και μικρά μήκη λύσεων θα πρέπει τα νέα υποπροβλήματα που δημιουργούνται να μην παρεκκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από το αρχικό όσο αφορά τον αριθμό των στόχων. Το γεγονός αυτό απορρέει από το προηγούμενο συμπέρασμα όπου έγινε αναφορά στον μη υπερβολικό αριθμό νέων προτάσεων που επιτυγχάνεται με την αύξηση των δράσεων που εισάγονται στον SatPlan. Συνεπώς αν το ποσοστό των νέων στόχων είναι μικρό, μπορεί να αυξηθήκαν οι δράσεις αλλά θα υπάρχουν αρκετές οι οποίες δεν θα είναι σχετικές με το αρχικό πρόβλημα με αποτέλεσμα να μην γίνει μείωση του αριθμού των νέων προτάσεων αφού δεν θα βρίσκονται ούτε στον SatPlan. Από την άλλη πλευρά αν το ποσοστό αυτό προσεγγίζει το αρχικό πρόβλημα τότε οι δράσεις του παραγόμενου πλάνου θα υπάρχουν στον SatPlan μειώνοντας παράλληλα τον αριθμό των μοναδιαίων προτάσεων. Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις ο καλύτερος συνδυασμός ο οποίος επιτυγχάνει το μικρότερο μήκος λύσης είναι

αυτός με 75% ποσοστό των νέων στόχων και 15 νέα υποπροβλήματα ενώ για το μικρότερο χρόνο εκτέλεσης το ποσοστό των νέων στόχων παραμένει το ίδιο με αριθμό νέων υποπροβλημάτων 5. Αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των νέων υποπροβλημάτων τόσο πιο πολύ καθυστερεί η εκτέλεση του LAMA ενώ από την άλλη ο μεγάλος αριθμός νέων υποπροβλημάτων δίνει περισσότερες δράσεις και συνεπώς λιγότερες νέες προτάσεις. Συνεπώς γενικεύοντας από τα πιο πάνω μπορούμε να πούμε ως συμπέρασμα πως ο καλύτερος συνδυασμός που εξασφαλίζει καλούς χρόνους εκτέλεσης και ποιότητα λύσης είναι αυτός με 75% ποσοστό στόχων και 10 νέα υποπροβλήματα.

Η μέθοδος αυτή όμως αν και βελτιώνει σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης προβλημάτων μεγάλης πολυπλοκότητας εν τούτοις έχει και κάποια μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα βασική προϋπόθεση για να γίνει εύρεση μιας λύσης με τη χρήση της μεθόδου αυτής θα πρέπει να παραχθεί τουλάχιστον ένα πλάνο από τον LAMA για το αρχικό πρόβλημα. Σε αντίθετη περίπτωση αν ο LAMA επιλύσει μόνο τα υποπροβλήματα η λύση του αρχικού προβλήματος καθίσταται αδύνατη. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι επειδή αν δεν υπάρχει λύση για το αρχικό πρόβλημα τότε θα δημιουργηθούν αρνητικές μοναδιαίες προτάσεις για πολλές από τις δράσεις που είναι απαραίτητες για την επίλυση του με αποτέλεσμα ο επιλυτής να μην μπορεί να βρει ικανοποιητική ανάθεση. Επίσης αν ο αριθμός των στόχων του προβλήματος είναι μικρός δεν μπορούν να δημιουργηθούν αρκετά νέα προβλήματα με υψηλό ποσοστό στόχων με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται βελτίωση του χρόνου εκτέλεσης. Το γεγονός αυτό φαίνεται σε μεγάλο βαθμό από τις κατηγορίες προβλημάτων Trucks και Freecell.

Τέλος συνοψίζοντας από τα πιο πάνω, βλέπουμε πως με το τέλος της διπλωματικής αυτής εργασίας επιτελέστηκε ο βασικός στόχος που τέθηκε εξ' αρχής. Όπως προαναφέρθηκε ο SatPlan παράγει το μικρότερο παράλληλο μήκος λύσης για ένα πρόβλημα και έτσι είναι αδύνατη η μείωση του αριθμού επιπέδων. Ο βασικός πυλώνας στον οποίο υλοποιήθηκε η διπλωματική αυτή εργασία είναι η βελτίωση του προκαθορισμένου χρόνου εκτέλεσης μειώνοντας τον αριθμό των διαθέσιμων δράσεων πράγμα το οποίο επιτεύχθηκε. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο το οποίο έχει κατορθωθεί είναι η επίλυση αρκετών προβλημάτων μεγάλης πολυπλοκότητας από όλες τις κατηγορίες που εξετάστηκαν, για τα οποία η

προκαθορισμένη εκτέλεση του SatPlan ήταν αδύνατο να βρει ένα ικανοποιητικό πλάνο. Στις περιπτώσεις αυτές δεν υπήρχε οποιαδήποτε σύγκριση αφού απουσίαζε η λύση του SatPlan.

7.2 Επεκτάσεις και Μελλοντική εργασία

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε υλοποίηση δύο τεχνικών για συνδυασμό ευρετικής αναζήτησης και προτασιακής ικανοποιησιμότητας. Επίσης αναπτύχθηκαν τρεις τρόποι για εισαγωγή παραγόμενων δράσεων του LAMA στον SatPlan. Οι μέθοδοι αυτοί, διαφέρουν κυρίως ως προς τον αριθμό των δράσεων που θα εισαχθούν και ως προς τις νέες προτάσεις που θα δημιουργηθούν στο αρχείο του επιλυτή. Ο κύριος στόχος για τον οποίο υλοποιήθηκαν τα πιο πάνω ήταν η ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης και γενικότερα του κόστους για τα προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας γεγονός το οποίο επιτεύχθηκε σε μεγάλο βαθμό.

Τα κύρια συστήματα σε αυτή την προσπάθεια ήταν ο LAMA και ο SatPlan. Επίσης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η απόδοση του SatPlan με τη χρήση μίας εκ των δύο τεχνικών εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από τις παραγόμενες δράσεις του LAMA και κατά πόσο ήταν βοηθητικές για τον SatPlan. Αν επιχειρηθεί να χρησιμοποιηθεί ένα άλλο σύστημα στη θέση του SatPlan δεν θα ήταν ουσιαστικό αφού είναι γνωστό πως ο SatPlan δίνει την καλύτερη λύση με βάση το σύνολο των δράσεων που έχει στη διάθεση του. Έτσι θα μπορούσε να δοκιμαστεί στη θέση του LAMA ένα άλλο σύστημα ευρετικής αναζήτησης με σκοπό να συνδυαστεί με τον SatPlan όπως ακριβώς συνδυάστηκε και ο LAMA. Με τον τρόπο αυτό θα είναι εφικτό να γίνει μια σύγκριση μεταξύ των δύο συνδυασμών για το που μειονεκτεί ο ένας έναντι του άλλου.

Όπως αναφέρθηκε στα συμπερασματικά σχόλια για να είναι δυνατό οι δύο τεχνικές συνδυασμού που αναπτύχθηκαν να λειτουργήσουν αποδοτικά θα πρέπει οι νέες προτάσεις που θα εισάγονται στο αρχείο του επιλυτή να μην έχουν υπερβολικά μεγάλο αριθμό. Σε αντίθετη περίπτωση, αν χρησιμοποιείται η δεύτερη τεχνική τότε περιορίζεται σημαντικά η

λειτουργία του επιλυτή ενώ αν χρησιμοποιείται η πρώτη αυξάνεται η πολυπλοκότητα του. Από τα πιο πάνω όμως δεν καθορίζεται συγκεκριμένα ο αριθμός αυτός των νέων προτάσεων που θα επιτρέπουν στον LamSat να λειτουργεί αποδοτικά. Έτσι ως μία επέκταση της διπλωματικής αυτής εργασίας θα μπορούσε να ήταν η εξακρίβωση ενός κατωφλίου που αντιπροσωπεύει τον αριθμό αυτό. Για την εύρεση του κατωφλίου αυτού θα πρέπει να εκτελείται ο LamSat διαδοχικά για ένα σύνολο προβλημάτων από διάφορες κατηγορίες. Σε κάθε διαδοχική εκτέλεση θα πρέπει να αυξάνονται κατά μία οι δράσεις που εισάγονται στον SatPlan μέχρι να διαπιστωθεί τότε αρχίζει να σημειώνει καλύτερους χρόνους εκτέλεσης.

Μια άλλη επέκταση η οποία θα μπορούσε να αναπτυχθεί για την παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πρώτη τεχνική συνδυασμού των δύο συστημάτων η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε τόσο όσο η δεύτερη τεχνική. Με τη χρήση όμως της πρώτης τεχνικής για να μην δημιουργείται υπερβολικός αριθμός από νέες προτάσεις θα πρέπει να μειωθούν οι εισαγόμενες δράσεις στον SatPlan και όχι να αυξηθούν όπως συμβαίνει με την δεύτερη τεχνική. Έτσι για το σκοπό αυτό θα μπορούσε να υλοποιηθεί μία μέθοδος η οποία θα λαμβάνει υπόψη τις δράσεις που αποτελούν τη τομή όλων των παραγόμενων πλάνων του LAMA μειώνοντας παράλληλα τις δημιουργία νέων προτάσεων στον επιλυτή.

Εν κατακλείδι θα πρέπει να λαμβάνουμε πάντοτε υπόψη ότι η βελτιστοποίηση του χρόνου είναι αποτέλεσμα πολλών παραμέτρων, κάθε μια από τις οποίες πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά.

Βιβλιογραφία

- [1] Henry Kautz: "Deconstructing Planning as Satisfiability", Proceedings of the 21st National Conference on Artificial Intelligence. (AAAI-06), Boston, MA, 2006.
- [2] Stuart Russel, Peter Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach (Second Edition), Chapter 11 Planning, Prentice Hall, 2002.
- [3] Richard E. Fikes, J. Nilsson: "STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving", Session No. 15, Heuristic Problem Solving.
- [4] João P. Marques Silva and Karem A. Sakallah. GRASP: A new search algorithm for satisfiability. In Proceedings of the 1996 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design, ICCAD '96, pages 220–227, Washington,DC, USA, 1996. IEEE Computer Society.
- [5] T. Bylander: "The Computational Complexity of Propositional STRIPS Planning" Artificial Intelligence, 69:165-204, 1994.
- [6] Steffen Hölldobler, Norbert Manthey, and Ari Saptawijaya: "Improving resource-unaware sat solvers" In Christian Fermüller and Andrei Voronkov, editors, Logic for Programming, Artificial Intelligence, and Reasoning, volume 6397 of Lecture Notes in Computer Science, pages 357–371. Springer Berlin / Heidelberg, 2010.
- [7] Henry Kautz ,Bart Selman,Joerg Hoffmann, "SatPlan: Planning as Satisfiability", Proceedings of the 10th European conference on Artificial intelligence, p.359-363, August 1992
- [8] Subbarao Kambhampati, Eric Parker and Eric Lambrecht "Understanding and Extending Graphplan" Proceedings of the 4th European Conferenceon Planning: Recent Advances in AI Planning Pages: 260 – 272, 1997

- [9] Avrim L. Blum, Merrick L. Furst: "Fast planning through planning graph analysis", Artificial Intelligence 90, 281-300, 1997.
- [10] Sylvia Richter, Matthias Westphal: "The LAMA Planner Using Landmark Counting in Heuristic Search".
- [11] M. Moskewicz, C. Madigan, Y. Zhao, L. Zhang, and S. Malik: "Engineering an efficient SAT solver", DAC, Design Automation Conference p.530-535, 2001.
- [12] Hoffmann, J. Porteous, Sebastia L. 2004. Ordered landmarks in planning. JAIR, Journal of Artificial Intelligence Research, 22:215–278, 2004.
- [13] M. Davis, G. Logemann, and D. Loveland. A machine program for theorem proving. Communications of the ACM, 5(7):394–397, 1962.
- [14] Armin Biere: Adaptive restart strategies for conflict driven sat solvers, SAT p.28-33, 2008.
- [15] Yannis Dimopoulos, Alfonso Gerevini, Patrik Haslum, Alessandro Saetti: "The Benchmark Domains of the Deterministic Part of IPC-5", Booklet of the 2006 Planning Competition, ICAPS'06, 2006
- [16] Andreas Sideris, Yannis Dimopoulos, "Constraint Propagation in Propositional Planning", 20th International Conference on Automated Planning and Scheduling, (ICAPS'10), p.153-160, Toronto, Canada, 2010.