



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
Και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής και Υπολογιστών

**Πρακτικά Συστήματα Συλλογιστικής
για Εκφραστικές Ασαφείς
Περιγραφικές Λογικές**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Ε. ΣΙΜΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών και Πληροφορικής
University of Sussex (2004)

Αθήνα, Μάρτιος 2010



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής και Υπολογιστών

Πρακτικά Συστήματα Συλλογιστικής για Εκφραστικές Ασαφείς Περιγραφικές Λογικές

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Ε. ΣΙΜΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών και Πληροφορικής
University of Sussex (2004)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Στέφανος Κόλλιας
Γιάννης Μαΐστρος
Ανδρέας Σταφυλοπάτης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Μαρτίου 2010.

...
Στέφανος Κόλλιας	Γιάννης Μαΐστρος	Ανδρέας Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.

...
Κώστας Κοντογιάννης	Τιμολέων Σελλής	Γιώργος Στάμου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Λέκτορας Ε.Μ.Π.

...

Μανώλης Κουμπαράκης
Αν. Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Αθήνα, Μάρτιος 2010

...

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Ε. ΣΙΜΟΥ

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2010 - All rights reserved

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Εφαρμογές και Εργαλεία για Περιγραφικές Λογικές.....	2
1.2	Σημασιολογική Ανάλυση Πολυμεσικού Περιεχομένου και Περιγραφικές Λογικές.....	4
1.3	Συνεισφορά και Δομή της Διατριβής.....	6
2	Εκφραστικές Περιγραφικές Λογικές	11
2.1	Η Περιγραφική Λογική <i>SHOIN</i>	11
2.1.1	Σύνταξη και Σημασιολογία.....	12
2.1.2	Υπηρεσίες Συλλογιστικής.....	17
2.2	Η Ασαφής Περιγραφική Λογική f_{KD} - <i>SHOIN</i>	18
2.2.1	Ασαφής Συνολοθεωρία.....	19
2.2.2	Σύνταξη και Σημασιολογία.....	23
2.2.3	Υπηρεσίες Συλλογιστικής.....	26
2.2.4	Ο Αλγόριθμος Tableau για την f_{KD} - <i>SHIN</i>	28
3	Συλλογιστική σε Εκφραστικές Ασαφείς Περιγραφικές Λογικές	37
3.1	Τεχνικές Βελτιστοποίησης.....	38
3.2	Βελτιστοποιήσεις για τη Μείωση των Απαιτήσεων Χώρου.....	39
3.2.1	Κανονικοποίηση Βαθμών.....	39
3.2.2	Διχοτόμηση του Σώματος Ισχυρισμών.....	41
3.3	Βελτιστοποιήσεις Προεπεξεργασίας.....	45
3.3.1	Οκνηρό Ξεδίπλωμα.....	45
3.3.2	Λεκτική Κανονικοποίηση και Κωδικοποίηση.....	48
3.4	Βελτιστοποιήσεις ικανοποιησιμότητας.....	52
3.4.1	Τεχνική των Ιχνών.....	52
3.4.2	Πρώτα Αναζήτηση σε Βάθος.....	55
3.4.3	Οδηγούμενη Οπισθοδρόμηση.....	56
3.4.4	Τοπική απλοποίηση.....	59
3.4.5	Σημασιολογική διακλάδωση.....	60
3.4.6	Βελτιστοποιήσεις για το Μέγιστο Κάτω Φράγμα.....	62
3.4.7	Διαχείριση των Γενικευμένων και Κυκλικών Αξιωμάτων.....	65
4	Συστήματα Συλλογιστικής για Εκφραστικές Ασαφείς Περιγραφικές Λογικές	71
4.1	Το Σύστημα Ασαφούς Συλλογιστικής FiRE.....	72

4.1.1	Σύνταξη.....	72
4.1.2	Γραφικό Περιβάλλον	75
4.1.3	Υπηρεσίες Συλλογιστικής.....	76
4.2	Αξιολόγηση των Υπηρεσιών Συλλογιστικής του FiRE	79
4.2.1	Δημιουργία της Ασαφούς Βάσης Γνώσης	80
4.2.1.1	Το Σώμα Ισχυρισμών	80
4.2.1.2	Το Σώμα Ορολογίας και το Σώμα Ρόλων.....	81
4.2.2	Αποτελέσματα	82
4.2.2.1	Τεχνικές Μείωσης Απαιτήσεων Χώρου.....	83
4.2.2.2	Τεχνικές Προεπεξεργασίας	84
4.2.2.3	Τεχνικές Ικανοποιησιμότητας	85
4.3	Ασαφή Συζητητικά Επερωτήματα σε Εκφραστικές Περιγραφικές Λογικές	88
4.3.1	Εισαγωγή στα Συστήματα Αποθήκευσης Οντολογιών.....	89
4.3.2	Αποθήκευση μίας Ασαφούς Βάσης Γνώσης	90
4.3.3	Ασαφή Συζητητικά Επερωτήματα	91
4.3.3.1	Επερωτήματα Κατωφλίων	92
4.3.3.2	Γενικευμένα Ασαφή Επερωτήματα	93
4.3.4	Υλοποίηση Ασαφών Επερωτημάτων με το FiRE	96
4.3.5	Αξιολόγηση Ασαφών Συζητητικών Επερωτημάτων για Εκφραστικές Ασαφείς Περιγραφικές Λογικές	100
5	Σημασιολογική Τεκμηρίωση Πολυμεσικού Περιεχομένου	103
5.1	Η Οντολογία των Οπτικών Περιγραφών	103
5.1.1	Η Δομή της Οντολογίας Οπτικών Περιγραφών	104
5.1.2	Αξιολόγηση της Οντολογίας Οπτικών Περιγραφών	106
5.2	Ταξινόμηση Βυζαντινών Εικόνων	107
5.2.1	Ερμηνεία της Βυζαντινής Τέχνης	108
5.2.2	Σύστημα Ταξινόμησης Βυζαντινών Εικόνων.....	110
5.2.2.1	Ανάλυση Βυζαντινών Εικόνων	110
5.2.2.2	Αναπαράσταση Γνώσης για Βυζαντινές Εικόνες	112
5.2.3	Αποτελέσματα	114
5.3	Σημασιολογική Δεικτοδότηση και Ανάκληση Εικόνων.....	115
5.3.1	Αρχιτεκτονική Συστήματος για Σημασιολογική Δεικτοδότηση και Ανάκληση Εικόνων	116
5.3.2	Αναπαράσταση Γνώσης για το πεδίο Διακοπών	118
5.3.3	Δεικτοδότηση Εικόνων.....	122
5.4	Σημασιολογική Περιήγηση σε Βίντεο.....	124
5.4.1	Αρχιτεκτονική του Συστήματος για Σημασιολογική Περιήγηση σε Βίντεο.....	124
5.4.2	Αναπαράσταση Γνώσης για Σημασιολογική Περιήγηση σε Αγώνες Ποδοσφαίρου	125
6	Προσαρμογή Νευρωνικών Δικτύων για την Κατάτμηση Εικόνων	127
6.1	Σύστημα Προσαρμογής Νευρωνικών Δικτύων στη Κατάτμηση Εικόνων.....	128
6.2	Σημασιολογικός Αλγόριθμος Προσαρμογής Νευρωνικών Δικτύων	129
6.3	Αναπαράσταση Γνώσης για την Προσαρμογή Νευρωνικών Δικτύων	131

6.4	Σημασιολογική Κατάτμηση	133
6.4.1	Σημασιολογική Κατάτμηση Εικόνας	133
6.4.2	Σημασιολογική Κατάτμηση Βίντεο	134
6.5	Αποτελέσματα	135
6.5.1	Η Αρχιτεκτονική του Νευρωνικού Δικτύου	135
6.5.2	Διόρθωση Αποτελεσμάτων με τη χρήση του FiRE	137
6.5.3	Σύγκριση με άλλες Τεχνικές	138
7	Σχετική Βιβλιογραφία	141
8	Συνεισφορά και Θέματα προς Έρευνα	147
	Παράρτημα Α: Μαθηματικά Σύμβολα	152
	Παράρτημα Β: Αποδόσεις Ξένων Όρων	155
	Βιβλιογραφία	163
	Κατάλογος δημοσιεύσεων του συγγραφέα	185
	Βιογραφικό Σημείωμα	189

Κατάλογος σχημάτων

3.1	Ένα δάσος ολοκλήρωσης που περιέχει 2 τμήματα του ABox.	42
3.2	Η λειτουργία της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης. (Παράδειγμα 3.4.3) ..	58
3.3	Η λειτουργία της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης. (Παράδειγμα 3.4.4) ..	59
3.4	Η μη ικανοποιησιμότητα της έννοιας C θα αποδειχθεί n φορές.....	61
3.5	Σημασιολογική διακλάδωση σε ασαφείς ΠΛ.	61
4.1	Το γραφικό περιβάλλον του FiRE.....	76
4.2	Οι ασαφείς διαμερίσεις για την ηλικία και το ύψος ενός άντρα.	81
5.1	Η δομή της οντολογία των οπτικών περιγραφών.	104
5.2	Η ιεραρχία του Dominant Color.....	105
5.3	Η αρχιτεκτονική του συστήματος για την κατηγοριοποίηση Βυζαντινών εικόνων.	111
5.4	Ανάλυση βυζαντινής εικόνας.	112
5.5	Συλλογιστική για βυζαντινές εικόνες.	115
5.6	Η αρχιτεκτονική για σημασιολογική δεικτοδότηση και ανάκτηση εικόνων.	117
5.7	Αποτελέσματα σημασιολογικής κατάτμησης.	121
5.8	Το γραφικό περιβάλλον του FiRE για την ανάκτηση εικόνων.	123
5.9	Οι εικόνες που ανακτήθηκαν για την ερώτηση "άνθρωπος σε παραλία".	123
6.1	Η αρχιτεκτονική για την σημασιολογική προσαρμογή ενός νευρωνικού δικτύου.....	128
6.2	Καρέ από μια ακολουθία βίντεο.....	135

Κατάλογος πινάκων

2.1	Σημασιολογία <i>SHOIN</i> -εννοιών και ρόλων.	15
2.2	Σύνταξη και Σημασιολογία fuzzy- <i>SHOIN</i> -εννοιών.	25
2.3	Κανόνες επέκτασης για την f_{KD} - <i>SHIN</i>	33
2.4	Συνέχεια κανόνων επέκτασης για την f_{KD} - <i>SHIN</i>	35
3.1	Κανόνες κανονικοποίησής των βαθμών.	40
3.2	Κανόνες πρόωρης ανίχνευσης αντίφασης.	41
3.3	Κανόνες επέκτασης για οκνηρό ξεδιπλωμα.	47
3.4	Κανόνες κανονικοποίησης και κωδικοποίησης.	51
3.5	Κανόνας για γενικευμένα αξιώματα.	67
3.6	Κανόνες επέκτασης για τα αξιώματα συνόλου τιμής και πεδίου ορισμού ενός ρόλου.	69
4.1	Η σύνταξη των f_{KD} - <i>SHIN</i> κατασκευαστών στο FiRE.	74
4.2	Ένα απόσπασμα του σώματος ορολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του FiRE.	82
4.3	Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση των τεχνικών μείωσης απαιτήσεων χώρου.	83
4.4	Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση της τεχνικής του οκνηρού ξεδιπλώματος.	84
4.5	Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση της τεχνικής της λεκτικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης.	85
4.6	Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση των τεχνικών προεπεξεργασίας.	85
4.7	Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς τη χρήση της τεχνικής των ιχνών.	86
4.8	Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς τη πρώτα αναζήτηση κατά βάθος.	86
4.9	Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση των τεχνικών για αποτελεσματική διαχείριση των διαζεύξεων.	87
4.10	Η συνολική αξιολόγηση του συστήματος για τον υπολογισμό του συνολικού MKΦ για βάσεις γνώσης διαφορετικού μεγέθους και διαφορετικής εκφραστικότητας.	88
4.11	Αφηρημένη σύνταξη της γλώσσας f-OWL.	90
4.12	Αξιολόγηση ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ.	101

5.1	Ένα απόσπασμα του σώματος ορολογίας για τη κατηγοριοποίηση βυζαντινών εικόνων.....	114
5.2	Αξιολόγηση συστήματος με τη χρήση των μέτρων ορθότητας και ανάκλησης.....	116
5.3	Ένα κομμάτι του σώματος ορολογίας για το πεδίο των διακοπών.....	120
5.4	Δεικτοδότηση αποτελεσμάτων για το ερώτημα "Άνθρωπος σε παραλία" (από τα παραδείγματα 5.3.4 και 5.3.5).	124
5.5	Απόσπασμα του σώματος ορολογίας για την σημασιολογική περιήγηση σε βίντεο.....	126
6.1	Το σώμα ορολογίας για την προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου ταξινομητή.	132
6.2	Η απόδοση του ταξινομητή μετά την εκπαίδευση.	137
6.3	Η απόδοση του Νευρωνικού Δικτύου μετά την προσαρμογή.....	138
6.4	Σύγκριση της απόδοσης του Νευρωνικού Δικτύου (μετά την προσαρμογή) με δυο ανταγωνιστικές προσεγγίσεις: έναν ΜΔΥ και έναν ΑΟΧ ταξινομητή.....	139

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ένας από του κύριους λόγους που με οδήγησε στην έναρξη της διδακτορικής μου διατριβής, ήταν η άποψη μου πως ο άνθρωπος θα πρέπει να γνωρίζει συνεχώς καινούργια πράγματα και να εξελίσσεται μέσα από αυτά. Ολοκληρώνοντας, λοιπόν, την διδακτορική μου διατριβή, και επιχειρώντας να δω την εξέλιξη μου στο πέρασμα των χρόνων μέσα από αυτή, η επιλογή μου με δικαιώνει. Το γεγονός ότι εμβαθύνεις σε ένα ερευνητικό πεδίο, γίνεσαι πολύ καλός γνώστης του, και προσπαθείς να προσφέρεις το δικό σου λιθαράκι σε αυτό σίγουρα σε εξελίσει, ως προς τις γνώσεις σου, άλλα αυτή ίσως δεν είναι η σημαντικότερη εξέλιξη. Σημαντικότερα, ίσως, οφέλη είναι η τυπικότητα και η μεθοδολογία στο τρόπο εργασίας, καθώς και η σφαιρική αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν, που αποκτούνται κατά την πορεία.

Ουσιαστικό ρόλο, όμως, σε αυτήν την εξέλιξη και την κατάκτηση των παραπάνω εφοδίων παίζουν και οι άνθρωποι με τους οποίους συνεργάζεσαι. Για αυτό το λόγο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα μου Λέκτορα Ε.Μ.Π. Γιώργο Στάμου, ο οποίος ήταν ο εμπνευστής της εργασίας μου και πάντα πρόθυμος να βοηθήσει στην επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάζονταν. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου Καθηγητή Ε.Μ.Π. Στέφανο Κόλλια για την ευκαιρία που μου προσέφερε εντάσσοντας με στους υποψηφίους διδάκτορες του καθώς και για την άριστη συνεργασία που είχαμε.

Ακόμη, ευχαριστώ όλους αυτούς με τους οποίους συνεργάστηκα στο πλαίσιο της εργασίας μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γιώργο Στοίλο για την πολύ γόνιμη και ουσιαστική συνεργασία, τον υποψήφιο διδάκτορα Θεόφιλο Μαΐλη για τα πολύ χρήσιμα σχόλια του στην εργασία μου, καθώς και τους Δρ. Αθανάσιο Αθανασιάδη, Δρ. Παρασκευή Τζούβελη και Δρ. Βασίλη Τζουβάρα.

Πέραν όμως από τους συνεργάτες μου σε αυτή την εργασία, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την σύντροφο μου Γρηγορία Λιάγκου για την αμέριστη συμπαράσταση και εμφύχωση που μου έδειξε στις δύσκολες προσωπικές μου στιγμές, αλλά και τις στιγμές που τα προβλήματα της εργασίας μου έμοιαζαν ανυπέβλητα και με αποκαρδίωναν.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία μου και να δώσω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τον τρόπο που με διαπαιδαγώγησαν και γαλούχησαν τον χαρακτήρα μου δίνοντας μου τα απαραίτητα εφόδια για να ολοκληρώσω την διδακτορική μου διατριβή.

*Νικόλαος Σίμου
Αθήνα, Μάρτιος 2010*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα της Επιστήμης των Υπολογιστών είναι η αναπαράσταση της ανθρώπινης γνώσης και η χρήση της για συλλογιστική. Οι Περιγραφικές Λογικές αποτελούν μια πολύ διαδεδομένη οικογένεια γλωσσών αναπαράστασης γνώσης που δημιουργήθηκαν για αυτό το σκοπό. Παρά όμως τη μεγάλη εκφραστική τους ικανότητα, αδυνατούν να χρησιμοποιηθούν σε πεδία εφαρμογής που πραγματεύονται με ατελή ή ασαφή πληροφορία. Τέτοιου είδους πληροφορία εμπεριέχεται στις έννοιες ψηλός, μακριά κ.α., και επειδή αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας, η ανάγκη για την αναπαράσταση της είναι επιτακτική. Για αυτό το λόγο προτάθηκαν στη βιβλιογραφία επεκτάσεις των Περιγραφικών Λογικών με τη χρήση της ασαφούς συνολοθεωρίας. Ανάμεσα τους ξεχωρίζει η εργασία των Stoilos et al. που παρουσιάζει έναν αλγόριθμο συλλογιστικής για την εκφραστική ασαφή Περιγραφική Λογική *f-SHLN* [209]. Η εργασία αυτή έθεσε τις βάσεις για την πρακτική εφαρμογή των ασαφών Περιγραφικών Λογικών, χωρίς να είναι όμως από μόνη της αρκετή. Η θεωρητική πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι πολύ υψηλή (2-NEXPTIME), γεγονός που κάνει την υλοποίηση ενός ασαφούς συστήματος συλλογιστικής, βάσει του θεωρητικού αλγορίθμου, άνευ πρακτικής σημασίας.

Κύριος στόχος της εργασίας, είναι η μετατροπή του θεωρητικού φορμαλισμού της ασαφούς Περιγραφικής Λογικής *f-SHLN* σε έναν πρακτικά εφαρμόσιμο αλγόριθμο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, πραγματοποιήθηκε μελέτη των τεχνικών και εργαλείων που επιτρέπουν την πρακτική εφαρμογή των κλασικών εκφραστικών Περιγραφικών Λογικών για την αναπαράσταση διαφόρων πεδίων.

Από τη μελέτη αυτή προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Τροποποιήσαμε κάποιες τεχνικές βελτιστοποίησης κλασικών Περιγραφικών Λογικών έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν στην ασαφή Περιγραφική Λογική *f-SHLN*. Αναπτύξαμε κάποιες νέες πρότυπες τεχνικές βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται αποκλειστικά σε ασαφείς Περιγραφικές Λογικές. Επιπρόσθετα, υλοποιήσαμε το σύστημα συλλογιστικής FiRE (Fuzzy Reasoning Engine) που αποτελεί το πρώτο σύστημα συλλογιστικής που υλοποιήθηκε για εκφραστικές ασαφείς Περιγραφικές Λογικές. Το FiRE επεκτάθηκε με τη χρήση triple stores, ώστε να μπορεί να αποθηκεύει μια ασαφή βάση γνώσης και να υποστηρίζει ασαφή συζευκτικά ερωτήματα. Το σύστημα συλλογιστικής FiRE αξιολογήθηκε ως προς την απόδοση του σε υπηρεσίες συλλογιστικής αλλά και στα ασαφή συζευκτικά ερωτήματα. Τέλος, κάνοντας χρήση των συστημάτων συλλογιστικής που υλοποιήσαμε προτείναμε νέες προσεγγίσεις για τη σημασιολογική τεκμηρίωση πολυμεσικού περιεχομένου που στηρίζονται σε εκφραστικές ασαφείς Περιγραφικές Λογικές, ενώ εργαστήκαμε και για την συνύφανση ασαφών Περιγραφικών Λογικών και Νευρωνικών Δικτύων.

ABSTRACT

One of the most important issues of Computer Science is the representation of human knowledge and its use for reasoning. Description Logics are a very popular family of knowledge representation languages which were created for this purpose. However, despite their rich expressive power, they are insufficient for application domains that deal with imperfect or fuzzy information. Such kinds of information are contained in concepts such as tall, long, etc that are an integral part of our lives and, therefore, the need for its effective representation is crucial. For this reason fuzzy extensions of Description Logics have been proposed in the literature. Among them, the work of Stoilos et al. that presents a reasoning algorithm for the expressive fuzzy Description Logic *f-SHIN* [209] is the most important. This work has set the basis for practical reasoning using fuzzy Description Logics but it was not enough. The theoretical complexity of the proposed tableau reasoning algorithm is (2-NEXPTIME), that is very expensive. Therefore an implementation directly based on this very expensive algorithm, would result to a reasoner that could not be applied to real case scenarios.

In this thesis we aim at transforming the theoretical formalism of fuzzy Description Logic *f-SHIN* to a practicable reasoning algorithm. In order to achieve this goal we studied the techniques and the tools that make expressive crisp Description Logics practicable for the representation of various domains.

In this research the following results have been achieved. We transformed some optimizations techniques that have been successfully applied to crisp Description Logics in a way that can also be applied to fuzzy Description Logic *f-SHIN*. We suggested some innovative optimization techniques only for fuzzy Description Logics. Additionally, we implemented the fuzzy reasoning engine FiRE which is the first system implemented for reasoning with expressive fuzzy Descriptive Logics. FiRE has been extended using triple stores to save a fuzzy knowledge base and to support fuzzy conjunctive queries. Furthermore, we assessed the performance of the reasoning system FiRE regarding its reasoning services and its support on fuzzy conjunctive queries. Finally, using the implemented reasoning systems, we have proposed innovative approaches for both the semantic annotation of multimedia content and neuro-symbolic integration, based on expressive fuzzy Description Logics.

Κατάλογος Συντμήσεων

ΑΕΚ	:	Ασαφή Επερωτήματα Κατωφλίων
ΑΟΧ	:	Αυτό-Οργανώμενοι Χάρτες
ΑΣ	:	(Επερωτήματα) Ασαφών Κατωφλίων
ΑΣ	:	(Επερωτήματα) Ασαφών Συναθροίσεων
ΓΑΕ	:	Γενικευμένες Ασαφείς Ερωτήσεις
ΓΣΙ	:	Γρέφος Συσχέτισης Ιδιοτήτων
ΒΓ	:	Βάση Γνώσης
ΕΑΦ	:	Ελάχιστο Άνω Φράγμα
ΚΜΑ	:	Κανονική Μορφή Άρνησης
ΜΔΥ	:	Μηχανή Διανυσματικής Υποστήριξης
ΜΚΦ	:	Μέγιστο Κάτω Φράγμα
ΠΛ	:	Περιγραφικές Λογικές
ABox	:	Assertion Box, Σώμα Ισχυρισμών
ALC	:	Attributive Language with Complement: $\top \mid \perp \mid A \mid \neg C \mid \exists R.C \mid \forall R.C$
API	:	Application Programming Interface
CQ	:	Conjunctive Query
CTQ	:	Conjunctive Threshold Query
DAML	:	DARPA Agent Markup Language
DL	:	Description Logics
DQ	:	Disjunctive Query
f-ΠΛ	:	Μια ασαφής Περιγραφική Λογική
f_{KD}-ΠΛ	:	Η οικογένεια των ασαφών ΠΛ γλωσσών που χρησιμοποιούν την ασαφή συνεπαγωγή του Kleene-Dienes, την τομή και την ένωση του Gödel και την άρνηση του Lukasiewicz
f-DL	:	fuzzy-DL
GCI s	:	General Concept Inclusions
GFCQ	:	General Fuzzy Conjunctive Query
GFDQ	:	General Fuzzy Disjunctive Query
GLB	:	Greatest Lower Bound
KRSS	:	Knowledge Representation System Specification
LUB	:	Least Upper Bound
OWL	:	Web Ontology Language
OIL	:	Ontology Inference Layer
RBox	:	Role Box, Σώμα Ρόλων
S	:	ALC με αξιώματα μεταβατικών ρόλων (ALC_{R+}): $\text{Trans}(R)$
SAIL	:	Storage And Inference Layer
SeRQL	:	Sesame RDF Query Language
SI	:	S με αντίστροφους ρόλους I : $\text{Inv}(R)$ ή R^-
SHI	:	SI με αξιώματα υπαγωγής ρόλων H : $R \sqsubseteq S$
SHIF	:	SHI με συναρτησιακούς περιορισμούς πληθυκότητας (\mathcal{F}): $\leq 1R, \geq 2R$
SHIN	:	SHI με περιορισμούς πληθυκότητας (\mathcal{N}): $\leq nR, \geq nR$
SHOIN	:	SHIN με ονοματικές έννοιες (\mathcal{O}): $\{o\}$
SVM	:	Support Vector Machine
TBox	:	Terminological Box, Σώμα Ορολογίας
VDO	:	Visual Descriptor Ontology
W3C	:	World Wide Web Consortium

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ένα θέμα που απασχολεί τον άνθρωπο εδώ και πάρα πολλά χρόνια είναι η αναπαράσταση της ανθρώπινης γνώσης και η χρήση της για συλλογιστική. Ο Αριστοτέλης είναι ο πρώτος που γνωρίζουμε, ο οποίος επιχείρησε να αποτυπώσει μια εκτεταμένη και συστηματική επεξεργασία των μεθόδων του ανθρώπινου συλλογισμού. Προσδιόρισε δύο σημαντικές μεθόδους συλλογισμού: την ανάλυση και τη σύνθεση. Σαν μέθοδο της ανάλυσης όρισε την προσπάθεια του ανθρώπου να κατανοήσει ένα αντικείμενο με την εξέταση των επιμέρους συστατικών του, ενώ από την άλλη, με τη μέθοδο της σύνθεσης όρισε την προσπάθεια για κατανόηση μιας κατηγορίας αντικειμένων με την εξέταση των κοινών ιδιοτήτων κάθε αντικειμένου που ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Με τον προσδιορισμό αυτών των μεθόδων από τον Αριστοτέλη, τέθηκαν οι βάσεις για αυτό που στις μέρες μας ονομάζεται *τυπική λογική (formal logic)*.

Πέρα όμως από τη φιλοσοφική του φύση, το ζήτημα της συλλογιστικής απασχόλησε την *Επιστήμη των Υπολογιστών (Computer Science)* από τα πρώτα της βήματα. Μόλις το 1950 ο Turing στη εργασία του "Computing machinery and intelligence"[13] θέτει το ερώτημα εάν μια μηχανή μπορεί να επιδείξει ευφυή συμπεριφορά, παρουσιάζοντας το πολύ γνωστό *Turing Test*. Σε αυτό, κάποιος κριτής καλείται να ξεχωρίσει έναν άνθρωπο από έναν υπολογιστή σύμφωνα με τις απαντήσεις τους σε ίδιες ερωτήσεις. Όπως γίνεται αντιληπτό, η βασική προϋπόθεση για να αντεπεξέλθει ένα υπολογιστικό σύστημα σε αυτή τη δοκιμασία, ήταν η αναπαράσταση της ανθρώπινης γνώσης που έκτοτε αποτελεί ένα από τα κύρια προβλήματα του τομέα της *Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence)*. Η αναπαράσταση της γνώσης θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή ευφυών αποτελεσμάτων και τη διενέργεια σύνθετων και πολύπλοκων ενεργειών, οι οποίες θα πλησιάζουν σε ποιότητα αυτές της ανθρώπινης συλλογιστικής και σκέψης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, απαραίτητα χαρακτηριστικά είναι η μαθηματικά ορισμένη *σύνταξη (syntax)* και η *σημασιολογία (semantics)* που θα ορίσουν μια μονοσήμαντη και πλήρως καθορισμένη ερμηνεία της γνώσης. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν οι *γλώσσες αναπαράστασης γνώσης (knowledge representation languages)*.

Στις μέρες μας, πολλά υπολογιστικά συστήματα χρησιμοποιούν κάποιο είδος γλώσσας για την αναπαράσταση της γνώσης με σκοπό να βελτιώσουν τις δυνατότητες και την απόδοσή τους. Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι οι βάσεις δεδομένων, στις οποίες η γνώση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ευφυή αναζήτηση των περιεχομένων τους [57], καθώς και τα συστήματα *ανάκτησης δεδομένων (information retrieval)* στα οποία με τη χρήση γνώσης βελτιώνεται η α-

νάκληση (*recall*) και η ακρίβεια (*precision*) τους [60]. Τα τελευταία χρόνια όμως οι γλώσσες αναπαράστασης γνώσης συγκέντρωσαν το ενδιαφέρον της Επιστήμης των Υπολογιστών για την πραγματοποίηση ενός μεγάλου στόχου, του *Σημασιολογικού Ιστού* (*Semantic Web*).

Ο όρος Σημασιολογικός Ιστός ορίστηκε από τον Tim Berners Lee στην ομώνυμη εργασία του [95]. Ο Tim Berners Lee διέκρινε ότι, παρά την τεράστια εξέλιξη και επιτυχία του *Παγκόσμιου Ιστού* (*World-Wide Web*) τις δυο τελευταίες δεκαετίες, η πληροφορία που περιέχει δεν είναι πάντα ευκόλως ανακτήσιμη. Η αναζήτηση διαδομένων ονομάτων ή λέξεων που χρησιμοποιούνται σε παραπάνω από μια γλώσσες, καθώς και η εύρεση συγκεκριμένης πληροφορίας που απαιτεί εξειδικευμένες ερωτήσεις, αποτελούν τέτοια παραδείγματα. Για αυτό το λόγο ο κύριος σκοπός του Σημασιολογικού Ιστού είναι ο μετασχηματισμός του Ιστού από μια συνδεδεμένη αποθήκη εγγράφων σε μια διανεμημένη βάση γνώσης με την προσθήκη σημασιολογικού σχολιασμού στο περιεχόμενο του Ιστού. Με αυτό τον τρόπο η γνώση θα χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των δυνατοτήτων των *πρακτόρων λογισμικού* (*software agents*) καθώς και για τη *διαλειτουργικότητα* (*interoperability*) ανάμεσα σε ετερογενή συστήματα.

Έτσι λοιπόν, για τη δημιουργία μιας διανεμημένης βάσης γνώσης δημιουργήθηκαν οι οντολογίες. Η οντολογία, υπό την αρχική φιλοσοφική έννοια της, είναι ένας θεμελιώδης κλάδος της μεταφυσικής που εστιάζει στη μελέτη της ύπαρξης. Στόχος μιας οντολογίας είναι να καθορίσει ποιες οντότητες και τύποι οντοτήτων υπάρχουν πραγματικά, μελετώντας με αυτό το τρόπο τη δομή του κόσμου. Από την άλλη, στην Επιστήμη των Υπολογιστών, μια οντολογία είναι ένα πρότυπο (κάποια πτυχή) του κόσμου που εισάγει ένα λεξιλόγιο, βάσει του οποίου περιγράφεται ο κόσμος, παρέχοντας ταυτόχρονα μια ρητή προδιαγραφή της κάθε έννοιας του λεξιλογίου. Επειδή η αρχιτεκτονική του Ιστού εξαρτάται από κάποια πρότυπα όπως το HTTP κ.α. που επιτρέπουν την ανταλλαγή και διανομή της πληροφορίας, η δημιουργία μιας τυποποιημένης γλώσσας για την αναπαράσταση οντολογιών ήταν απαραίτητη. Αναγνωρίζοντας αυτή την ανάγκη, η οργάνωση κοινοπραξίας *World Wide Web* (*W3C*) δημιούργησε μια ομάδα για να αναπτύξει μια τέτοια γλώσσα. Το αποτέλεσμα αυτής της δραστηριότητας ήταν η γλώσσα *OWL* (*Web Ontology Language*)[125] που αποτελεί την εξέλιξη των προηγούμενων εργασιών, που είχαν εισάγει την *OIL* (*Ontology Inference Layer*) [90], την *DAML* (*DARPA Agent Markup Language-Ontology Inference Layer*) και την *DAML+OIL* [86].

1.1 Εφαρμογές και Εργαλεία για Περιγραφικές Λογικές

Η *OWL* όπως και οι προηγούμενες γλώσσες για αναπαράσταση οντολογιών βασίστηκαν σε μια *Περιγραφική Λογική* (*Description Logic-DL*) και πιο συγκεκριμένα σε μια πολύ εκφραστική *Περιγραφική Λογική* [111]. Οι *Περιγραφικές Λογικές* (ΠΛ) [102] αποτελούν μια οικογένεια γλωσσών αναπαράστασης γνώσης που είναι επικεντρωμένες στις *έννοιες* (μοναδιαία κατηγορήματα) και τους *ρόλους* (δυαδικά κατηγορήματα), σε αντίθεση με άλλες γλώσσες, όπως η *Λογική-Πρώτης Τάξης* (*First-Order Logic*) [53] (για μια σύντομη και κατανοητή εισαγωγή ο αναγνώστης παραπέμπεται και στο [151]) και ο *Λογικός Προγραμματισμός* (*Logic Programming*), [25, 17] οι οποίες χρησιμοποιούν γενικευμένα *κατηγορήματα* (*predicates*) *n*-οστού βαθμού. Αυτό το οποίο είναι αρκετά ενδιαφέρον για τις ΠΛ, και είναι ο λόγος για τον οποίο έχουν γίνει

αρκετά δημοφιλείς, είναι ότι αποτελούν ένα *εκφραστικό* (*expressive*) και ταυτόχρονα *αποφάνσιμο* (*decidable*) υποσύνολο της Λογικής-Πρώτης Τάξης [52]. Επιπρόσθετα, είναι πολύ εύχρηστες λόγω της ομοιότητάς τους με το αντικειμενοστραφές μοντέλο χωρίς να απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις στα πεδία της αναπαράστασης γνώσης και της μαθηματικής λογικής.

Διαισθητικά, για την αναπαράσταση ενός πεδίου εφαρμογής με την χρήση των ΠΛ ορίζονται *περιγραφές* (*descriptions*) *εννοιών* (*concept*) και *ρόλων* (*role*) σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο μια βάση γνώσης. Τα κυριότερα συστατικά μια *βάσης γνώσης* (*knowledge base*) είναι το *σώμα ορολογίας* (*Terminological Box-TBox*) και το *σώμα ισχυρισμών* (*Assertional Box-ABox*). Στο σώμα ορολογίας περιγράφονται οι σχετικές έννοιες μιας περιοχής εφαρμογής με τη δήλωση των ιδιοτήτων των εννοιών, των ρόλων και των σχέσεων μεταξύ τους, και θα μπορούσαμε να το αντιστοιχίσουμε με το σχήμα μιας βάσης δεδομένων. Από την άλλη, στο σώμα ισχυρισμών περιγράφεται μια συγκεκριμένη κατάσταση με τη δήλωση των ιδιοτήτων των αντικειμένων του πεδίου εφαρμογής, και θα μπορούσαμε να πούμε ότι αντιστοιχεί στα δεδομένα μιας βάσης δεδομένων.

Παρόλο όμως που γίνεται συχνά αυτή η σύγκριση των ΠΛ με τις βάσεις δεδομένων, υπάρχει μια πάρα πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ τους που έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στο γεγονός ότι οι ΠΛ αποτελούν τη βάση του Σημασιολογικού Ιστού. Μια βάση δεδομένων αναπαριστά μονάχα μια ερμηνεία του πεδίου ενδιαφέροντος, αυτή που ορίζεται από τις έννοιες και τις σχέσεις του σχήματος της βάσης δεδομένων, ενώ αντίθετα το σώμα ισχυρισμών μιας βάσης γνώσης αναπαριστά πολλές διαφορετικές ερμηνείες. Πιο συγκεκριμένα, η απουσία πληροφορίας από μια βάση δεδομένων ερμηνεύεται ως αρνητική πληροφορία, ενώ αντίθετα η απουσία πληροφορίας από μια βάση γνώσης ερμηνεύεται ως έλλειψη πληροφορίας. Με άλλα λόγια, ενώ η πληροφορία σε μια βάση δεδομένων θεωρείται πάντοτε πλήρης, η πληροφορία σε μια βάση γνώσης αντιμετωπίζεται γενικά ως ελλιπής. Για αυτό το λόγο η σημασιολογία των ΠΛ ονομάζεται *Ανοιχτού Κόσμου* (*Open World Semantics*) ενώ η σημασιολογία των βάσεων δεδομένων *Κλειστού Κόσμου* (*Closed World Semantics*).

Έστω ότι έχουμε την παρακάτω δήλωση:

(ο) Γιώργος έχει-Παιδί (που είναι) Άντρας

Ένα σύστημα με σημασιολογία κλειστού κόσμου θα απαντούσε στην ερώτηση "έχει παιδί ο Γιώργος που είναι Γυναίκα;" αρνητικά, και αυτό επειδή δεν υπάρχει δήλωση που να αναφέρει κάτι τέτοιο. Από την άλλη, η απόκριση ένα συστήματος με σημασιολογία ανοιχτού κόσμου στην ίδια ερώτηση θα ήταν "δεν γνωρίζω", μια και το ότι δεν υπάρχει τέτοια δήλωση στη γνώση μας, δεν σημαίνει ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Καθώς λοιπόν ο Σημασιολογικός Ιστός και η πληροφορία σε αυτόν αποτελεί ένα δυναμικό και διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, για την ορθή του αναπαράσταση είναι απαραίτητη η σημασιολογία ανοιχτού κόσμου.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι οντολογίες βασίζονται στις ΠΛ, έτσι μια οντολογία περιέχει ένα σώμα ορολογίας και ένα σώμα ισχυρισμών. Μια οντολογία όμως, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής που περιγράφει, μπορεί να είναι πολύ μεγάλη και πολύ πολύπλοκη. Η γνωστή οντολογία με κλινικούς όρους Snomed περιλαμβάνει για παράδειγμα πάνω από 200,000 έννοιες [72], γεγονός που μπορεί να κάνει τη δημιουργία και την επεξεργασία οντολογιών πολύ χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό, η ύπαρξη εργαλείων και υπηρεσιών - που διευκολύνουν τη *μηχανική οντολογιών* - (*ontology engineering*) είναι καίριας σημασίας, τόσο στο χρόνο που απαιτείται για την δημιουργία τους όσο

και στην ποιότητα της προκύπτουσας οντολογίας. Τα κυριότερα εργαλεία για τη δημιουργία και επεξεργασία οντολογιών είναι το SWOOP [193], το Protégé [126], και το TopBraid Composer¹. Εκτός όμως από τα εργαλεία ανάπτυξης οντολογιών απαραίτητα είναι και τα συστήματα συλλογιστικής, τα οποία δίνουν χρήσιμες πληροφορίες στο χρήστη όσον αφορά την οντολογία. Τα πιο εξελιγμένα συστήματα συλλογιστικής είναι το FaCT++ [177], το Racer [93] και το Pellet [206].

Μια από τις κυριότερες υπηρεσίες συλλογιστικής (*reasoning services*) που παρέχεται από όλα τα συστήματα συλλογιστικής είναι ο έλεγχος της συνέπειας (*consistency checking*) μιας οντολογίας. Μια οντολογία είναι *μη-ικανοποιήσιμη* (*inconsistent*) όταν περιέχει μια έννοια της οποίας η περιγραφή αυτό-αναιρείται, με αποτέλεσμα η έννοια αυτή να μην μπορεί ποτέ να περιγράψει κάποιο αντικείμενο του πεδίου εφαρμογής. Εκτός όμως από τον έλεγχο για τις ασυνέπειες, τα συστήματα συλλογιστικής μπορούν να εξάγουν *υπονοούμενη γνώση* (*implicit knowledge*). Με αυτό το τρόπο μπορεί να εξαχθεί κάποιος νέος ισχυρισμός για ένα αντικείμενο, αλλά και να αλλάξει η ιεραρχία εννοιών, εξάγοντας νέες υπο-έννοιες ή υπερ-έννοιες μιας έννοιας. Ακόμα, πρόσφατη εργασία έχει δείξει πώς η χρήση συλλογιστικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει την εξαγωγή *υποενοτήτων μιας οντολογίας* (*modules*) [216], βάσει των οποίων μπορεί να γίνει ένας πιο αποδοτικός ανασχεδιασμός της οντολογίας [202], τεχνική που είναι πολύ σημαντική ιδιαίτερα για μεγάλες οντολογίες.

Έτσι λοιπόν, η διαθεσιμότητα των εργαλείων και των συστημάτων συλλογιστικής έχει συμβάλει σημαντικά στη διάδοση της OWL, όχι μόνο για την ανάπτυξη του Σημασιολογικού Ιστού, αλλά και ως μια δημοφιλής γλώσσα για την ανάπτυξη οντολογιών σε διαφορετικούς τομείς όπως η βιολογία [158], η ιατρική [110], η γεωγραφία [141], η γεωλογία [191], η αστρονομία [186], και η γεωργία [128]. Οι εφαρμογές της OWL έχουν κυριαρχήσει στις βιολογικές επιστήμες όπου έχουν χρησιμοποιηθεί από τους ειδικούς για την ανάπτυξη διάφορων μεγάλων βιοϊατρικών οντολογιών, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι η οντολογία Biological Pathways Exchange (BioPAX) [140], η οντολογία GALEN [75], το θεμελιώδες πρότυπο της ανατομίας (FMA) [110], και η οντολογία του Ιδρύματος Καρκίνου των Ηνωμένων Πολιτειών [152]. Η σημασία της χρήσης υπηρεσιών συλλογιστικής σε τέτοιες εφαρμογές τονίστηκε στο [166], που περιγράφεται η διαδικασία κατά την οποία το ιατρικό λεξικό οντοτήτων (MED), μια μεγάλη οντολογία (με 100.210 έννοιες και 261 ρόλους) που χρησιμοποιείται στο ιατρικό κέντρο της Κολούμπια, μετατράπηκε σε OWL και ελέγχθηκε χρησιμοποιώντας ένα σύστημα συλλογιστικής βασισμένο σε ΠΛ. Αυτός ο έλεγχος αποκάλυψε πολλά λάθη σχεδιασμού, καθώς και ελλιπή ιεραρχία εννοιών, τα οποία εάν δεν διορθώνονταν, θα είχαν σαν αποτέλεσμα τη λανθασμένη διάγνωση παθήσεων σε ασθενείς.

1.2 Σημασιολογική Ανάλυση Πολυμεσικού Περιεχομένου και Περιγραφικές Λογικές

Όπως είδαμε, οι οντολογίες με τη χρήση των εργαλείων και των συστημάτων συλλογιστικής εφαρμόστηκαν σε πολλά και διαφορετικά πεδία εφαρμογών, με τα αποτελέσματά τους να αποτελούν κίνητρο για την περαιτέρω χρήση τους. Ένα από τα θέματα που έχει απασχολήσει έντονα την ερευνητική κοινότητα τα τελευταία χρόνια είναι η μεταφορά της πολυμεσικής πληροφορίας στο Σημασιολογικό Ιστό [153]. Οι

¹<http://www.topbraidcomposer.com/>

λόγοι που δημιουργήθηκε αυτή η ανάγκη είναι αρκετοί. Οι εικόνες και τα βίντεο είναι μια μορφή δεδομένων που κατακλύζει το διαδίκτυο στις μέρες μας, γεγονός στο οποίο έπαιξε σημαντικό ρόλο η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας που τα έκανε ακόμη πιο προσιτά στο μέσο χρήστη. Στις μέρες μας είναι εύκολο κάποιος να τραβήξει μια φωτογραφία ή ένα βίντεο και να τα "ανεβάσει" στο διαδίκτυο. Επιπρόσθετα, η πολυμεσική πληροφορία αποτελεί μια από τις βασικότερες πηγές αναζήτησης για πάρα πολλούς χρήστες. Λόγω του μεγάλου μεγέθους της, όμως, η χειρωνακτική τεκμηρίωση της είναι σχεδόν αδύνατη (η περιγραφή δηλαδή του πολυμεσικού περιεχομένου με ένα σύνολο από μεταδεδομένα), έτσι για την επίτευξη της σημασιολογικής πρόσβασης και αναζήτησης σε πολυμεσική πληροφορία, απαιτείται μια αυτοματοποιημένη ή ημιαυτοποιημένη τεχνική για την τεκμηρίωση του περιεχομένου των πολυμεσικών κειμένων.

Μια προσέγγιση αυτού του ζητήματος περιλαμβάνει αρχικά την εφαρμογή ενός αλγορίθμου *κατάτμησης* (*segmentation*) σε μια εικόνα ή βίντεο, εξάγοντας *τιμήματα* (*segments*) τα οποία αναπαριστούν μια περιοχή ή ένα αντικείμενο μιας εικόνας βάσει κριτηρίων χρώματος, υψής ή σχήματος της εικόνας [68]. Στη συνέχεια, τα τμήματα αυτά επεξεργάζονται από ένα σύστημα *αναγνώρισης* (*recognition*) που τα χαρακτηρίζει σημασιολογικά με μια έννοια, όπως για παράδειγμα θάλασσα, ουρανός, άνθρωπος ή μπάλα [212]. Επειδή, όμως, οι αλγόριθμοι αναγνώρισης δεν μπορούν να προσφέρουν τις περισσότερες φορές ακριβή αποτελέσματα, δεν είναι αρκετοί από μόνοι τους για τη σημασιολογική τεκμηρίωση. Με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων αναγνώρισης, έχει προταθεί στη βιβλιογραφία η εισαγωγή γνώσης στους αλγόριθμους αναγνώρισης. Η πρώτη απόπειρα έγινε από τους Meghini et al. [54, 89] που παρουσίασαν ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί τις ΠΛ με σκοπό την αναπαράσταση και αναζήτηση πολυμεσικής πληροφορίας. Η μέθοδος τους επικεντρώνεται στην αναζήτηση, ενώ η τεκμηρίωση της πολυμεσικής πληροφορίας γίνεται χειρωνακτικά. Μια παρόμοια προσέγγιση για την ανάκτηση εικόνων, η οποία όμως στηρίζεται στο σχήμα των αντικειμένων, γίνεται και από τους Sciascio et al. [66]. Ακόμα, προσεγγίσεις για τη χρήση γλωσσών αναπαράστασης γνώσης με σκοπό την αναγνώριση ή *ερμηνεία* (*interpretation*) μιας σκηνης προτείνονται από τους Moeller et al. στα [70] και [185]. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ΠΛ αναπτύσσεται μια γνώση της οποίας τα αξιώματα βασίζονται σε χωρικές σχέσεις, όπως για παράδειγμα ότι μια πόλη δε μπορεί να βρίσκεται μέσα σε μια λίμνη, με σκοπό την αναγνώριση και την ερμηνεία αεροφωτογραφιών.

Από τις παραπάνω προσεγγίσεις για την αναπαράσταση πληροφορίας πολυμεσικού περιεχομένου βγήκαν κάποια πάρα πολύ σημαντικά συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς παρατηρούν ότι για την ορθή αναπαράσταση ενός πολύ απαιτητικού πεδίου εφαρμογής, όπως της σημασιολογικής τεκμηρίωσης πολυμεσικού περιεχομένου, είναι απαραίτητες κάποιες επεκτάσεις στις ΠΛ. Έτσι λοιπόν, ο Moeller προτείνει την επέκταση των ΠΛ με χωρικές σχέσεις, ενώ ο Sciascio προτείνει πολύ συγκεκριμένες επεκτάσεις που θα επέτρεπαν την αναπαράσταση του *περιγράμματος* (*contour*) και της *μορφής* (*shape*) μιας εικόνας. Ο Meghini, από την μεριά του, αναγνωρίζοντας ότι η επεξεργασία πολυμεσικών κειμένων είναι μια διαδικασία η οποία περιέχει εγγενή *αβέβαιη* (*uncertain*) και *ασαφή* (*fuzzy*) πληροφορία, προτείνει την επέκταση της ΠΛ *ALC* με τη χρήση ασαφών συνόλων. Η αιτία που οδήγησε σε αυτή την πρόταση, είναι το γεγονός πως ακόμα και ένας πολύ αναπτυγμένος αλγόριθμος αναγνώρισης, δε θα μπορέσει ποτέ να αναγνωρίσει με απόλυτη βεβαιότητα αν ένα αντικείμενο (τμήμα εικόνας) ανήκει σε ένα συγκεκριμένο χρώμα ή έχει ένα συγκεκριμένο σχήμα.

Η πρώτη τυπική εργασία σε ασαφείς ΠΛ ήταν η fuzzy-*ALC* από τον Straccia [59]. Έκτοτε, διάφορες ασαφείς επεκτάσεις ΠΛ έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία [94, 138, 162, 7, 145, 209, 180, 222, 200, 6, 221, 227, 172, 213, 214]. Ανάμεσα τους ξεχωρίζει η εργασία των Stoilos et al. [209] που παρουσιάζει τη σύνταξη, τη σημασιολογία και τον αλγόριθμο συλλογιστικής για την εκφραστική ασαφή ΠΛ fuzzy-*SHLN*.

1.3 Συνεισφορά και Δομή της Διατριβής

Οι εκφραστικές ΠΛ αποτελούν τη βάση του Σημασιολογικού Ιστού, και για αυτές έχουν αναπτυχθεί εργαλεία που διευκολύνουν τη δημιουργία οντολογιών καθώς και μηχανές συλλογιστικής, για τη συλλογιστική σε αυτές. Επιπρόσθετα, με τη χρήση αυτών των εργαλείων, οι ΠΛ εφαρμόστηκαν αποτελεσματικά για την αναπαράσταση διαφορετικών πεδίων, αποδεικνύοντας με αυτό το τρόπο τη μεγάλη χρησιμότητα των τεχνολογιών αναπαράστασης γνώσης. Ένα από τα μειονεκτήματά τους, όμως, είναι η αδυναμία να αναπαραστήσουν πεδία τα οποία εμπεριέχουν *ατελή πληροφορία*, όπως είναι η ασαφής, η αβέβαιη και η ανακριβής πληροφορία. Για το σκοπό αυτό προτάθηκαν στην βιβλιογραφία οι επεκτάσεις των ΠΛ με χρήση της ασαφούς συνολοθεωρίας [59][209].

Παρόλο όμως που η πρώτη εργασία για ασαφείς ΠΛ δημοσιεύτηκε το 1998 από τον Straccia [59], λίγη δουλειά έχει γίνει ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή των ασαφών ΠΛ σε πεδία εφαρμογής που πραγματεύονται αβέβαιη ή ασαφή πληροφορία. Οι περισσότερες δουλειές σε αυτό το χώρο παρουσιάζουν τη σύνταξη και τη σημασιολογία ασαφών ΠΛ, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ασαφείς τελεστές [200, 6, 221, 227]. Εξαιρέσεις αποτελούν οι εργασίες των Stoilos et al. που πρώτοι παρουσίασαν αλγόριθμους συλλογιστικής για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ [145, 180, 209]. Οι εργασίες αυτές έθεσαν τις βάσεις για την πρακτική εφαρμογή των εκφραστικών ασαφών ΠΛ, όμως επιπλέον εργασία σε αυτό το πεδίο ήταν απαραίτητη. Η θεωρητική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου συλλογιστικής για την f_{KD} -*SHLN* που πρότειναν είναι πολύ υψηλή (2-NEXPTIME). Το γεγονός αυτό κάνει την υλοποίηση ενός ασαφούς συστήματος συλλογιστικής, βάσει του θεωρητικού αλγορίθμου, άνευ πρακτικής σημασίας. Το πρόβλημα της αυξημένης πολυπλοκότητας στους αλγορίθμους συλλογιστικής για κλασικές ΠΛ αντιμετωπίστηκε με τη χρήση *τεχνικών βελτιστοποίησης (optimization techniques)*. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης για αλγορίθμους συλλογιστικής έχουν συνήθως χαμηλή πολυπλοκότητα και μετατρέπουν έναν ακριβό σε πολυπλοκότητα θεωρητικό υπολογισμό, σε έναν ισοδύναμο και πρακτικό με χαμηλότερη πολυπλοκότητα. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές δημιουργήθηκαν συστήματα συλλογιστικής όπως το FaCT++ [177], το Racer [93] και το Pellet [206], τα οποία προσφέρουν χαμηλή πρακτική πολυπλοκότητα και ικανοποιητικό χρόνο απόκρισης σε υπηρεσίες συλλογιστικής εκφραστικών ΠΛ με υψηλή θεωρητική πολυπλοκότητα. Εκτός όμως του συστήματος ασαφούς συλλογιστικής, για τη χρήση των ασαφών ΠΛ σε εφαρμογές, είναι απαραίτητη και η δημιουργία εργαλείων για την ανάπτυξη ασαφών βάσεων γνώσης. Η σύνταξη τους είναι διαφορετική από αυτή των κλασικών ΠΛ και το γεγονός αυτό κάνει ακατάλληλη τη χρήση των υπαρχουσών εργαλείων για την ανάπτυξη ασαφών βάσεων γνώσης. Επιπρόσθετα, λόγω της διαφορετικής σύνταξης των ασαφών ΠΛ, δεν είναι δυνατή η χρήση ειδικών αποθηκευτικών συστημάτων που έχουν κατασκευαστεί για την αποθήκευση βάσεων γνώσης και υποστηρίζουν επερωτήματα σε αυτές.

Κύριος στόχος της εργασίας μας είναι η μετατροπή του θεωρητικού φορμαλισμού της ασαφούς ΠΛ $f\text{-SHIN}$ σε έναν πρακτικά εφαρμόσιμο αλγόριθμο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, πραγματοποιήθηκε μελέτη και ανάπτυξη εργαλείων που επιτρέπουν την πρακτική εφαρμογή των εκφραστικών ασαφών ΠΛ σε διάφορα πεδία εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, τροποποιήσαμε κάποιες τεχνικές βελτιστοποίησης που έχουν εφαρμοστεί σε συστήματα συλλογιστικής για κλασικές ΠΛ έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν για την ασαφή ΠΛ $f\text{-SHIN}$, ενώ προτείνουμε και νέες πρότυπες τεχνικές βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται αποκλειστικά σε ασαφείς ΠΛ. Επιπρόσθετα, υλοποιήσαμε το πρώτο συστήματα συλλογιστικής για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ, το FiRE (Fuzzy Reasoning Engine), με κατάλληλες επεκτάσεις έτσι ώστε να μπορεί να αποθηκεύει μια ασαφή βάση γνώσης και να υποστηρίζει ασαφή συζευκτικά επερωτήματα. Για το σύστημα συλλογιστικής FiRE πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της απόδοσης του όσο αφορά τις υπηρεσίες συλλογιστικής αλλά και τα ασαφή συζευκτικά επερωτήματα. Τέλος, κάνοντας χρήση των συστημάτων συλλογιστικής που υλοποιήσαμε πραγματοποιήσαμε νέες προσεγγίσεις για τη σημασιολογική τεκμηρίωση πολυμεσικού περιεχομένου που στηρίζονται σε εκφραστικές ασαφείς ΠΛ, ενώ εργαστήκαμε και για την συνύφανση ασαφών Περιγραφικών Λογικών και Νευρωνικών Δικτύων.

Πιο αναλυτικά η παρούσα διατριβή οργανώνεται ως εξής:

- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο για την κατανόηση του υπολοίπου της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια εισαγωγή στην εκφραστική ΠΛ $SHOIN$ παρουσιάζοντας τη σύνταξη και την σημασιολογία της, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η ασαφής της επέκταση $f_{KD}\text{-SHOIN}$ όπως αυτή παρουσιάστηκε από τους Stoilos et al. [209]. Τέλος, παρουσιάζεται πολύ συνοπτικά ο αλγόριθμος tableau για την ασαφή ΠΛ $f_{KD}\text{-SHIN}$.
- Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εργασία μας στις τεχνικές βελτιστοποίησης για την ασαφή ΠΛ $f_{KD}\text{-SHIN}$. Αρχικά, παρουσιάζονται οι κατηγορίες των τεχνικών βελτιστοποίησης που έχουν προταθεί ως τώρα στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συνεισφορά μας στις κατηγορίες τεχνικών βελτιστοποίησης που δεν αφορούν την υπαγωγή εννοιών (μια και στην ΠΛ $f_{KD}\text{-SHIN}$ η υπαγωγή εννοιών δεν διαφοροποιείται από τις κλασικές ΠΛ [209]) δηλαδή τις βελτιστοποιήσεις μείωσης των απαιτήσεων χώρου (*reduce storage requirements optimizations*), τις βελτιστοποιήσεις προεπεξεργασίας (*preprocessing optimizations*) και τις βελτιστοποιήσεις ικανοποιησιμότητας (*satisfiability optimizations*). Πιο συγκεκριμένα, οι βελτιστοποιήσεις μείωσης των απαιτήσεων έχουν σαν στόχο τη μείωση των απαιτήσεων χώρου κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου tableau. Συγκεκριμένα στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται:
 - Η τεχνική κανονικοποίησης βαθμών (*degrees normalization*), και
 - η διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμών (*ABox partitioning*).

Από την άλλη μεριά, οι βελτιστοποιήσεις προεπεξεργασίας τροποποιούν την βάση γνώσης κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε ο έλεγχος της συνέπειας να γίνεται ευκολότερος. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται:

- Το οκνηρό ξεδίπλωμα (*lazy unfolding*), και

- η λεκτική κανονικοποίηση και κωδικοποίηση (*lexical normalization and encoding*).

Τέλος, ο σκοπός των βελτιστοποιήσεων ικανοποιησιμότητας είναι η βελτίωση της τυπικής απόδοσης κατά τον έλεγχο ικανοποιησιμότητας. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται:

- Η τεχνική των ιχνών (*trace technique*),
 - η πρώτα αναζήτηση σε βάθος (*depth first search*),
 - η οδηγούμενη οπισθοδρόμηση (*dependency directed backtracking*),
 - η τοπική απλοποίηση (*local simplification*),
 - η σημασιολογική διακλάδωση (*semantic branching*),
 - οι βελτιστοποιήσεις για το μέγιστο κάτω φράγμα (*optimized GLB*), και τέλος
 - οι βελτιστοποιήσεις για τα γενικευμένα κυκλικά αξιώματα (*managment of GCIs*).
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το σύστημα συλλογιστικής FiRE [194] το οποίο ήταν το πρώτο σύστημα ασαφούς συλλογιστικής που υποστήριξε εκφραστικές ασαφείς ΠΛ. Παρουσιάζεται η σύνταξη και το γραφικό περιβάλλον που διαθέτει μέσω των οποίων ένας χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ασαφείς βάσεις γνώσης. Σε αυτό το σημείο, είναι πολύ σημαντικό να επισημάνουμε ότι το FiRE αποτελεί το μοναδικό εργαλείο που διαθέτει γραφικό περιβάλλον και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ασαφών βάσεων γνώσης. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται μια πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης των υπηρεσιών συλλογιστικής του FiRE. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια σύγκριση της απόδοσης του συστήματος FiRE με χρήση ή μη των τεχνικών βελτιστοποίησης που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3, στην συλλογιστική με ασαφείς βάσεις γνώσης διαφορετικού μεγέθους και πολυπλοκότητας.

Επιπρόσθετα, προτείνεται μια σύνταξη σε RDF τριάδες για ασαφείς βάσεις γνώσης, ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση τους σε συστήματα αποθήκευσης κλασικών βάσεων γνώσης. Παρουσιάζουμε ακόμα την ενσωμάτωση του συστήματος αποθήκευσης Sesame στο σύστημα συλλογιστικής FiRE, βάσει της προτεινόμενης σύνταξης. Με αυτή την ενσωμάτωση όχι μόνο δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης μιας ασαφούς βάσης γνώσης αλλά, επιπρόσθετα, υποστηρίζονται τα ασαφή συζευκτικά επερωτήματα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [198], για τα οποία παρουσιάζεται πειραματική αξιολόγηση. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως το πρόβλημα των συζευκτικών επερωτημάτων παραμένει ανοιχτό στις κλασικές ΠΛ και πως η εργασία μας είναι η πρώτη απόπειρα για συζευκτικά επερωτήματα σε εκφραστικές ασαφείς ΠΛ.

- Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η συνεισφορά μας στο πρόβλημα της σημασιολογικής τεκμηρίωσης πολυμεσικού περιεχομένου. Το πρόβλημα αυτό μας απασχόλησε από τα πρώτα χρόνια της εργασίας μας προσπαθώντας αρχικά να το προσεγγίσουμε με την δημιουργία κλασικών βάσεων γνώσης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουμε μια οντολογία που βασίζεται σε οπτικούς περιγραφείς για τη συλλογιστική σε πολυμεσικά κείμενα. Το γεγονός όμως ότι, παρόλο που η

απόδοση των αλγορίθμων ανάλυσης πολυμεσικού υλικού είναι σχετικά υψηλή, τα αποτελέσματα που παράγουν τις περισσότερες φορές εμπεριέχουν ασάφεια μας έκανε να στραφούμε στη χρήση των ασαφών ΠΛ και του συστήματος συλλογιστικής FiRE. Παρουσιάζονται λοιπόν οι προσεγγίσεις μας που βασίζονται σε ασαφείς ΠΛ στα προβλήματα της:

- σημασιολογικής ταξινόμησης εικόνων,
 - σημασιολογικής δεικτοδότησης εικόνων, και
 - σημασιολογικής περιήγησης σε βίντεο.
- Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η εργασία μας, το τελευταίο διάστημα της διατριβής μας, σε ένα εκκολαπτόμενο ερευνητικό πεδίο το οποίο προσπαθεί να συνδυάσει τα οφέλη των ΠΛ με τα πλεονεκτήματα των νευρωνικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια αρχιτεκτονική στην οποία με την βοήθεια μιας ασαφούς βάσης γνώσης - σε ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής - και του FiRE προσδιορίζονται οι επιθυμητές έξοδοι ενός νευρωνικού δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου του οποίου η απόδοση στην ταξινόμηση βελτιώνεται σημαντικά στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής.
 - Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται πιο αναλυτικά σχετική βιβλιογραφία στο πεδίο των τεχνικών βελτιστοποίησης και των ασαφών συστημάτων συλλογιστικής, ενώ στο κεφάλαιο 8 ολοκληρώνεται η διατριβή ανακεφαλαιώνοντας την συνεισφορά μας και παρουσιάζοντας θέματα για πιθανή μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Εκφραστικές Περιγραφικές Λογικές

Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται μια σύντομη εισαγωγή στις θεωρίες που κρίνονται απαραίτητες για την κατανόηση του υπόλοιπου της διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα 2.1 γίνεται μια εισαγωγή στις εκφραστικές Περιγραφικές Λογικές παρουσιάζοντας τη σύνταξη, τη σημασιολογία καθώς και τις υπηρεσίες συλλογιστικής της γλώσσας *SHOIN*, ενώ στην επόμενη ενότητα (2.2) παρουσιάζεται η ασαφής επέκτασή της. Πιο αναλυτικά, στην υπο-ενότητα 2.2.1 γίνεται αρχικά μια σύντομη εισαγωγή στην ασαφή συνολοθεωρία, ενώ στις υπο-ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται η σύνταξη, η σημασιολογία (2.2.2) και οι υπηρεσίες συλλογιστικής της ασαφούς ΠΛ f_{KD} -*SHOIN* (2.2.3). Τέλος στην ενότητα 2.2.4 παρουσιάζεται συνοπτικά ο αλγόριθμος συλλογιστικής για τη f_{KD} -*SHOIN* όπως παρουσιάστηκε στο [146]. Πρέπει να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο πως ο στόχος μας είναι να παρουσιάσουμε πολύ συνοπτικά τη σημασιολογία και τον μη βελτιστοποιημένο αλγόριθμο συλλογιστικής των ασαφών ΠΛ, προκειμένου να γίνουν αντιληπτά τα επόμενα κεφάλαια που αναφέρονται στις βελτιστοποιήσεις και την πρακτική εφαρμογή των ασαφών ΠΛ. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στο [109] για μια εισαγωγή στις Περιγραφικές Λογικές και στο [80] για μια αναλυτική περιγραφή των αλγορίθμων tableau. Από την άλλη, όσο αφορά την ασαφή συνολοθεωρία παραπέμπεται στο [45], ενώ αναλυτικά οι αλγόριθμοι συλλογιστικής για ασαφείς ΠΛ περιγράφονται στα [145, 209].

2.1 Η Περιγραφική Λογική *SHOIN*

Οι Περιγραφικές Λογικές (ΠΛ) (Description Logics-DLs) [109] αποτελούν μια οικογένεια γλωσσών αναπαράστασης γνώσης που δημιουργήθηκαν με σκοπό τη δομημένη, τυπική και κατανοητή από τον άνθρωπο, καταγραφή γνώσης ενός πεδίου εφαρμογής. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους, που τις έχουν κάνει πολύ διαδεδομένες στις μέρες μας, είναι η εκφραστική τους δύναμη καθώς και το ότι στη πλειοψηφία τους είναι *αποφάνσιμες* (*decidable*), προσφέρουν δηλαδή αποφάνσιμους αλγόριθμους συλλογιστικής. Το όνομα τους προέρχεται από το γεγονός ότι βασίζονται στη *λογική* (*logic based*), σε αντίθεση με προγενέστερες γλώσσες αναπαράστασης γνώσης όπως τα *Σημασιολογικά Δίκτυα* (*Semantic Networks*) [22] και τα *Πλαίσια* (*Frames*) [16], και από το γεγονός ότι για την αναπαράσταση του πεδίου εφαρμογής ορίζονται *περιγραφές* (*descriptions*) *εννοιών* (*concept*) και *ρόλων* (*role*). Διαισθητικά θα λέγαμε

πως μια έννοια αναπαριστά ένα σύνολο ατόμων με κοινές ιδιότητες, ενώ ένας ρόλος αναπαριστά μια σχέση ανάμεσα σε δυο άτομα.

Για τη περιγραφή μιας έννοιας ή ενός ρόλου χρησιμοποιούνται οι κατασκευαστές (*constructors*) εννοιών και ρόλων που προσφέρει η ΠΛ μαζί με τις έννοιες και τους ρόλους του πεδίου εφαρμογής. Αν υποθέσουμε, λοιπόν, πως η έννοια Άνθρωπος και ο ρόλος έχει-Παιδί είναι μια από τις έννοιες και ένας από τους ρόλους του πεδίου εφαρμογής αντίστοιχα, τότε μπορούμε να περιγράψουμε την έννοια Γονιός σαν το άτομο που είναι Άνθρωπος και για το οποίο υπάρχει η σχέση έχει-Παιδί που το συνδέει με ένα άλλο άτομο που είναι Άνθρωπος.

Οι έννοιες και οι ρόλοι χρησιμοποιούνται στο σώμα ορολογίας (*Terminological Box-TBox*) και στο σώμα ισχυρισμών (*Assertional Box-ABox*) τα οποία αποτελούν τα κυριότερα συστατικά μιας βάσης γνώσης (*knowledge base*). Στο σώμα ορολογίας περιγράφονται οι έννοιες και οι ρόλοι ενός πεδίου εφαρμογής, όπως και οι σχέσεις που μπορεί να έχουν μεταξύ τους, και θα μπορούσαμε να το αντιστοιχίσουμε με το σχήμα μιας βάσης δεδομένων. Από την άλλη, στο σώμα ισχυρισμών περιγράφεται μια συγκεκριμένη κατάσταση με ισχυρισμούς για τα άτομα του πεδίου εφαρμογής, και θα μπορούσαμε να πούμε ότι αντιστοιχεί στα δεδομένα μιας βάσης δεδομένων.

Το σύνολο των κατασκευαστών ρόλων και εννοιών που διαθέτει μια ΠΛ ορίζει την εκφραστικότητα της (*expressivity*). Με άλλα λόγια, ορίζει το πόσο περίπλοκες έννοιες και ρόλους, οπότε και πεδία εφαρμογής, μπορεί να περιγράψει και για αυτό το λόγο μια ΠΛ παίρνει το όνομα της από τους κατασκευαστές που προσφέρει. Στη παρακάτω ενότητα θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση της εκφραστικής ΠΛ *SHOIN*.

2.1.1 Σύνταξη και Σημασιολογία

Ο βασικός σκοπός της δημιουργίας των ΠΛ είναι η αναπαράσταση γνώσης και η συλλογιστική σε αυτή. Για την ορθή επίτευξη των παραπάνω είναι απαραίτητα ένα *συντακτικό* (*syntax*) για τη δημιουργία της γνώσης, και μια *σημασιολογία* (*semantics*) για την ερμηνεία της κατά τη συλλογιστική.

Για τη σύνταξη μιας γνώσης οι ΠΛ χρησιμοποιούν ένα αλφάβητο που αποτελείται από τα σύνολα των διακεκριμένων *ατομικών εννοιών* (*atomic concepts*) (**C**), των *ατομικών ρόλων* (*atomic roles*) (**R**) και των *ατόμων* (*individuals*) (**I**) του πεδίου εφαρμογής. Οι έννοιες αναπαριστούν σύνολα ατόμων με κοινές ιδιότητες, παρόμοια με τις κλάσεις στο αντικειμενοστραφές μοντέλο δεδομένων, οι ρόλοι αναπαριστούν σχέσεις ανάμεσα σε δύο άτομα και τέλος τα άτομα αποτελούν τα αντικείμενα του πεδίου εφαρμογής που περιγράφεται. Με τη χρήση αυτού του αλφαβήτου, σε συνδυασμό με το σύνολο των κατασκευαστών ρόλων και εννοιών που διαθέτει μια ΠΛ, συντάσσονται οι *σύνθετες έννοιες* (*complex concepts*).

Μια ΠΛ παίρνει το όνομα της από τους κατασκευαστές που διαθέτει. Η *ALC* (*Attribute Language with Complement*) έχει εισαχθεί από τους Schmidt-Schauß and Smolka [34] ως η ελάχιστη εκφραστική γλώσσα πρακτικού ενδιαφέροντος. Η *ALC* επιτρέπει τη χρήση των \perp και \top που ονομάζονται *κενή* (*bottom*) και *καθολική* έννοια (*top*) αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, αν υποθέσουμε τις ατομικές έννοιες C και D , τότε σαν $\neg C$ συντάσσεται η *άρνηση* (*complement*) της C , σαν $C \sqcap D$ η *τομή* ή *σύζευξη* (*conjunction*) των C και D , ενώ σαν $C \sqcup D$ η *ένωση* ή *διάζευξη* (*disjunction*) των C και D . Ακόμα, αν υποθέσουμε ένα ρόλο R , τότε η έννοια $\exists R.C$ υποδηλώνει τον *υπαρξιακό περιορισμό* (*existential restriction*) και η έννοια $\forall R.C$ τον *περιορισμό τιμής* (*value restriction*).

Κάθε επιπλέον κατασκευαστής εννοιών καθώς και τα αξιώματα ρόλων υποδηλώνονται με ένα γράμμα στο όνομα της ΠΛ, δηλώνοντας τις πιο εκφραστικές ΠΛ. Έτσι λοιπόν οι *ονοματικές έννοιες* (*nominal concepts*) που συντάσσονται με τον κατασκευαστή $\{\}$ υποδηλώνονται με το γράμμα \mathcal{O} , ενώ οι *περιορισμοί πληθικότητας* (*number restrictions*) που συντάσσονται με το \geq , όταν πρόκειται για *περιορισμούς το λιγότερο* (*at-least restrictions*), και με το \leq , όταν πρόκειται για *περιορισμούς το πολύ* (*at-most restrictions*) υποδηλώνονται με το γράμμα \mathcal{N} . Το σύνολο λοιπόν όλων των προαναφερθέντων κατασκευαστών ορίζει την ΠΛ \mathcal{ALCON} . Όσον αφορά τα αξιώματα ρόλων, οι *μεταβατικοί ρόλοι* (*transitive roles*) υποδηλώνονται με το γράμμα \mathcal{S} και συντάσσονται με $\text{Trans}()$, η *ιεραρχία ρόλων* (*roles hierarchy*) υποδηλώνονται με το γράμμα \mathcal{H} και συντάσσεται με \sqsubseteq , και οι *αντίστροφοι ρόλοι* (*inverse roles*) υποδηλώνονται με το γράμμα \mathcal{I} και συντάσσονται με $-$. Για την αποφυγή πολύ μεγάλων ονομάτων το \mathcal{S} χρησιμοποιείται σαν συντομογραφία της \mathcal{ALC} [109], οπότε η ΠΛ που προκύπτει από τους παραπάνω κατασκευαστές είναι η \mathcal{SHOIN} . Άτυπα, σαν *εκφραστικές* (*expressive*) ορίζονται οι ΠΛ που υποστηρίζουν τουλάχιστον μεταβατικούς ρόλους (δηλαδή η ΠΛ \mathcal{S} και οι πιο εκφραστικές) ενώ σαν *πολύ εκφραστικές* (*very expressive*) ορίζονται οι ΠΛ που υποστηρίζουν τουλάχιστον μεταβατικούς ρόλους και περιορισμούς πληθικότητας.

Τυπικά ο ορισμός των εννοιών της \mathcal{SHOIN} δίνεται παρακάτω.

Ορισμός 2.1.1 Έστω $RN \in \mathbf{R}$ ένας ατομικός ρόλος και R ένας \mathcal{SHOIN} -ρόλος. Οι \mathcal{SHOIN} -ρόλοι ορίζονται από την παρακάτω αφηρημένη σύνταξη (*abstract syntax*): $S ::= RN \mid S^-$, όπου το S^- συμβολίζει τον αντίστροφο (*inverse*) ρόλο του S . Η σχέση *αντίστροφων* ρόλων είναι *συμμετρική* και για την απλοποίηση περιπτώσεων όπως η S^{--} , ορίζουμε τη συνάρτηση Inv η οποία επιστρέφει τον αντίστροφο ενός ρόλου. Πιο συγκεκριμένα,

$$\text{Inv}(S) := \begin{cases} RN^- & \text{αν } S = RN, \\ RN & \text{αν } S = RN^-. \end{cases}$$

Το σύνολο των \mathcal{SHOIN} -εννοιών είναι το μικρότερο σύνολο τέτοιο ώστε,

1. κάθε ατομική έννοια $CN \in \mathbf{C}$ είναι μια \mathcal{SHOIN} -έννοια,
2. οι ειδικές έννοιες \perp και \top είναι \mathcal{SHOIN} -έννοιες,
3. αν οι C και D είναι \mathcal{SHOIN} -έννοιες και R είναι ένας \mathcal{SHOIN} -ρόλος, τότε οι $(\neg C)$, $(C \sqcup D)$, $(C \sqcap D)$, $(\forall R.C)$, $(\exists R.C)$ είναι επίσης \mathcal{SHOIN} -έννοιες,
4. αν $o \in \mathbf{I}$ είναι ένα άτομο, τότε η $\{o\}$ είναι μια \mathcal{SHOIN} -έννοια και
5. αν R είναι ένας απλός¹ (*simple*) \mathcal{SHOIN} -ρόλος και $p \in \mathbf{N}$, τότε $(\geq pR)$ και $(\leq pR)$ είναι επίσης \mathcal{SHOIN} -έννοιες.

◇

Η εκφραστική δυνατότητα της \mathcal{SHOIN} είναι πολύ υψηλή και με τη χρήση των κατασκευαστών της μπορούμε να γράψουμε τυπικά την έννοια *Γονιός γράφοντας*

Άνθρωπος \sqcap Ξέχει-Παιδί.Άνθρωπος

¹Ένας ρόλος ονομάζεται απλός αν δεν είναι μεταβατικός ή δεν έχει μεταβατικούς υπο-ρόλους.

ακόμα μπορούμε να δηλώσουμε την έννοια του πολύτεχνου γράφοντα,

$$\text{Άνθρωπος} \sqsupseteq \text{Ζέχει-Παιδί}$$

την έννοια του ανθρώπου που έχει μόνο γιους γράφοντα,

$$\text{Άνθρωπος} \sqsupseteq \text{Ξέχει-Παιδί} \wedge \text{Άντρας} \sqsupseteq \text{Υέχει-Παιδί} \wedge \text{Άντρας}$$

και την έννοια των ημερών της εβδομάδας γράφοντα

$$\{\text{Δευτέρα}\} \sqcup \{\text{Τρίτη}\} \dots \sqcup \{\text{Κυριακή}\}$$

Επιπρόσθετα, μπορούμε να ορίσουμε και ιδιότητες ρόλων, όπως ότι ο ρόλος έχει-Πρόγονο είναι μεταβατικός και να γράψουμε

$$\text{Trans}(\text{έχειΠρόγονο})$$

ότι ο ρόλος έχειΓιό είναι υπορόλος του ρόλου έχειΠαιδί γράφοντα

$$\text{έχειΓιό} \sqsubseteq \text{έχειΠαιδί}$$

και πως ο ρόλος έχειΠαιδί έχει αντίστροφο τον ρόλο έχειΓονιό γράφοντα

$$\text{έχειΓονιό} \sqsubseteq \text{έχειΠαιδί}^{-}$$

Ένα από τα χαρακτηριστικά που κάνει τις γλώσσες αναπαράστασης γνώσης να ξεχωρίζουν από τις φυσικές γλώσσες είναι η τυπικότητα η οποία τις διακρίνει. Πιο συγκεκριμένα, τα δομικά στοιχεία τους ερμηνεύονται με ένα τυπικό, μαθηματικό τρόπο, έτσι ώστε το νόημα μιας έννοιας (δήλωσης) να επιδέχεται μοναδική ερμηνεία, πράγμα το οποίο δε συμβαίνει με τις φυσικές γλώσσες, στις οποίες οι προτάσεις μπορεί να εμπεριέχουν αμφισημία. Οι ΠΛ έχουν αυτό το οποίο λέγεται *μοντελοθεωρητική σημασιολογία* (*model-theoretic semantics*), η οποία ορίζεται με τη χρήση ερμηνειών. Μια *ερμηνεία* (*interpretation*) \mathcal{I} αποτελείται από ένα *χώρο ερμηνείας* (*domain of interpretation*) $\Delta^{\mathcal{I}}$ και από μια *συνάρτηση ερμηνείας* $\cdot^{\mathcal{I}}$ (*interpretation function*), όπου ο χώρος ερμηνείας αποτελεί ένα σύνολο *αντικειμένων* (*objects*) και η συνάρτηση ερμηνείας απεικονίζει,

- κάθε άτομο $a \in \mathbf{I}$ σε ένα αντικείμενο $a^{\mathcal{I}} \in \Delta^{\mathcal{I}}$,
- κάθε ατομική έννοια $CN \in \mathbf{C}$ σε ένα υποσύνολο $CN^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta^{\mathcal{I}}$, και
- κάθε ατομικό ρόλο $RN \in \mathbf{R}$ σε μια δυαδική σχέση $RN^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}$.

Η συνάρτηση ερμηνείας μπορεί να επεκταθεί έτσι ώστε να ερμηνευτούν και οι πολύπλοκες *SHOIN*-έννοιες και ρόλοι. Οι ερμηνείες αυτές φαίνονται στον Πίνακα 2.1, όπου $\#$ συμβολίζει την πληθικότητα ενός συνόλου.

Όπως γίνεται αντιληπτό κάθε *SHOIN*-έννοια ερμηνεύεται ως ένα υποσύνολο του $\Delta^{\mathcal{I}}$. Για παράδειγμα η έννοια \top ερμηνεύεται ως το σύνολο που περιέχει όλα τα αντικείμενα του χώρου ερμηνείας, ενώ η έννοια \perp ερμηνεύεται ως το κενό σύνολο, το οποίο και δικαιολογεί την ονομασία που τους έχουμε προσδώσει. Η έννοια $\neg C$ ερμηνεύεται ως το σύνολο το οποίο περιέχει όλα τα αντικείμενα του χώρου ερμηνείας,

Πίνακας 2.1: Σημασιολογία SHOIN-εννοιών και ρόλων.

Κατασκευαστής	Σύνταξη	Σημασιολογία
καθολική έννοια	\top	$\Delta^{\mathcal{I}}$
κενή έννοια	\perp	\emptyset
γενικευμένη άρνηση	$\neg C$	$\Delta^{\mathcal{I}} \setminus C^{\mathcal{I}}$
τομή (σύζευξη)	$C \sqcap D$	$C^{\mathcal{I}} \cap D^{\mathcal{I}}$
ένωση (διάζευξη)	$C \sqcup D$	$C^{\mathcal{I}} \cup D^{\mathcal{I}}$
ονοματική έννοια	$\{o\}$	$\{o\}^{\mathcal{I}} = \{o^{\mathcal{I}}\}$
υπαρξιακός περιορισμός	$\exists R.C$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists y. \langle x, y \rangle \in R^{\mathcal{I}} \wedge y \in C^{\mathcal{I}}\}$
περιορισμός τιμής	$\forall R.C$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \forall y. \langle x, y \rangle \in R^{\mathcal{I}} \rightarrow y \in C^{\mathcal{I}}\}$
περιορισμός το-πολύ	$\leq nR$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \#\{y \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \langle x, y \rangle \in R^{\mathcal{I}}\} \leq n\}$
περιορισμός το-λιγότερο	$\geq nR$	$\{x \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \#\{y \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \langle x, y \rangle \in R^{\mathcal{I}}\} \geq n\}$
αντίστροφοι ρόλοι	R^-	$x, y \in \Delta^{\mathcal{I}}, \langle x, y \rangle \in R^{\mathcal{I}} \text{ ανν } \langle y, x \rangle \in (R^-)^{\mathcal{I}}$

εκτός αυτών που ανήκουν στην ερμηνεία της έννοιας C . Οι έννοιες $C \sqcap D$ και $C \sqcup D$ ερμηνεύονται ως το σύνολο το οποίο προκύπτει από την τομή και την ένωση, αντίστοιχα, των ερμηνειών των εννοιών C και D . Από την άλλη, η έννοια $\exists R.C$ περιέχει το σύνολο των αντικειμένων του $\Delta^{\mathcal{I}}$, τα οποία συμμετέχουν στο ρόλο $R^{\mathcal{I}}$ με κάποιο άλλο αντικείμενο το οποίο ανήκει στην ερμηνεία της έννοιας C , δηλαδή στο σύνολο $C^{\mathcal{I}}$. Επιπρόσθετα, η ερμηνεία της έννοιας $\forall R.C$ περιέχει το σύνολο των αντικειμένων του $\Delta^{\mathcal{I}}$ τα οποία αν συμμετέχουν στο ρόλο $R^{\mathcal{I}}$ με κάποιο άλλο αντικείμενο, τότε το αντικείμενο αυτό ανήκει στην ερμηνεία της έννοιας C δηλαδή στο σύνολο $C^{\mathcal{I}}$. Με λίγα λόγια η έννοια αυτή ερμηνεύεται ως μια συνεπαγωγή (implication). Όσον αφορά την ερμηνεία των εννοιών που αφορούν τους περιορισμούς πληθικότητας, αυτή περιέχει το σύνολο των αντικειμένων του $\Delta^{\mathcal{I}}$ τα οποία συμμετέχουν στο ρόλο $R^{\mathcal{I}}$ με την πληθικότητα που ορίζεται από την έννοια. Τέλος, παρατηρούμε ότι ο κατασκευαστής ονοματικών εννοιών ουσιαστικά αποτελεί κατασκευαστή μονοσυνόλων (singleton) εφόσον η έννοια $\{o\}$ ερμηνεύεται ως το σύνολο με μοναδικό στοιχείο το $o^{\mathcal{I}}$.

Μέχρι αυτό το σημείο έχουμε ορίσει την σύνταξη και την σημασιολογία των SHOIN εννοιών. Στη συνέχεια θα δούμε πως μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να ορίσουμε μια βάση γνώσης. Μια βάση γνώσης αποτελείται από τρία κύρια συστατικά: το σώμα ορολογίας (Terminological Box-TBox), το σώμα ρόλων (Role box-RBox) και το σώμα ισχυρισμών (Assertional Box-ABox).

Στο σώμα ορολογίας περιγράφονται οι σχετικές έννοιες μιας περιοχής εφαρμογής σύμφωνα με τις ιδιότητες τους. Τυπικά ένα SHOIN σώμα ορολογίας (Terminological box-TBox), που συμβολίζεται με \mathcal{T} , είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από αξιώματα υπαγωγής εννοιών (concept inclusion axioms) της μορφής $C \sqsubseteq D$, και αξιώματα ισοδυναμίας εννοιών (concept equivalence axioms) της μορφής $C \equiv D$ όπου C, D είναι SHOIN-έννοιες. Έτσι λοιπόν οι έννοιες Γονιός και Πολύτεκνος που ορίσαμε νωρίτερα μπορούν να γραφούν τυπικά

$$\text{Γονιός} \equiv \text{Άνθρωπος} \sqcap \text{Ψέχει-Παιδί.Άνθρωπος}$$

$$\text{Πολύτεκνος} \equiv \text{Άνθρωπος} \sqcap \geq \text{3έχει-Παιδί}$$

και να συμπεριλαμβάνονται σε ένα σώμα ορολογίας. Τα αξιώματα υπαγωγής εννοιών

στα οποία η έννοια του αριστερού μέλους είναι μια σύνθετη έννοια, ονομάζονται *αξιώματα υπαγωγής γενικευμένων εννοιών* (*General Concept Inclusions - GCIs*) ή απλά *γενικευμένα αξιώματα* (*general axioms*) [65]. Ένα παράδειγμα γενικευμένου αξιώματος σύμφωνα με τους ορισμούς των εννοιών Γονιός και Πολύτεκνος που δόθηκαν παραπάνω είναι το ακόλουθο

Πολύτεκνος \sqsubseteq Γονιός.

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που ένα TBox περιέχει αξιώματα στα οποία μια έννοια του αριστερού μέλους ορίζεται είτε άμεσα, είτε έμμεσα από τον εαυτό της, περιέχεται δηλαδή κάποιος κύκλος, λέμε ότι το TBox είναι *κυκλικό* (*cyclic*). Ένα παράδειγμα κυκλικού αξιώματος είναι το ακόλουθο

Άνθρωπος \sqsubseteq ΞέχειΓονιό.Άνθρωπος.

Ένα σώμα ορολογίας το οποίο δεν είναι κυκλικό και δεν περιέχει γενικευμένα αξιώματα, περιέχει δηλαδή μόνο αξιώματα της μορφής $A \sqsubseteq D$ ή $A \equiv D$, όπου A είναι μια ατομική έννοια, ονομάζεται *απλό* (*simple*). Λέμε ότι μια ερμηνεία \mathcal{I} *ικανοποιεί* (*satisfies*) ένα αξίωμα $C \sqsubseteq D$ αν $C^{\mathcal{I}} \subseteq D^{\mathcal{I}}$, ενώ ικανοποιεί ένα αξίωμα $C \equiv D$ αν $C^{\mathcal{I}} = D^{\mathcal{I}}$. Μια ερμηνεία \mathcal{I} ικανοποιεί ένα σώμα ορολογίας \mathcal{T} αν ικανοποιεί όλα τα αξιώματα στο \mathcal{T} . Τότε λέμε ότι η \mathcal{I} είναι *μοντέλο* (*model*) του \mathcal{T} .

Το δεύτερο συστατικό μιας βάσης γνώσης είναι το σώμα ρόλων στο οποίο περιγράφονται τα αξιώματα ρόλων. Ένα *SHOIN* σώμα ρόλων (*Role Box-RBox*), που συμβολίζεται με \mathcal{R} , είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από *αξιώματα μεταβατικών ρόλων* (*transitive role axioms*) της μορφής $\text{Trans}(R)$, και από *αξιώματα υπαγωγής ρόλων* (*role inclusion axioms*) της μορφής $R \sqsubseteq S$. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να ορίσουμε ότι ο ρόλος *έχειΠρόγονο* είναι μεταβατικός και να γράψουμε

$\text{Trans}(\text{έχειΠρόγονο})$

ότι ο ρόλος *έχειΓιό* είναι υπορόλος του ρόλου *έχειΠαιδί* γράφοντας

$\text{έχειΓιό} \sqsubseteq \text{έχειΠαιδί}$

και πως ο ρόλος *έχειΠαιδί* έχει αντίστροφο τον ρόλο *έχειΓονιό* γράφοντας

$\text{έχειΓονιό} \sqsubseteq \text{έχειΠαιδί}^{-}$

ή

$\text{έχειΠαιδί}^{-} \sqsubseteq \text{έχειΓονιό}$

Μια ερμηνεία \mathcal{I} ικανοποιεί ένα αξίωμα $\text{Trans}(R)$ αν, για κάθε $x, y, z \in \Delta^{\mathcal{I}}$, $\{\langle x, y \rangle, \langle y, z \rangle\} \subseteq R^{\mathcal{I}} \rightarrow \langle x, z \rangle \in R^{\mathcal{I}}$, και ικανοποιεί ένα αξίωμα $R \sqsubseteq S$ αν $R^{\mathcal{I}} \subseteq S^{\mathcal{I}}$. Ένα σύνολο από αξιώματα υπαγωγής ρόλων ορίζει μια *ιεραρχία ρόλων* (*role hierarchy*). Για μια τέτοια ιεραρχία χρησιμοποιούμε το συμβολισμό \sqsubseteq^* ως το μεταβατικό (transitive) και ανακλαστικό (reflexive) κλείσιμο της σχέσης \sqsubseteq . Ακόμα παρατηρήστε ότι, αν $R \sqsubseteq S$, τότε από τη σημασιολογία των αντίστροφων ρόλων συνεπάγεται ότι $\text{Inv}(R)^{\mathcal{I}} \subseteq \text{Inv}(S)^{\mathcal{I}}$. Μια ερμηνεία ικανοποιεί ένα *SHOIN* RBox \mathcal{R} αν ικανοποιεί κάθε αξίωμα στο \mathcal{R} . Σε αυτήν την περίπτωση λέμε ότι η \mathcal{I} είναι *μοντέλο* του \mathcal{R} .

Τέλος, μπορούμε να δημιουργήσουμε και αξιώματα ατόμων, δηλαδή σχέσεις στιγμιότυπου ανάμεσα σε άτομα (ζεύγη ατόμων) και έννοιες (ρόλους) τα οποία συλλέγονται στο σώμα ισχυρισμών. Ένα *SHOIN* σώμα ισχυρισμών (*Assertional Box-ABox*) που συμβολίζεται με \mathcal{A} , είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από ισχυρισμούς (*assertions*) της μορφής $a : C$, που ονομάζονται *ισχυρισμοί εννοιών* (*concept assertions*), και της μορφής $(a, b) : R$, που ονομάζονται *ισχυρισμοί ρόλων* (*role assertions*), ή της μορφής $a \doteq b$ και $a \not\doteq b$, που δηλώνουν αν δύο άτομα είναι ταυτόσημα ή όχι. Στο σώμα ισχυρισμών, για παράδειγμα, μπορούμε να δηλώσουμε ότι το άτομο ΜΑΝΩΛΗΣ είναι Γονιός και ακόμα πως σχετίζεται με το άτομο ΝΙΚΟΣ, το οποίο είναι Άνθρωπος, με τον ρόλο έχει-Παιδί και να γράψουμε τυπικά:

Γονιός(ΜΑΝΩΛΗΣ), Άνθρωπος(ΝΙΚΟΣ), έχει-Παιδί(ΜΑΝΩΛΗΣ, ΝΙΚΟΣ).

Μια ερμηνεία \mathcal{I} ικανοποιεί τον ισχυρισμό $a : C$ αν $a^{\mathcal{I}} \in C^{\mathcal{I}}$, τον ισχυρισμό $(a, b) : R$ αν $(a^{\mathcal{I}}, b^{\mathcal{I}}) \in R^{\mathcal{I}}$ και τη σχέση $a \doteq b$ ($a \not\doteq b$) αν $a^{\mathcal{I}} \doteq b^{\mathcal{I}}$ ($a^{\mathcal{I}} \not\doteq b^{\mathcal{I}}$). Μια ερμηνεία ικανοποιεί ένα *SHOIN* ABox \mathcal{A} αν ικανοποιεί κάθε ισχυρισμό του \mathcal{A} . Σε αυτήν την περίπτωση λέμε ότι η \mathcal{I} είναι μοντέλο του \mathcal{A} .

Μια *SHOIN* βάση γνώσης (ΒΓ) (*knowledge base*) $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \rangle$ αποτελείται από ένα TBox, ένα RBox και ένα ABox. Μια ερμηνεία ικανοποιεί μια *SHOIN* βάση γνώσης Σ αν ικανοποιεί κάθε αξίωμα της Σ . Στην περίπτωση αυτή θα λέμε ότι η \mathcal{I} είναι μοντέλο της Σ .

2.1.2 Υπηρεσίες Συλλογιστικής

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ΠΛ που τις έχουν κάνει πολύ διαδεδομένες στις μέρες μας είναι η εκφραστική τους δύναμη σε συνδυασμό με το γεγονός ότι, στην πλειοψηφία τους, προσφέρουν αποφάνσιμες υπηρεσίες συλλογιστικής. Στις προηγούμενες ενότητες είδαμε την εκφραστική τους δύναμη, καθώς και την τυπικότητα με την οποία μπορούν να αναπαραστήσουν ένα πεδίο εφαρμογής. Ο πρωταρχικός όμως σκοπός των τεχνολογιών αναπαράστασης γνώσης είναι οι *υπηρεσίες συλλογιστικής* (*inference services*), η δυνατότητα δηλαδή υποβολής ενός συνόλου ερωτημάτων σε μια γνώση για την εξαγωγή νέας *συμπεραίνουσας γνώσης* (*inferred knowledge*).

Κάθε γλώσσα αναπαράστασης γνώσης μας προσφέρει ένα διαφορετικό σύνολο υπηρεσιών συλλογιστικής. Οι ΠΛ μας προσφέρουν τις παρακάτω υπηρεσίες:

- **Ικανοποιησιμότητα μιας ΒΓ:** Μια ΒΓ Σ είναι *ικανοποιήσιμη* (*satisfiable*) αν και μόνο αν (ανν) υπάρχει μοντέλο \mathcal{I} για την Σ . Αντίστοιχα ορίζεται η έννοια της μη-ικανοποιησιμότητας (*unsatisfiability*).
- **Ικανοποιησιμότητα μιας έννοιας:** Η έννοια C είναι *ικανοποιήσιμη* με βάση την (μ.β.τ.) Σ ανν υπάρχει μοντέλο \mathcal{I} της Σ τέτοιο ώστε (τ.ω.) $C^{\mathcal{I}} \neq \emptyset$.
- **Υπαγωγή εννοιών:** Η C *υπάγεται* (*subsumed*) στην D μ.β.τ. Σ ανν για κάθε μοντέλο \mathcal{I} της Σ έχουμε $C^{\mathcal{I}} \subseteq D^{\mathcal{I}}$.
- **Συνέπεια ενός σώματος ισχυρισμών:** Ένα σώμα ισχυρισμών \mathcal{A} είναι *συνεπές* (*consistent*) ανν υπάρχει κάποιο μοντέλο \mathcal{I} για το \mathcal{A} .
- **Λογική Συνεπαγωγή:** Δοθέντος ενός αξιώματος εννοιών, ρόλων ή ενός ισχυρισμού, φ , η Σ *συνεπάγεται λογικά* (*entails*) το φ , γράφοντας $\Sigma \models \varphi$, ανν για κάθε μοντέλο \mathcal{I} της Σ έχουμε ότι η \mathcal{I} ικανοποιεί το φ .

Όπως είναι λογικό, αυτό το οποίο επιθυμούμε είναι να αναπτύξουμε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, έναν αλγόριθμο δηλαδή, ο οποίος να αποφασίζει (decides) τα παραπάνω προβλήματα. Εφόσον μιλάμε για λογικές γλώσσες η ανάπτυξη τέτοιων αλγορίθμων είναι συνήθως αρκετά δύσκολη και δυσκολεύει όσο εκφραστικότερη γίνεται η γλώσσα αναπαράστασης γνώσης που εξετάζουμε. Οι αλγόριθμοι αυτοί ονομάζονται *αλγόριθμοι συλλογιστικής (reasoning algorithm)*.

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω προβλήματα συλλογιστικής για τις ΠΛ, σε πολλές περιπτώσεις για να αποφασίσουμε κάποια από αυτά απαιτείται να ελέγξουμε όλα τα μοντέλα μιας βάσης γνώσης. Προφανώς κάτι τέτοιο είναι αδύνατο. Για το λόγο αυτό, λοιπόν, τις περισσότερες φορές τα προβλήματα αυτά ανάγονται σε απλούστερα. Όπως έχει αποδειχθεί [32, 41] ισχύουν τα ακόλουθα:

- Η έννοια C είναι ικανοποιήσιμη μ.β.τ. Σ αν το σώμα ισχυρισμών $\{a : C\}$ είναι συνεπές μ.β.τ. Σ για κάποιο τυχαίο a .
- Η C υπάγεται στην D μ.β.τ. Σ αν το σώμα ισχυρισμών $\{a : C \sqcap \neg D\}$ είναι μη-συνεπές μ.β.τ. Σ .
- Μια $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \rangle$ συνεπάγεται λογικά έναν ισχυρισμό $a : C$ αν η $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{a : \neg C\} \rangle$ είναι μη-ικανοποιήσιμη.

Παράδειγμα 2.1.2 Για να κατανοήσουμε καλύτερα την πρακτική εφαρμογή των υπηρεσιών συλλογιστικής ας θεωρήσουμε το παρακάτω σώμα ορολογίας:

$$\mathcal{T} = \{ \text{Γονιός} \equiv \text{Άνθρωπος} \sqcap \exists \text{έχειΠαιδί. Άνθρωπος} \}$$

το παρακάτω σώμα ρόλων:

$$\mathcal{R} = \{ \text{έχειΓονιό} \sqsubseteq \text{έχειΠαιδί}^-, \text{έχειΓιό} \sqsubseteq \text{έχειΠαιδί} \}$$

και το παρακάτω σώμα ισχυρισμών:

$$\mathcal{A} = \{ \text{Άνθρωπος}(\text{ΜΑΝΩΛΗΣ}), \text{Άνθρωπος}(\text{ΝΙΚΟΣ}), \\ \text{έχειΓονιό}(\text{ΝΙΚΟΣ}, \text{ΜΑΝΩΛΗΣ}) \}$$

Σύμφωνα λοιπόν με το σώμα ορολογίας, μπορούμε να πούμε ότι το σώμα ισχυρισμών είναι συνεπές, δηλαδή η κατάσταση που περιγράφει είναι ορθή. Επιπρόσθετα, για το άτομο ΜΑΝΩΛΗΣ - με βάση το σώμα ορολογίας, το σώμα ρόλων και το σώμα ισχυρισμών - μπορούμε να εξάγουμε την υπονοούμενη γνώση ότι είναι στιγμιότυπο της έννοιας Γονιός.

2.2 Η Ασαφής Περιγραφική Λογική f_{KD} -SHOIN

Όπως είδαμε μέχρι τώρα, οι ΠΛ διαθέτουν υψηλή εκφραστικότητα προσφέροντας παράλληλα υπηρεσίες συλλογιστικής για την εξαγωγή νέας συμπεραίνουσας γνώσης. Η εκφραστικότητα τους όμως δεν είναι πάντοτε επαρκής έτσι ώστε να αναπαραστήσουν αποτελεσματικά κάποια πεδία εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, οι ΠΛ δεν είναι επαρκείς για την αναπαράσταση πεδίων εφαρμογών που πραγματεύονται με ατελή πληροφορία. Με τον όρο ατελής πληροφορία εννοούμε ένα από τα παρακάτω είδη πληροφορίας ή γνώσης:

- Λανθασμένη/Εσφαλμένη (Error/Erroneous)
- Ασυνεπής (Inconsistent)
- Αβέβαιη (Uncertain)
- Ανακριβής (Imprecise)
- Ασαφής (Fuzzy)

Για παράδειγμα, η έννοια Ψηλός εμπεριέχει ασαφή πληροφορία διότι, εάν χαρακτηρίσουμε δύο άτομα με αυτή την έννοια, δεν γινόμαστε συγκεκριμένοι όσο αφορά το ύψος τους. Πέραν όμως των εννοιών που εκ φύσεως μπορεί να εκφράζουν ασαφή πληροφορία, αβέβαιη ή ανακριβής πληροφορία μπορεί να εξαχθεί από κάποιον αλγόριθμο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων αλγορίθμων αποτελούν οι αλγόριθμοι για πολυμεσικά κείμενα. Τέτοιου είδους αλγόριθμοι δεν μπορούν να προσδιορίσουν με βεβαιότητα κάποια χαρακτηριστικά ενός τμήματος μιας εικόνας που επεξεργάζονται, όπως για παράδειγμα το χρώμα ή το σχήμα.

Έχοντας σαν στόχο την αναπαράσταση γνώσης που εμπεριέχει ατελή πληροφορία, χρησιμοποιήθηκαν η ασαφής συνολοθεωρία (*fuzzy set theory*) [15, 45] και η ασαφής λογική (*fuzzy logic*) [61]. Οι προαναφερθείσες μαθηματικές θεωρίες δημιουργήθηκαν για τη διαχείριση και επεξεργασία ασαφούς και ανακριβούς γνώσης και πληροφορίας. Με τη χρήση τους προτάθηκε η επέκταση της ΠΛ *ALC* [34], δημιουργώντας έτσι την ασαφή ΠΛ, *fuzzy-ALC* [59]. Έκτοτε, διάφορες ασαφείς επεκτάσεις περιγραφικών λογικών έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία [162, 200, 6, 221, 227] με αυτές των Stoilos et al. [145, 180, 209] - που παρουσιάζουν τη σύνταξη, τη σημασιολογία και τον αλγόριθμο συλλογιστικής για την ασαφή ΠΛ *fuzzy-SHIN*- να ξεχωρίζουν.

Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως έχουν αναπτυχθεί αρκετές μαθηματικές θεωρίες για τη διαχείριση μιας ατελούς πληροφορίας, όπως για παράδειγμα το *paraconsistent reasoning*, για την ασυνεπή πληροφορία, η *θεωρία πιθανοτήτων (proba-bilistic theory)* για την αβέβαιη πληροφορία που προκύπτει από πιθανοκρατικά και τυχαία ενδεχόμενα, και η *θεωρία δυνατοτήτων (possibilistic theory)* για αβέβαιη πληροφορία που προκύπτει από ελλιπή στοιχεία. Με τη χρήση τους, οι ΠΛ έχουν επεκταθεί σε πιθανοτικές [107], καθώς και σε ΠΛ δυνατοτήτων [44].

Η εργασία μας επικεντρώνεται μονάχα στις ασαφείς ΠΛ, οι οποίες κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, μπορούν να χειριστούν πιθανοτικά ή δυναμικά δεδομένα. Στις παρακάτω ενότητες γίνεται αρχικά μια εισαγωγή στην ασαφή συνολοθεωρία, στην οποία βασίζονται οι ασαφείς ΠΛ, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται η σύνταξη, η σημασιολογία καθώς και οι υπηρεσίες συλλογιστικής της ΠΛ *fuzzy-SHON*.

2.2.1 Ασαφής Συνολοθεωρία

Η ασαφής συνολοθεωρία (*fuzzy set theory*) είναι μια ευρέως διαδεδομένη μαθηματική θεωρία που σκοπός της είναι η μοντελοποίηση και διαχείριση ασαφούς (*vague*) πληροφορίας και γνώσης [45]. Αυτό που την διαφοροποιεί σε σχέση με την κλασική συνολοθεωρία, στην οποία ένα αντικείμενο είτε ανήκει είτε δεν ανήκει σε ένα σύνολο, είναι ότι στην ασαφή συνολοθεωρία ένα αντικείμενο μπορεί να ανήκει σε ένα σύνολο με κάποιο βαθμό, ο οποίος παίρνει τιμές από το διάστημα $[0,1]$. Ένα αντικείμενο δηλαδή μπορεί να ανήκει σε μικρό ή μεγάλο βαθμό σε ένα ασαφές σύνολο. Πιο συγκεκριμένα, αν X μια συλλογή από αντικείμενα, $X = \{x_1, x_2, \dots\}$, τότε ένα υποσύνολο S

του X αποτελείται από μια οποιαδήποτε συλλογή αντικειμένων του X , η οποία μπορεί να οριστεί με τη βοήθεια της *χαρακτηριστικής συνάρτησης* (*characteristic function*) αυτού, $\chi_S(x)$. Η συνάρτηση αυτή αναθέτει σε κάθε αντικείμενο $x \in X$ την τιμή 1 ή την τιμή 0 αν αυτό το αντικείμενο ανήκει ή δεν ανήκει στο X , αντίστοιχα. Είναι δηλαδή της μορφής

$$\chi_S : X \rightarrow \{0, 1\}.$$

Από την άλλη, ένα ασαφές υποσύνολο A του X , ορίζεται από τη *συνάρτηση συμμετοχής* (*membership function*) $\mu_A(x)$, η απλώς $A(x)$, $x \in X$. Αυτή η συνάρτηση αποδίδει σε κάθε αντικείμενο $x \in X$ μια τιμή ανάμεσα από τις τιμές 0 και 1 και αντιπροσωπεύει το βαθμό στον οποίο το αντικείμενο ανήκει στο ασαφές υποσύνολο A . Η συνάρτηση αυτή, δηλαδή, έχει τη μορφή

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1].$$

Πρακτικά δηλαδή το σύνολο τιμών της χαρακτηριστικής συνάρτησης επεκτείνεται και με αυτό το τρόπο εισάγεται μαθηματικά η έννοια της ασάφειας (*fuzziness*) και της ανακρίβειας (*imprecision*). Με ανάλογο τρόπο επεκτείνονται οι σχέσεις, ορίζοντας τις ασαφείς σχέσεις. Πιο συγκεκριμένα, μια ασαφής σχέση βαθμού n , ορίζεται από μια συνάρτηση της μορφής

$$R : \underbrace{X \times X \times \dots \times X}_{n\text{-φορές}} \rightarrow [0, 1],$$

η οποία αντιστοιχεί μια πλειάδα $\langle x_1, \dots, x_n \rangle \in X \times \dots \times X$ στο βαθμό συμμετοχής της πλειάδας στην ασαφή σχέση R .

Όπως είναι φυσικό, η εισαγωγή της ασάφειας στα σύνολα επηρεάζει τις συνολοθεωρητικές πράξεις του συμπληρώματος, της ένωσης και της τομής. Έτσι λοιπόν αφού πρέπει να διαχειριστούμε βαθμούς συμμετοχής είναι λογικό οι πράξεις αυτές να τελούνται με τη χρήση μαθηματικών συναρτήσεων μιας ή περισσότερων μεταβλητών. Οι τελεστές αυτοί ονομάζονται *νόρμες* (*norm*) [132] και ανάλογα με την πράξη την οποία αντιπροσωπεύουν έχουν και διαφορετικές ιδιότητες.

Ένα *ασαφές συμπλήρωμα* ή *ασαφής άρνηση* c (*fuzzy complement* ή *fuzzy negation*) πραγματοποιείται από μια συνάρτηση μιας μεταβλητής της μορφής $c : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$. Προκειμένου να δημιουργηθούν διαισθητικά ορθά ασαφή συμπληρώματα οι συναρτήσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- *οριακές συνθήκες* (*boundary conditions*): $c(0) = 1$ και $c(1) = 0$,
- *γνησίως φθίνουσες* (*monotonic decreasing*): για κάθε $a \leq b$, $c(a) \geq c(b)$.

Επιπρόσθετα, ένα ασαφές συμπλήρωμα μπορεί να είναι *συνεχές* (*continuous*) και *ενελικτικό* (*involutive*), για κάθε $a \in [0, 1]$ $c(c(a)) = a$. Τα περισσότερα από τα ασαφή συμπληρώματα που χρησιμοποιούνται σήμερα σε εφαρμογές ικανοποιούν τις συνθήκες αυτές, όπως είναι για παράδειγμα το συμπλήρωμα Lukasiewicz, $c_L(a) = 1 - a$, η οικογένεια συμπληρωμάτων Sugeno, $c_S(a) = \frac{1-a}{1+\lambda a}$, $\lambda \in (-1, \infty)$ και η οικογένεια Yager, $c_Y(a) = (1 - a^w)^{1/w}$, $w \in (0, \infty)$. Ένα μη-ενελικτικό και ασυνεχές συμπλήρωμα το οποίο έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία είναι το συμπλήρωμα Gödel το οποίο ορίζεται ως, $c_G(a) = 0$ αν $a > 0$, αλλιώς $c_G(0) = 1$.

Ο τελεστής της *ασαφούς τομής* (*fuzzy intersection*) πραγματοποιείται από μια δυαδική συνάρτηση της μορφής $t : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, η οποία ονομάζεται τριγωνική

νόρμα ή απλά t -νόρμα (t -norm) [132]. Παρόμοια με τα ασαφή συμπληρώματα, οι τελεστές αυτοί πρέπει να έχουν κάποιες ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, οι συναρτήσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- οριακή συνθήκη (*boundary condition*): $t(a, 1) = a$,
- γνησίως αύξουσες (*monotonic increasing*): για $b \leq d$ τότε $t(a, b) \leq t(a, d)$,
- αντιμεταθετική ιδιότητα (*commutative*): $t(a, b) = t(b, a)$ και
- προσεταιριστική ιδιότητα (*associative*): $t(a, t(b, c)) = t(t(a, b), c)$.

Συνήθως, οι t -νόρμες είναι επίσης συνεχείς και υπο-ταυτοδύναμες (*subidempotent*), δηλαδή $t(a, a) < a$, για $a \in (0, 1)$. Οι t -νόρμες που έχουν τις ιδιότητες αυτές ονομάζονται Αρχιμήδειες (*Archimedean*) t -νόρμες. Η μοναδική ταυτοδύναμη (*idempotent*) t -νόρμα είναι η t -νόρμα του Gödel που ορίζεται από την εξίσωση, $t_G(a, b) = \min(a, b)$. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι για κάθε t -νόρμα t ισχύει ότι, $a, b \geq t(a, b)$, και $t(a, 0) = 0$. Συνήθεις Αρχιμήδειες t -νόρμες είναι η νόρμα Lukasiewicz $t_L(a, b) = \max(0, a + b - 1)$, και η νόρμα του γινομένου (*product*) $t_P(a, b) = a \cdot b$.

Παρόμοια με τους προηγούμενους τελεστές και ο τελεστής της ασαφούς ένωσης (*fuzzy union*) πραγματοποιείται από μια δυαδική συνάρτηση της μορφής $u : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, η οποία ονομάζεται τριγωνική συνόρμα ή σ -νόρμα (t -conorm ή s -norm) [132]. Οι σ -νόρμες πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω συνθήκες:

- οριακή συνθήκη (*boundary condition*): $u(a, 0) = a$,
- γνησίως αύξουσες (*monotonic increasing*): για $b \leq d$ τότε $u(a, b) \leq u(a, d)$,
- αντιμεταθετική ιδιότητα (*commutative*): $u(a, b) = u(b, a)$ και
- προσεταιριστική ιδιότητα (*associative*): $u(a, u(b, c)) = u(u(a, b), c)$.

Συνήθως, οι σ -νόρμες είναι επίσης συνεχείς και υπερ-ταυτοδύναμες (*superidempotent*), δηλαδή $u(a, a) > a$, για $a \in (0, 1)$. Οι σ -νόρμες που έχουν τις ιδιότητες αυτές ονομάζονται Αρχιμήδειες (*Archimedean*) σ -νόρμες. Η μοναδική ταυτοδύναμη σ -νόρμα είναι η σ -νόρμα του Gödel που ορίζεται από τη σχέση, $u_G(a, b) = \max(a, b)$. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι για κάθε σ -νόρμα u ισχύει ότι, $u(a, b) \geq a, b$, και $u(a, 1) = 1$. Συνήθεις Αρχιμήδειες σ -νόρμες είναι η νόρμα Lukasiewicz $u_L(a, b) = \min(1, a + b)$, και η νόρμα του πιθανοτικού αθροίσματος (*probabilistic sum*) $u_P(a, b) = a + b - a \cdot b$. Για μια πολύ καλή εισαγωγή στις t - και σ -νόρμες ο αναγνώστης παραπέμπεται στα [45] και [132]. Επίσης, στο [133] μπορούν να βρεθούν αλγεβρικοί τρόποι κατασκευής t - και σ -νορμών.

Ένας ακόμα, πολύ σημαντικός για την λογική, τελεστής που με την σειρά του επεκτείνεται στην ασαφή συνολοθεωρία είναι αυτός της ασαφούς συνεπαγωγής (*fuzzy implication*). Η πράξη της ασαφούς συνεπαγωγής υλοποιείται από μια δυαδική πράξη της μορφής, $\mathcal{I} : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τελεστών οι οποίες διαφέρουν σε σημαντικά σημεία.

- Οι S -συνεπαγωγές που προκύπτουν από την ασαφοποίηση της λογικής πρότασης $\neg a \vee b$, η οποία στη λογική Boole ορίζει την πράξη της συνεπαγωγής. Χρησιμοποιώντας μια ασαφή ένωση και ένα ασαφές συμπλήρωμα στη θέση των τελεστών της ένωσης (\vee) και του συμπληρώματος (\neg) προκύπτει $\mathcal{I}_S(a, b) = u(c(a), b)$ [45].

- Οι R -συνεπαγωγές που προκύπτουν από την ασαφοποίηση της πρότασης $\max\{x \in [0, 1] \mid a \wedge x \leq b\}$, η οποία και αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο αναπαράστασης της πράξης της συνεπαγωγής στην κλασική λογική. Χρησιμοποιώντας μια ασαφή τομή και επεκτείνοντας την πράξη \max στην πιο γενικευμένη πράξη του supremum (\sup) προκύπτει $\mathcal{J}_R(a, b) = \sup\{x \in [0, 1] \mid t(a, x) \leq b\}$ [45]. (Η πράξη αυτή αναφέρεται αρκετές φορές και ως τελεστής ω_t , όπου t αντιπροσωπεύει την τ -νόρμα που χρησιμοποιείται στον ορισμό του τελεστή.)

Οι παραπάνω ασαφείς συνεπαγωγές είναι γνησίως φθίνουσες (αύξουσες) στο πρώτο (δεύτερο) όρισμα. Πέραν όμως από την ομοιότητά τους αυτή υπάρχουν αρκετά σημαντικά σημεία στα οποία διαφέρουν. Πρώτιστα, για όλες τις R -συνεπαγωγές ισχύει ότι, $\mathcal{J}_R(a, b) = 1$ ανν $a \leq b$ [61]. Επίσης ισχύει η ιδιότητα, $\mathcal{J}_R(a, b) \geq c$ ανν $t(a, c) \leq b$, όπου t είναι η ίδια τ -νόρμα που χρησιμοποιείται για τον ορισμό της \mathcal{J}_R . Αυτό σημαίνει ότι οι τελεστές \mathcal{J}_R και t είναι *παρακείμενοι* (*adjoint*). Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, οι R -συνεπαγωγές προσφέρουν μια *φυσική* (*natural*) επέκταση του κλασικού κανόνα modus ponens [53]. Πιο συγκεκριμένα, αν $A \rightarrow B \geq n_1$ και $A \geq n_2$, τότε έχουμε ότι $B \geq t(n_1, n_2)$, όπου t είναι ο *adjoint* τελεστής της ασαφής συνεπαγωγής (\rightarrow). Επιπρόσθετα, για τις R -συνεπαγωγές ισχύει η παρακάτω ιδιότητα.

Λήμμα 2.2.1 [45, 61] Έστω $a, b, c \in [0, 1]$. Τότε ο τελεστής άρνησης, οι R -συνεπαγωγές και οι τ -νόρμες ικανοποιούν την παρακάτω ιδιότητα:

- $\mathcal{J}_R(t(a, b), c) = \mathcal{J}_R(a, \mathcal{J}_R(b, c))$.

Συνήθεις R -συνεπαγωγές είναι η συνεπαγωγή Lukasiewicz, $\mathcal{J}_L(a, b) = \min(1, 1 - a + b)$, η συνεπαγωγή Gödel, $\mathcal{J}_G(a, b) = b$, αν $a > b$, $\mathcal{J}_G(a, b) = 1$, διαφορετικά, και η συνεπαγωγή Goguen, $\mathcal{J}_P(a, b) = a/b$, αν $a > b$, $\mathcal{J}_P(a, b) = 1$ διαφορετικά, ενώ από τις S -συνεπαγωγές, η συνεπαγωγή Kleene-Dienes, $\mathcal{J}_{KD}(a, b) = \max(1 - a, b)$ και η συνεπαγωγή Reichenbach, $\mathcal{J}_R(a, b) = 1 - a + ab$. Περισσότερες πληροφορίες, όσον αφορά τις ασαφείς συνεπαγωγές μπορούν να βρεθούν στα [45] και [40] ενώ πολλές από τις ιδιότητες που αναφέραμε αποδεικνύονται στο [61].

Έτσι λοιπόν, ανάλογα με τους ασαφείς τελεστές c, t, u και \mathcal{J} που θα επιλέξουμε ορίζεται μια ασαφής λογική. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να κατανοήσουμε ότι υπάρχουν περισσότερες από μια ασαφείς λογικές, βάσει της συλλογής τελεστών που θα επιλέξουμε, ακόμα και για το ίδιο σύνολο κατασκευαστών. Μια συλλογή τελεστών αναφέρεται συνήθως και ως *ασαφής τετράδα* (*fuzzy quadruple*), $\langle c, t, u, \mathcal{J} \rangle$, ή *ασαφής τριάδα* (*fuzzy triple*) - στην περίπτωση που έχουμε μόνο τους τελεστές $\langle c, t, u \rangle$. Για παράδειγμα, έχουμε την τετράδα που ορίζει τη λογική Lukasiewicz, $\langle c_L, u_L, t_L, \mathcal{J}_L \rangle$, τη λογική Gödel, $\langle c_G, u_G, t_G, \mathcal{J}_G \rangle$, τη λογική του γινομένου (product logic), $\langle c_G, u_P, t_P, \mathcal{J}_P \rangle$ και τη λογική του Zadeh, $\langle c_L, u_G, t_G, \mathcal{J}_{KD} \rangle$.

Τέλος, η επέκταση των σχέσεων σε ασαφείς σχέσεις απαιτεί επαναπροσδιορισμό των ιδιοτήτων τους. Έτσι λοιπόν μια ασαφής σχέση R ορισμένη στο σύνολο $X \times X$ ονομάζεται:

- *sup* - *μεταβατική*, η απλά *μεταβατική* αν $\forall a, b \in X, R(a, c) \geq \sup_{b \in X} \{t(R(a, b), R(b, c))\}$.
- *συμμετρική* (*symmetric*) αν $\forall a, b \in X, R(a, b) = R(b, a)$
- *αντι-συμμετρική* (*anti-symmetric*) αν $\forall a, b \in X, R(a, b) \neq R(b, a)$
- *μη-ανακλαστική* (*irreflexive*) αν $\forall a \in X, R(a, a) = 0$

Στην ασαφή συνολοθεωρία μπορούμε να δηλώσουμε μια πιο ασθενή έννοια της ανακλαστικότητας, η οποία ονομάζεται *ε-ανακλαστικότητα*. Η R ονομάζεται *ε-ανακλαστική* (*ε-irreflexive*) αν $\forall a \in X, R(a, a) \geq \epsilon$. Η αντίστροφη μιας ασαφής σχέσης $R : X \times Y \rightarrow [0, 1]$ είναι η ασαφής σχέση $R^- : Y \times X \rightarrow [0, 1]$ η οποία ορίζεται ως $R^-(b, a) = R(a, b), \forall a, b \in X$. Τέλος, δοθέντων δύο ασαφών σχέσεων $R_1 : X \times Y \rightarrow [0, 1]$ και $R_2 : Y \times Z \rightarrow [0, 1]$ ορίζουμε την $\sup -t$ σύνθεση (*sup -t composition*) των σχέσεων ως, $[R_1 \circ^t R_2](a, c) = \sup_{b \in Y} \{t(R(a, b), R(b, c))\}$. Ο τελεστής της $\sup -t$ σύνθεσης ικανοποιεί τις ακόλουθες ιδιότητες:

$$\begin{aligned} (R_1 \circ^t R_2) \circ^t R_3 &= R_1 \circ^t (R_2 \circ^t R_3), \\ (R_1 \circ^t R_2)^- &= (R_2^- \circ^t R_1^-) \end{aligned}$$

Λόγω της ιδιότητας της προσεταιριστικότητας μπορούμε να επεκτείνουμε τον τελεστή της $\sup -t$ σύνθεσης σε οποιοδήποτε αριθμό από ασαφείς σχέσεις. Στην περίπτωση αυτή θα γράφουμε πιο απλά $[R_1 \circ^t R_2 \circ^t \dots \circ^t R_n](a, b)$.

2.2.2 Σύνταξη και Σημασιολογία

Όμοια με τις ΠΛ, οι ασαφείς ΠΛ χρησιμοποιούν ένα αλφάβητο που αποτελείται από τα σύνολα των διακεκριμένων ατομικών ασαφών εννοιών (**C**), των ατομικών ασαφών ρόλων (**R**) και των ατόμων (**I**) του πεδίου εφαρμογής. Οι ασαφείς επεκτάσεις που έχουν προταθεί για τις ΠΛ [162, 209] αναφέρονται στο βαθμό συμμετοχής ενός ατόμου σε μια έννοια και στο βαθμό με τον οποίο συνδέονται δύο άτομα μέσω μιας σχέσης. Με άλλα λόγια, το σώμα των ισχυρισμών είναι αυτό που αλλάζει με αποτέλεσμα οι *f-SHOIN* έννοιες και ρόλοι να ορίζονται όμοια με τις *SHOIN* έννοιες βάσει του ορισμού 2.1.1.

Όπως είναι λογικό, η επέκταση των ΠΛ για τη χρήση τους με ασαφή πληροφορία αλλάζει την σημασιολογία τους έτσι ώστε να δίνεται στις περιγραφές ασαφές νόημα με τη χρήση των ασαφών ερμηνειών (*fuzzy interpretations*) [94]. Μια ασαφής ερμηνεία αποτελείται από ένα ζευγάρι $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$ όπου ο χώρος ερμηνείας $\Delta^{\mathcal{I}}$ είναι ένα μη κενό σύνολο αντικειμένων και $\cdot^{\mathcal{I}}$ είναι μια ασαφής συνάρτηση ερμηνείας (*fuzzy interpretation function*), η οποία απεικονίζει:

1. ένα άτομο $a \in \mathbf{I}$ σε ένα στοιχείο $a^{\mathcal{I}} \in \Delta^{\mathcal{I}}$,
2. μια ατομική έννοια $A \in \mathbf{C}$ σε μια συνάρτηση συμμετοχής $A^{\mathcal{I}} : \Delta^{\mathcal{I}} \rightarrow [0, 1]$,
3. και έναν ατομικό ρόλο $R \in \mathbf{R}$ σε μια συνάρτηση συμμετοχής της μορφής, $R^{\mathcal{I}} : \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}} \rightarrow [0, 1]$.

Με αυτό τον τρόπο, ένα αντικείμενο ή ένα ζεύγος αντικειμένων μπορεί να ανήκει σε μια έννοια ή να συνδέεται μέσω ενός ρόλου, αντίστοιχα, με ένα βαθμό από το 0 έως το 1. Για την ερμηνεία πολύπλοκων *f-SHOIN* εννοιών και ρόλων οι συναρτήσεις ερμηνείας επεκτείνονται με τη βοήθεια της ασαφούς συνολοθεωρίας. Έτσι, λοιπόν, η έννοια $C \sqcap D$ που αναπαριστά μια τομή ανάμεσα στις έννοιες C και D , με τη χρήση του τελεστή της ασαφούς τομής (t) ερμηνεύεται $(C \sqcap D)^{\mathcal{I}}(a) = t(C^{\mathcal{I}}(a), D^{\mathcal{I}}(a))$ η οποία υποδηλώνει ότι ο βαθμός συμμετοχής ενός αντικειμένου $a \in \Delta^{\mathcal{I}}$ στην ερμηνεία της τομής δύο ασαφών εννοιών ισούται με τη t -νόρμα των βαθμών συμμετοχής του αντικειμένου αυτού στα ασαφή σύνολα $C^{\mathcal{I}}$ και $D^{\mathcal{I}}$. Αντίστοιχα, η καθολική έννοια \top

ερμηνεύεται ως βαθμός συμμετοχής του αντικειμένου ίσος με 1, η κενή έννοια ως βαθμός συμμετοχής του αντικειμένου ίσος με 0, ενώ για την ένωση και διάζευξη εννοιών η ερμηνεία δίνεται με τη χρήση της τ-νόρμας και του ασαφούς συμπληρώματος.

Η έννοια $\exists R.C$ ερμηνεύεται με το supremum (sup) ενώ, επειδή όπως είδαμε στην ενότητα 2.1.1 η έννοια $\forall R.C$ ερμηνεύεται ως μια συνεπαγωγή της μορφής, $\forall y(R(x, y) \rightarrow C(y))$, η πράξη \forall γενικεύεται στην πράξη του infimum (inf), και η πράξη \rightarrow ερμηνεύεται ως μια ασαφή συνεπαγωγή. Έτσι, προκύπτει η σχέση $(\forall R.C)^{\mathcal{I}}(a) = \inf_{b \in \Delta^{\mathcal{I}}} \{ \mathcal{J}(R^{\mathcal{I}}(a, b), C^{\mathcal{I}}(b)) \}$ η οποία δίνει την ασαφή σημασιολογία της έννοιας $\forall R.C$.

Όσο αφορά τους περιορισμούς πληθυσκότητας, ένας περιορισμός το-λιγότερο της μορφής $\geq pR$ είναι ισοδύναμος με τη φόρμουλα (formula) πρώτης τάξης:

$$(\geq pR)^{\mathcal{I}}(x) = \exists y_1, \dots, y_p. \bigwedge_{i=1}^p R^{\mathcal{I}}(x, y_i) \wedge \bigwedge_{i < j} y_i \neq y_j$$

η οποία διαισθητικά δηλώνει ότι πρέπει να υπάρχουν p y_i τα οποία να είναι διαφορετικά μεταξύ τους ανά δύο και για τα οποία ισχύει $R(x, y_i)$, όπου x είναι μια ελεύθερη μεταβλητή. Ερμηνεύοντας, λοιπόν, την πράξη \exists με το supremum (sup) και την πράξη \wedge με μια τ-νόρμα λαμβάνουμε την εξίσωση:

$$(\geq pR)^{\mathcal{I}}(a) = \sup_{b_1, \dots, b_p \in \Delta^{\mathcal{I}}} t \left(\bigwedge_{i=1}^p R^{\mathcal{I}}(a, b_i), \bigwedge_{i < j} \{b_i \neq b_j\} \right)$$

Από την άλλη μεριά, ένας περιορισμός το-πολύ της μορφής $\leq pR$ είναι ισοδύναμος με τη φόρμουλα πρώτης τάξης:

$$(\leq pR)^{\mathcal{I}}(x) \forall y_1, \dots, y_{p+1}. \bigwedge_{i=1}^{p+1} R^{\mathcal{I}}(x, y_i) \wedge \rightarrow \bigvee_{i < j} y_i = y_j$$

στην οποία αν ο τελεστής \forall αντιστοιχηθεί στο infimum, ο τελεστής \rightarrow σε μια ασαφή συνεπαγωγή, ο \vee σε μια σ-νόρμα και ο \wedge σε μια τ-νόρμα λαμβάνουμε την εξίσωση:

$$(\leq pR)^{\mathcal{I}}(a) = \inf_{b_1, \dots, b_{p+1} \in \Delta^{\mathcal{I}}} \mathcal{J} \left(\bigwedge_{i=1}^{p+1} R^{\mathcal{I}}(a, b_i), \bigvee_{i < j} \{b_i = b_j\} \right)$$

Το πλήρες σύνολο της σημασιολογίας των κατασκευαστών εννοιών και ρόλων της γλώσσας f-SHOIN παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2.

Παρόμοια με τις ΠΛ έτσι και στις ασαφείς επεκτάσεις τους μια ασαφής βάση γνώσης αποτελείται από τρία κύρια συστατικά: το ασαφές σώμα ορολογίας (TBox), το ασαφές σώμα ρόλων (RBox) και το ασαφές σώμα ισχυρισμών (ABox). Σε αυτή την περίπτωση, ένα ασαφές σώμα ορολογίας είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από αξιώματα ασαφών εννοιών. Έτσι, αν C και D δύο f-SHOIN-έννοιες, αξιώματα της μορφής $C \sqsubseteq D$ ονομάζονται αξιώματα υπαγωγής ασαφών εννοιών (fuzzy concept inclusion axioms), ενώ αξιώματα της μορφής $C \equiv D$ ονομάζονται αξιώματα ισοδυναμίας ασαφών εννοιών (fuzzy concept equivalence axioms). Μια ασαφής ερμηνεία \mathcal{I} ικανοποιεί το αξίωμα $C \sqsubseteq D$ αν $\forall a \in \Delta^{\mathcal{I}}, C^{\mathcal{I}}(a) \leq D^{\mathcal{I}}(a)$ ενώ ικανοποιεί το $C \equiv D$ αν $C^{\mathcal{I}}(a) = D^{\mathcal{I}}(a)$. Τέλος, μια ασαφής ερμηνεία \mathcal{I} ικανοποιεί ένα f-SHOIN σώμα ορολογίας \mathcal{T} αν ικανοποιεί κάθε αξίωμα στο \mathcal{T} . Τότε λέμε ότι η \mathcal{I} είναι μοντέλο (model) του \mathcal{T} . Είναι σημαντικό να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι ο παραπάνω ορισμός της υπαγωγής είναι ο ορισμός που δίνεται στο [209]. Βάσει αυτού του ορισμού, που βασίζεται στη σχέση υποσυνόλου ανάμεσα σε δύο ασαφή σύνολα [45], μια έννοια είτε

Πίνακας 2.2: Σύνταξη και Σημασιολογία fuzzy-SHOIN-εννοιών.

Κατασκευαστής	Σύνταξη	Σημασιολογία
καθολική έννοια	\top	$\top^{\mathcal{I}}(a) = 1$
κενή έννοια	\perp	$\perp^{\mathcal{I}}(a) = 0$
άρνηση	$\neg C$	$(\neg C)^{\mathcal{I}}(a) = c(C^{\mathcal{I}}(a))$
σύζευξη	$C \sqcap D$	$(C \sqcap D)^{\mathcal{I}}(a) = t(C^{\mathcal{I}}(a), D^{\mathcal{I}}(a))$
διάζευξη	$C \sqcup D$	$(C \sqcup D)^{\mathcal{I}}(a) = u(C^{\mathcal{I}}(a), D^{\mathcal{I}}(a))$
ονοματική έννοια	$\{o\}$	$\{o\}^{\mathcal{I}}(a) = 1$ αν $a \in \{o^{\mathcal{I}}\}$, διαφορετικά $\{o\}^{\mathcal{I}}(a) = 0$
υπαρξιακός περιορισμός	$\exists R.C$	$(\exists R.C)^{\mathcal{I}}(a) = \sup_{b \in \Delta^{\mathcal{I}}} t(R^{\mathcal{I}}(a, b), C^{\mathcal{I}}(b))$
περιορισμός τιμής	$\forall R.C$	$(\forall R.C)^{\mathcal{I}}(a) = \inf_{b \in \Delta^{\mathcal{I}}} \mathcal{J}(R^{\mathcal{I}}(a, b), C^{\mathcal{I}}(b))$
περιορισμός το-πολύ	$\leq pR$	$(\leq pR)^{\mathcal{I}}(a) = \inf_{b_1, \dots, b_{p+1} \in \Delta^{\mathcal{I}}} \mathcal{J}(\underbrace{t}_{i=1}^p R^{\mathcal{I}}(a, b_i), \underbrace{u}_{i < j} \{b_i = b_j\})$
περιορισμός το-λιγότερο	$\geq pR$	$(\geq pR)^{\mathcal{I}}(a) = \sup_{b_1, \dots, b_p \in \Delta^{\mathcal{I}}} t(\underbrace{t}_{i=1}^p R^{\mathcal{I}}(a, b_i), \underbrace{t}_{i < j} \{b_i \neq b_j\})$
αντίστροφοι ρόλοι	R^-	$(R^-)^{\mathcal{I}}(b, a) = R^{\mathcal{I}}(a, b)$

υπάγεται σε μια άλλη είτε όχι. Ο Straccia στο [162] προτείνει την έννοια της *ασαφούς υπαγωγής* (fuzzy subsumption) ασαφών εννοιών, η οποία επεκτείνει τη σύνταξη του σώματος ορολογίας.

Αντίστοιχα, ένα *ασαφές σώμα ρόλων* είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από αξιώματα ασαφών ρόλων. Αξιώματα ασαφών ρόλων, της μορφής $\text{Trans}(R)$, ονομάζονται αξιώματα *μεταβατικών ασαφών ρόλων* (fuzzy transitive role axioms) ενώ αξιώματα ασαφών ρόλων, της μορφής $R \sqsubseteq S$, ονομάζονται αξιώματα *υπαγωγής ασαφών ρόλων* (fuzzy role inclusion axioms). Σύμφωνα με τις ιδιότητες των ασαφών ρόλων, μια ασαφής ερμηνεία \mathcal{I} ικανοποιεί ένα αξίωμα $\text{Trans}(R)$ αν

$$\forall a, b, c \in \Delta^{\mathcal{I}}, R^{\mathcal{I}}(a, c) \geq \sup_{b \in \Delta^{\mathcal{I}}} \{t(R^{\mathcal{I}}(a, b), R^{\mathcal{I}}(b, c))\}$$

ενώ ικανοποιεί το $R \sqsubseteq S$ αν $\forall \langle a, b \rangle \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}, R^{\mathcal{I}}(a, b) \leq S^{\mathcal{I}}(a, b)$. Τέλος, η \mathcal{I} ικανοποιεί ένα f-SHOIN *RBox*, αν ικανοποιεί όλα τα αξιώματα στο \mathcal{R} . Σε αυτή την περίπτωση η \mathcal{I} λέγεται μοντέλο του \mathcal{R} . Ένα σύνολο από αξιώματα υπαγωγής ρόλων καθορίζει μια *ιεραρχία ρόλων* (role hierarchy) \mathcal{R}_h . Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι η σημασιολογία των αξιωμάτων υπαγωγής και των αντίστροφων ρόλων συνεπάγεται ότι αν $R \sqsubseteq S$, τότε και $\text{Inv}(R) \sqsubseteq \text{Inv}(S)$, όπως και στην κλασική περίπτωση.

Τέλος, το τρίτο συστατικό μίας ασαφούς βάσης γνώσης είναι το ασαφές σώμα ισχυρισμών του οποίου η σύνταξη επηρεάζεται άμεσα από την ασαφή επέκταση. Έτσι, ένα ασαφές σώμα ισχυρισμών (assertional box) *ABox* είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από ασαφή αξιώματα ατόμων τα οποία αποκαλούνται ασαφείς ισχυρισμοί. Ένας ασαφής ισχυρισμός (fuzzy assertion) [94] είναι μια δήλωση της μορφής $(a : C) \bowtie n$, $((a, b) : R) \bowtie n$, όπου $\bowtie \in \{\geq, >, \leq, <\}$, $a \doteq b$, ή $a \neq b$, για $a, b \in \mathbf{I}$. Θα γράφουμε επίσης $(a : C) = n$ αντί για δύο ασαφείς ισχυρισμούς της μορφής $(a : C) \geq n$ και $(a : C) \leq n$. Ισχυρισμοί οι οποίοι περιέχουν είτε την ανισότητα \geq ή την $>$ θα ονομάζονται *θετικοί* (positive) ισχυρισμοί και θα συμβολίζονται με το σύμβολο \triangleright , ενώ ισχυρισμοί που περιέχουν είτε την \leq ή την $<$ *αρνητικοί* (negative) και θα συμβολίζονται με το σύμβολο \triangleleft . Δοθείσης μιας ασαφούς ερμηνείας \mathcal{I} ,

$$\begin{aligned}
 \eta \mathcal{I} \text{ ικανοποιεί τον } (a : C) \geq n & \quad \text{αν} \quad C^{\mathcal{I}}(a^{\mathcal{I}}) \geq n, \\
 \eta \mathcal{I} \text{ ικανοποιεί τον } (a : C) \leq n & \quad \text{αν} \quad C^{\mathcal{I}}(a^{\mathcal{I}}) \leq n, \\
 \eta \mathcal{I} \text{ ικανοποιεί τον } ((a, b) : R) \geq n & \quad \text{αν} \quad R^{\mathcal{I}}(a^{\mathcal{I}}, b^{\mathcal{I}}) \geq n, \\
 \eta \mathcal{I} \text{ ικανοποιεί τον } ((a, b) : R) \leq n & \quad \text{αν} \quad R^{\mathcal{I}}(a^{\mathcal{I}}, b^{\mathcal{I}}) \leq n, \\
 \eta \mathcal{I} \text{ ικανοποιεί τον } a \doteq b & \quad \text{αν} \quad a^{\mathcal{I}} = b^{\mathcal{I}}, \\
 \eta \mathcal{I} \text{ ικανοποιεί τον } a \neq b & \quad \text{αν} \quad a^{\mathcal{I}} \neq b^{\mathcal{I}}.
 \end{aligned}$$

Η ικανοποιησιμότητα των ασαφών ισχυρισμών που περιέχουν μια από τις ανισότητες $>$ ή $<$ ορίζεται με ανάλογο τρόπο. Μια ασαφής ερμηνεία \mathcal{I} ικανοποιεί ένα ασαφές $ABox$ \mathcal{A} αν ικανοποιεί όλους τους ασαφείς ισχυρισμούς στο \mathcal{A} . Σε αυτήν την περίπτωση λέμε ότι η \mathcal{I} είναι μοντέλο του \mathcal{A} .

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι διαφορετικοί ασαφείς τελεστές ορίζουν και διαφορετικές ασαφείς ΠΛ. Έτσι, λοιπόν, ανάλογα με τους τελεστές που χρησιμοποιούνται, κάθε ασαφής ΠΛ έχει και διαφορετικό όνομα, όπως έχει οριστεί στο [146]. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο συμβολισμός $f_{\mathcal{J}}\text{-}\mathcal{L}$ όπου \mathcal{J} είναι μια ασαφής συνεπαγωγή και \mathcal{L} αναπαριστά μια γλώσσα ΠΛ. Στην περίπτωση που η \mathcal{J} είναι μια R -συνεπαγωγή, ο συμβολισμός μας δηλώνει επίσης και ποια είναι η τ-νόρμα που χρησιμοποιείται, λόγω του ορισμού των R -συνεπαγωγών, ενώ ως άρνηση μπορούμε να θεωρήσουμε το προσυμπλήρωμα του \mathcal{J} και ως σ-νόρμα το δυαδικό τελεστή (dual) που προκύπτει από την εξίσωση $u(a, b) = c(t(c(a), c(b)))$. Από την άλλη πλευρά, αν \mathcal{J} είναι μια S -συνεπαγωγή τότε επίσης λόγω ορισμού των S -συνεπαγωγών γνωρίζουμε και το ασαφές συμπλήρωμα και την σ-νόρμα. Η τ-νόρμα μπορεί να οριστεί από το δυαδικό τελεστή ο οποίος δίνεται από την εξίσωση $t(a, b) = c(u(c(a), c(b)))$. Έτσι λοιπόν η γλώσσα $f_L\text{-}\mathcal{SHOIN}$ είναι η ασαφής- \mathcal{SHOIN} , η οποία χρησιμοποιεί τους τελεστές της λογικής του Lukasiewicz, ενώ η γλώσσα $f_{KD}\text{-}\mathcal{SHIN}$ είναι η ασαφής- \mathcal{SHIN} , η οποία χρησιμοποιεί την ασαφή συνεπαγωγή του Kleene-Dienes, την τ-νόρμα και την σ-νόρμα του Gödel και την άρνηση του Lukasiewicz. Τις ασαφείς ΠΛ που ορίζονται με αυτόν τον τρόπο τις ονομάζουμε κανονικές (normal). Αντίθετα, οι μη-κανονικές (abnormal) ασαφείς ΠΛ μπορούν να οριστούν δηλώνοντας όλους τους τελεστές της ασαφούς τετράδας με μια δήλωση της μορφής, $f_{(c,t,u,\mathcal{J})}\text{-}\mathcal{L}$.

Στο υπόλοιπο αυτής της διατριβής θα ασχοληθούμε μονάχα με την ασαφή ΠΛ $f_{KD}\text{-}\mathcal{SHIN}$ της οποίας η σύνταξη, η σημασιολογία και οι αλγόριθμοι συλλογιστικής παρουσιάστηκαν από τους Stoilos et al. [209].

2.2.3 Υπηρεσίες Συλλογιστικής

Ο κύριος σκοπός των ΠΛ είναι η δυνατότητα αναπαράστασης ενός πεδίου εφαρμογής, καθώς και οι υπηρεσίες συλλογιστικής που προσφέρουν για την εξαγωγή νέας γνώσης από την ήδη υπάρχουσα. Ως αυτό το σημείο, έχουμε δει πως οι ΠΛ επεκτάθηκαν βάσει της ασαφούς συνολοθεωρίας για να μπορούν να αναπαραστήσουν ατελή και ασαφή πληροφορία. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τις υπηρεσίες εξαγωγής συμπερασμάτων (inference services) ή υπηρεσίες συλλογιστικής (reasoning services) που παρέχουν οι ασαφείς ΠΛ.

Οι ασαφείς ΠΛ προσφέρουν τις υπηρεσίες συλλογιστικής των κλασικών ΠΛ, κατάλληλα τροποποιημένες σύμφωνα με τους ασαφείς βαθμούς συμμετοχής, καθώς και δύο καινούργιες υπηρεσίες συλλογιστικής οι οποίες έχουν νόημα μονάχα στις ασαφείς ΒΓ. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της ασαφούς επέκτασης τους - και όπως αποδει-

κνύεται στο [94] - ένα ασαφές ABox \mathcal{A} μπορεί να περιέχει ένα πλήθος από θετικούς ισχυρισμούς της μορφής $(a : C) \triangleright n_i$ με $n_i \in [0, 1]$ και $1 \leq i$, χωρίς να εμφανίζεται κάποια αντίφαση (*contradiction*), για το λόγο αυτό ορίστηκαν οι υπηρεσίες συλλογιστικής για την έρευνα του μέγιστου κάτω φράγματος (ΜΚΦ) και του ελάχιστου άνω φράγματος (ΕΑΦ) ενός ισχυρισμού. Η f_{KD} -SHOIN μας προσφέρει τις παρακάτω υπηρεσίες συλλογιστικής:

- **Ικανοποιησιμότητα μιας ασαφούς ΒΓ:** Μια f -SHOIN βάση γνώσης $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \rangle$ είναι *ικανοποιήσιμη* (*satisfiable*) (μή-ικανοποιήσιμη) αν υπάρχει (δεν υπάρχει) μια ασαφής ερμηνεία \mathcal{I} η οποία ικανοποιεί όλα τα αξιώματα της Σ , και σε αυτήν την περίπτωση η \mathcal{I} λέγεται μοντέλο της Σ .
- **Ικανοποιησιμότητα μιας ασαφούς έννοιας:** Μια f -SHOIN-έννοια C , είναι *n-ικανοποιήσιμη* (*n-satisfiable*) μ.β.τ. Σ αν υπάρχει ένα μοντέλο \mathcal{I} της Σ στο οποίο υπάρχει κάποιο $a \in \Delta^{\mathcal{I}}$ τέτοιο ώστε $C^{\mathcal{I}}(a) = n$ και $n \in (0, 1]$ [79].
- **Υπαγωγή ασαφών εννοιών:** Η f -SHOIN έννοια C υπάγεται στην f -SHOIN D μ.β.τ. Σ αν για κάθε μοντέλο \mathcal{I} της Σ έχουμε ότι $\forall d \in \Delta^{\mathcal{I}}, C^{\mathcal{I}}(d) \leq D^{\mathcal{I}}(d)$.
- **Συνέπεια ενός ασαφούς σώματος ισχυρισμών:** Ένα ασαφές σώμα ισχυρισμών \mathcal{A} είναι *συνεπές* (*ασυνεπές*) μ.β.τ. σώμα ορολογίας \mathcal{T} και το σώμα ρόλων \mathcal{R} αν υπάρχει (δεν υπάρχει) μοντέλο \mathcal{I} των \mathcal{T} και \mathcal{R} το οποίο ικανοποιεί κάθε ισχυρισμό στο \mathcal{A} .
- **Λογική Συνεπαγωγή:** Δοθέντος ενός αξιώματος ασαφών εννοιών, ασαφών ρόλων ή ένος ασαφούς ισχυρισμού φ , λέμε ότι η Σ *συνεπάγεται* (*entails*) το φ , γράφοντας $\Sigma \models \varphi$, αν όλα τα μοντέλα \mathcal{I} της Σ ικανοποιούν το φ .
- **Μέγιστο κάτω φράγμα:** Το *μέγιστο κάτω φράγμα* (ΜΚΦ) (*greatest lower bound*) ενός ισχυρισμού φ μ.β.τ. Σ ορίζεται ως $glb(\Sigma, \varphi) = \sup\{n : \Sigma \models \varphi \geq n\}$ όπου $\sup \emptyset = 0$.
- **Ελάχιστο άνω φράγμα:** Το *ελάχιστο άνω φράγμα* (ΕΑΦ) (*least upper bound*) ενός ισχυρισμού φ μ.β.τ. Σ ορίζεται ως $lub(\Sigma, \varphi) = \inf\{n : \Sigma \models \varphi \leq n\}$ όπου $\inf \emptyset = 1$.

Παρόμοια με τις κλασικές ΠΛ, έχει αποδειχθεί στη βιβλιογραφία των ασαφών ΠΛ ότι τα προβλήματα της ικανοποιησιμότητας ασαφών ΠΛ εννοιών, υπαγωγής εννοιών, και συνεπαγωγής σύμφωνα με μια βάση γνώσης $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \rangle$ μπορούν να αναχθούν στο πρόβλημα της ικανοποιησιμότητας μιας βάσης γνώσης Σ' [94]. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε τις παρακάτω ικανές και αναγκαίες συνθήκες, οι οποίες εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο [94]:

- Η f -SHOIN έννοια C n-ικανοποιήσιμη μ.β.τ. Σ αν $\langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{(a : C) \geq n\} \rangle$ ικανοποιήσιμη.
- Η f -SHOIN έννοια C υπάγεται στην f -SHOIN έννοια D ($C \sqsubseteq D$) μ.β.τ. Σ αν $\langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{(a : C) \geq n, (a : D) < n\} \rangle$ μη-ικανοποιήσιμη για κάθε $n \in [0, 1]$.

- Μια f - $SHOIN$ βάση γνώσης $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \rangle$ συνεπάγεται λογικά έναν ασαφή ισχυρισμό $SHOIN \phi$ ($\Sigma \models \phi \triangleright n$) ανν $\langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{\neg \phi \triangleright n\} \rangle$ μη-ικανοποιήσιμη.

Απο τα παραπάνω φαίνεται ότι για να ελέγξουμε το πρόβλημα της υπαγωγής θα πρέπει να ελέγξουμε τη μη-ικανοποιησιμότητα της βάσης γνώσης για κάθε βαθμό $n \in [0, 1]$, που είναι πρακτικώς αδύνατο. Ο Straccia στο [94] αποδεικνύει ότι αρκεί να ελέγξουμε τη βάση γνώσης για μη-ικανοποιησιμότητα μόνο για δύο τυχαία επιλεγμένες τιμές από τα διαστήματα $(0, 0.5]$ και $(0.5, 1]$. Πιο συγκεκριμένα, $C \sqsubseteq D$ μ.β.τ. Σ ανν η βάση γνώσης $\langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{(a : C) \geq n, (a : D) < n\} \rangle$ είναι μη-ικανοποιήσιμη για $n \in \{n_1, n_2\}$, όπου $n_1 \in (0, 0.5]$ και $n_2 \in (0.5, 1]$.

Παράδειγμα 2.2.2 Για να κατανοήσουμε καλύτερα την πρακτική εφαρμογή των υπερησιών συλλογιστικής as θεωρήσουμε το παρακάτω σώμα ορολογίας

$$\mathcal{T} = \{ \text{Ερευνητής} \sqsubseteq \text{Άνθρωπος} \sqcap \text{Έξυπνος} \sqcap \\ \exists \text{έχειΠτυχίο.ΚαλόΠτυχίο} \sqcap \text{Εργατικός} \}$$

το παρακάτω σώμα ρόλων

$$\mathcal{R} = \{ \text{έχειΠτυχίοΜηχανικού} \sqsubseteq \text{έχειΠτυχίο} \}$$

και το παρακάτω σώμα ισχυρισμών

$$\mathcal{A} = \{ \text{Άνθρωπος}(\text{MAN}\Omega\Lambda\text{H}\Sigma), (\text{ΚαλόΠτυχίο}(\text{EMΠ})) \geq 0.7, \\ \text{Εργατικός}(\text{MAN}\Omega\Lambda\text{H}\Sigma) \geq 0.8, \text{Έξυπνος}(\text{MAN}\Omega\Lambda\text{H}\Sigma) \geq 0.9, \\ \text{έχειΠτυχίο}(\text{MAN}\Omega\Lambda\text{H}\Sigma, \text{EMΠ}) \}$$

Σύμφωνα λοιπόν με το σώμα ορολογίας μπορούμε να πούμε ότι το σώμα ισχυρισμών είναι συνεπές, δηλαδή η κατάσταση που περιγράφει είναι ορθή. Επιπρόσθετα, για το άτομο $\text{MAN}\Omega\Lambda\text{H}\Sigma$ με βάση το σώμα ορολογίας, το σώμα ρόλων και το σώμα ισχυρισμών μπορούμε να εξάγουμε την υπονοούμενη γνώση ότι συνεπάγεται λογικά στην έννοια Ερευνητής . Τέλος το μέγιστο κάτω φράγμα του ατόμου $\text{MAN}\Omega\Lambda\text{H}\Sigma$ στην έννοια Ερευνητής είναι 0.7 και προκύπτει από την ασαφή σημασιολογία της τομής, που στην περίπτωση μας ορίζεται από την τ -νόρμα του Gödel (\min).

2.2.4 Ο Αλγόριθμος Tableau για την f_{KD} - $SHIN$

Όπως έχουμε δει, η εξαγωγή συμπερασμάτων τόσο στις ΠΛ όσο και στις ασαφείς ΠΛ ανάγεται στο πρόβλημα της συνέπειας. Το πρόβλημα αυτό, στην πλειοψηφία των εκφραστικών κλασικών και ασαφών ΠΛ, ελέγχεται με την βοήθεια των αλγορίθμων tableaux [98]. Ο τρόπος που λειτουργούν αυτοί οι αλγόριθμοι είναι αναλύοντας τις περίπλοκες έννοιες που μπορεί να βρίσκονται σε ένα σώμα ασαφών ισχυρισμών, σύμφωνα με την σημασιολογία τους, σε απλούστερες έννοιες. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τους κανόνες επέκτασης, οι οποίοι είναι διαφορετικοί για κάθε είδος σύνθετης έννοιας. Για παράδειγμα η έννοια $C \sqcap D$ μας λέει ότι ο βαθμός συμμετοχής ενός αντικειμένου στην έννοια αυτή ισούται με τον ελάχιστο από τους βαθμούς που το αντικείμενο a^I ανήκει στις C^I και D^I , δηλαδή $(C \sqcap D)^I(a^I) = \min(C^I(a^I), D^I(a^I))$. Έτσι λοιπόν αν έχουμε τον ισχυρισμό $(a : C \sqcap D) \geq n$ τότε μπορούμε να συνάγουμε ότι οι ισχυρισμοί $(a : C) \geq n$ και $(a : D) \geq n$ πρέπει επίσης να ισχύουν. Παρόμοια,

έναν ισχυρισμό της μορφής $(a : \forall R.C) \geq n$, ικανοποιείται αν για κάθε $b^I \in \Delta^I$ ισχύει η ανίσωση $\max(1 - R^I(a^I, b^I), C^I(b^I)) \geq n$, δηλαδή είτε $R^I(a^I, b^I) \leq 1 - n$ ή $C^I(b^I) \geq n$. Έτσι λοιπόν, αν υπάρχει ένας ισχυρισμός της μορφής $((a, b) : R) \geq n'$, με $n' > 1 - n$ θα πρέπει να επιβάλουμε τον ισχυρισμό $(b : C) \geq n$, διότι σε διαφορετική περίπτωση ο αρχικός μας ισχυρισμός δεν ικανοποιείται.

Ο στόχος των αλγορίθμων tableaux είναι η κατασκευή μιας δομής tableau [38, 65], η οποία αποτελεί μια *αφαίρεση* (*abstraction*) ενός μοντέλου του \mathcal{A} . Έτσι, ενώ σε ένα μοντέλο τα αντικείμενα μπορεί να είναι τυχαία συνδεδεμένα μεταξύ τους ή ακόμα και ασύνδετα, σε ένα tableau οι κόμβοι συνδέονται δημιουργώντας μια δεντρική (tree-like), δασική (forest-like) ή γραφική (graph-like) δομή. Η επέκταση των δομών tableau σε αυτή των ασαφών tableau οι οποίοι είναι ικανοί να διαχειριστούν τους βαθμούς συμμετοχής που εμφανίζονται στις ασαφείς ΠΛ, καθώς και ένας αλγόριθμος συλλογιστικής για την γλώσσα f_{KD} - \mathcal{SHIN} παρουσιάστηκαν στο [209]. Στηριζόμενοι σε αυτόν τον αλγόριθμο, ο οποίος παρουσιάζεται συνοπτικά στην επόμενη ενότητα, εργαστήκαμε για την πρακτική βελτιστοποίηση του και την υλοποίηση της πρώτης μηχανής πρακτικής συλλογιστικής για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ.

Για τη γλώσσα f_{KD} - \mathcal{SHIN} ορίστηκε η έννοια της δομής του ασαφούς tableau ο ορισμός αυτός αποτελεί επέκταση του ορισμού που παρουσιάζεται στο [78] για τη γλώσσα \mathcal{SHIN} και απαιτεί αρχικά να οριστούν τα παρακάτω.

Ορισμός 2.2.3 (υπο-έννοιες) Για κάθε έννοια D ορίζουμε επαγωγικά το σύνολο των υπο-εννοιών της ($sub(D)$) ως,

$$\begin{aligned} sub(A) &= \{A\} \text{ για κάθε ατομική έννοια } A \in \mathbf{C}, \\ sub(C \sqcap D) &= \{C \sqcap D\} \cup \{sub(C)\} \cup \{sub(D)\}, \\ sub(C \sqcup D) &= \{C \sqcup D\} \cup \{sub(C)\} \cup \{sub(D)\}, \\ sub(\exists R.C) &= \{\exists R.C\} \cup \{sub(C)\}, \\ sub(\forall R.C) &= \{\forall R.C\} \cup \{sub(C)\}, \\ sub(\geq nR) &= \{\geq nR\} \text{ και} \\ sub(\leq nR) &= \{\leq nR\} \end{aligned}$$

◇

Ορισμός 2.2.4 Για μια ασαφή έννοια D και ένα $RBox \mathcal{R}$ ορίζουμε ως $cl(D, \mathcal{R})$ το μικρότερο σύνολο f_{KD} - \mathcal{SHIN} -εννοιών το οποίο ικανοποιεί τα εξής:

- $D \in cl(D, \mathcal{R})$,
- Το $cl(D, \mathcal{R})$ είναι κλειστό ως προς τις υπο-έννοιες της D και
- αν $\forall S.C \in cl(D, \mathcal{R})$, $R \sqsubseteq^* S$ και $\text{Trans}(R)$, τότε $\forall R.C \in cl(D, \mathcal{R})$
- αν $\exists S.C \in cl(D, \mathcal{R})$, $R \sqsubseteq^* S$ και $\text{Trans}(R)$, τότε $\exists R.C \in cl(D, \mathcal{R})$

Τέλος ορίζουμε $cl(\mathcal{A}, \mathcal{R}) = \bigcup_{(a:D) \triangleright n \in \mathcal{A}} cl(D, \mathcal{R})$.

◇

Όταν το \mathcal{R} είναι προφανές από τα συμφραζόμενα θα γράφουμε απλώς $cl(\mathcal{A})$.

Στον παρακάτω ορισμό χρησιμοποιούνται τα σύμβολα \triangleright και \triangleleft σαν αντικατάσταση των ανισώσεων \geq , $>$ και \leq , $<$ αντίστοιχα, ενώ το σύμβολο \boxtimes χρησιμοποιείται για όλα τα είδη των ανισώσεων. Ακόμη τα σύμβολα \boxtimes^- , \triangleright^- και \triangleleft^- για να δηλώσουν τις αντανάκλασεις τους, π. χ. η αντανάκλαση του \leq είναι το \geq και του $<$ το $>$.

Ορισμός 2.2.5 (Ασαφές tableau) Έστω \mathcal{A} ένα f_{KD} -SHIN $ABox$, \mathcal{R} ένα f_{KD} -SHIN $RBox$, $\mathbf{R}_{\mathcal{A}}$ το σύνολο των ρόλων που εμφανίζονται στο \mathcal{A} και στο \mathcal{R} , μαζί με τους αντίστροφους τους, και $\mathbf{I}_{\mathcal{A}}$ το σύνολο των ατόμων στο \mathcal{A} . Ένα ασαφές tableau T για το \mathcal{A} μ.β.τ. \mathcal{R} ορίζεται ως μια τετράδα $(\mathbf{S}, \mathcal{L}, \mathcal{E}, \mathcal{V})$ τέτοια ώστε: \mathbf{S} είναι ένα σύνολο από στοιχεία, το $\mathcal{L} : \mathbf{S} \times cl(\mathcal{A}) \rightarrow [0, 1]$ απεικονίζει κάθε ζεύγος στοιχείου και έννοιας στο βαθμό με τον οποίο το στοιχείο αυτό ανήκει στην έννοια, το $\mathcal{E} : \mathbf{R}_{\mathcal{A}} \times \mathbf{S} \times \mathbf{S} \rightarrow [0, 1]$ απεικονίζει κάθε ρόλο του $\mathbf{R}_{\mathcal{A}}$ και ζεύγος στοιχείων στο βαθμό συμμετοχής του ζεύγους αυτού στο ρόλο, και το $\mathcal{V} : \mathbf{I}_{\mathcal{A}} \rightarrow \mathbf{S}$ απεικονίζει άτομα τα οποία εμφανίζονται στο \mathcal{A} σε στοιχεία του \mathbf{S} . Για κάθε $s, t \in \mathbf{S}$, $C, E \in cl(\mathcal{A})$, $A \in \mathbf{C}$, $n \in (0, 1]$, A είναι μια ατομική έννοια και $R \in \mathbf{R}_{\mathcal{A}}$, το T ικανοποιεί τις ιδιότητες:

1. $\mathcal{L}(s, \perp) = 0$ και $\mathcal{L}(s, \top) = 1$ για κάθε $s \in \mathbf{S}$,
2. Αν $\mathcal{L}(s, \neg A) \boxtimes n$, τότε $\mathcal{L}(s, A) \boxtimes^- 1 - n$,
3. Αν $\mathcal{L}(s, C \sqcap E) \triangleright n$, τότε $\mathcal{L}(s, C) \triangleright n$ και $\mathcal{L}(s, E) \triangleright n$,
4. Αν $\mathcal{L}(s, C \sqcup E) \triangleleft n$, τότε $\mathcal{L}(s, C) \triangleleft n$ και $\mathcal{L}(s, E) \triangleleft n$,
5. Αν $\mathcal{L}(s, C \sqcup E) \triangleright n$, τότε $\mathcal{L}(s, C) \triangleright n$ ή $\mathcal{L}(s, E) \triangleright n$,
6. Αν $\mathcal{L}(s, C \sqcap E) \triangleleft n$, τότε $\mathcal{L}(s, C) \triangleleft n$ ή $\mathcal{L}(s, E) \triangleleft n$,
7. Αν $\mathcal{L}(s, \forall R.C) \triangleright n$, τότε είτε $\mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \triangleright^- 1 - n$ ή $\mathcal{L}(t, C) \triangleright n$,
8. Αν $\mathcal{L}(s, \exists R.C) \triangleleft n$, τότε είτε $\mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \triangleleft n$ ή $\mathcal{L}(t, C) \triangleleft n$,
9. Αν $\mathcal{L}(s, \exists R.C) \triangleright n$, τότε υπάρχει $t \in \mathbf{S}$ τέτοιο ώστε $\mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \triangleright n$ και $\mathcal{L}(t, C) \triangleright n$,
10. Αν $\mathcal{L}(s, \forall R.C) \triangleleft n$, τότε υπάρχει $t \in \mathbf{S}$ τέτοιο ώστε $\mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \triangleleft^- 1 - n$ και $\mathcal{L}(t, C) \triangleleft n$,
11. Αν $\mathcal{L}(s, \exists R.C) \triangleleft n$, $P \sqsubseteq^* R$ και $\text{Trans}(P)$, τότε είτε $\mathcal{E}(P, \langle s, t \rangle) \triangleleft n$ ή $\mathcal{L}(t, \exists P.C) \triangleleft n$,
12. Αν $\mathcal{L}(s, \forall R.C) \triangleright n$, $P \sqsubseteq^* R$ και $\text{Trans}(P)$, τότε είτε $\mathcal{E}(P, \langle s, t \rangle) \triangleright^- 1 - n$ ή $\mathcal{L}(t, \forall P.C) \triangleright n$,
13. Αν $\mathcal{L}(s, \geq pR) \triangleright n$, τότε $\sharp R^T(s, \triangleright, n) \geq p$,
14. Αν $\mathcal{L}(s, \leq pR) \triangleleft n$, τότε $\sharp R^T(s, \triangleleft^-, 1 - n) \geq p + 1$,
15. Αν $\mathcal{L}(s, \leq pR) \triangleright n$, τότε $\sharp R^T_-(s, \triangleright^-, 1 - n) \leq p$,
16. Αν $\mathcal{L}(s, \geq pR) \triangleleft n$, τότε $\sharp R^T_-(s, \triangleleft, n) \leq p - 1$,

17. $\mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \bowtie n$ αν $\mathcal{E}(\text{Inv}(R), \langle t, s \rangle) \bowtie n$,
18. Αν $\mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \triangleright n$ και $R \sqsubseteq^* S$, τότε $\mathcal{E}(S, \langle s, t \rangle) \triangleright n$,
19. Αν $(a : C) \bowtie n \in \mathcal{A}$, τότε $\mathcal{L}(\mathcal{V}(a), C) \bowtie n$,
20. Αν $((a, b) : R) \bowtie n \in \mathcal{A}$, τότε $\mathcal{E}(R, \langle \mathcal{V}(a), \mathcal{V}(b) \rangle) \bowtie n$,
21. Αν $a \doteq b \in \mathcal{A}$ ($a \not\equiv b \in \mathcal{A}$), τότε $\mathcal{V}(a) = \mathcal{V}(b)$ ($\mathcal{V}(a) \neq \mathcal{V}(b)$).

όπου $\#$ αναπαριστά την πληθικότητα ενός συνόλου και $R^T(s, \bowtie, n) = \{t \in \mathbf{S} \mid \mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \bowtie n\}$ επιστρέφει το σύνολο των στοιχείων $t \in \mathbf{S}$ τα οποία συμμετέχουν στο ρόλο R με κάποιο στοιχείο s και σε βαθμό, μεγαλύτερο ή ίσο, ανστηρά μεγαλύτερο, μικρότερο ή ίσο ή ανστηρά μικρότερο ενός δοθέντος βαθμού n , ενώ $R_-^T(s, \bowtie, n) = \{t \in \mathbf{S} \mid \mathcal{E}(R, \langle s, t \rangle) \not\bowtie n\}$ επιστρέφει το σύνολο των στοιχείων τα οποία δεν ικανοποιούν την ανισότητα. \diamond

Στο [209] αποδεικνύεται ότι ένα f_{KD} - \mathcal{SHLN} -ABox \mathcal{A} είναι συνεπές μ.β.τ. \mathcal{R} αν υπάρχει ένα ασαφές tableau T για το \mathcal{A} . Βάσει αυτού, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος που βασίζεται στους αλγορίθμους tableaux [98], ο οποίος κατασκευάζει ένα ασαφές tableau για ένα f_{KD} - \mathcal{SHLN} ABox και RBox. Οι αλγόριθμοι tableaux αποτελούνται από ένα σύνολο κανόνων, που όπως θα δούμε ονομάζονται κανόνες επέκτασης και χρησιμοποιούνται για να αποσυνθέτουμε τις περίπλοκες έννοιες σε πιο απλές. Με αυτό το τρόπο καταλήγουμε σε επίπεδο ατομικών εννοιών στο οποίο η ικανοποιησιμότητα, ή μη, μιας έννοιας είναι προφανής.

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται από τους Stoilos et al. στο [209] ενεργεί σε δάση ολοκλήρωσης (*completion-forests*) \mathcal{F} , όπως άλλωστε και ο κλασικός αλγόριθμος της \mathcal{SHLN} [78]. Ένα δάσος ολοκλήρωσης αποτελείται από ένα σύνολο από δέντρα ολοκλήρωσης (*completion-trees*), τα οποία είναι τυχαία συνδεδεμένα μεταξύ τους λόγω των τυχαίων συνδέσεων που μπορεί να ορίζονται από τους ισχυρισμούς ενός σώματος ισχυρισμών. Η εφαρμογή των κανόνων του αλγορίθμου σε κάθε ένα από τα άτομα του σώματος ισχυρισμών είναι αυτή που ουσιαστικά δημιουργεί τη δενδρική δομή για κάθε ένα από αυτά. Επιπλέον, υπενθυμίζουμε ότι λόγω της δυνατότητας ορισμού μεταβατικών ρόλων, ο τερματισμός του αλγορίθμου είναι προβληματικός και διασφαλίζεται με τη χρήση τεχνικών μπλοκαρίσματος (*blocking*), οι οποίες σταματούν την εκτέλεση του αλγορίθμου όταν ένας συγκεκριμένος τύπος κύκλου έχει σχηματιστεί.

Ορισμός 2.2.6 (Δάσος Ολοκλήρωσης) Ένα δάσος ολοκλήρωσης \mathcal{F} για ένα f_{KD} - \mathcal{SHLN} ABox \mathcal{A} μ.β.τ. RBox \mathcal{R} είναι μια συλλογή από δέντρα των οποίων οι ρίζες είναι τυχαία συνδεδεμένες μεταξύ τους με ακμές. Κάθε δέντρο αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με ακμές. Κάθε κόμβος x χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο από τριάδες εννοιών $\langle C, \bowtie, n \rangle$ όπου $C \in \text{sub}(\mathcal{A})$, $\bowtie \in \{\leq, >, \geq, <\}$ και $n \in [0, 1]$. Κάθε ακμή $\langle x, y \rangle$ χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο από τριάδες ρόλων $\mathcal{L}(\langle x, y \rangle) = \{\langle R, \bowtie, n \rangle\}$, όπου $R \in \mathbf{R}_{\mathcal{A}}$ είναι (πιθανά αντίστροφοι) ρόλοι που εμφανίζονται στο \mathcal{A} . Τόσο το $\mathcal{L}(x)$ όσο και το $\mathcal{L}(\langle x, y \rangle)$ ονομάζονται ετικέτες (labels) των x και $\langle x, y \rangle$, αντίστοιχα. Διαισθητικά, κάθε τριάδα $\langle C, \triangleright, n \rangle$ ($\langle R, \triangleright, n \rangle$), που ονομάζεται τριάδα συμμετοχής (membership triple), αναπαριστά το βαθμό συμμετοχής και τον τύπο της ανισότητας του κάθε κόμβου (ζεύγους κόμβων) σε μια έννοια C (ρόλο R).

Αν οι κόμβοι x και y είναι συνδεδεμένοι με μια ακμή $\langle x, y \rangle$ έχοντας $\langle P, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(\langle x, y \rangle)$, και $P \stackrel{\boxtimes}{=} R$, τότε ο y ονομάζεται $R_{\triangleright n}$ -διάδοχος ($R_{\triangleright n}$ -successor) του x και ο x ονομάζεται $R_{\triangleright n}$ -προκάτοχος ($R_{\triangleright n}$ -predecessor) του y . Αν ο y είναι ένας $R_{\triangleright n}$ -διάδοχος ή ένας $\text{Inn}(R)_{\triangleright n}$ -προκάτοχος του x , τότε ονομάζεται $R_{\triangleright n}$ -γείτονας ($R_{\triangleright n}$ -neighbour) του x . Έστω ότι ο y είναι ένας $R_{\geq n}$ -γείτονας του x . Τότε η ακμή $\langle x, y \rangle$ συγκρούεται (conjugates) με τριάδες της μορφής $\langle R, \triangleleft, m \rangle$ αν $n \geq m$. Με παρόμοιο τρόπο ορίζονται οι συγκρούσεις για τους $R_{\leq n}$, $R_{< n}$, $R_{> n}$ -γείτονες του x .

Αντιστοίχως ορίζουμε τη σύγκρουση ανάμεσα σε τριάδες εννοιών. Πιο συγκεκριμένα η τριάδα $\langle C, \geq, n \rangle$ συγκρούεται με την τριάδα $\langle C, <, m \rangle$ αν $n \geq m$.

Ένας κόμβος x είναι μπλοκαρισμένος (label blocked) αν έχει προγόνους x' , y και y' τέτοιους ώστε

1. ο x είναι διάδοχος του x' και ο y διάδοχος του y' ,
2. ο y δεν είναι κόμβος ρίζα,
3. οι y, x και όλοι οι κόμβοι στο μονοπάτι από τον y στον x είναι μπλοκαρισμένοι,
4. $\mathcal{L}(x) = \mathcal{L}(y)$ και $\mathcal{L}(x') = \mathcal{L}(y')$ και τέλος,
5. $\mathcal{L}(\langle x', x \rangle) = \mathcal{L}(\langle y', y \rangle)$.

Σε αυτήν την περίπτωση λέμε ότι ο y μπλοκάρει τον x . Ένας κόμβος y είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος (indirectly blocked) αν κάποιος από τους προγόνους του είναι μπλοκαρισμένος.

Για κάποιο κόμβο x , λέμε ότι το σύνολο $\mathcal{L}(x)$ περιέχει αντίφαση (clash) αν περιέχει:

- Δύο συγκρουόμενες τριάδες.
- Μία από τις τριάδες $\langle \perp, \geq, n \rangle$ με $n > 0$, $\langle \perp, >, n \rangle$, $\langle \top, \leq, n \rangle$ με $n < 1$, $\langle \top, <, n \rangle$, $\langle C, >, 1 \rangle$ ή $\langle C, <, 0 \rangle$
- Κάποια τριάδα $\langle \leq pR, \triangleright, n \rangle$ και ο x έχει $p + 1$ R_{\triangleright, n_i} -γείτονες y_0, \dots, y_p όλες οι ακμές $\langle x, y_i \rangle$ συγκρούονται με την τριάδα $\langle \neg R, \triangleright, n \rangle$ και $y_i \neq y_j$, για κάθε $0 \leq i < j \leq p$, ή

Επιπρόσθετα, λέμε ότι η ακμή $\langle x, y \rangle$ περιέχει μια αντίφαση αν υπάρχουν δύο συγκρουόμενες τριάδες στο $\mathcal{L}(\langle x, y \rangle)$ ή αν περιέχει τις τριάδες $\langle R, >, 1 \rangle$, $\langle R, <, 0 \rangle$ ή αν $\mathcal{L}(\langle x, y \rangle) \cup \{ \langle \text{Inn}(R), \triangleright, n \rangle \mid \langle R, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(\langle y, x \rangle) \}$, όπου x, y είναι κόμβοι ρίζες, περιέχει δύο συγκρουόμενες τριάδες. \diamond

Ορισμός 2.2.7 (Αλγόριθμος tableaux) Για ένα f_{KD} -SHIN $ABox \mathcal{A}$, ο αλγόριθμος αρχικοποιεί ένα δάσος \mathcal{F} ώστε να περιέχει:

- έναν κόμβο ρίζα x_{a_i} , για κάθε άτομο $a_i \in \mathbf{I}_{\mathcal{A}}$ που εμφανίζεται στο $ABox \mathcal{A}$, χαρακτηρισμένο με μια ετικέτα $\mathcal{L}(x_{a_i})$ τέτοια ώστε $\{ \langle C_i, \boxtimes, n \rangle \} \subseteq \mathcal{L}(x_{a_i})$ για κάθε ισχυρισμό της μορφής $(a_i : C_i) \boxtimes n \in \mathcal{A}$,
- μια ακμή $\langle x_{a_i}, x_{a_j} \rangle$, για κάθε ισχυρισμό $((a_i, a_j) : R_i) \boxtimes n \in \mathcal{A}$, με μια ετικέτα $\mathcal{L}(\langle x_{a_j}, x_{a_i} \rangle)$ τέτοια ώστε $\{ \langle R_i, \boxtimes, n \rangle \} \subseteq \mathcal{L}(\langle x_{a_i}, x_{a_j} \rangle)$.

Πίνακας 2.3: Κανόνες επέκτασης για την f_{KD} -SHLN

Κανόνας	Περιγραφή
$\neg \bowtie$	αν 1. $\langle \neg C, \bowtie, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, και 2. $\{\langle C, \bowtie^-, 1 - n \rangle\} \notin \mathcal{L}(x)$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C, \bowtie^-, 1 - n \rangle\}$
$\sqcap \triangleright$	αν 1. $\langle C_1 \sqcap C_2, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, και 2. $\{\langle C_1, \triangleright, n \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\} \not\subseteq \mathcal{L}(x)$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C_1, \triangleright, n \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\}$
$\sqcup \triangleleft$	αν 1. $\langle C_1 \sqcup C_2, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, και 2. $\{\langle C_1, \triangleright, n \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\} \not\subseteq \mathcal{L}(x)$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C_1, \triangleright, n \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\}$
$\sqcup \triangleright$	αν 1. $\langle C_1 \sqcup C_2, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, και 2. $\{\langle C_1, \triangleright, n \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\} \cap \mathcal{L}(x) = \emptyset$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{C\}$ για κάποιο $C \in \{\langle C_1, \triangleright, n \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\}$
$\sqcap \triangleleft$	αν 1. $\langle C_1 \sqcap C_2, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, και 2. $\{\langle C_1, \triangleright, n \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\} \cap \mathcal{L}(x) = \emptyset$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{C\}$ για κάποιο $C \in \{\langle C_1, \triangleleft, n \rangle, \langle C_2, \triangleleft, n \rangle\}$
$\exists \triangleright$	αν 1. $\langle \exists R.C, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι μπλοκαρισμένος, 2. ο x δεν έχει κάποιο $R_{\triangleright n}$ -γείτονα y με $\langle C, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(y)$ τότε δημιουργήσε νέο κόμβο y με $\mathcal{L}(\langle x, y \rangle) = \{\langle R, \triangleright, n \rangle\}$, $\mathcal{L}(y) = \{\langle C, \triangleright, n \rangle\}$
$\forall \triangleleft$	αν 1. $\langle \forall R.C, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι μπλοκαρισμένος, 2. ο x δεν έχει κάποιο $R_{\triangleleft^-, 1-n}$ -γείτονα y με $\langle C, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(y)$ τότε δημιουργήσε νέο κόμβο y με $\mathcal{L}(\langle x, y \rangle) = \{\langle R, \triangleleft^-, 1 - n \rangle\}$, $\mathcal{L}(y) = \{\langle C, \triangleright, n \rangle\}$
$\forall \triangleright$	αν 1. $\langle \forall R.C, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, 2. ο x έχει έναν $R_{\triangleright n_1}$ -γείτονα y με $\langle C, \triangleright, n \rangle \notin \mathcal{L}(y)$ και 3. η ακμή $\langle x, y \rangle$ συγκρούεται με την $\langle R, \triangleright^-, 1 - n \rangle$ τότε $\mathcal{L}(y) \rightarrow \mathcal{L}(y) \cup \{\langle C, \triangleright, n \rangle\}$
$\exists \triangleleft$	αν 1. $\langle \exists R.C, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, 2. ο x έχει έναν $R_{\triangleright n_1}$ -γείτονα y με $\langle C, \triangleleft, n \rangle \notin \mathcal{L}(y)$ και 3. η ακμή $\langle x, y \rangle$ συγκρούεται με την $\langle R, \triangleleft, n \rangle$ τότε $\mathcal{L}(y) \rightarrow \mathcal{L}(y) \cup \{\langle C, \triangleleft, n \rangle\}$

Επιπλέον, αρχικοποιούμε τη σχέση \neq ως $x_{a_i} \neq x_{a_j}$ αν $a_i \neq a_j \in \mathcal{A}$, και τη σχέση \doteq ως κενή, έτσι ώστε να μπορούμε να διαχωρίζουμε τους κόμβους που μπορούν να συγχωνευτούν κατά την εφαρμογή του κανόνα της πληθικότητας. Τέλος, ο αλγόριθμος επεκτείνει το $RBox \mathcal{R}$ προσθέτοντας αξιώματα υπαγωγής ρόλων $\text{Inv}(P) \sqsubseteq \text{Inv}(R)$, για κάθε $P \sqsubseteq R \in \mathcal{R}$ και προσθέτοντας αξιώματα $\text{Trans}(\text{Inv}(R))$ για κάθε $\text{Trans}(R) \in \mathcal{R}$. Στη συνέχεια, το \mathcal{F} επεκτείνεται εφαρμόζοντας διαδοχικά τους κανόνες επέκτασης (completion rules) των Πινάκων 2.3, 2.4. Λέμε ότι το δάσος είναι πλήρες (complete) όταν, για κάποιο κόμβο x , η ετικέτα $\mathcal{L}(x)$ περιέχει μια αντίφαση, ή κανένας από τους κανόνες ολοκλήρωσης δεν εφαρμόζεται. Ο αλγόριθμος απαντά ότι το \mathcal{A} είναι συνεπές μ.β.τ. \mathcal{R}' αν οι κανόνες ολοκλήρωσης μπορούν να εφαρμοστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί ένα πλήρες και ελεύθερο αντιφάσεων (clash-free) δάσος ολοκλήρωσης, και ότι το \mathcal{A} είναι μη-συνεπές μ.β.τ. \mathcal{R}' σε διαφορετική περίπτωση.

Συγχώνευση: Συγχώνευση ενός κόμβου y στον κόμβο x , σημαίνει ότι προσθέτουμε τα περιεχόμενα της ετικέτας $\mathcal{L}(y)$ στην $\mathcal{L}(x)$, "μετακινούμε" όλες τις ακμές που κατευθύνονται στον y έτσι ώστε να κατευθύνονται στον x . Στη συνέχεια, αν ο y δεν είναι κόμβος ρίζα τον διαγράφουμε (μαζί με κάθε μπλοκαρισμένο υποδέντρο κάτω από τον

y) από το δάσος ολοκλήρωσης, αλλιώς θέτουμε την ετικέτα $\mathcal{L}(y)$ στην κενή και $x \doteq y$. Πιο συγκεκριμένα, η συγχώνευση ενός κόμβου y στον x (γράφοντας $\text{Συγχώνευση}(y,x)$) σε ένα δάσος $\mathcal{F} = (V, E, \mathcal{L}, \neq, \doteq)$ παράγει έναν νέο δάσος, το οποίο προκύπτει από τον \mathcal{F} ως εξής:

1. Για κάθε κόμβο z τέτοιο ώστε $\langle z, y \rangle \in E$
 - αν $\{\langle x, z \rangle, \langle z, x \rangle\} \cap E = \emptyset$, τότε προσθέτουμε $\langle z, x \rangle$ στο E και θέτουμε $\mathcal{L}(\langle z, x \rangle) = \mathcal{L}(\langle z, y \rangle)$,
 - αν $\langle z, x \rangle \in E$, τότε θέτουμε $\mathcal{L}(\langle z, x \rangle) = \mathcal{L}(\langle z, x \rangle) \cup \mathcal{L}(\langle z, y \rangle)$,
 - αν $\langle x, z \rangle \in E$, τότε θέτουμε $\mathcal{L}(\langle x, z \rangle) = \mathcal{L}(\langle x, z \rangle) \cup \{\langle \text{Inv}(R), \triangleright, n \rangle \mid \langle R, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(\langle z, y \rangle)\}$ και
 - αφαιρούμε την ακμή $\langle z, y \rangle$ από το E .
2. θέτουμε $\mathcal{L}(x) = \mathcal{L}(x) \cup \mathcal{L}(y)$;
3. προσθέτουμε $x \neq z$ για κάθε z τέτοιο ώστε $y \neq z$;
4. αν y είναι ένας κόμβος ρίζα τότε θέτουμε $x \doteq y$, και
5. Κλάδεμα(y).

Κλάδεμα: Το κλάδεμα ενός κόμβου y από ένα δάσος ολοκλήρωσης \mathcal{F} , αποδίδει ένα νέο δάσος το οποίο προκύπτει από το \mathcal{F} ως εξής:

1. για όλους τους διαδόχους z του y , διαγράφουμε την $\langle y, z \rangle$ από το \mathcal{F} , και αν ο κόμβος z είναι μπλοκαρισμένος τότε $\text{Κλάδεμα}(z)$;
2. αν y είναι ένας κόμβος ρίζα τότε $\mathcal{L}(y) = \emptyset$, αλλιώς διαγράφουμε τον y .

◇

Τέλος στο [209] αποδεικνύονται τα παρακάτω:

- **Τερματισμός (termination):** Έστω \mathcal{A} ένα f_{KD} - SHLN ABox και \mathcal{R} ένα RBox. Τότε, όταν αρχικοποιήσουμε τη διαδικασία για το \mathcal{A} και \mathcal{R} ο αλγόριθμος επέκτασης τερματίζει.
- **Ορθότητα (soundness)** Αν οι κανόνες μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα f_{KD} - SHLN ασαφές σώμα ισχυρισμών \mathcal{A} και ρόλων \mathcal{R} , έτσι ώστε να προκύψει ένα πλήρες και ελεύθερο αντιφάσεων δάσος ολοκλήρωσης, τότε το \mathcal{A} έχει ένα ασαφές tableau μ.β.τ. \mathcal{R} .
- **Πληρότητα (completeness)** Έστω \mathcal{A} ένα f_{KD} - SHLN ABox και \mathcal{R} ένα RBox. Αν το \mathcal{A} έχει ένα ασαφές tableau μ.β.τ. \mathcal{R} τότε οι κανόνες επέκτασης μπορούν να εκτελεστούν με τέτοιο τρόπο ώστε ο αλγόριθμος να δημιουργήσει ένα πλήρες και ελεύθερο αντιφάσεων δάσος ολοκλήρωσης για το \mathcal{A} και το \mathcal{R} .
- **Πολυπλοκότητα (complexity)** Ο f_{KD} - SHLN αλγόριθμος εκτελείται σε 2-NEXPTIME.

Πίνακας 2.4: Συνέχεια κανόνων επέκτασης για την f_{KD} -SHIN

Κανόνας	Περιγραφή
\forall_+	αν 1. $\langle \forall S.C, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, 2. υπάρχει κάποιος ρόλος R , με $\text{Trans}(R)$, και $R \stackrel{\boxtimes}{\subseteq} S$, 3. ο x έχει έναν R_{\triangleright, n_1} -γείτονα y με, $\langle \forall R.C, \triangleright, n \rangle \notin \mathcal{L}(y)$, και 4. η ακμή $\langle x, y \rangle$ συγκρούεται με την $\langle R, \triangleright^-, 1 - n \rangle$ τότε $\mathcal{L}(y) \rightarrow \mathcal{L}(y) \cup \{ \langle \forall R.C, \triangleright, n \rangle \}$
\exists_+	αν 1. $\langle \exists S.C, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, 2. υπάρχει κάποιος ρόλος R , με $\text{Trans}(R)$, και $R \stackrel{\boxtimes}{\subseteq} S$, 3. ο x έχει έναν R_{\triangleright, n_1} -γείτονα y με, $\langle \exists R.C, \triangleleft, n \rangle \notin \mathcal{L}(y)$, και 4. η ακμή $\langle x, y \rangle$ συγκρούεται με την $\langle R, \triangleleft, n \rangle$ τότε $\mathcal{L}(y) \rightarrow \mathcal{L}(y) \cup \{ \langle \forall R.C, \triangleleft, n \rangle \}$
\geq_{\triangleright}	αν 1. $\langle \geq pR, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι μπλοκαρισμένος, 2. δεν υπάρχουν p $R_{\triangleright, n}$ -γείτονες y_1, \dots, y_p του x με $y_i \neq y_j$ και $1 \leq i < j \leq p$ τότε δημιουργήσε p νέους κόμβους y_1, \dots, y_p , με $\mathcal{L}(\langle x, y_i \rangle) = \{ \langle R, \triangleright, n \rangle \}$ και $y_i \neq y_j$ για $1 \leq i < j \leq p$
\leq_{\triangleleft}	αν 1. $\langle \geq pR, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι μπλοκαρισμένος, 2. τότε εφαρμόζεται ο κανόνας \geq_{\triangleright} για την τριπλέτα $\langle \geq (p+1)R, \triangleleft^-, 1 - n \rangle$
\leq_{\triangleright}	αν 1. $\langle \leq pR, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(z)$, ο z δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, $\#R_c^F(z, \triangleright, n) > p$, υπάρχουν δύο από αυτούς τους κόμβους, x, y , χωρίς να ισχύει $y \neq x$ τότε 1. αν y είναι κόμβος ρίζα ή πρόγονος του x , τότε Συγχώνευση(x, y) 2. αλλιώς Συγχώνευση(y, x)
\geq_{\triangleleft}	αν 1. $\langle \leq pR, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, ο x δεν είναι μπλοκαρισμένος, 2. τότε εφαρμόζεται ο κανόνας \leq_{\triangleleft} για την τριπλέτα $\langle \leq (p-1)R, \triangleleft^-, 1 - n \rangle$

- **Αναγωγή υπηρεσιών συλλογιστικής στον αλγόριθμο tableau** Ο αλγόριθμος tableau είναι μια διαδικασία απόφασης για το πρόβλημα της συνέπειας ενός f_{KD} -SHIN ABox, της n -ικανοποιησιμότητας και της υπαγωγής f_{KD} -SHIN-εννοιών με βάση ένα RBox.

Κεφάλαιο 3

Συλλογιστική σε Εκφραστικές Ασαφείς Περιγραφικές Λογικές

Ο αλγόριθμος συλλογιστικής για τη f_{KD} - $SHLN$ έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία από τους Stoilos et al. και βασίζεται στη δομή tableau [146]. Για τον αλγόριθμο αυτό, όπως είδαμε, έχουν αποδειχθεί η ορθότητα, η πληρότητα, αλλά και η υψηλή θεωρητική πολυπλοκότητα (2-NEXPTIME) [209] που κάνει την υλοποίηση του - βάσει του θεωρητικού φορμαλισμού - άνευ πρακτικής σημασίας. Παρόμοιο πρόβλημα υπήρχε όμως και με τους αλγόριθμους συλλογιστικής για τις κλασικές ΠΛ, το οποίο και αντιμετώπιστηκε με τις τεχνικές βελτιστοποίησης που προτάθηκαν για τους αλγόριθμους tableau [42, 67].

Ένας από τους κύριους στόχους μας ήταν η μετατροπή του θεωρητικού φορμαλισμού της f_{KD} - $SHLN$ σε έναν πρακτικά εφαρμόσιμο αλγόριθμο που να μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις ανάγκες συλλογιστικής ενός πεδίου με ασαφή ή ατελή πληροφορία, παρά την υψηλή θεωρητική του πολυπλοκότητα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου μελετήσαμε τον αλγόριθμο tableau της f_{KD} - $SHLN$ καθώς και τις τεχνικές βελτιστοποίησης για τους αλγόριθμους tableau που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η συνεισφορά μας στο κομμάτι των ασαφών αλγορίθμων συλλογιστικής, προτείνοντας τεχνικές βελτιστοποίησης για τον αλγόριθμο tableau της f_{KD} - $SHLN$. Πιο συγκεκριμένα, προτείνουμε κάποιες τεχνικές βελτιστοποίησης που μπορούν να εφαρμοστούν αποκλειστικά σε ασαφείς ΠΛ, μια και τροποποιούν το ασαφές σώμα ορολογίας με γνώμονα τους βαθμούς συμμετοχής που περιέχονται σε αυτό. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις κάποιων τεχνικών βελτιστοποίησης που έχουν εφαρμοστεί επιτυχημένα σε κλασικές ΠΛ, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τους στη f_{KD} - $SHLN$ χωρίς να επηρεάζεται η ορθότητα και η πληρότητα του αλγορίθμου.

Το υπόλοιπο κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής. Στην ενότητα 3.1 γίνεται μια εισαγωγή στις τεχνικές βελτιστοποίησης καθώς και μια κατηγοριοποίηση τους σύμφωνα με το σκοπό τους. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι τεχνικές βελτιστοποίησης που προτείνουμε για τον αλγόριθμο tableau τις f_{KD} - $SHLN$. Πιο αναλυτικά, προτείνουμε τεχνικές βελτιστοποίησης που αποσκοπούν στην μείωση του χώρου, τεχνικές βελτιστοποίησης που προεπεξεργάζονται τις βάσεις γνώσης με τέτοιο τρόπο ώστε ο έλεγχος συνέπειας να γίνεται ευκολότερος και, τέλος, τεχνικές βελτιστοποίησης που προσπαθούν να βελτιώσουν την τυπική απόδοση του αλγορίθμου κατά τον έλεγχο ικανοποιησιμότητας.

3.1 Τεχνικές Βελτιστοποίησης

Οι ΠΛ, όπως είδαμε, αποτελούν εκφραστικές γλώσσες αναπαράστασης γνώσης, οι οποίες μπορούν να αναπαραστήσουν ένα πεδίο εφαρμογής, ενώ διαθέτουν και αποφάνσιμες, στην πλειοψηφία τους, υπηρεσίες συλλογιστικής που υλοποιούνται με τη βοήθεια των αλγορίθμων *tableaux*. Επίσης είδαμε τις κυριότερες επεκτάσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για ασαφείς ΠΛ [94, 145, 210], καθώς και τον αλγόριθμο *tableau* για την εκφραστική ασαφή ΠΛ f_{KD} -*SHLN* [209].

Στην περιοχή των πολύ εκφραστικών ΠΛ έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα συλλογιστικής, με τα *FaCT++* [177], *Racer* [93] και *Pellet* [206] να είναι τα πιο δημοφιλή. Παρά τη σχετικά υψηλή πολυπλοκότητα χειρότερης περίπτωσης (*worst case complexity*) των πολύ εκφραστικών ΠΛ, που είναι EXPTIME-complete στην περίπτωση της *SHIQ* και NEXPTIME-complete στην περίπτωση της *SHOIQ*, τα παραπάνω συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχημένα σε διάφορες εφαρμογές [58, 101, 136, 150]. Η επιτυχία τους αυτή οφείλεται στις τεχνικές βελτιστοποίησης (*optimization techniques*) που έχουν αναπτυχθεί για τους αλγόριθμους *tableaux*. Έτσι λοιπόν, σε πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν τεχνητά δεδομένα καθώς και δεδομένα εφαρμογών η απόδοση των μη βελτιστοποιημένων συστημάτων ήταν πολύ χειρότερη. Σε κάποιες περιπτώσεις τα απλά συστήματα απαιτούσαν ώρες για να λύσουν προβλήματα στα οποία βελτιστοποιημένα συστήματα απαντούσαν σε ελάχιστα δευτερόλεπτα [69, 58]. Οι βελτιστοποιήσεις των αλγορίθμων *tableaux* υπήρξε, και εξακολουθεί να είναι, αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης τα τελευταία 15 χρόνια [42, 67, 84, 82, 91, 106, 112, 157, 178, 206].

Οι ασαφείς ΠΛ αποτελούν μια σχετικά πρόσφατη επέκταση των ΠΛ, με αποτέλεσμα η δουλειά που έχει γίνει πάνω σε συστήματα συλλογιστικής καθώς και σε τεχνικές βελτιστοποίησης για τους αλγόριθμους για ασαφή *tableaux* να είναι πολύ περιορισμένη. Για πολύ εκφραστικές ασαφείς ΠΛ υπάρχουν τα συστήματα ασαφούς συλλογιστικής *FiRE* [194] και *FuzzyDL* [217] τα οποία υποστηρίζουν τις f_{KD} -*SHLN* και *fuzzy SHIf* αντίστοιχα. Πρόσφατα παρουσιάστηκε το σύστημα *DeLorean*[215] το οποίο υποστηρίζει την ΠΛ f_{KD} - *SROIQ*, χρησιμοποιώντας όμως έναν αλγόριθμο αναγωγής μιας ασαφούς βάσης γνώσης σε μια κλασική [172, 214], και έπειτα τη μηχανή συλλογιστικής *Pellet* για τη συλλογιστική. Όσο αφορά τις τεχνικές βελτιστοποίησης για συλλογιστική σε ασαφείς ΠΛ, η μόνη υπάρχουσα εργασία είναι του Haarslev [204] η οποία είναι πολύ γενική και αφορά ένα πρότυπο σύστημα για συλλογιστική με αβεβαιότητα που υποστηρίζει την *ALC*.

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζουμε κάποιες βασικές τεχνικές βελτιστοποίησης για τον αλγόριθμο *tableau* της f_{KD} -*SHLN* που χρησιμοποιήσαμε κατά την υλοποίηση του ασαφούς συστήματος συλλογιστικής *FiRE*. Γενικότερα, οι τεχνικές βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος της συλλογιστικής που αποσκοπούν. Έτσι λοιπόν, υπάρχουν βελτιστοποιήσεις για την βελτίωση της συλλογιστικής στο σώμα ορολογίας [67, 106, 112, 205], ενώ άλλες που εστιάζονται στη συλλογιστική στο σώμα ισχυρισμών [71, 87, 118, 155]. Ένας πιο συγκεκριμένος διαχωρισμός των τεχνικών βελτιστοποίησης μπορεί να γίνει σύμφωνα με το σκοπό τους από τον οποίο προκύπτουν οι παρακάτω κατηγορίες:

1. Βελτιστοποιήσεις μείωσης απαιτήσεων χώρου (*reduce storage requirements*), οι οποίες έχουν σκοπό να μειώσουν το χώρο κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου *tableau*.

2. Βελτιστοποιήσεις προεπεξεργασίας (*preprocessing*), οι οποίες τροποποιούν την βάση γνώσης κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο έλεγχος της συνέπειας να γίνεται ευκολότερος.
3. Βελτιστοποιήσεις μερικής διάταξης (*partial ordering*), οι οποίες ελαχιστοποιήσουν τον αριθμό ελέγχων υπαγωγής που απαιτείται προκειμένου να ταξινομηθεί η βάση γνώσης.
4. Βελτιστοποιήσεις υπαγωγής (*subsumption*), οι οποίες αποφεύγουν μια ενδεχομένως ακριβή δοκιμή ικανοποιησιμότητας, συνήθως με την αντικατάσταση της με μια φτηνότερη.
5. Βελτιστοποιήσεις ικανοποιησιμότητας (*satisfiability*) οι οποίες βελτιώσουν την τυπική απόδοση κατά τον έλεγχο ικανοποιησιμότητας.

Μιας και στην $f_{KD}\text{-SHIN}$ δεν ορίζεται ασαφής υπαγωγή, δεν υπάρχει δηλαδή κάποια διαφορά στην ιεράρχηση ενός ασαφούς ή ενός κλασικού σώματος ορολογίας [209], η συνεισφορά μας όσο αφορά τις τεχνικές βελτιστοποίησης για τον αλγόριθμο tableau της $f_{KD}\text{-SHIN}$ επικεντρώνεται στις βελτιστοποιήσεις για τη μείωση των απαιτήσεων χώρου, τις βελτιστοποιήσεις προεπεξεργασίας και τις βελτιστοποιήσεις ικανοποιησιμότητας.

3.2 Βελτιστοποιήσεις για τη Μείωση των Απαιτήσεων Χώρου

Όταν μελετούμε την απόδοση ενός αλγορίθμου, ο χρόνος εκτέλεσης καθώς και ο χώρος που απαιτεί ο αλγόριθμος είναι οι δύο κυριότεροι παράγοντες που εξετάζονται. Πρακτικά, στους αλγόριθμους tableau, ο χρόνος που απαιτείται για τον έλεγχο της ικανοποιησιμότητας μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα για τη χρήση τους. Παρόλα αυτά, ο χρόνος εκτέλεσης είναι άμεσα συνδεδεμένος με το χώρο που απαιτεί ο αλγόριθμος. Έτσι, λοιπόν, με τη μείωση του απαιτούμενου χώρου μειώνεται και ο χώρος αναζήτησης του αλγορίθμου που συνεπάγεται με την καλύτερη απόδοση του. Παρακάτω περιγράφονται κάποιες τεχνικές βελτιστοποίησης οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση του χώρου στον αλγόριθμο για το ασαφή $f_{KD}\text{-SHIN}$ tableau.

3.2.1 Κανονικοποίηση Βαθμών

Η επέκταση των ΠΛ με τη χρήση της ασαφούς συνολοθεωρίας έχει άμεση επίπτωση στο σώμα των ισχυρισμών. Έτσι λοιπόν, στις ασαφείς ΠΛ ένα άτομο συμμετέχει σε μια έννοια με ένα βαθμό και αντίστοιχα δύο άτομα συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός ρόλου με ένα βαθμό. Η εισαγωγή βαθμών στο σώμα ισχυρισμών έχει σαν αποτέλεσμα την πιθανή ύπαρξη ενός ατόμου που συμμετέχει στην ίδια έννοια με διαφορετικούς βαθμούς, χωρίς να σχηματίζεται κάποια αντίφαση. Το γεγονός αυτό - σε συνδυασμό με το ότι στις σημασιολογικές εφαρμογές το σώμα ορολογίας ορίζεται από ειδικούς στο αντικείμενο της εφαρμογής, ενώ το σώμα των ισχυρισμών αρχικοποιείται συνήθως

από κάποιο αλγόριθμο ή από κάποια βάση δεδομένων - μπορεί να οδηγήσει σε τραγικές συνέπειες για τη συλλογιστική. Είναι δυνατό λοιπόν να έχουμε

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle C, >, n \rangle \langle C, >, m \rangle \langle C, <, l \rangle \langle C, <, k \rangle \},$$

όπου C είναι μια f_{KD} - $SHLN$ έννοια και $m, n, l, k \in [0, 1]$. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, ανάλογα με τις τιμές των m, n, k, l μπορεί να υπάρχει αντίφαση (αν $m=0.6, l=0.3$) ή να μην υπάρχει (αν $m=0.4, n=0.6, l=0.7, k=0.8$). Οι πιθανοί συνδυασμοί που θα πρέπει να ελεγχθούν για το συγκεκριμένο παράδειγμα, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει αντίφαση ή όχι, είναι οι συνδυασμοί ανά 2 σε ένα σύνολο που αποτελείται από 4 στοιχεία, δηλαδή 6 συνδυασμοί. Μετά από αυτό τον έλεγχο, και στην περίπτωση που δεν υπάρχει αντίφαση, θα πρέπει να ελεγχθούν οι 4 ισχυρισμοί για πιθανή εφαρμογή των κανόνων επέκτασης του f_{KD} - $SHLN$ tableau. Εάν η έννοια C είναι μια απλή f_{KD} - $SHLN$ έννοια, τότε η κατάσταση δεν περιπλέκεται διότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί κανένας κανόνας. Διαφορετικά, εάν δηλαδή η C είναι μια σύνθετη f_{KD} - $SHLN$ έννοια, θα πρέπει να εφαρμοστούν οι κανόνες επέκτασης για την ίδια έννοια (C) για 2 διαφορετικές ανισότητες ($>, <$) με 2 διαφορετικούς βαθμούς (n, m και l, k αντίστοιχα).

Το παραπάνω πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί πιο αποτελεσματικά με μια κανονικοποίηση των βαθμών συμμετοχής στους ισχυρισμούς. Χρησιμοποιώντας το μέγιστο κάτω φράγμα (greatest lower bound-glb) και το ελάχιστο άνω φράγμα (least upper bound-lup)[94] της έννοιας C μπορούμε να μειώσουμε τους ισχυρισμούς που αφορούν αυτή την έννοια σε ένα κόμβο, το πολύ σε 2. Αυτό γίνεται αφήνοντας μονάχα το μεγαλύτερο δυνατό θετικό και το μικρότερο δυνατό αρνητικό ισχυρισμό για κάθε έννοια

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle C, >, d_{max} \rangle \langle C, <, d_{min} \rangle \}.$$

Με αυτό τον τρόπο, στο παραπάνω παράδειγμα θα είχαμε μονάχα 1 συνδυασμό τριάδων συμμετοχής για να ελέγξουμε αν υπάρχει κάποια αντίφαση και στην περίπτωση που δεν υπήρχε θα εφαρμοζόνταν μονάχα 2 κανόνες επέκτασης. Αν, επιπρόσθετα, επεκτείνουμε το σχεπτικό αυτό και σε ισχυρισμούς που περιλαμβάνουν την άρνηση της ίδιας έννοιας, τότε μπορούμε να έχουμε τους παρακάτω κανόνες κανονικοποίησης των βαθμών (degrees normalization) των ισχυρισμών σε ένα κόμβο.

Πίνακας 3.1: Κανόνες κανονικοποίησής των βαθμών

Ισχυρισμός 1	Ισχυρισμός 2	Συνθήκη	Ενέργεια
$\langle C, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle C, \triangleright, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n \triangleright l$	Διαγραφή $\langle C, \triangleright, l \rangle$
$\langle C, >, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle C, \geq, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n \geq l$	Διαγραφή $\langle C, \geq, l \rangle$
$\langle C, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle C, \triangleleft, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n \triangleleft l$	Διαγραφή $\langle C, \triangleleft, l \rangle$
$\langle C, <, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle C, \leq, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n \leq l$	Διαγραφή $\langle C, \leq, l \rangle$
$\langle C, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, \triangleright, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n \leq 1 - l$	Διαγραφή $\langle \neg C, \triangleright, l \rangle$
		$n > 1 - l$	Διαγραφή $\langle C, \triangleleft, n \rangle$
$\langle C, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, \triangleleft, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n \geq 1 - l$	Διαγραφή $\langle \neg C, \triangleleft, l \rangle$
		$n < 1 - l$	Διαγραφή $\langle C, \triangleright, n \rangle$

Η τεχνική της κανονικοποίησης των βαθμών μπορεί να επεκταθεί και στις τριάδες ρόλων και να επιταχύνει σημαντικά τον αλγόριθμο f_{KD} - $SHLN$ tableau μειώνοντας

αισθητά το χώρο του αλγορίθμου (search space). Ακόμη, κατά τη διαδικασία της κανονικοποίησης των βαθμών μπορούμε να εισάγουμε κάποιους επιπρόσθετους κανόνες οι οποίοι - στηριζόμενοι στους κανόνες του f_{KD} - $SHLN$ tableau - θα εξυπηρετούν τη γρήγορη εύρεση αντίφασης. Αν έχουμε για παράδειγμα

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle C, >, n \rangle \langle \neg C, >, m \rangle \}$$

και το $n+l \geq 1$, δηλαδή οι βαθμοί συμμετοχής είναι τέτοιοι που προκαλείται αντίφαση, τότε μπορούμε να την ανιχνεύσουμε χωρίς να εφαρμόσουμε τον f_{KD} - $SHLN$ κανόνα της άρνησης. Αυτοί οι κανόνες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2: Κανόνες πρόωρης ανίχνευσης αντίφασης.

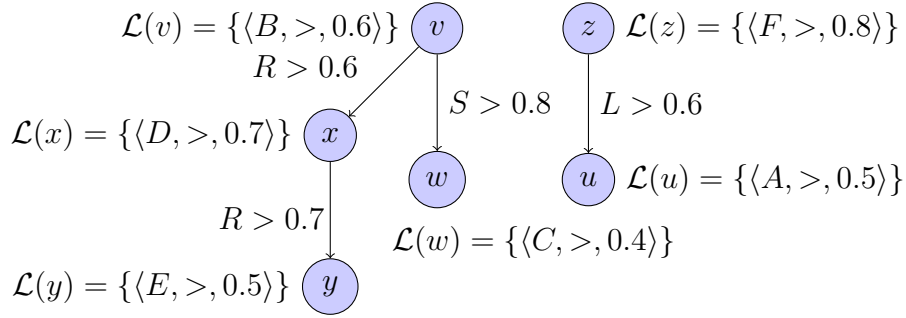
Ισχυρισμός 1	Ισχυρισμός 2	Συνθήκη	Ενέργεια
$\langle C, \geq, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, \geq, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l > 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$
$\langle C, >, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, >, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l \geq 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$
$\langle C, >, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, \geq, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l \geq 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$
$\langle C, \geq, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, >, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l \geq 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$
$\langle C, \leq, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, \leq, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l < 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$
$\langle C, <, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, <, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l \leq 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$
$\langle C, <, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, \leq, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l \leq 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$
$\langle C, \leq, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$\langle \neg C, <, l \rangle \in \mathcal{L}(x)$	$n + l \leq 1$	Αντίφαση στο $\mathcal{L}(x)$

Οι τεχνικές της κανονικοποίησης των βαθμών και της πρόωρης ανίχνευσης αντιφάσεων υλοποιούνται εύκολα. Για ένα κόμβο ο οποίος περιέχει n τριάδες συμμετοχής πρέπει να πραγματοποιηθούν οι έλεγχοι ανά 2 τριάδες συμμετοχής για την εφαρμογή τους, δηλαδή $\frac{n!}{2!(n-2)!}$, οπότε ο αλγόριθμος που τις συνδυάζει έχει πολυωνυμική πολυπλοκότητα. Επιπλέον, οι βελτιστοποιήσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε ασαφείς ΠΛ με χαμηλή εκφραστικότητα, όπως η ALC , μέχρι τις πιο εκφραστικές, όπως η $SHOIN$. Ακόμα, εάν οι κανόνες τους τροποποιηθούν σύμφωνα με την νόρμα της άρνησης που χρησιμοποιείται στην ασαφή ΠΛ, τότε οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για διαφορετικές ασαφείς λογικές. Το μοναδικό ίσως μειονέκτημα αυτών των βελτιστοποιήσεων είναι ότι τα αποτελέσματά τους είναι άμεσα εξαρτώμενα από τη βάση γνώσης. Με άλλα λόγια, είναι πιθανό για συγκεκριμένες βάσεις γνώσης η κανονικοποίηση των βαθμών και η πρόωρη ανίχνευση αντιφάσεων να μην έχουν κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα στην απόδοση του αλγορίθμου.

3.2.2 Διχοτόμηση του Σώματος Ισχυρισμών

Μια ακόμα πολύ σημαντική τεχνική βελτιστοποίησης, που έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά συστήματα συλλογιστικής, είναι η *διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμών* (*ABox Partitioning*) [71, 204]. Η τεχνική αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι κανόνες επέκτασης στο κόμβο που εξετάζεται, είτε προσθέτουν τριάδες συμμετοχής σε αυτόν, είτε δημιουργούν καινούργιους γειτονικούς κόμβους ή προσθέτουν τριάδες συμμετοχής στους γειτονικούς κόμβους του. Βάσει, λοιπόν, αυτής της ιδιότητας των κατασκευαστών της ασαφούς ΠΛ f_{KD} - $SHLN$, το σώμα ισχυρισμών μπορεί να διχοτομηθεί σε επιμέρους τμήματα έτσι ώστε το ένα να μην επηρεάζει το άλλο. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο που ενεργεί η τεχνική της διχοτόμησης ας μελετήσουμε το παρακάτω παράδειγμα.

Σχήμα 3.1: Ένα δάσος ολοκλήρωσης που περιέχει 2 τμήματα του ABox.



Παράδειγμα 3.2.1 Θεωρούμε το δάσος ολοκλήρωσης που φαίνεται στο Σχήμα 3.1 όπου A, B, C, D, E, F f_{KD} -SHLN έννοιες και R, S, L f_{KD} -SHLN ρόλοι.

Αν θεωρήσουμε ότι η B είναι μια σύνθετη f_{KD} -SHLN έννοια και μελετήσουμε την επιρροή της στους υπόλοιπους κόμβους της βάσης γνώσης τότε:

- Εάν η B χρησιμοποιεί τελεστές τοπικής προτασιακής συλλογιστικής (local propositional reasoning) δηλαδή \neg, \sqcap, \sqcup , τότε επηρεάζεται μονάχα ο κόμβος v .
- Εάν η B χρησιμοποιεί τους τελεστές \exists_{\triangleright} και \geq_{\triangleright} μια και το B είναι θετικός ισχυρισμός (στην περίπτωση που το B είναι αρνητικός ισχυρισμός τότε οι \forall_{\triangleleft} και \leq_{\triangleleft} έχουν το ίδιο αποτέλεσμα), τότε δημιουργούνται καινούργιοι γείτονες για το κόμβο v .
- Εάν η B χρησιμοποιεί τον τελεστή \forall_{\triangleright} (\exists_{\triangleleft}), τότε είναι πιθανό να επηρεαστούν οι w (π. χ. $B \equiv \forall R.C$), x (π. χ. $B \equiv \forall S.C$) και y (π. χ. $B \equiv \forall S.(\forall R.C)$) καθώς και οι νέοι γείτονες του v που έχουν δημιουργηθεί ή πρόκειται να δημιουργηθούν.
- Εάν η B χρησιμοποιεί το τελεστή \leq_{\triangleright} (\geq_{\triangleleft}), επηρεάζονται οι w, x καθώς και όποιοι νέοι γείτονες του v που έχουν δημιουργηθεί ή πρόκειται να δημιουργηθούν.

Τέλος, εάν θεωρήσουμε σαν R^- το αντίστροφο του R τότε και πάλι η εφαρμογή κάποιου κανόνα με αντίστροφους θα έχει επιρροή μονάχα στους γείτονες του v .

Από το παραπάνω παράδειγμα παρατηρούμε ότι σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις η ικανοποιησιμότητα του v δεν επηρεάζεται από τους κόμβους z και u . Είναι δηλαδή δυνατή η διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμού του παραδείγματος 3.2.1 σε 2 επιμέρους τμήματα τα οποία μπορούν να εξεταστούν ξεχωριστά. Εάν και τα δύο αυτά τμήματα είναι συνεπή τότε η βάση γνώσης μας είναι συνεπής, ενώ σε διαφορετική περίπτωση δεν είναι.

Όπως λοιπόν γίνεται αντιληπτό, ο χώρος μιας δομής tableau μειώνεται αισθητά μια και οι κόμβοι που δεν συνδέονται με το κόμβο που εξετάζεται και άρα δεν μπορούν να τον επηρεάσουν παραλείπονται. Επιπρόσθετα, λιγότερος χώρος καταλαμβάνεται κατά την εφαρμογή των κανόνων tableau επειδή τα κομμάτια του σώματος ισχυρισμών, στα οποία εφαρμόστηκαν οι κανόνες επέκτασης, μπορούν να διαγραφούν. Η τεχνική της διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμού ορίζεται τυπικά παρακάτω. Αρχικά ορίζουμε την σύνδεση με σχέση ενός ατόμου.

Ορισμός 3.2.2 Σύνδεση με σχέση (Connection Relation) Η σχέση σύνδεσης μεταξύ δύο ατόμων $a, b \in \mathbf{I}_A$ μ.β.τ ένα σώμα ισχυρισμών A συμβολίζεται με \rightsquigarrow_A και ορίζεται επαγωγικά ως:

$$a \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} b \iff \begin{cases} R(a, b) \triangleright d \in \mathcal{A} & \text{για κάποιο ρόλο } R \text{ και } d \in [0, 1] \text{ ή} \\ R(b, a) \triangleright d \in \mathcal{A} & \text{για κάποιο ρόλο } R \text{ και } d \in [0, 1] \text{ ή} \\ a \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} c \text{ and } c \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} b \end{cases} \quad (3.1)$$

Πρόταση 3.2.3 Η σύνδεση με σχέση $\rightsquigarrow_{\mathcal{A}}$ είναι μια συμμετρική σχέση δηλαδή $a \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} b$ αν $b \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} a$. (Μπορεί να αποδειχθεί εύκολα με επαγωγή).

Στην συνέχεια ορίζεται η γειτονιά ενός ατόμου και το τμήμα ενός σώματος ισχυρισμών.σ

Ορισμός 3.2.4 Για ένα σώμα ισχυρισμών \mathcal{A} και το σύνολο των ατόμων σε αυτό $\mathbf{I}_{\mathcal{A}}$, για κάθε $a \in \mathbf{I}_{\mathcal{A}}$ το σύνολο $[a]_{\mathcal{A}}$ λέγεται γειτονιά (neighborhood) του a και περιέχει το a και όλα τα άτομα που σχετίζονται με αυτό μ.β.τ \mathcal{A} .

$$[a]_{\mathcal{A}} = \{a\} \cup \{b \mid b \in \mathbf{I}_{\mathcal{A}} \text{ and } a \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} b\} \quad (3.2)$$

Πρόταση 3.2.5 Αν $b \in [a_i] \cap [a_j]$ τότε έχουμε ότι $a_i \in [a_j]$.

Απόδειξη: Αφού $b \in [a_i] \cap [a_j]$ έχουμε ότι $a_i \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} b$ και $a_j \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} b$ (ή $b \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} a_j$ λόγω της συμμετρίας της σχέσης $\rightsquigarrow_{\mathcal{A}}$). Από τον ορισμό της $\rightsquigarrow_{\mathcal{A}}$ έχουμε ότι $a_i \rightsquigarrow_{\mathcal{A}} a_j$ και από τον ορισμό του $[a_i]_{\mathcal{A}}$: $a_j \in [a_i]_{\mathcal{A}}$.

Ορισμός 3.2.6 Συμβολίζουμε με \mathcal{A}_a το τμήμα του σώματος ισχυρισμών \mathcal{A} που περιέχει τα άτομα στο $[a]_{\mathcal{A}}$:

$$\mathcal{A}_a = \left\{ C(b) \bowtie d \mid C(b) \bowtie d \in \mathcal{A} \text{ και } b \in [a]_{\mathcal{A}} \right\} \cup \left\{ R(b, c) \triangleright d \mid R(b, c) \triangleright d \in \mathcal{A} \text{ και } b, c \in [a]_{\mathcal{A}} \right\} \quad (3.3)$$

Θεώρημα 3.2.7 Υπάρχει ένα σύνολο από άτομα $\mathbf{I}'_{\mathcal{A}} \subseteq \mathbf{I}_{\mathcal{A}}$, τέτοιο ώστε το σώμα ισχυρισμών \mathcal{A} να μπορεί να διχοτομηθεί σε ένα σύνολο από τμήματα $\mathcal{A}_{a_1}, \dots, \mathcal{A}_{a_n}$ (όπου $\{a_1, \dots, a_n\} = \mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$) τέτοιο ώστε:

1. $\mathcal{A}_{a_1} \cup \dots \cup \mathcal{A}_{a_n} = \mathcal{A}$,
2. $\mathcal{A}_{a_i} \cap \mathcal{A}_{a_j} = \emptyset$, για κάθε ζεύγος $a_i, a_j \in \mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$ τέτοιο ώστε $a_i \neq a_j$
3. \mathcal{A} να είναι συνεπές μ.β.τ το σώμα ορολογίας \mathcal{T} και το σώμα ρόλων \mathcal{R} αν $\mathcal{A}_{a_1}, \dots, \mathcal{A}_{a_n}$ είναι συνεπή μ.β.τ \mathcal{T} και \mathcal{R} .

Απόδειξη: Αρχικά ορίζουμε το σύνολο $\mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$ επαγωγικά όπως ακολουθεί.

- $\mathbf{I}'_{\mathcal{A}} := \emptyset$
- Για κάθε $b \in \mathbf{I}_{\mathcal{A}}$
 - Εάν δεν υπάρχει $a \in \mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$ τέτοιο ώστε $b \in [a]$ τότε $\mathbf{I}'_{\mathcal{A}} := \mathbf{I}'_{\mathcal{A}} \cup \{b\}$

1. Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει ένας ισχυρισμός (για παράδειγμα ισχυρισμός έννοιας) $(a : C) \triangleright n$ τέτοιος ώστε $(a : C) \triangleright n \in \mathcal{A}$ και $(a : C) \triangleright n \notin \mathcal{A}_{a_1} \cup \dots \cup \mathcal{A}_{a_n}$. Αυτό υποδηλώνει ότι $a \notin [a_1] \cup \dots \cup [a_n]$. Επειδή όμως $(a : C) \triangleright n \in \mathcal{A}$ ισχύει ότι $a \in \mathbf{I}_{\mathcal{A}}$ και από την δημιουργία του $\mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$ έχουμε ότι $a \in \mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$ που έρχεται σε αντίφαση με την υπόθεση μας μια και $(a : C) \triangleright n \in \mathcal{A}$.
2. Ας υποθέσουμε ότι η πρόταση αυτή δεν ισχύει. Σε αυτή την περίπτωση τα υποσύνολα $\mathcal{A}_{a_i}, \mathcal{A}_{a_j}$ έχουν ένα κοινό ισχυρισμό. Εάν αυτός είναι ο ισχυρισμός $(b : C) \triangleright d$ (με παρόμοιο τρόπο αποδεικνύεται και για ισχυρισμό ρόλου) από τον ορισμό του $\mathcal{A}_{a_i}, \mathcal{A}_{a_j}$ έχουμε ότι $b \in [a_i] \cap [a_j]$ και σύμφωνα με την πρόταση 3.2.5 έχουμε ότι $a_i \in [a_j]$ το οποίο είναι άτοπο λόγω του τρόπου κατασκευής του $\mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$.
3. Έστω ότι υπάρχει μοντέλο \mathcal{I} για το \mathcal{A} μ.β.τ το σώμα ορολογίας \mathcal{T} και το σώμα ρόλων \mathcal{R} . Προφανώς αφού $\mathcal{A}_{a_i} \subseteq \mathcal{A}$ για κάθε $a_i \in \mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$ έχουμε ότι \mathcal{I} είναι επίσης μοντέλο του \mathcal{A}_{a_i} . Για το αντίστροφο, έστω για κάθε $\mathcal{A}_{a_1}, \dots, \mathcal{A}_{a_n}$ υπάρχει μοντέλο $\mathcal{I}_{a_1}, \dots, \mathcal{I}_{a_n}$ μ.β.τ το το σώμα ορολογίας \mathcal{T} και το σώμα ρόλων \mathcal{R} . Μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα νέο σύνολο από μοντέλα $\mathcal{I}'_{a_1}, \dots, \mathcal{I}'_{a_n}$ τέτοιο ώστε $\Delta^{\mathcal{I}'_{a_i}} \cap \Delta^{\mathcal{I}'_{a_j}} = \emptyset$ για κάθε ζεύγος $a_i, a_j \in \mathbf{I}'_{\mathcal{A}}$ και $a_i \neq a_j$. Μπορούμε να συνδυάσουμε τις ερμηνείες $\mathcal{I}'_{a_1}, \dots, \mathcal{I}'_{a_n}$ σε μια ερμηνεία \mathcal{I} η οποία θα αποτελεί ερμηνεία για το \mathcal{A} μ.β.τ. \mathcal{T} και \mathcal{R} .

Η τεχνική της διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών είναι πολύ αποτελεσματική ενώ έχει πολυωνυμική πολυπλοκότητα και είναι ανεξάρτητη από την ασαφή σημασιολογία που χρησιμοποιείται. Η μοναδική περίπτωση για να μη μειώσει το χώρο είναι όταν όλα τα άτομα της βάσης γνώσης συνδέονται, το οποίο είναι εξαιρετικά σπάνιο. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί από λιγότερο εκφραστικές ΠΛ μέχρι τις πολύ εκφραστικές ΠΛ, με μόνο περιορισμό ότι τις ΠΛ που χρησιμοποιούν ονοματικές έννοιες. Τα οφέλη που μας προσφέρει είναι πάρα πολλά διότι ένα πρόβλημα διαιρείται σε επιμέρους μικρότερα προβλήματα, ανεξάρτητα μεταξύ τους, τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν πιο αποτελεσματικά. Είναι λοιπόν δυνατό σε ένα τμήμα του σώματος ισχυρισμών να μην συμπεριλαμβάνονται αντίστροφοι ρόλοι και έτσι να εφαρμοστεί η τεχνική των ιχνών (δείτε ενότητα 3.4.1) για επιπρόσθετη βελτίωση του αλγορίθμου. Ακόμα, επειδή η ικανοποιησιμότητα του σώματος ισχυρισμών εξαρτάται από την ικανοποιησιμότητα των επιμέρους τμημάτων, θα ήταν δυνατή μια αξιολόγηση των τμημάτων σύμφωνα με το ποίο είναι πιο πιθανό να περιέχει αντίφαση. Επιπρόσθετα, με την διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμών είναι δυνατός ο έλεγχος ικανοποιησιμότητας ενός μόνο ατόμου βάσει του τμήματος ισχυρισμών στο οποίο ανήκει. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, όπως θα δούμε παρακάτω, για την βελτιστοποίηση της υπηρεσίας συλλογιστικής του μέγιστου άνω φράγματος (ενότητα 3.4.6). Πέραν όμως των τεχνικών βελτιστοποίησης, οι οποίες βασίζονται στην θεωρία των ΠΛ, είναι δυνατή η χρήση και άλλων τεχνικών για τη βελτίωση της απόδοσης επειδή η ικανοποιησιμότητα ενός τμήματος είναι ανεξάρτητη από την ικανοποιησιμότητα ενός άλλου. Μια τέτοια τεχνική είναι ο έλεγχος της ικανοποιησιμότητας κάνοντας χρήση παράλληλης επεξεργασίας και πολυνηματικού προγραμματισμού [135]. Στις μέρες μας είναι πολύ συνηθισμένο οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές να λειτουργούν με παραπάνω από ένα επεξεργαστή, έτσι με χρήση πολυνηματικού προγραμματισμού μπορούμε να αναθέσουμε τον υπολογισμό της συνέπειας διαφορετικών τμημάτων του σώματος ισχυρισμών σε διαφορετικούς επεξεργαστές.

3.3 Βελτιστοποιήσεις Προεπεξεργασίας

Μια πολύ σημαντική ομάδα βελτιστοποιήσεων η οποία χρησιμοποιείται στα περισσότερα συστήματα κλασικής συλλογιστικής, είναι οι *βελτιστοποιήσεις προεπεξεργασίας*. Οι βελτιστοποιήσεις αυτές ενεργούν απευθείας στη βάση γνώσης και σκοπός τους είναι να την απλοποιήσουν σε μια μορφή η οποία θα διευκολύνει τη μετέπειτα επεξεργασία από τον αλγόριθμο tableau. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να ανιχνευτούν πιο γρήγορα αντιφάσεις ή να παραλειφθούν κάποιοι ισχυρισμοί οι οποίοι υπονοούνται από κάποιους άλλους. Κάποιες από αυτές τις τεχνικές, οι οποίες είναι εύκολες στην υλοποίηση και μπορούν να εφαρμοστούν στον αλγόριθμο f_{KD} -*SHIN* tableau, θα μελετηθούν παρακάτω. Είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι περισσότερες βελτιστοποιήσεις προεπεξεργασίας έχουν πολυωνυμική ή και γραμμική πολυπλοκότητα χείριστης περίπτωσης.

3.3.1 Οκνηρό Ξεδίπλωμα

Μια ασαφής βάση γνώσης, όπως είδαμε, αποτελείται από τρία κύρια συστατικά το ασαφές σώμα ορολογίας \mathcal{T} (TBox), το ασαφές σώμα ρόλων \mathcal{R} (RBox) και το ασαφές σώμα ισχυρισμών \mathcal{A} (ABox). Το ασαφές σώμα ορολογίας περιέχει αξιώματα υπαγωγής της μορφής $A \sqsubseteq C$ και αξιώματα ισοδυναμίας ασαφών εννοιών της μορφής $A \equiv C$. Τα αξιώματα αυτά συχνά λέγονται και *αξιώματα ορισμού* (*definitional axioms*) μιας και ορίζουν τη σημασία της ατομικής έννοιας A . Ένα σώμα ορολογίας

$$\mathcal{T} = \{A_1 \equiv C_1, \dots, A_l \equiv C_l, A_{l+1} \sqsubseteq C_{l+1}, \dots, A_{l+m} \sqsubseteq C_{l+m}\}$$

λέγεται *ξεδιπλώσιμο* [112] (*unfoldable*) εάν ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες.

- Όλα τα αξιώματα του \mathcal{T} είναι αξιώματα ορισμού.
- Όλα τα αξιώματα του \mathcal{T} είναι μοναδικά. Με άλλα λόγια, για κάθε έννοια με όνομα A , το \mathcal{T} περιέχει το πολύ ένα αξίωμα της μορφής $A \equiv C$, και δεν περιέχει κάποιο αξίωμα της μορφής $A \sqsubseteq C$. (Είναι σημαντικό να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι ένα σύνολο από αξιώματα της μορφής $\{A \sqsubseteq C_1, \dots, A \sqsubseteq C_n\}$ μπορούν να τροποποιηθούν στο αξίωμα $A \sqsubseteq C_1 \sqcap \dots \sqcap C_n$). Μια ατομική έννοια A ονομάζεται *μη πρωταρχική* (*non-primitive*) εάν το \mathcal{T} περιέχει αξίωμα της μορφής $A \equiv C$ που ονομάζεται *μη πρωταρχικός ορισμός* (*non-primitive definition*) ενώ ονομάζεται *πρωταρχική* (*primitive*) αν ισχύει $A \sqsubseteq C$ που ονομάζεται *πρωταρχικός ορισμός* (*primitive definition*).
- Το \mathcal{T} είναι *μη κυκλικό* (*acyclic*) περιέχει δηλαδή *μη κυκλικά αξιώματα* (*acyclic axioms*). Ένα αξίωμα ονομάζεται *κυκλικό* (*cyclic*) όταν σε αξίωμα της μορφής $A_i \equiv C_i \in \mathcal{T}$ η έννοια A_i εμφανίζεται στην C_i . Μια έννοια A εμφανίζεται σε μια έννοια C εάν η A εμφανίζεται συντακτικά στην C , ή εάν υπάρχει μια έννοια A' τέτοια ώστε η A' να εμφανίζεται συντακτικά στη C , ή αν υπάρχει αξίωμα $A' \equiv C'$ και η A να εμφανίζεται στη C' .

Ο χαρακτηρισμός ξεδιπλώσιμο για ένα σώμα ορολογίας οφείλεται στο γεγονός ότι μπορεί να εφαρμοστεί η *διαδικασία ξεδίπλωσης* (*unfolding*) [42]. Εάν δηλαδή κάποια έννοια - η οποία ορίζεται σε ένα ξεδιπλώσιμο σώμα ορολογίας - βρεθεί σε ένα σώμα ισχυρισμών, τότε αυτή μπορεί να αντικατασταθεί με την ισοδύναμη έννοια που ορίζεται στο σώμα ορολογίας.

Παράδειγμα 3.3.1 Έστω $A, B, C, D, E \in f_{KD}\text{-SHLN}$ έννοιες και R ρόλος, εάν έχουμε το παρακάτω σώμα ορολογίας και ισχυρισμών αντίστοιχα,

$$\mathcal{T} = \{A \equiv B \sqcap C, C \equiv D \sqcap \exists R.E\}$$

$$\mathcal{A} = \{((a : A) > 0.7)\}$$

τότε εφαρμόζοντας την τεχνική της ξεδίπλωσης το σώμα ισχυρισμών γίνεται

$$\mathcal{A} = \{((a : B \sqcap (D \sqcap \exists R.E)) > 0.7)\}$$

Παρόλο λοιπόν που θεωρητικά οι αλγόριθμοι tableaux ενεργούν σε σώματα ισχυρισμών στα οποία έχει εφαρμοστεί η τεχνική του ξεδιπλώματος, στην πράξη μπορεί να αποδειχθεί πολύ επιβαρυντικό για την επίδοση του αλγορίθμου, όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα.

Παράδειγμα 3.3.2 Έστω $A, B, C, D, E \in f_{KD}\text{-SHLN}$ έννοιες και R ρόλος, εάν έχουμε το παρακάτω σώμα ορολογίας και ισχυρισμών αντίστοιχα,

$$\mathcal{T} = \{C \equiv D \sqcap \exists R.E\}$$

$$\mathcal{A} = \{((a : A \sqcap C) > 0.7), ((a : \neg C) > 0.5)\}$$

τότε εφαρμόζοντας την τεχνική της ξεδίπλωσης το σώμα ισχυρισμών γίνεται

$$\mathcal{A} = \{((a : A \sqcap (D \sqcap \exists R.E)) > 0.7), ((a : \neg(D \sqcap \exists R.E)) > 0.5)\}$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι μια σχετικά προφανής αντίφαση, μετά την διαδικασία της ξεδίπλωσης, δεν είναι δυνατό να αποκαλυφθεί πριν την εφαρμογή επιπλέον κανόνων. Όπως γίνεται αντιληπτό το παραπάνω παράδειγμα θα μπορούσε να επιβαρυνθεί ακόμα περισσότερο εάν η έννοια C - την οποία ξεδιπλώσαμε - ήταν ακόμα πιο πολύπλοκη. Παρατηρούμε ακόμα πως ο χώρος που καταλαμβάνει ο κόμβος a σχεδόν διπλασιάστηκε, ενώ στην περίπτωση που οι έννοιες D και E ήταν σύνθετες έννοιες θα είχε αυξηθεί ακόμη περισσότερο. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό σαν exponential blow-up, επειδή μπορεί να αυξήσει εκθετικά το χώρο του αλγορίθμου. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους επιβραδύνσεις, στα συστήματα συλλογιστικής χρησιμοποιείται η τεχνική του οκνηρού ξεδιπλώματος (*lazy unfolding*)[42]. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική μια έννοια ξεδιπλώνεται μονάχα όταν βρίσκεται σε ένα κόμβο που έχουν εφαρμοστεί όλοι οι κανόνες. Ο κόμβος a του παραδείγματος 3.3.2 που στον αλγόριθμο tableau αρχικά είναι

$$\mathcal{L}(a) = \{\langle(A \sqcap C), >, 0.7\rangle, \langle(\neg C), >, 0.5\rangle\}$$

γίνεται όπως παρακάτω μετά την εφαρμογή των κανόνων επέκτασης

$$\mathcal{L}(a) = \{\langle A, >, 0.7\rangle, \langle C, >, 0.7\rangle, \langle C, <, 0.5\rangle\}$$

όπου μπορεί να ανιχνευτεί η αντίφαση.

Τυπικά, το οκνηρό ξεδίπλωμα μπορεί να περιγραφεί με πρόσθετους κανόνες επέκτασης στον αλγόριθμο tableau. Επειδή - όπως είδαμε στην περίπτωση των ασαφών ΠΛ - είναι δυνατό να υπάρχουν πάνω από μια τριάδες συμμετοχής που να περιέχουν την ίδια έννοια, αλλά με διαφορετικούς βαθμούς, οι κανόνες διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3, με σκοπό να διατηρήσουν το σώμα ισχυρισμών κανονικοποιημένο.

Πίνακας 3.3: Κανόνες επέκτασης για οκνηρό ξεδίπλωμα

Κανόνας	Περιγραφή
$U_{1-\triangleright}$	αν 1. $\langle A, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, και $(A \equiv C) \in \mathcal{T}$ 2. $\{\langle C, \triangleright, n \rangle\} \notin \mathcal{L}(x)$ ή $\{\langle C, \triangleright, l \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $l < n$ ή $\{\langle \neg C, \triangleright^-, m \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $1 - m < n$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C, \triangleright, n \rangle\}$
$U_{1-\triangleleft}$	αν 1. $\langle A, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, και $(A \equiv C) \in \mathcal{T}$ 2. $\{\langle C, \triangleleft, n \rangle\} \notin \mathcal{L}(x)$ ή $\{\langle C, \triangleleft, l \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $n < l$ ή $\{\langle \neg C, \triangleleft^-, m \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $n < 1 - m$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C, \triangleleft, n \rangle\}$
$U_{2-\triangleright}$	αν 1. $\langle \neg A, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, και $(A \equiv C) \in \mathcal{T}$ 2. $\{\langle \neg C, \triangleright, n \rangle\} \notin \mathcal{L}(x)$ ή $\{\langle \neg C, \triangleright, l \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $l < n$ ή $\{\langle C, \triangleright^-, m \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $1 - m < n$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle \neg C, \triangleright, n \rangle\}$
$U_{2-\triangleleft}$	αν 1. $\langle \neg A, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, και $(A \equiv C) \in \mathcal{T}$ 2. $\{\langle \neg C, \triangleleft, n \rangle\} \notin \mathcal{L}(x)$ ή $\{\langle \neg C, \triangleleft, l \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $n < l$ ή $\{\langle C, \triangleleft^-, m \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $n < 1 - m$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle \neg C, \triangleleft, n \rangle\}$
$U_{3-\triangleright}$	αν 1. $\langle A, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, και $(A \sqsubseteq C) \in \mathcal{T}$ 2. $\{\langle C, \triangleright, n \rangle\} \notin \mathcal{L}(x)$ ή $\{\langle C, \triangleright, l \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $l < n$ ή $\{\langle \neg C, \triangleright^-, m \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $1 - m < n$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C, \triangleright, n \rangle\}$
$U_{3-\triangleleft}$	αν 1. $\langle A, \triangleleft, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, και $(A \sqsubseteq C) \in \mathcal{T}$ 2. $\{\langle C, \triangleleft, n \rangle\} \notin \mathcal{L}(x)$ ή $\{\langle C, \triangleleft, l \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $n < l$ ή $\{\langle \neg C, \triangleleft^-, m \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$ με $n < 1 - m$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C, \triangleleft, n \rangle\}$

Οι κανόνες U_1 και U_2 απεικονίζουν τη συμμετρία της σχέσης ισότητας στο αξίωμα ισότητας $A \equiv B$, το οποίο είναι ισοδύναμο με τα αξιώματα υπαγωγής $A \sqsubseteq B$, $\neg A \sqsubseteq \neg B$. Από την άλλη, ο U_3 απεικονίζει την ασυμμετρία του αξιώματος υπαγωγής $A \sqsubseteq B$. Είναι σημαντικό να επισημάνουμε πως σε αυτή τη περίπτωση η αρχική τριάδα συμμετοχής στην οποία εφαρμόστηκε ο κανόνας της ξεδίπλωσης δεν αφαιρείται από το κόμβο. Αυτό γίνεται σχόπιμα έτσι ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη ανίχνευση αντιφάσεων, χωρίς την περαιτέρω εφαρμογή κανόνων tableau. Κάτι τέτοιο συμβαίνει στην περίπτωση που μια έννοια, η οποία έχει ξεδιπλωθεί, προστεθεί στο κόμβο από κάποιο γειτονικό κόμβο ή όταν η έννοια που ξεδιπλώθηκε περιέχεται σε μια πιο σύνθετη έννοια που βρίσκεται στο κόμβο, αλλά δεν έχει ακόμα ξεδιπλωθεί.

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, η τεχνική του οκνηρού ξεδιπλώματος αφορά μονάχα τις έννοιες που εμφανίζονται στο σώμα ορολογίας και έχουν οριστεί στο ξεδιπλώσιμο κομμάτι του. Για το λόγο αυτό, το σώμα ορολογίας μιας βάσης γνώσης χωρίζεται στο ξεδιπλώσιμο κομμάτι \mathcal{T}_u και στο κομμάτι που περιέχει τα γενικευμένα αξιώματα \mathcal{T}_g για τα οποία απαιτείται ιδιαίτερη μεταχείριση και μελετάται στην ενότητα 3.4.7. Έτσι για το σώμα ορολογίας \mathcal{T} ισχύει μετά το διαχωρισμό $\mathcal{T}_u \cup \mathcal{T}_g = \mathcal{T}$ και $\mathcal{T}_u \cap \mathcal{T}_g = \emptyset$.

Γενικότερα, η τεχνική του οκνηρού ξεδιπλώματος είναι μια τεχνική απλή στην υλοποίηση η οποία επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση στον αλγόριθμο $f_{KD-SHLN}$ tableau. Επιπρόσθετα, μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές, όπως για παράδειγμα την τεχνική της λεκτικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης που θα δούμε παρακάτω. Ακόμα, η τεχνική αυτή είναι ανεξάρτητη από την εκφραστικότητα της λογικής ενώ μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με την νόρμα που χρησιμοποιείται για την άρνηση σε διαφορετικές ασαφείς σημασιολογίες. Το μοναδικό ίσως μειονέκτημα της είναι ότι η απόδοση της εξαρτάται από την βάση γνώσης και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να μην έχει κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα.

3.3.2 Λεκτική Κανονικοποίηση και Κωδικοποίηση

Ο κύριος στόχος, όπως είδαμε, της τεχνικής του οκνηρού ξεδιπλώματος είναι να αποτρέψει την εκθετική αύξηση του χώρου και να διευκολύνει τον εντοπισμό κάποιας αντίφασης, αποφεύγοντας την άσκοπη ξεδίπλωση εννοιών που έχουν δηλωθεί στο σώμα ορολογίας. Σε ένα σώμα ισχυρισμών μιας βάσης γνώσης, όμως, μπορεί να συμβεί και το αντίστροφο σενάριο. Το σώμα ισχυρισμών δηλαδή να περιέχει $f_{KD-SHLN}$ σύνθετες έννοιες οι οποίες δεν έχουν δηλωθεί στο σώμα ορολογίας, δηλαδή μπορεί να έχουμε

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle A \sqcap B, >, 0.7 \rangle, \langle \neg(A \sqcap B), >, 0.7 \rangle \}.$$

Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά συνηθισμένο, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που το σώμα ισχυρισμών αρχικοποιείται από κάποιο αλγόριθμο. Παρατηρούμε λοιπόν πως, παρόλο που στον παραπάνω κόμβο υπάρχει μια προφανής αντίφαση, θα πρέπει να εκτελεστούν πρώτα κάποιοι κανόνες επέκτασης του $f_{KD-SHLN}$ tableau πριν αυτή αποκαλυφθεί. Αυτό συμβαίνει διότι οι αντιφάσεις ανιχνεύονται μονάχα ανάμεσα σε έννοιες που έχουν το ίδιο όνομα (δηλαδή $\langle C, >, 0.6 \rangle, \langle C, <, 0.4 \rangle \in \mathcal{L}(x)$). Η παραπάνω περίπτωση θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί εάν κωδικοποιούσαμε την έννοια $A \sqcap B$ σαν μια νέα έννοια στο σώμα ορολογίας, εάν λέγαμε δηλαδή $C \equiv A \sqcap B \in \mathcal{T}$. Τα πράγματα όμως θα μπορούσαν να γίνουν ακόμα πιο περίπλοκα εάν είχαμε

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle A \sqcap B, >, 0.7 \rangle, \langle \neg A \sqcup \neg B, >, 0.7 \rangle \},$$

που είναι ισοδύναμος με τον προηγούμενο $\mathcal{L}(x)$. Παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση μια κωδικοποίηση δεν θα είχε αποτέλεσμα. Τέτοιες περιπτώσεις, όπως και περιπτώσεις που έχουμε τριάδες συμμετοχής σαν την $C \sqcap C$, απαιτούν πρώτα λεκτική κανονικοποίηση.

Ο σκοπός της *λεκτικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης* (*lexical normalization and encoding*) είναι να ξαναγραφτεί το σώμα ισχυρισμών έτσι ώστε:

1. Όλες οι υπο-εκφράσεις μιας έννοιας να γραφτούν σαν μια έννοια - π.χ. $\forall R.(C_1 \sqcap C_2)$ να κωδικοποιηθούν σαν έννοιες $\forall R.D$ όπου $D \equiv C_1 \sqcap C_2$.
2. Όλες οι εκφράσεις εννοιών να είναι στην ίδια μορφή - π.χ. όλες οι έννοιες υπο-παρξιακού περιορισμού ($\exists R.C$) να μετατρέπονται σε περιορισμούς τιμής ($\forall R.C$) έτσι ώστε η έννοια $\exists R.D$ να κωδικοποιείται σε $\neg \forall R.\neg D$.

Παρόλο όμως που στις κλασικές ΠΛ η λεκτική κανονικοποίηση είναι απλή, στις ασαφείς ΠΛ απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή. Αυτό διότι, όπως αναφέραμε στην Ενότητα 2.2.1, διαφορετικοί ασαφείς τελεστές έχουν διαφορετικές ιδιότητες και ορίζουν

διαφορετικές ασαφείς ΠΛ. Εάν λοιπόν η πράξη της ασαφούς τομής ορίζεται από τη τ -νόρμα του Gödel, που ορίζεται από την εξίσωση $t_G(a, b) = \min(a, b)$, τότε η τριάδα συμμετοχής $\langle C \sqcap C, >, 0.4 \rangle$ είναι ισοδύναμη με την $\langle C, >, 0.4 \rangle$ οπότε μια λεκτική κανονικοποίηση του $\langle C \sqcap C, >, 0.4 \rangle$ σε $\langle C, >, 0.4 \rangle$ είναι δυνατή. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει στην περίπτωση που η ασαφής τομή ορίζεται από τη νόρμα του γινομένου $t_P(a, b) = a \cdot b$, διότι η τριάδα συμμετοχής $\langle C \sqcap C, >, 0.4 \rangle$ είναι ισοδύναμη με την $\langle C, >, 0.16 \rangle$.

Οι τεχνικές της λεκτικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης προτάθηκαν από τον Horrocks [67] και χρησιμοποιούνται από τα περισσότερα συστήματα συλλογιστικής των κλασικών ΠΛ διευκολύνοντας σημαντικά τον αλγόριθμο tableau, ιδιαίτερα σε συνεργασία με την τεχνική του οκνηρού ξεδιπλώματος. Για να εφαρμοστούν όμως αποτελεσματικά στις ασαφείς ΠΛ, πρέπει πρώτα να μελετηθούν οι νόρμες που χρησιμοποιούνται και οι ιδιότητες τους. Η ΠΛ f_{KD} -*SHLN*, όπως φανερώνει το όνομα της, είναι η ασαφής *SHLN* η οποία χρησιμοποιεί την ασαφή συνεπαγωγή του Kleene-Dienes ($\mathcal{J}_{KD}(a, b) = \max(1 - a, b)$), την τ -νόρμα και την σ -νόρμα του Gödel ($t_G(a, b) = \min(a, b), u_G(a, b) = \max(a, b)$) καθώς και την άρνηση του Lukasiewicz ($c_L(a) = 1 - a$). Για κάθε τριάδα $\langle c, t, u \rangle$, λόγω των αναγκαίων ιδιοτήτων που πρέπει να ικανοποιεί κάθε ασαφής τελεστής [45], ισχύουν οι ακόλουθες ισοδυναμίες εννοιών:

$$\begin{array}{ll} \neg \top \equiv \perp, & \neg \perp \equiv \top, \\ C \sqcap \top \equiv C, & C \sqcup \perp \equiv C, \\ C \sqcup \top \equiv \top, & C \sqcap \perp \equiv \perp. \end{array}$$

Ακόμα, επειδή η άρνηση του Lukasiewicz είναι ενελικτική, ισχύει:

$$\neg \neg C \equiv C.$$

Επιπρόσθετα, η ασαφής τριάδα $\langle c_L, t_G, u_G \rangle$ ικανοποιεί τους κανόνες DeMorgan, είναι δηλαδή *δυαδική (dual)* τριάδα, οπότε ισχύει ότι

$$\neg(C \sqcup D) \equiv \neg C \sqcap \neg D \text{ και } \neg(C \sqcap D) \equiv \neg C \sqcup \neg D.$$

Επειδή η συνεπαγωγή \mathcal{J}_{KD} είναι *S*-συνεπαγωγή, και η τριάδα $\langle c_L, t_G, u_G \rangle$ είναι *δυαδική* ισχύει ότι

$$\begin{array}{ll} \neg \exists R.C \equiv \forall R.\neg C, & \neg \forall R.C \equiv \exists R.\neg C, \\ \neg \leq p_1 R \equiv \geq (p_1 + 1)R, & \neg \geq p_1 R \equiv \begin{cases} \leq (p_1 - 1)R, & p_1 \in \mathbb{N}^* \\ \perp, & p_1 = 0 \end{cases} \end{array}$$

Επιπλέον, επειδή το ασαφές συμπλήρωμα είναι ενελικτικό, ισχύουν

$$R.C \equiv \neg \forall R.\neg C \text{ και } \forall R.C \equiv \neg \exists R.\neg C$$

Τέλος, επειδή η τριάδα $\langle c_L, t_G, u_G \rangle$ είναι και *επιμεριστική (distributive)*, οι ακόλουθες ισοδυναμίες ισχύουν:

$$\begin{array}{ll} C_1 \sqcap (C_2 \sqcup C_3) \equiv (C_1 \sqcap C_2) \sqcup (C_1 \sqcap C_3) \text{ και} \\ C_1 \sqcup (C_2 \sqcap C_3) \equiv (C_1 \sqcup C_2) \sqcap (C_1 \sqcup C_3). \end{array}$$

Βάσει λοιπόν των παραπάνω ιδιοτήτων της f_{KD} - $SHLN$, όσον αφορά τις κωδικοποιήσεις ανάλογα με τον εάν ο ισχυρισμός είναι θετικός ή αρνητικός και εάν ο βαθμός του ισχυρισμού μπορεί να προκαλέσει αντίφαση, έχουμε τις σταθερές κωδικοποιήσεις (constant elimination)[205]

$$\langle C \sqcap T, \triangleright, n \rangle \rightarrow \langle C, \triangleright, n \rangle, \langle C \sqcap T, \triangleleft, n \rangle \rightarrow \text{Αντίφαση}, \langle C \sqcap \perp, \triangleright, n \rangle \rightarrow \text{Αντίφαση},$$

$$\langle C \sqcap \perp, \triangleleft, n \rangle \rightarrow \langle C, \triangleleft, n \rangle, \langle \forall R.T, \triangleleft, n \rangle \rightarrow \langle T, \triangleleft, n \rangle, \langle \forall R.T, \triangleright, n \rangle \rightarrow \text{Αντίφαση},$$

και τις συντακτικές

$$\langle C \sqcap C, \bowtie, n \rangle \rightarrow \langle C, \bowtie, n \rangle, \langle \neg\neg C, \bowtie, n \rangle \rightarrow \langle C, \bowtie, n \rangle, \langle C \sqcap \neg C, \triangleright, n \rangle n > 0.5 \rightarrow \text{Αντίφαση}$$

Τέλος, εάν έχουμε $\langle C_1 \sqcap C_2, \bowtie, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$ και $\langle C_3 \sqcap C_4, \bowtie, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$, με ίδιο σύμβολο ανισότητας στον ισχυρισμό, τότε οι τριάδες συμμετοχής αυτές μπορούν να αντικατασταθούν από την $\langle C_1 \sqcap C_2 \sqcap C_3 \sqcap C_4, \bowtie, n \rangle$. Παρόμοια και για $\langle \forall R.C_1, \bowtie, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$ και $\langle \forall R.C_2, \bowtie, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$ μπορούμε να γράψουμε $\langle \forall R.(C_1 \sqcap C_2), \bowtie, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$. Όπως παρατηρούμε, στις ασαφείς ΠΛ, είναι πολύ σημαντικός ο βαθμός που χρησιμοποιείται στον ισχυρισμό γιατί από αυτόν εξαρτάται εάν προκαλείται κάποια αντίφαση ή εάν θα είναι δυνατό να γίνει η σύζευξη 2 επιμέρους εννοιών σε μια έννοια σύζευξης. Για το λόγο αυτό, η αναζήτηση για έννοιες με συζεύξεις που μπορούν να ενοποιηθούν γίνεται πρώτα. Κατά την διαδικασία αυτού του ελέγχου μπορεί να πραγματοποιηθεί κάποια επιπρόσθετη κανονικοποίηση βαθμών. Εάν $\langle C_1 \sqcap C_2, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(x)$ και $\langle C_1, \triangleright, m \rangle \in \mathcal{L}(x)$ με $m > n$, τότε $\{\langle C_1, \triangleright, m \rangle, \langle C_2, \triangleright, n \rangle\} \in \mathcal{L}(x)$. Έπειτα επειδή ο σκοπός της λεκτικής κανονικοποίησης και της κωδικοποίησης στις κλασικές ΠΛ είναι η ανίχνευση αντίφασης δηλαδή $C \sqcap \neg C$, στις ασαφείς ΠΛ οι παρακάτω κανόνες εφαρμόζονται πρώτα στις τριάδες συμμετοχής που έχουν βαθμούς ικανούς να προκαλέσουν αντίφαση. Δηλαδή στους θετικούς ισχυρισμούς $\langle C, \triangleright, n \rangle$ με $n > 0.5$ και στους αρνητικούς ισχυρισμούς $\langle C, \triangleleft, n \rangle$ με $n < 0.5$. Οι κανόνες κανονικοποίησης και κωδικοποίησης που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ισχυρισμό, ανεξάρτητα αν είναι θετικός ή αρνητικός, φαίνονται στον Πίνακα 3.4.

Παρατηρούμε ότι η συνάρτηση κωδικοποίησης ελαχιστοποιεί τον αριθμό των νέων εννοιών που θα προστεθούν στο σώμα ορολογίας, αναγνωρίζοντας τις έννοιες που είναι συντακτικά ισοδύναμες και έχουν ήδη κωδικοποιηθεί. Ακόμα, στην περίπτωση των εννοιών που χρησιμοποιούν σύζευξη, η διαδικασία αναγνώρισης μπορεί να διευκολυνθεί χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη σειρά με την οποία θα εμφανίζονται οι έννοιες έτσι ώστε να μην υπάρχουν επαναλήψεις. Η λειτουργία της λεκτικής κανονικοποίησης και της κωδικοποίησης γίνεται καλύτερα αντιληπτή με το παρακάτω παράδειγμα.

Παράδειγμα 3.3.3 Έστω ότι έχουμε τον κόμβο x με την παρακάτω τριάδα συμμετοχής

$$\mathcal{L}(x) = \{(\exists R.(C \sqcap E \sqcap \neg D) \sqcap \forall R.(D \sqcup \neg C \sqcup \neg E), >, 0.6)\}$$

όπου C, D, E είναι απλές f_{KD} - $SHLN$ έννοιες και το σώμα ορολογίας είναι κενό. Εφαρμόζοντας λεκτική κανονικοποίηση και κωδικοποίηση έχουμε.

1. Κανονικοποιείται η πρώτη έννοια της σύζευξης

Πίνακας 3.4: Κανόνες κανονικοποίησης και κωδικοποίησης

Κανόνας	Περιγραφή
Κανονικοποίηση(C):	
C	$\rightarrow C$
$C = \neg D$	\rightarrow CN εάν Κανονικοποίηση(D) $=\neg CN$ \top εάν Κανονικοποίηση(D) $=\perp$ \perp εάν Κανονικοποίηση(D) $=\top$ αλλιώς \neg Κανονικοποίηση(D)
$C = \forall R.D$	\rightarrow \top εάν Κανονικοποίηση(D) $=\top$ αλλιώς Κωδικοποίηση($\forall R$.Κανονικοποίηση(D))
$C = D_1 \sqcap \dots \sqcap D_n$	\rightarrow \perp εάν $\perp \in (\text{Κανονικοποίηση}(D_1 \sqcap \dots \sqcap D_n))$ αλλιώς Κωδικοποίηση(Κανονικοποίηση($D_1 \sqcap \dots \sqcap D_n$))
$C = \exists R.D$	\rightarrow Κανονικοποίηση($\neg \forall R. \neg D$)
$C = D_1 \sqcup \dots \sqcup D_n$	\rightarrow Κανονικοποίηση($\neg(\neg D_1 \sqcap \dots \sqcap \neg D_n)$)
$C =_{\geq} pR$	\rightarrow αν $p \in \mathbb{N}^*$ Κανονικοποίηση($\neg \leq (p-1)R$) αν $p = 0$ Αντίφαση
$C =_{\leq} pR$	\rightarrow $\leq pR$
Κωδικοποίηση(C):	
$C = \forall R.D$	\rightarrow CN εάν $CN \equiv \forall R.D \in \mathcal{T}$ διαφορετικά CN' όπου CN' είναι μια νέα έννοια για την οποία ισχύει $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{T} \cup \{CN' \equiv \forall R.D\}$
$C \equiv D_1 \sqcap \dots \sqcap D_n$	\rightarrow CN εάν $CN \equiv D'_1 \sqcap \dots \sqcap D'_n \in \mathcal{T}$ και $\forall D.(D \in \{D_1, \dots, D_n\} \Leftrightarrow D \in \{D'_1, \dots, D'_n\})$ $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{T} \cup \{CN' \equiv \forall R.D\}$ διαφορετικά CN' όπου CN' είναι μια νέα έννοια για την οποία ισχύει $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{T} \cup \{CN' \equiv D_1 \sqcap \dots \sqcap D_n\}$

- Κανονικοποίηση($\exists R.(C \sqcap E \sqcap \neg D)$) \rightarrow \neg Κανονικοποίηση($\forall R. \neg(C \sqcap E \sqcap \neg D)$)
- Κανονικοποίηση($\forall R. \neg(C \sqcap E \sqcap \neg D)$) \rightarrow Κωδικοποίηση($\forall R. \text{Κανονικοποίηση}(\neg(C \sqcap E \sqcap \neg D))$)
- Κανονικοποίηση($\neg(C \sqcap E \sqcap \neg D)$) \rightarrow \neg Κωδικοποίηση($C \sqcap E \sqcap \neg D$)
- Κωδικοποίηση($C \sqcap E \sqcap \neg D$) \rightarrow CN_1 όπου CN_1 είναι μια νέα έννοια και $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{T} \cup \{CN_1 \equiv C \sqcap \neg D \sqcap E\}$
- Κωδικοποίηση($\forall R. \text{Κανονικοποίηση}(\neg(C \sqcap E \sqcap \neg D))$) \rightarrow CN_2 όπου CN_2 είναι μια νέα έννοια και $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{T} \cup \{CN_2 \equiv \forall R. \neg CN_1\}$
- Κανονικοποίηση($\exists R.(C \sqcap E \sqcap \neg D)$) \rightarrow $\neg CN_2$

2. Κανονικοποιείται η δεύτερη έννοια της σύζευξης

- Κανονικοποίηση($\forall R.(D \sqcup \neg C \sqcup \neg E)$) \rightarrow Κωδικοποίηση($\forall R. \text{Κανονικοποίηση}(D \sqcup \neg C \sqcup \neg E)$)
- Κανονικοποίηση($D \sqcup \neg C \sqcup \neg E$) \rightarrow Κανονικοποίηση($\neg(\neg D \sqcap C \sqcap E)$)
- Κανονικοποίηση($\neg(\neg D \sqcap C \sqcap E)$) \rightarrow \neg Κωδικοποίηση($\neg D \sqcap C \sqcap E$)
- Κωδικοποίηση($\neg D \sqcap C \sqcap E$) \rightarrow CN_1 Κωδικοποίηση($C \sqcap \neg D \sqcap E$) που αναγνωρίζεται σαν CN_1
- Κανονικοποίηση($\forall R.(D \sqcup \neg C \sqcup \neg E)$) \rightarrow Κωδικοποίηση($\forall R. \text{Κανονικοποίηση} \neg CN_1$) που αναγνωρίζεται σαν CN_2

3. Συνδυάζονται και οι δύο υπο-έννοιες της σύζευξης

- Κανονικοποίηση($\exists R.(C \sqcap E \sqcap \neg D) \sqcap \forall R.(D \sqcup \neg C \sqcup \neg E)$) \rightarrow Κανονικοποίηση($\neg CN_2 \sqcap CN_2$)
- Κανονικοποίηση($\neg CN_2 \sqcap CN_2$) \rightarrow Αντίφαση επειδή η ανίσωση είναι θετική με βαθμό που ικανοποιεί το νόμο του αποκλειόμενου μέσου.

4. Ανιχνεύτηκε ότι η έννοια δεν είναι ικανοποιήσιμη χωρίς να γίνει χρήση του αλγορίθμου του f_{KD} - $SHIN$ tableau.

Τα κύριο πλεονεκτήματα των τεχνικών αυτών είναι ότι μπορούν να ανιχνεύσουν κάποια αντίφαση, χωρίς να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος tableau. Επίσης, η αποτελεσματικότητά τους είναι συνήθως ανάλογη του μεγέθους της βάσης γνώσης, μιας και συχνά κάποιες έννοιες επαναλαμβάνονται σε μεγαλύτερες βάσεις γνώσης. Με αυτές τις τεχνικές πραγματοποιείται μια πιο αποτελεσματική αναδόμηση της βάσης γνώσης, η οποία μειώνει το χώρο του αλγορίθμου tableau, κάνοντάς ακόμα πιο αποτελεσματική την τεχνική του σκληρού ξεδιπλώματος που μελετήσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον, με την λεκτική κανονικοποίηση και την κωδικοποίηση είναι δυνατό να εφαρμοστεί η κανονικοποίηση βαθμών σε σύνθετες έννοιες που θα έχουν κωδικοποιηθεί. Από την άλλη μεριά, το μειονέκτημα τους - επειδή εξαρτώνται άμεσα από τη βάση γνώσης - είναι πιθανό να μην έχουν σημαντικό αποτέλεσμα και σε κάποιες περιπτώσεις να επιβαρύνουν το χρόνο εκτέλεσης. Συνήθως όμως, ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή της λεκτικής κανονικοποίησης και της κωδικοποίησης είναι μικρός, και εάν συγκριθεί με το χρόνο που θα απαιτούσε ο αλγόριθμος tableau χωρίς την εφαρμογή τους, το όφελος είναι μεγάλο.

3.4 Βελτιστοποιήσεις ικανοποιησιμότητας

Ένας έλεγχος ικανοποιησιμότητας μπορεί να αποβεί υπολογιστικά πολύ δαπανηρός ιδιαίτερα για τις πολύ εκφραστικές ΠΛ όπως η f_{KD} - $SHIN$. Ο τρόπος που παρουσιάζεται ο αλγόριθμος tableau για την f_{KD} - $SHIN$ στο [209] είναι τέτοιος ώστε να διευκολύνει τις απαραίτητες αποδείξεις για τον αλγόριθμο αλλά όχι την υλοποίηση του. Για παράδειγμα στο [209] δεν αναφέρεται τίποτα για την σειρά με την οποία εκτελούνται οι κανόνες επέκτασης στο tableau, ούτε ο τρόπος που διαχειρίζονται οι μη-ντετερμινιστικοί κανόνες επέκτασης πρακτικά. Ο κύριος στόχος των τεχνικών βελτιστοποίησης ικανοποιησιμότητας είναι να τροποποιήσουν τη λειτουργία του αλγορίθμου tableau κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο έλεγχος ικανοποιησιμότητας να καθίσταται ευκολότερος στην πράξη χωρίς όμως να επηρεάζουν την ορθότητα και την πληρότητα του αλγορίθμου. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζουμε μερικές τεχνικές βελτιστοποίησης που βελτιώνουν σημαντικά την επίδοση του ελέγχου ικανοποιησιμότητας σε πολύ εκφραστικές ασαφείς ΠΛ.

3.4.1 Τεχνική των Ιχνών

Μια πολύ διαδεδομένη τεχνική η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά συστήματα συλλογιστικής είναι η *τεχνική των ιχνών* (*trace technique*) [34]. Ο σκοπός αυτής της τεχνικής είναι να μειωθεί ο χώρος της δομής tableau, και για να επιτευχθεί αυτό ακολουθείται μια συγκεκριμένη σειρά στην εφαρμογή των κανόνων επέκτασης. Για

να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο που λειτουργεί ως μελετήσουμε το παρακάτω παράδειγμα

Παράδειγμα 3.4.1 Έστω μια δομή *tableau* η οποία αποτελείται από τον παρακάτω κόμβο (ο οποίος είναι κόμβος ρίζα, δηλαδή δεν μπορεί να είναι έμμεσα ή άμεσα μπλοκαρισμένος)

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C \sqcup D, >, 0.7 \rangle, \langle E \sqcap F, >, 0.5 \rangle\}$$

όπου οι C, D, E και F είναι f_{KD} - \mathcal{SHIN} έννοιες απλές ή σύνθετες οι οποίες όμως δεν περιέχουν έννοια υπαρξιακού περιορισμού ή περιορισμού τιμής με αντίστροφους ρόλους και R, S ένας απλός ρόλος. Εάν σε αυτό το παράδειγμα εφαρμοστούν οι κανόνες επέκτασης με την σειρά που εμφανίζονται στις τριάδες συμμετοχής, τότε θα έχουμε τα παρακάτω βήματα.

1. Εφαρμογή του $\exists R.C > 0.6$ στο κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.6 \rangle, \langle C \sqcup D, >, 0.7 \rangle, \langle E \sqcap F, >, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, y) = \{\langle R, >, 0.6 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle C, >, 0.6 \rangle\}$$

2. Εφαρμογή του $\exists S.C > 0.6$ στο κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.6 \rangle, \langle C \sqcup D, >, 0.7 \rangle, \langle E \sqcap F, >, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, y) = \{\langle R, >, 0.6 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle C, >, 0.6 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, z) = \{\langle R, >, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(z) = \{\langle C, >, 0.7 \rangle\}$$

3. Εφαρμογή του $\forall R.D > 0.4$ στο κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C \sqcup D, >, 0.7 \rangle, \langle E \sqcap F, >, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, y) = \{\langle R, >, 0.6 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle C, >, 0.6 \rangle, \langle D, >, 0.4 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, z) = \{\langle R, >, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(z) = \{\langle C, >, 0.7 \rangle\}$$

4. Εφαρμογή του $C \sqcup D > 0.7$ στο κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C \sqcup D, >, 0.7 \rangle,$$

$$\langle E \sqcap F, >, 0.5 \rangle, \langle C, >, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, y) = \{\langle R, >, 0.6 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle C, >, 0.6 \rangle, \langle D, >, 0.4 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, z) = \{\langle R, >, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(z) = \{\langle C, >, 0.7 \rangle\}$$

5. Εφαρμογή του $E \sqcap F > 0.5$ στο κόμβο x

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(x) &= \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C \sqcup D, >, 0.7 \rangle \\ &\quad \langle E \sqcap F, >, 0.5 \rangle, \langle C, >, 0.7 \rangle, \langle E, >, 0.5 \rangle, \langle F, >, 0.5 \rangle\} \\ \mathcal{L}(x, y) &= \{\langle R, >, 0.6 \rangle\} \\ \mathcal{L}(y) &= \{\langle C, >, 0.6 \rangle, \langle D, >, 0.4 \rangle\} \\ \mathcal{L}(x, z) &= \{\langle R, >, 0.7 \rangle\} \\ \mathcal{L}(z) &= \{\langle C, >, 0.7 \rangle\}\end{aligned}$$

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, κατά την εφαρμογή των κανόνων του f_{KD} -*SHLN* tableau, δεν είναι όλοι οι κόμβοι ούτε όλες οι τριάδες συμμετοχής απαραίτητες. Η τεχνική των ιχνών ορίζει μια σειρά στην επέκταση των κανόνων, η οποία αν δεν υπάρχουν αντίστροφοι ρόλοι, μειώνει σημαντικά τον χώρο της δομής tableau. Η εφαρμογή των κανόνων που επηρεάζουν μόνο τον κόμβο που εξετάζεται και των κανόνων που δημιουργούν γείτονες αυτού του κόμβου αντιμετωπίζονται σαν ξεχωριστά προβλήματα. Έτσι λοιπόν εφαρμόζονται οι κανόνες \neg , \sqcap και \sqcup στον κόμβο διαγράφοντας έπειτα από την εφαρμογή τους την τριπλέτα στην οποία περιέχονταν. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εφαρμογή των κανόνων που δημιουργούν νέους κόμβους \exists_{\triangleright} , \forall_{\triangleleft} , \geq_{\triangleright} και \leq_{\triangleleft} όπως και των κανόνων που τους επηρεάζουν \exists_{\triangleleft} , \forall_{\triangleright} , \geq_{\triangleleft} και \leq_{\triangleright} , διαγράφοντας και σε αυτή την περίπτωση τις τριάδες στις οποίες περιέχονταν. Λόγω της απουσίας των αντίστροφων ρόλων, ο χώρος που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των κανόνων που δημιουργούν νέους κόμβους καθώς και αυτών που τους επηρεάζουν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, χωρίς να επηρεάζεται η πληρότητα και η ορθότητα του αλγορίθμου. Για να αντιληφθούμε ακριβώς το τρόπο λειτουργίας αυτής της τεχνικής των ιχνών και την αποτελεσματικότητά της, ας δούμε πως διαμορφώνεται το παράδειγμα 3.4.1 με την εφαρμογή της.

Παράδειγμα 3.4.2 1. Εφαρμογή του $E \sqcap F > 0.5$ και διαγραφή του από το κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C \sqcup D, >, 0.7 \rangle, \langle E, >, 0.5 \rangle, \langle F, >, 0.5 \rangle\}$$

2. Εφαρμογή του $C \sqcup D > 0.7$ και διαγραφή του από το κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle, \langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C, >, 0.7 \rangle, \langle E, >, 0.5 \rangle, \langle F, >, 0.5 \rangle\}$$

3. Εφαρμογή του $\exists R.C > 0.6$ και διαγραφή του από το κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \exists S.C, >, 0.7 \rangle, \langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C, >, 0.7 \rangle, \langle E, >, 0.5 \rangle, \langle F, >, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, y) = \{\langle R, >, 0.6 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle \exists R.C, >, 0.6 \rangle\}$$

4. Εφαρμογή του $\exists S.C > 0.7$ και διαγραφή του από το κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle \forall R.D, >, 0.4 \rangle, \langle C, >, 0.7 \rangle, \langle E, >, 0.5 \rangle, \langle F, >, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, y) = \{\langle R, >, 0.6 \rangle, \langle S, >, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle C, >, 0.6 \rangle, \langle C, >, 0.7 \rangle\}$$

5. Εφαρμογή του $\forall R.D > 0.4$ και διαγραφή του από το κόμβο x

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle C, >, 0.7 \rangle, \langle E, >, 0.5 \rangle, \langle F, >, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, y) = \{\langle R, >, 0.6 \rangle, \langle S, >, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle C, >, 0.6 \rangle, \langle C, >, 0.7 \rangle, \langle D, >, 0.4 \rangle\}$$

Όπως φαίνεται ο χώρος που απαιτείται για τον έλεγχο της ικανοποιησιμότητας του κόμβου x μειώνεται σημαντικά. Τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνικής των ιχνών είναι η εύκολη υλοποίηση και το γεγονός ότι είναι ανεξάρτητη από την ασαφή σημασιολογία που χρησιμοποιείται. Επιπρόσθετα, ένα άλλο πάρα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι ότι η αποτελεσματικότητα της είναι ανάλογη με το μέγεθος της βάσης γνώσης γεγονός. Το μοναδικό ουσιαστικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι δε μπορεί να εφαρμοστεί σε βάσεις γνώσης που περιέχουν αντίστροφους ρόλους.

3.4.2 Πρώτα Αναζήτηση σε Βάθος

Μια τεχνική με παρόμοιο σκεπτικό με αυτή της τεχνικής των ιχνών η οποία όμως αποσκοπεί στη μείωση του χώρου όταν στην ασαφή βάση γνώσης υπάρχουν αντίστροφοι ρόλοι είναι η *πρώτα αναζήτηση βάθους* (*depth first search*) [112]. Σε αυτή την περίπτωση, αντί να εφαρμόζονται αρχικά οι κανόνες τοπικής προτασιακής συλλογιστικής (*local propositional reasoning*), εφαρμόζονται οι κανόνες που δημιουργούν νέους κόμβους και στην συνέχεια εφαρμόζονται οι κανόνες για τις τριάδες συμμετοχής που περιέχονται σε αυτούς. Αναλύονται δηλαδή με αυτό τον τρόπο πρώτα τα υποδέντρα ενός κόμβου τα οποία έπειτα μπορούν να διαγραφούν για να μειωθεί ο χώρος.

Αρχικά για τον κόμβο που εξετάζουμε εφαρμόζονται οι κανόνες που δημιουργούν νέους κόμβους δηλαδή οι \exists_{\triangleright} , \forall_{\triangleleft} καθώς και οι \geq_{\triangleright} , \leq_{\triangleleft} , μετά την εφαρμογή τους οι τριάδες συμμετοχής που τους περιέχουν μπορούν να διαγραφούν. Έπειτα εφαρμόζονται οι κανόνες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τους γείτονες του κόμβου δηλαδή οι \leq_{\triangleright} , \geq_{\triangleleft} και \forall_{\triangleright} , \exists_{\triangleleft} . Με αυτό τον τρόπο όλοι οι γείτονες του κόμβου που εξετάζεται θα έχουν τις τριάδες συμμετοχής που είναι πιθανό να κληρονομήσουν από αυτόν. Είναι πολύ σημαντικό να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι οι τριάδες συμμετοχής που περιέχουν τους κατασκευαστές \leq_{\triangleright} , \geq_{\triangleleft} και \forall_{\triangleright} , \exists_{\triangleleft} δεν διαγράφονται επειδή στην εξέλιξη του αλγορίθμου tableau είναι πιθανό να εφαρμοστούν ξανά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται διαδοχικά για τους γείτονες του κόμβου μέχρι να βρεθούν γειτονικοί κόμβοι που δεν δημιουργούν νέους γείτονες. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται το μέγιστο βάθος του tableau και έπειτα μπορούν να εφαρμοστούν οι κανόνες για τις υπόλοιπες τριάδες συμμετοχής.

Τυπικά σε μια δομή tableau $\forall x \in \mathbf{I}_A$

1. Αρχικά εφαρμόζονται οι κανόνες επέκτασης \exists_{\triangleright} , \forall_{\triangleleft} και \geq_{\triangleright} , \leq_{\triangleleft} και έπειτα διαγράφονται οι τριάδες συμμετοχής που περιείχαν αυτούς τους κατασκευαστές.
2. Έπειτα εφαρμόζονται οι κανόνες επέκτασης \leq_{\triangleright} , \geq_{\triangleleft} και \forall_{\triangleright} , \exists_{\triangleleft} για το κόμβο x .
3. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους γειτονικούς κόμβους του x και αναδρομικά για τους γείτονες του μέχρι να εφαρμοστούν όλοι οι πιθανοί κανόνες επέκτασης.

4. Εφαρμόζονται οι υπόλοιποι κανόνες επέκτασης στους κόμβους με την ακόλουθη σειρά $\neg, \sqsupset, \sqcup, \sqcup, \sqsupset, \sqcap$. Έπειτα από την εφαρμογή του κάθε κανόνα οι τριάδες συμμετοχής που περιείχαν αυτούς τους κατασκευαστές μπορούν να διαγραφούν. Εάν έπειτα από την εφαρμογή τους δεν βρεθεί κάποια αντίφαση τότε ο κόμβος x μπορεί να διαγραφεί.

Η τεχνική της αναζήτησης κατά βάθος είναι μια πάρα πολύ αποτελεσματική τεχνική η οποία είναι εύκολη στην υλοποίηση και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά συστήματα συλλογιστικής. Επιπρόσθετα, η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις ασαφείς ΠΛ ανεξάρτητα από τους ασαφείς τελεστές που χρησιμοποιούν για την ερμηνεία των κατασκευαστών και το όφελος από αυτήν είναι σχεδόν ανάλογο του μεγέθους της βάσης γνώσης. Παρόλα τα πλεονεκτήματα της όμως, πρόσφατη εργασία στο θέμα της σειράς με την οποία εφαρμόζονται οι κανόνων επέκτασης στους αλγορίθμους *tableau* από τον Tsarkov et al. προτείνει την χρήση της *λίστας εργασιών* (*ToDo List*) η οποία εφαρμόστηκε στο Fact++ [205]. Η κύρια ιδέα αυτής της τεχνικής είναι ότι οι κανόνες επέκτασης μπορούν να εφαρμοστούν όταν μια έννοια προστεθεί στο κόμβο. Όταν συμβεί αυτό δημιουργείται μια σημείωση της έννοιας και του κόμβου στον οποίο προστέθηκε, η οποία προσθεται στην λίστα εργασιών. Στην λίστα γίνεται αξιολόγηση όλων των εργασιών και αποφασίζεται ποιά θα εκτελεστεί πρώτη. Η τεχνική αυτή επιτρέπει μια πιο εξελιγμένη διαχείριση στην σειρά που εφαρμόζονται οι κανόνες επέκτασης και θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε ασαφείς ΠΛ. Το κύριο μειονέκτημα της, όμως, είναι ότι απαιτεί επιπλέον δομές που αυξάνουν το συνολικό χώρο του αλγορίθμου.

3.4.3 Οδηγούμενη Οπισθοδρόμηση

Η *οδηγούμενη οπισθοδρόμηση* (*dependency directed backtracking*) είναι μια πολύ αποτελεσματική τεχνική για την βελτίωση της απόδοσης του ελέγχου της ικανοποιησιμότητας που προτάθηκε από τον Horrocks [67] και μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα για την εφαρμογή της σε ασαφείς ΠΛ. Ο κύριος σκοπός αυτής της τεχνικής είναι να αποτρέψει την άσκοπη εφαρμογή κανόνων επέκτασης που μπορεί να προκληθεί από τις διαζεύξεις. Ας εξετάσουμε για παράδειγμα τον παρακάτω κόμβο

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle (C_1 \sqcup D_1) \sqcap \dots (C_n \sqcup D_n) \sqcap \exists R.(A \sqcap B) \sqcap \forall R.(\neg A), \geq, 0.6 \rangle \}.$$

Αν δεν εφαρμοστεί η τεχνική πρώτα αναζήτηση σε βάθος οι διαζεύξεις θα εφαρμοστούν πριν την εφαρμογή του υπαρξιακού περιορισμού και του περιορισμού τιμής, το οποίο θα έχει σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή n διαζεύξεων πριν αποκαλυφθεί η αντίφαση που υπάρχει. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν 2^n διαφορετικές επιλογές από τις διαζεύξεις, οι οποίες πρέπει να εξεταστούν πριν βρεθεί η αντίφαση.

Η οδηγούμενη οπισθοδρόμηση είχε αρχικά εφαρμοστεί επιτυχημένα σε προκάτοχους των συστημάτων των ΠΛ [47, 28]. Ο τρόπος που λειτουργεί στις κλασικές ΠΛ είναι δημιουργώντας ένα σύνολο εξάρτησης για κάθε έννοια και κάθε ρόλο, το οποίο περιέχει τους κόμβους διακλάδωσης από τους οποίους εξαρτώνται. Μια έννοια $C \in \mathcal{L}(x)$ εξαρτάται από ένα σημείο διακλάδωσης (*branching point*), δηλαδή ένα σημείο στο οποίο εφαρμόζεται ένας κανόνας \sqcup που προκαλεί διακλάδωση *διακλάδωση* (*branching*), εάν η C προστέθηκε στον κόμβο $\mathcal{L}(x)$ από το συγκεκριμένο σημείο διακλάδωσης ή αν η C εξαρτάται από μια άλλη έννοια D (ή ρόλο R) και η D (ή ο R) εξαρτάται από το το συγκεκριμένο σημείο διακλάδωσης. Μια έννοια $C \in \mathcal{L}(x)$

εξαρτάται από μια άλλη έννοια D (ή ρόλο R) όταν η C προστίθεται στον κόμβο $\mathcal{L}(x)$ από την εφαρμογή κάποιου ντετερμινιστικού κανόνα επέκτασης που χρησιμοποιεί την D (ή R), ενώ ένας ρόλος $R = \mathcal{L}(\langle x, y \rangle)$ εξαρτάται από μια έννοια D όταν η ακμή $\langle x, y \rangle$ χαρακτηρίζεται με το ρόλο R από την εφαρμογή ενός ντετερμινιστικού κανόνα που χρησιμοποιεί την D . Για παράδειγμα, αν η $A \in \mathcal{L}(y)$ προήλθε από την επέκταση της $\exists R.C \in \mathcal{L}(x)$, τότε το $A \in \mathcal{L}(y)$ εξαρτάται από τα $\exists R.C \in \mathcal{L}(x)$ και από το $R = \mathcal{L}(\langle x, y \rangle)$. Με αυτό τον τρόπο όταν ανιχνεύεται κάποια αντίφαση μεταξύ δυο εννοιών χρησιμοποιούνται τα σύνολα εξάρτησης για να βρεθεί ο πιο πρόσφατος κόμβος διακλάδωσης, από τον οποίο προήλθαν, έτσι ώστε να επιλεγεί ο εναλλακτικός \sqcup απόγονος του, που είναι πιθανόν θα αποτρέψει την συγκεκριμένη αντίφαση.

Για να εφαρμοστεί η τεχνική αυτή σε ασαφείς ΠΛ πρέπει να έχουμε κατά νου ότι οι κανόνες επέκτασης είναι διαφορετικοί. Πρέπει λοιπόν να εξετάσουμε το είδος της τριάδας συμμετοχής που περιέχεται στους κόμβους μιας και, εκτός από μια θετική τριάδα συμμετοχής με διάζευξη \sqcup_{\triangleright} , διακλάδωση κόμβων μπορεί να προκληθεί και στην περίπτωση που υπάρχει μια αρνητική τριάδα συμμετοχής με σύζευξη \sqcap_{\triangleleft} . Τυπικά η οδηγούμενη οπισθοδρόμηση για την $f_{KD}\text{-SHIN}$ λειτουργεί όπως περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικοποιούνται τα σύνολα εξάρτησης για όλες τις τριάδες συμμετοχής με το κενό σύνολο και ο μετρητής του βήθους διακλάδωσης β τίθεται ίσος με 1.

1. Κατά την εφαρμογή των ντετερμινιστικών κανόνων επέκτασης, \neg_{\boxtimes} , \sqcup_{\triangleright} , \sqcap_{\triangleleft} , \exists_{\boxtimes} , \forall_{\boxtimes} και \geq_{\boxtimes} , \leq_{\boxtimes} , τίθενται τα σύνολα εξάρτησης, για κάθε έννοια (σε μια τριάδα συμμετοχής) που προστίθεται σε έναν κόμβο και κάθε ρόλο (σε μια τριάδα συμμετοχής) που χαρακτηρίζει μια ακμή, ίσα με την ένωση των συνόλων εξάρτησης των εννοιών και των ρόλων (των τριάδων συμμετοχής) από τις οποίες εξαρτώνται.
2. Κατά την εφαρμογή κάποιου κανόνα που προκαλεί διακλάδωση, \sqcup_{\triangleright} και \sqcap_{\triangleleft} , για μια τριάδα συμμετοχής $\langle A \sqcup B, \triangleright, n \rangle \in \mathcal{L}(y)$, προστίθεται πρώτα το $\langle A, \triangleright, n \rangle$ στο $\mathcal{L}(y)$ με σύνολο εξάρτησης $\{\beta\}$, και το β αυξάνεται.

Εαν αποκαλυφθεί αντίφαση, μεταξύ δυο τριάδων συμμετοχής.

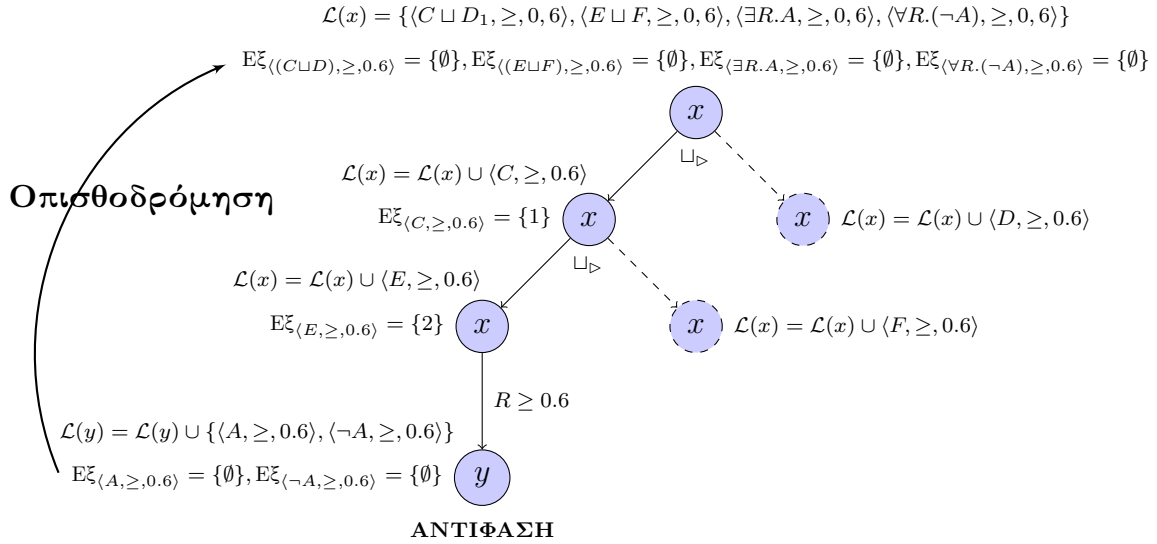
1. Υπολογίζεται το σύνολο Εξ που είναι η ένωση των συνόλων εξάρτησης των τριάδων συμμετοχής που προκάλεσαν την αντίφαση, και μειώνεται το β κατά 1.
 - (α') Αν το $\beta \notin \text{Εξ}$, μειώνεται το β κατά 1.
 - (β') Αν το $\beta \in \text{Εξ}$, γίνεται οπισθοδρόμηση στο σημείο διακλάδωσης β , όπου προστίθεται η τριάδα συμμετοχής $\langle B, \triangleright, n \rangle$ στο $\mathcal{L}(y)$ με σύνολο εξάρτησης $\text{Εξ} \setminus \{\beta\}$.

Έτσι εάν έχει προκληθεί μια αντίφαση και επιστραφεί β μειωθεί ώστε να πάρει την τιμή 0, τότε η αντίφαση αυτή δεν μπορεί να αποφευχθεί και η βάση γνώσης είναι μη ικανοποιήσιμη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται 2 παραδείγματα χρήσης της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης.

Παράδειγμα 3.4.3 Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει ένα σχηματικό παράδειγμα με την εφαρμογή της τεχνικής της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της. Αρχικά εφαρμόζεται ο κανόνας \sqcup_{\triangleright} που προκαλεί διακλάδωση προσθέτοντας την τριάδα $\langle C, \geq, 0.6 \rangle$ στον κόμβο $\mathcal{L}(x)$ με σύνολο εξάρτησης που περιέχει το σημείο διακλάδωσης 1. Παρόμοια για την τριάδα $\langle E \sqcup F, \geq, 0.6 \rangle$ προστίθεται

η τριάδα $\langle E, \geq, 0.6 \rangle$ στον κόμβο $\mathcal{L}(x)$ με σύνολο εξάρτησης που περιέχει το σημείο διακλάδωσης 2. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο \exists_{\triangleright} και \forall_{\triangleright} δημιουργώντας έναν νέο κόμβο y στον οποίο προστίθενται οι τριάδες $\langle A, \geq, 0.6 \rangle$ και $\langle \neg A, \geq, 0.6 \rangle$ που προκαλούν αντίφαση. Το σύνολο που επιστρέφεται είναι άδειο μια και οι έννοιες που περιέχονται σε αυτές τις τριάδες δεν εξαρτώνται από κάποιο σημείο διακλάδωσης, έτσι το β παίρνει την τιμή 0 που σημαίνει ότι η αντίφαση δεν μπορεί να αποφευχθεί.

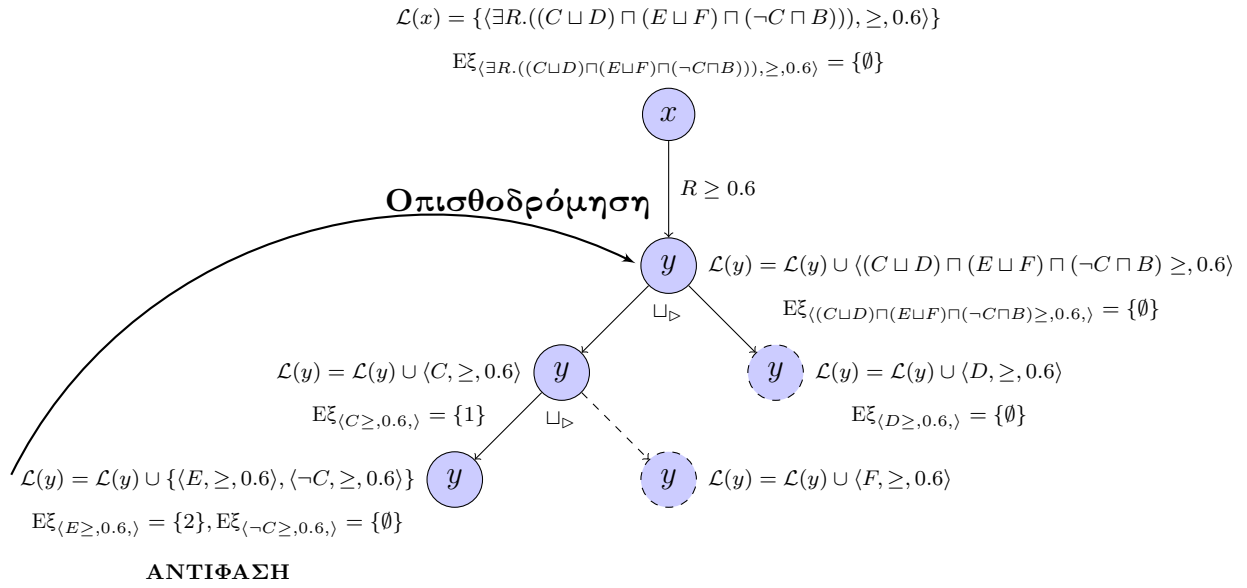
Σχήμα 3.2: Η λειτουργία της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης. (Παράδειγμα 3.4.3)



Παράδειγμα 3.4.4 Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει ένα σχηματικό παράδειγμα με την εφαρμογή της τεχνικής της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της. Αρχικά εφαρμόζεται ο κανόνας \exists_{\triangleright} που δημιουργεί έναν κόμβο y στον οποίο προστίθεται η τριάδα $\langle (C \sqcup D) \sqcap (E \sqcup F) \sqcap (\neg C \sqcap B), \geq, 0.6 \rangle$ με κενό σύνολο εξάρτησης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο \sqcup_{\triangleright} κανόνας για την τριάδα $\langle (C \sqcup D), \geq, 0.6 \rangle$ προσθέτοντας την τριάδα $\langle C, \geq, 0.6 \rangle$ στον $\mathcal{L}(y)$ με σύνολο εξάρτησης που περιέχει το σημείο διακλάδωσης 1. Με παρόμοιο τρόπο για την $\langle (E \sqcup F), \geq, 0.6 \rangle$ προστίθεται η τριάδα $\langle E, \geq, 0.6 \rangle$ στον $\mathcal{L}(y)$ με σύνολο εξάρτησης που περιέχει το σημείο διακλάδωσης 2. Έπειτα εφαρμόζεται ο κανόνας \sqcap_{\triangleright} για την τριάδα $\langle \neg C \sqcap B, \geq, 0.6 \rangle$ που προσθέτει τις τριάδες $\langle \neg C, \geq, 0.6 \rangle$ και $\langle B, \geq, 0.6 \rangle$ με άδειο σύνολο εξάρτησης. Στο σημείο αυτό σχηματίζεται αντίφαση μεταξύ των $\langle \neg C, \geq, 0.6 \rangle$ και $\langle C, \geq, 0.6 \rangle$ και το σύνολο που επιστρέφεται είναι περιέχει μονάχα το σημείο διακλάδωσης 1. Πραγματοποιείται οπισθοδρόμηση στο σημείο διακλάδωσης 1 και προστίθεται η τριάδα $\langle D, \geq, 0.6 \rangle$ με άδειο σύνολο εξάρτησης.

Γενικά η τεχνική της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης είναι μια πάρα πολύ αποτελεσματική τεχνική η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά το χώρο αναζήτησης του αλγορίθμου tableau. Επιπρόσθετα, είναι σχετικά εύκολη στην υλοποίηση και μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές ασαφείς ΠΛ μια και η τεχνική αυτή είναι ανεξάρτητη από τις ασαφείς νόρμες που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία των κατασκευαστών. Παρόλα αυτά, τα μειονέκτημα της είναι οι επιπλέον δομές, που είναι απαραίτητες, για την υλοποίηση της αυξάνουν το χώρο του αλγορίθμου καθώς και το γεγονός πως η απόδοση της εξαρτάται από την βάση γνώσης.

Σχήμα 3.3: Η λειτουργία της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης. (Παράδειγμα 3.4.4)



3.4.4 Τοπική απλοποίηση

Μια άλλη τεχνική, η οποία προέρχεται από συστήματα ελέγχου ικανοποιησιμότητας (SAT solvers) [48] αλλά έχει εφαρμοστεί αποτελεσματικά και σε συστήματα συλλογιστικής που βασίζονται σε κλασικές ΠΛ, είναι η *τοπική απλοποίηση* (*local simplification*) [62]. Ο στόχος αυτής της τεχνικής ή *boolean constraint propagation* (BCP) όπως συχνά λέγεται [46] είναι να απλοποιήσει τις διαζεύξεις πριν την εφαρμογή μη-ντετερμινιστικών κανόνων. Για να το πετύχει αυτό οι διαζεύξεις που μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς να προκαλέσουν διακλάδωση εντοπίζονται και εφαρμόζονται ντετερμινιστικά. Ένα παράδειγμα που φανερώνει τον τρόπο λειτουργίας της είναι το παρακάτω

$$\mathcal{L}(x) = \{C \sqcap (D_1 \sqcup D_2), \neg D_2\}.$$

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί η διάζευξη ($D_1 \sqcup D_2$) η οποία προκαλεί διακλάδωση κόμβων μια και στον κόμβο x επειδή υπάρχει η έννοια $\neg D_2$ που δεν επιτρέπει την ύπαρξη της έννοιας D_2 . Ένα ανάλογο παράδειγμα μπορούμε να έχουμε και στις ασαφείς ΠΛ

$$\mathcal{L}(x) = \{((C \sqcap (D_1 \sqcup D_2)), \geq, 0.6), \langle D_2 \leq, 0.4 \rangle\}.$$

Παρατηρούμε ότι και σε αυτή την περίπτωση η εφαρμογή της διάζευξης ($D_1 \sqcup D_2$) που προκαλεί διακλάδωση κόμβων είναι περιττή μιας και στον κόμβο x υπάρχει η τριάδα συμμετοχής $\langle D_2 \leq, 0.4 \rangle$ που δεν επιτρέπει την ύπαρξη της έννοιας D_2 με βαθμό μεγαλύτερο του 0.4. Για την ορθή εφαρμογή, όμως, της τοπικής απλοποίησης σε ασαφείς ΠΛ πρέπει να εξετάσουμε προσεκτικά τις περιπτώσεις που προκαλείται αντίφαση μια και εκτός από μια θετική τριάδα συμμετοχής με διάζευξη \sqcup_{\triangleright} , διακλάδωση κόμβων μπορεί να προκληθεί και στην περίπτωση που υπάρχει μια αρνητική τριάδα συμμετοχής με σύζευξη \sqcap_{\triangleleft} . Επιπρόσθετα, λόγω των βαθμών συμμετοχής που χρησιμοποιούνται στους ισχυρισμούς είναι δυνατό μια έννοια A να συνυπάρχει με την άρνηση της $\neg A$ σε ένα κόμβο αλλά με βαθμούς συμμετοχής που δεν προκαλούν αντίφαση. Η τοπική απλοποίηση για ασαφείς ΠΛ περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα.

1. Πριν την εφαρμογή κάποιου κανόνα επέκτασης στον κόμβο x , ο οποίος προκαλεί διακλάδωση κόμβων δηλαδή \sqcup_{\triangleright} ή \sqcap_{\triangleleft} , γίνεται έλεγχος στον x εάν περιέχει τριάδες συμμετοχής που περιέχουν μια από τις 2 έννοιες σύζευξης D_1, D_2 .
2. Αν μια από τις έννοιες αυτές ή η άρνηση τους εντοπιστεί στον κόμβο x τότε έχουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:
 - Αν $\sqcup_{\triangleright} d_1$ και $\langle D_1, \triangleright, d_2 \rangle \in \mathcal{L}(x)$ ή $\langle \neg D_1, \triangleleft, 1 - d_2 \rangle \in \mathcal{L}(x)$ με $d_1 < d_2$ τότε αφαιρείται η τριάδα της διάζευξης και παραμένει η τριάδα $\langle D_1, \triangleright, d_2 \rangle$ στον κόμβο x .
 - Αν $\sqcup_{\triangleright} d_1$ και $\langle D_1, \triangleleft, d_2 \rangle \in \mathcal{L}(x)$ ή $\langle \neg D_1, \triangleright, 1 - d_2 \rangle \in \mathcal{L}(x)$ με $d_2 < d_1$ τότε αφαιρείται η τριάδα της διάζευξης και προστίθεται η $\langle D_2, \triangleright, d_1 \rangle$ στον κόμβο x .
 - Αν $\sqcap_{\triangleleft} d_1$ και $\langle D_1, \triangleright, d_2 \rangle$ ή $\langle \neg D_1, \triangleleft, 1 - d_2 \rangle$ με $d_2 < d_1$ τότε αφαιρείται η τριάδα της διάζευξης και προστίθεται η $\langle D_2, \triangleright, d_1 \rangle$ στον κόμβο x .
 - Αν $\sqcap_{\triangleleft} d_1$ και $\langle D_1, \triangleleft, d_2 \rangle$ ή $\langle \neg D_1, \triangleright, 1 - d_2 \rangle$ με $d_1 < d_2$ τότε αφαιρείται η τριάδα της διάζευξης και παραμένει η τριάδα $\langle D_1, \triangleright, d_2 \rangle$ στον κόμβο x .

Το κύριο πλεονέκτημα της τοπικής απλοποίησης είναι ότι μπορεί να μειώσει δραστικά τον χώρο του αλγορίθμου tableau αποτρέποντας την άσκοπη εφαρμογή κανόνων επέκτασης που προκαλούν τη διακλάδωση κόμβων. Επιπρόσθετα, η τεχνική αυτή μπορεί πολύ εύκολα να τροποποιηθεί για την εφαρμογή της σε άλλες ασαφείς ΠΛ, σύμφωνα με τη νόρμα της άρνησης που χρησιμοποιούν.

3.4.5 Σημασιολογική διακλάδωση

Μια από τις αιτίες που μειώνουν σημαντικά την απόδοση των αλγορίθμων tableaux είναι η διακλάδωση κόμβων. Για το αυτό το λόγο οι τεχνικές βελτιστοποίησης που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες έχουν σαν στόχο τις λιγότερο υπολογιστικά δαπανηρές επεκτάσεις των κανόνων διάζευξης. Μια ακόμα τεχνική, της οποίας ο σκοπός είναι να βελτιώσει την απόδοση των αλγορίθμων tableaux όταν εφαρμόζονται κανόνες που προκαλούν διακλάδωση, είναι η *σημασιολογική διακλάδωση* (*semantic branching*). Η σημασιολογική διακλάδωση έχει εφαρμοστεί σε προβλήματα ικανοποιησιμότητας προτασιακής λογικής [14, 51] καθώς και για την βελτιστοποίηση αλγορίθμων tableaux για κλασικές ΠΛ [48]. Για να κατανοήσουμε το πρόβλημα που επιχειρεί να λύσει ας δούμε το παρακάτω παράδειγμα.

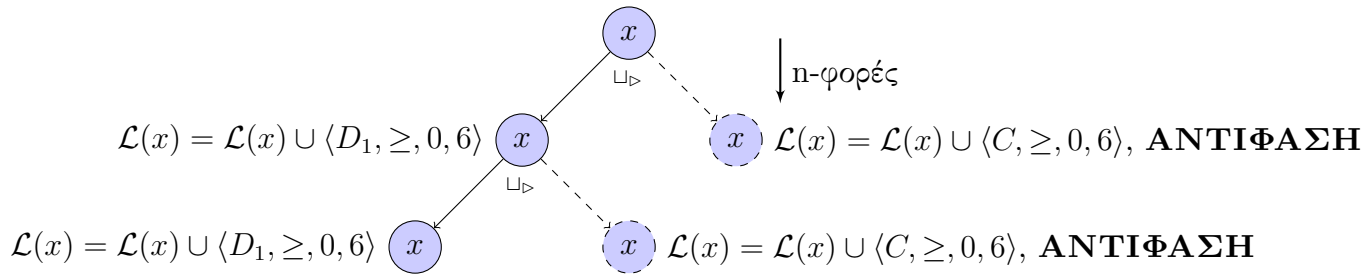
Παράδειγμα 3.4.5 Έστω μια δομή tableau που αποτελείται από τον παρακάτω κόμβο

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle C \sqcup D_1, \triangleright, 0.6 \rangle, \dots, \langle C \sqcup D_n, \triangleright, 0.6 \rangle \}$$

όπου $C \equiv A \sqcap (\neg A)$ και A, D_1, \dots, D_n , είναι απλές ή σύνθετες f_{KD} -SHLN έννοιες. Είναι προφανές ότι η έννοια C δεν είναι ικανοποιήσιμη λόγω του τρόπου που έχει οριστεί και επειδή περιλαμβάνεται σε έναν θετικό ισχυρισμό με βαθμό τέτοιο που προκαλείται αντίφαση. Παρόλα αυτά η εφαρμογή των κανόνων επέκτασης για τον κόμβο x θα οδηγήσει στην n φορές απόδειξη της μη ικανοποιησιμότητας της C , λόγω της διακλάδωσης κόμβων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

Σχήμα 3.4: Η μη ικανοποιησιμότητα της έννοιας C θα αποδειχθεί n φορές.

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle C \sqcup D_1, \geq, 0, 6 \rangle, \dots, \langle C \sqcup D_n, \geq, 0, 6 \rangle\}$$

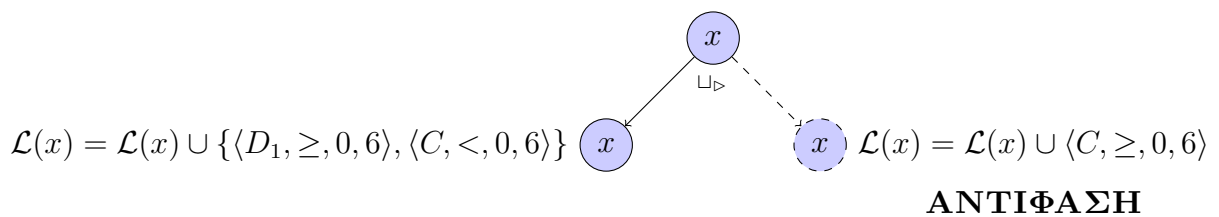


Διαισθητικά, η σημασιολογική διακλάδωση κάνει τα δύο κλαδιά που προκύπτουν από μια διακλάδωση ξένα, ως προς μια εκ των δυο εννοιών της σύζευξης, προσθέτοντας την άρνηση της έννοιας αυτής στο ένα κλαδί. Παρόλα αυτά στις ασαφείς ΠΛ το να προσθέσεις την άρνηση μιας έννοιας δεν έχει πάντα σαν αποτέλεσμα να γίνουν οι δυο κόμβοι ξένοι ως προς την έννοια αυτή, εκτός εάν ο βαθμός συμμετοχής της τριάδας είναι τέτοιος ώστε να προκαλείται αντίφαση. Έτσι στο προηγούμενο παράδειγμα έχουμε την τριάδα συμμετοχής $\langle C \sqcup D, >, 0.6 \rangle$, αν εφαρμόσουμε την σημασιολογική διακλάδωση με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόζεται στις κλασικές ΠΛ, προσθέτοντας δηλαδή την άρνηση της μιας έννοιας, καταλήγουμε με την τριάδα συμμετοχής $\langle C, >, 0.6 \rangle$ στο ένα κλαδί και τις $\langle D, >, 0.6 \rangle$, $\langle \neg C, >, 0.6 \rangle$ στο άλλο. Εφαρμόζοντας την άρνηση παίρνουμε την τριάδα συμμετοχής $\langle C, \leq, 0.4 \rangle$ που δημιουργεί αντίφαση με την $\langle C > 0.6 \rangle$ κάνοντας επιτυχημένα τους δυο κόμβους ξένους όσο αφορά αυτή την τριάδα συμμετοχής. Αν, όμως, αντί για την $\langle C \sqcup D, >, 0.6 \rangle$ είχαμε αρχικά $\langle C \sqcup D, >, 0.4 \rangle$, τότε η όλη κατάσταση αλλάζει μια και ο βαθμός συμμετοχής είναι τέτοιος που δεν προκαλείται αντίφαση, οπότε η πρόσθεση της άρνησης της τριάδας $\langle C, >, 0.4 \rangle$ (δηλαδή την $\langle \neg C, >, 0.4 \rangle$) δεν κάνει τους κόμβους ξένους ως προς την τριάδα συμμετοχής. Για τον ίδιο λόγο, εάν έχουμε την τριάδα $\langle C \sqcap D, <, 0.4 \rangle$ μπορεί να σχηματιστεί αντίφαση ενώ με την $\langle C \sqcap D < 0.6 \rangle$ δεν σχηματίζεται.

Καταλήγοντας, η σημασιολογική διακλάδωση στις ασαφείς ΠΛ εφαρμόζεται προσθέτοντας την σημασιολογικά αντίθετη τριάδα συμμετοχής της διάζευξης. Αν δηλαδή έχουμε $\langle C \sqcup D \triangleright n \rangle$ τότε στον ένα κόμβο προσθέτουμε τις τριάδες $\langle C \triangleright n \rangle$, $\langle D \triangleright^- n \rangle$, ενώ στον άλλο την $\langle D \triangleright n \rangle$. Με την σημασιολογική διακλάδωση το προηγούμενο παράδειγμα μετασχηματίζεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.

Σχήμα 3.5: Σημασιολογική διακλάδωση σε ασαφείς ΠΛ.

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle C \sqcup D_1, \geq, 0, 6 \rangle, \dots, \langle C \sqcup D_n, \geq, 0, 6 \rangle\}$$



Η σημασιολογική διακλάδωση μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα σύμφωνα με τις ασαφείς νόρμες της άρνησης, έτσι ώστε να είναι εφαρμόσιμη σε κάθε ασαφή ΠΛ. Το κυριότερο πλεονέκτημα της είναι πως μειώνει σημαντικά το χώρο του αλγορίθμου, αλλά από την άλλη η αποτελεσματικότητα της είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη βάση γνώσης. Πιο συγκεκριμένα, σε μια αξιολόγηση της συγκεκριμένης τεχνικής για κλασικές ΠΛ έχει αποδειχθεί ότι η είναι πιο αποτελεσματική με βάσεις γνώσης που έχουν δημιουργηθεί αυτοματοποιημένα [67].

3.4.6 Βελτιστοποιήσεις για το Μέγιστο Κάτω Φράγμα

Στις ασαφείς ΠΛ ένα σώμα ορολογίας μπορεί να περιέχει θετικούς και αρνητικούς ισχυρισμούς της ίδιας έννοιας χωρίς να σχηματίζεται κάποια αντίφαση. Για το λόγο αυτό είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε το ανώτερο και το κατώτερο όριο της έννοιας για το συγκεκριμένο άτομο. Τυπικά για μια ασαφή γνώση Σ και ένα ισχυρισμό φ , το μέγιστο κάτω φράγμα ($MK\Phi$) του φ μ.β.τ Σ είναι $glb(\Sigma, \varphi) = \sup\{n \mid \Sigma \models \varphi \geq n\}$, όπου $\sup \emptyset = 0$, ενώ το ελάχιστο άνω φράγμα ($EA\Phi$) του φ μ.β.τ Σ είναι $lub(\Sigma, \varphi) = \inf\{n \mid \Sigma \models \varphi \leq n\}$, όπου $\inf \emptyset = 1$. Επιπρόσθετα, στο [94] αποδεικνύεται ότι για έναν ισχυρισμό $\varphi = a : C$ το $lub(\Sigma, \varphi)$ είναι ίσο με $1 - glb(\Sigma, a : \neg C)$. Μια διαδικασία επίλυσης του μέγιστου κάτω και ελάχιστου άνω φράγματος έχει προταθεί από τον Straccia [94]. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι βαθμοί συμμετοχής που εμφανίζονται σε ένα σώμα ισχυρισμών μαζί με τις αντίθετες τιμές τους (η αντίθετη τιμή του ισχυρισμού 0.4 είναι $\text{Ant}_{0.4} = 1 - 0.4 = 0.6$) και τους βαθμούς 0, 0.5 και 1 σχηματίζουν το σύνολο των βαθμών N^Σ . Έπειτα για να υπολογίσουμε το $MK\Phi$ ενός ισχυρισμού φ υπολογίζεται το μέγιστο $n \in N^\Sigma$ τέτοιο ώστε $\{n \mid \Sigma \models \varphi \geq n\}$. Μια βελτιστοποίηση για την έρευνα του $MK\Phi$ που προτάθηκε από τον Straccia [94] και μειώνει σημαντικά το χώρο αναζήτησης είναι η χρήση του αλγορίθμου της δυαδικής αναζήτησης, με την βοήθεια του οποίου μειώνονται σημαντικά οι απαιτούμενοι έλεγχοι ικανοποιησιμότητας. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που δείχνει τη λειτουργία για την εύρεση του $MK\Phi$.

Παράδειγμα 3.4.6 Έστω μια ικανοποιήσιμη ασαφής βάση γνώσης Σ με $N^\Sigma = \{0, \dots, 0.5, \dots, 1\}$ που περιέχει τον παρακάτω κόμβο

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle (E \sqcap D), \geq, 0.6 \rangle, \langle \exists R. (\forall R^- . C), \geq, 0.8 \rangle \}$$

και ζητείται το $glb(\Sigma, (x : C))$.

Αφού ζητείται το $MK\Phi$, το $\Sigma \models \varphi \geq n, \forall n \in N^\Sigma$ θα πρέπει να λυθεί για την εύρεση του μεγαλύτερου n . Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο της δυαδικής αναζήτησης και έστω ότι το 0.5 είναι το μέσο των ταξινομημένων στοιχείων του N^Σ . Οπότε ελέγχουμε αν $\Sigma \models (x : C) \geq 0.5$ και στη περίπτωση που είναι (δηλαδή $\Sigma \cup (x : C) < 0.5$ είναι μη ικανοποιήσιμη) προχωράμε στον επόμενο υψηλότερο βαθμό. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι $\Sigma \not\models (x : C) \geq n$, που σημαίνει ότι ο προηγούμενος βαθμός που εξετάστηκε είναι το $glb(\Sigma, (x : C))$, διαφορετικά (δηλαδή $\Sigma \models (x : C) \geq n, \forall n \in N^\Sigma$) $glb(\Sigma, (x : C)) = 1$.

1. Προσθέτουμε την τριάδα συμμετοχής $\langle C, <, 0.5 \rangle$ στον κόμβο x .

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle (E \sqcap D), \geq, 0.6 \rangle, \langle \exists R. (\forall R^- . C), \geq, 0.8 \rangle \langle C, <, 0.5 \rangle \}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{ \langle (A \sqcap B), \geq, 0.7 \rangle \}$$

2. Εφαρμογή του $(E \sqcap D), \geq, 0.6$

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle E, \geq, 0.6 \rangle, \langle D, \geq, 0.6 \rangle, \langle \exists R.(\forall R^-.C), \geq, 0.8 \rangle \langle C, <, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle (A \sqcap B), \geq, 0.7 \rangle\}$$

3. Εφαρμογή του $\langle \exists R.(\forall R^-.C), \geq, 0.8 \rangle$

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle E, \geq, 0.6 \rangle, \langle D, \geq, 0.6 \rangle, \langle \exists R.(\forall R^-.C), \geq, 0.8 \rangle \langle C, <, 0.5 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle (A \sqcap B), \geq, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, z) = \{\langle R, \geq, 0.8 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(z) = \{\langle \forall R^-.C, \geq, 0.8 \rangle\}$$

4. Εφαρμογή του $\langle \forall R^-.C, \geq, 0.8 \rangle$

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle E, \geq, 0.6 \rangle, \langle D, \geq, 0.6 \rangle, \langle \exists R.(\forall R^-.C), \geq, 0.8 \rangle, \langle C, <, 0.5 \rangle, \langle C, \geq, 0.8 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle (A \sqcap B), \geq, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, z) = \{\langle R, \geq, 0.8 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(z) = \{\langle \forall R^-.C, \geq, 0.8 \rangle\}$$

5. Αντίφαση, δηλαδή $\Sigma \models (x : C) \geq 0.5$. Προχωρούμε στο επόμενο $n \in N^\Sigma$ που θα μας δώσει ο αλγόριθμος δυαδικής αναζήτησης. Προσθέτουμε την τριάδα συμμετοχής $\langle C, <, n \rangle$ στον κόμβο x .

6. Εφαρμογή του $(E \sqcap D), \geq, 0.6$

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle E, \geq, 0.6 \rangle, \langle D, \geq, 0.6 \rangle, \langle \exists R.(\forall R^-.C), \geq, 0.8 \rangle \langle C, <, n \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle (A \sqcap B), \geq, 0.7 \rangle\}$$

7. Εφαρμογή του $\langle \exists R.(\forall R^-.C), \geq, 0.8 \rangle$

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle E, \geq, 0.6 \rangle, \langle D, \geq, 0.6 \rangle, \langle \exists R.(\forall R^-.C), \geq, 0.8 \rangle \langle C, <, n \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(y) = \{\langle (A \sqcap B), \geq, 0.7 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(x, z) = \{\langle R, \geq, 0.8 \rangle\}$$

$$\mathcal{L}(z) = \{\langle \forall R^-.C, \geq, 0.8 \rangle\}$$

⋮

Όπως βλέπουμε από το παραπάνω παράδειγμα ο υπολογισμός του $MK\Phi$, που είναι η κυριότερη υπηρεσία συλλογιστική που χρησιμοποιείται στις εφαρμογές με ασαφείς ΠΛ [203, 223], μπορεί να αποβεί υπολογιστικά πολύ ακριβή. Έχοντας σαν στόχο την βελτίωση της απόδοσης της συγκεκριμένης υπηρεσίας συλλογιστικής προτείνουμε το συνδυασμό διαφόρων τεχνικών. Αρχικά, μιας και ο υπολογισμός του $MK\Phi$ γίνεται βάσει ενός ισχυρισμού, δηλαδή ενός συγκεκριμένου ατόμου, εάν η βάση γνώσης είναι ικανοποιήσιμη η τεχνική της διχοτόμησης του σώματος ορολογίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επιλέγοντας το τμήμα του σώματος ορολογίας A' που περιέχει το άτομο του ισχυρισμού. (Παρατηρούμε ότι οι κανόνες επέκτασης για τις τριάδες συμμετοχής που περιέχονται στον κόμβο y δεν εφαρμόζονται ποτέ γιατί δεν επηρεάζουν το κόμβο x .) Η βάση γνώσης πρέπει να είναι ικανοποιήσιμη διότι διαφορετικά το τμήμα A' μπορεί να είναι ένα συνεπές τμήμα ένας ασυνεπούς σώματος ορολογίας, το οποίο θα δώσει λανθασμένα αποτελέσματα. Επιλέγοντας ένα τμήμα A' προκύπτει ένα νέο σύνολο βαθμών συμμετοχής, μονάχα για αυτό, τέτοιο ώστε $N^{A'} \subseteq N^{\Sigma}$. Στην χειρότερη περίπτωση το A' θα περιέχει τον ίδιο αριθμό βαθμών συμμετοχής, πρακτικά όμως, το $N^{A'}$ είναι ένα σημαντικά μικρότερο σύνολο. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται ο χώρος αναζήτησης και παράλληλα ο χρόνος υπολογισμού του $MK\Phi$ αφού απαιτούνται λιγότεροι έλεγχοι ικανοποιησιμότητας.

Η δυαδική αναζήτηση είναι ένας πολύ αποτελεσματικός αλγόριθμος αναζήτησης που απαιτεί μονάχα $\log_2 N$ δοκιμές πριν την εύρεση της λύσης, και σε συνδυασμό με την τεχνική της διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική. Ακόμη, όμως, και με τη χρήση αυτών των τεχνικών υπάρχουν περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται πολλοί διαφορετικοί βαθμοί συμμετοχής (π.χ. το σύνολο των βαθμών για ένα τμήμα του σώματος ορολογίας να περιλαμβάνει 128 στοιχεία δηλαδή στην χειρότερη περίπτωση να απαιτούνται 7 επιλύσεις ικανοποιησιμότητας πριν βρεθεί το $MK\Phi$) με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η απόδοση του αλγορίθμου για την εύρεση του $MK\Phi$. Επιπρόσθετα, η συνολική απόδοση μπορεί να επιβαρυνθεί ακόμα περισσότερο όταν ζητείται ο υπολογισμός του συνολικού $MK\Phi$ (*Global GLB*), δηλαδή του $MK\Phi$ όλων των ατόμων της βάσης γνώσης για όλες τις έννοιες που έχουν δηλωθεί στο σώμα ορολογίας [8].

Για να βελτιώσουμε την απόδοση για τον υπολογισμό του $MK\Phi$ μπορούμε να τροποποιήσουμε ελαφρά τον αλγόριθμο της δυαδικής αναζήτησης. Έτσι αρχικά ελέγχουμε για τον ισχυρισμό με το μέγιστο βαθμό, δηλαδή το βαθμό 1. Ας θεωρήσουμε τον ισχυρισμό $\varphi = x : B$. Εάν δεν ικανοποιείται από τη βάση γνώσης, δηλαδή η τριάδα συμμετοχής $\langle B, <, 1 \rangle$ οδηγεί σε αντίφαση όταν προστεθεί στον κόμβο x , τότε έχουμε $B^I(x^I) \geq 1$, δηλαδή $B^I(x^I) = 1$, οπότε $\forall n \in N^{A'}$ έχουμε $B^I(x^I) \geq n$ το οποίο σημαίνει ότι το μέγιστο άνω φράγμα για το συγκεκριμένο ισχυρισμό είναι 1. Με αυτό το τρόπο αποτρέπουμε την άσκοπη αναζήτηση του $MK\Phi$ στις περιπτώσεις των κλασικών ισχυρισμών (δηλαδή ισχυρισμών με βαθμό συμμετοχής 1). Αν από την άλλη ο ισχυρισμός με βαθμό 1 είναι μη ικανοποιήσιμος τότε εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της δυαδικής αναζήτησης.

Επιπρόσθετα, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το προηγούμενο παράδειγμα, όταν ελέγχεται η ικανοποιησιμότητα για το $MK\Phi$ οι κανόνες επέκτασης για τις τριάδες συμμετοχής που περιέχονται στον κόμβο που εξετάζεται εφαρμόζονται με τον ίδιο τρόπο ανεξάρτητα από την τριάδα συμμετοχής που προστίθεται κάθε φορά με διαφορετικό βαθμό λόγω του ισχυρισμού φ . Ο υπολογισμός του $MK\Phi$ μπορεί να βελτιωθεί αποτρέποντας την άσκοπη εφαρμογή κανόνων για τις τριάδες συμμετοχής που περιέχονται στον κόμβο που εξετάζεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας

αρχικά τους κανόνες επέκτασης για το κόμβο που εξετάζεται καταλήγοντας έτσι σε ένα δάσος F , το οποίο και αποθηκεύεται. Έπειτα, σε αυτό το δάσος και στον κόμβο που εξετάζεται, προστίθεται η τριάδα συμμετοχής που προκύπτει από τον ισχυρισμό που ελέγχεται, δηλαδή $F \cup \varphi$, και σε αυτό το δάσος εφαρμόζονται οι απαραίτητοι κανόνες επέκτασης. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνουμε το ίδιο αποτέλεσμα για την ικανοποιησιμότητα χωρίς την επαναλαμβανόμενη επέκταση κάποιων κανόνων, κάνοντας τον υπολογισμό του $MK\Phi$ πολύ γρηγορότερο.

Οι τεχνικές για την βελτίωση στον υπολογισμό του $MK\Phi$ είναι πολύ αποτελεσματικές μια και μπορούν να μειώσουν αισθητά το χώρο αναζήτησης του tableau ανεξάρτητα από τη βάση γνώσης. Ακόμα, είναι εφαρμόσιμες σε όλες τις ασαφείς ΠΛ ανεξάρτητα των τελεστών που χρησιμοποιούν για την απόδοση ερμηνειών στους κατασκευαστές τους, και πολύ εύκολα υλοποιήσιμες. Τέλος, παρά το γεγονός ότι ο χώρος του αλγορίθμου μεγαλώνει, λόγω της αποθήκευσης του tableau, μπορούμε να πούμε ότι ο συνολικός χώρος παραμένει χαμηλός σε σύγκριση με τον υπολογισμό του $MK\Phi$ χωρίς τις παραπάνω τεχνικές.

3.4.7 Διαχείριση των Γενικευμένων και Κυκλικών Αξιωμάτων

Στις προηγούμενες ενότητες προτείναμε διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης που επικεντρωνόντουσαν στο σώμα ισχυρισμών μιας ασαφούς βάσης γνώσης. Σε αυτή την ενότητα εστιάζουμε την προσοχή μας στο τρόπο που διαχειρίζονται τα γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα ενός σώματος ορολογίας μιας ασαφούς βάσης γνώσης από τον αλγόριθμο tableau, τα αίτια που τα κάνουν ιδιαίτερα υπολογιστικά δαπανηρά στις ασαφείς ΠΛ, και τέλος καταλήγουμε προτείνοντας τεχνικές με την βοήθεια των οποίων είναι δυνατό να τα διαχειριστούμε αποτελεσματικά.

Όπως είδαμε ένα σώμα ορολογίας είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από αξιώματα *υπαγωγής εννοιών* (*concept inclusion axioms*) της μορφής $C \sqsubseteq D$, και αξιώματα *ισοδυναμίας εννοιών* (*concept equivalence axioms*) της μορφής $C \equiv D$. Αν οι C, D είναι $SHLN$ -έννοιες τότε το αξίωμα ονομάζεται *αξίωμα υπαγωγής γενικευμένων εννοιών* (*General Concept Inclusions - GCIs*). Από την άλλη, όταν μια έννοια σε ένα αξίωμα ορίζεται είτε άμεσα, είτε έμμεσα από τον εαυτό της, περιέχεται δηλαδή κάποιος κύκλος, λέμε ότι το αξίωμα αυτό είναι *κυκλικό* (*cyclic*).

Για τα γενικευμένα και τα κυκλικά αξιώματα δεν μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική του οκνηρού ξεδιπλώματος. Τα αξιώματα αυτά για αυτό το λόγο απαιτούν μια ιδιαίτερη μεταχείριση. Έτσι λοιπόν, αρχικά ένα σώμα ορολογίας μιας βάσης γνώσης χωρίζεται στο ξεδιπλώσιμο κομμάτι T_u και στο κομμάτι που περιέχει τα γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα T_g . Για το σώμα ορολογίας T ισχύει μετά το διαχωρισμό $T_u \cup T_g = T$ και $T_u \cap T_g = \emptyset$.

Στα γενικευμένα αξιώματα υπάγονται και κάποιες κατηγορίες αξιωμάτων που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν το πεδίο και το σύνολο τιμής ενός ρόλου καθώς και δυο έννοιες που είναι ξένες μεταξύ τους. Για παράδειγμα, για το ρόλο οδηγεί μπορούμε να δηλώσουμε ότι έχει σαν πεδίο τιμών την έννοια *Ενήλικας* ενώ σαν σύνολο τιμής την έννοια *Όχημα*, θέλοντας να δηλώσουμε ότι μόνο οι ενήλικες οδηγούν. Για τις έννοιες *Άντρας* και *Γυναίκα* μπορούμε να δηλώσουμε ότι είναι ξένες μεταξύ τους εννοώντας πως ένα άτομο που χαρακτηρίζεται με την έννοια *Άντρας* δεν μπορεί να χαρακτηριστεί με την έννοια *Γυναίκα*. Ανάλογα με την εκφραστικότητα που προσφέρει η ΠΛ τα χαρακτηριστικά αυτά ενός ρόλου μπορούν να γραφούν σαν αξιώμα

της μορφής $\exists R.T \sqsubseteq C$ για να δηλώσουμε ότι η C είναι το πεδίο τιμών του R (π.χ. \exists οδηγεί. $T \sqsubseteq$ Ενήλικας) και σαν αξίωμα της μορφής $T \sqsubseteq \forall R.C$ για να δηλώσουμε ότι η C είναι το σύνολο τιμών του R (π.χ. $T \sqsubseteq \forall$ οδηγεί.Όχημα). Στην περίπτωση που η ΠΛ επιτρέπει την χρήση αντίστροφων ρόλων τότε το πεδίο τιμής ενός ρόλου μπορεί εναλλακτικά να δηλωθεί και σαν αξίωμα της μορφής $T \sqsubseteq \forall R^-.C$. Όσο αφορά τις ξένες έννοιες, όπως π.χ. τις έννοιες Άντρας και Γυναίκα, αυτές ορίζονται με το γενικευμένο αξίωμα Άντρας \sqcap Γυναίκα $\sqsubseteq \perp$. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως τα ξένα αξιώματα ορίζονται και με την μορφή $A \sqsubseteq \neg B$ στις κλασικές ΠΛ, το οποίο δεν είναι γενικευμένο αξίωμα. Ωστόσο στις ασαφείς ΠΛ τα δυο αυτά αξιώματα οδηγούν σε διαφορετικές σημασιολογίες (δείτε [232] για μια ανάλυση των διαφορών).

Για την περίπτωση των ασαφών γενικευμένων αξιωμάτων η σημασιολογία του $C \sqsubseteq D$ δεν ταυτίζεται με αυτή του $T \sqsubseteq \neg C \sqcup D$ που προκύπτει με την εφαρμογή της τεχνικής της εσωτερίκευσης (*internalization*) [109] που χρησιμοποιείται στις κλασικές ΠΛ. Για αυτό το λόγο, η επέκταση του ασαφούς tableau γίνεται σύμφωνα με τη σημασιολογία του $C \sqsubseteq D$, αρκεί δηλαδή να ισχύει $C^I(d^I) \leq D^I(d^I)$ για κάθε άτομο $d \in \Delta^I$.

Οι Stoilos et al. [180] πρότειναν την παρακάτω διαδικασία για το χειρισμό των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων στις ασαφείς ΠΛ.

1. Αρχικά το σώμα ισχυρισμών κανονικοποιείται έτσι ώστε να μην υπάρχουν αυστηροί ισχυρισμοί *strict assertion*, δηλαδή ισχυρισμοί που χρησιμοποιούν $<, >$. Έτσι οι τριάδες συμμετοχής της μορφής $\langle (x : C), >, n \rangle$ και $\langle (x : C), <, n \rangle$ μετασχηματίζονται σε $\langle (x : C), \geq, n + \epsilon \rangle$ και $\langle (x : C), \leq, n + \epsilon \rangle$ αντίστοιχα όπου $n \in \mathbb{N}^\Sigma$ και ϵ είναι ένας πολύ μικρός αριθμός τέτοιος ώστε $\epsilon \in [0, 1]$. Αυτή η κανονικοποίηση γίνεται επειδή κατά την διαδικασία κατασκευής του μοντέλου χρησιμοποιούνται ισότητες, έτσι με τη χρήση μη αυστηρών ανισοτήτων εξασφαλίζουμε ότι οι βαθμοί που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου εμφανίζονται σαν βαθμοί στο σώμα ισχυρισμών. Πιο συγκεκριμένα, ο Straccia [94, 130] αποδεικνύει ότι εάν ένα ασαφές \mathcal{ALC} σώμα ισχυρισμών είναι συνεπές, τότε υπάρχει ένα μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί τους βαθμούς συμμετοχής που υπάρχουν στο σώμα ορολογίας, το οποίο μπορεί να επεκταθεί και σε πιο εκφραστικές ασαφείς ΠΛ. Καταλήγοντας, λόγω της παραπάνω κανονικοποίησης οι αντιφάσεις πρέπει να επεκταθούν κατάλληλα μιας και ο βαθμός συμμετοχής ένας κανονικοποιημένου ισχυρισμού ανήκει στο σύνολο $(-\epsilon, 1 + \epsilon)$
2. Για κάθε γενικευμένο αξίωμα υπαγωγής $A \sqsubseteq B$ και $n \in \mathbb{N}^\Sigma$, όπου \mathbb{N}^Σ είναι ένα σύνολο που περιέχει όλους τους βαθμούς συμμετοχής του σώματος ισχυρισμών μαζί με τις αντίθετες τιμές τους και ένας κόμβος x ισχύει ότι $\langle (x : A), \leq, n - \epsilon \rangle$ ή $\langle (x : B), \geq, n \rangle$. (Στην περίπτωση που υπάρχουν γενικευμένα αξιώματα ισοδυναμίας π.χ. $C \equiv D$ αυτά μετασχηματίζονται στα ισοδύναμα αξιώματα υπαγωγής $C \sqsubseteq D$ και $D \sqsubseteq C$.)

Για να κατανοήσουμε τον τρόπο που διαχειρίζονται οι αλγόριθμοι για ασαφή tableau τα γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα ας δούμε το παρακάτω παράδειγμα.

Παράδειγμα 3.4.7 Έστω μια ασαφής βάση γνώσης με το γενικευμένο αξίωμα υπαγωγής $A \sqsubseteq B$, ένα άδειο σώμα ρόλων και το παρακάτω ασαφές σώμα ισχυρισμών.

$$\mathcal{L}(x) = \{ \langle A, >, 0.3 \rangle, \langle B, \leq, 0.3 \rangle \}$$

Πίνακας 3.5: Κανόνας για γενικευμένα αξιώματα

Κανόνας	Περιγραφή
\sqsubseteq_g	αν 1. $(C \sqsubseteq D) \in \mathcal{T}_g$ 2. $\{\langle C, \leq, n - \epsilon \rangle, \langle D, \geq, n \rangle\} \cap \mathcal{L}(x) = \emptyset$ για $\forall n \in N^A$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup E$ τότε $E \in \{\langle C, \leq, n - \epsilon \rangle, \langle D, \geq, n \rangle\}$

Κάνοντας την κανονικοποίηση του $ABox$ έτσι ώστε να μη περιλαμβάνει ανστηρές ανισώσεις έχουμε

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle A, \geq, 0.3 + \epsilon \rangle, \langle B, \leq, 0.3 \rangle\}$$

Το N^Σ περιέχει όλους τους βαθμούς συμμετοχής που εμφανίζονται στο κανονικοποιημένο $ABox$ μαζί με τις αντίθετες τιμές τους καθώς και τις τιμές 0, 0.5 και 1 έτσι προκύπτει $N^\Sigma = \{0, 0.5, 1\} \cup \{0.3, 0.3 + \epsilon, 1 - (0.3 + \epsilon), 1 - 0.3\} = \{0, 0.3, 0.3 + \epsilon, 0.5, 0.7 - \epsilon, 0.7, 1\}$. $\forall n \in N^\Sigma$ πρέπει να ισχύει $A \leq n - \epsilon$ ή $B \geq n$, οπότε έχουμε τα παρακάτω βήματα

- Για $n = 0$ προσθέτουμε $\langle A, \leq, 0 - \epsilon \rangle$ ή $\langle B, \geq, 0 \rangle$ (επιλέγουμε την τριάδα συμμετοχής $\langle B, \geq, 0 \rangle$ επειδή η τριάδα συμμετοχής $\langle A, \leq, -\epsilon \rangle$ δημιουργεί αντίφαση).

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle A, \geq, 0.3 + \epsilon \rangle, \langle B, \leq, 0.3 \rangle, \langle B, \leq, 0 \rangle\}$$

- Για $n = 0.3$ προσθέτουμε $\langle A, \leq, 0.3 - \epsilon \rangle$ ή $B \geq 0.3$ (επιλέγουμε τριάδα συμμετοχής $\langle B, \geq, 0 \rangle$ επειδή η τριάδα συμμετοχής $\langle A, \leq, 0.3 - \epsilon \rangle$ δημιουργεί αντίφαση).

$$\mathcal{L}(x) = \{\langle A, \geq, 0.3 + \epsilon \rangle, \langle B, \leq, 0.3 \rangle, \langle B, \leq, 0 \rangle, \langle B \geq 0.3 \rangle\}$$

- Για $n = 0.3 + \epsilon$ προσθέτουμε την τριάδα συμμετοχής $\langle A, <, 0.3 + \epsilon - \epsilon \rangle$ η την τριάδα συμμετοχής $\langle B, \geq, 0.3 + \epsilon \rangle$, σε αυτή την περίπτωση και οι δυο τριάδες συμμετοχής δημιουργούν αντίφαση.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε εύκολα από το παραπάνω παράδειγμα η διαδικασία που ακολουθείται για τα ασαφή γενικευμένα αξιώματα είναι ιδιαίτερα δαπανηρή αφού και για κάθε κόμβο στο δάσος ολοκλήρωσης προκύπτουν $2^{k \times |N^\Sigma|}$ πιθανοί συνδυασμοί για να εξεταστούν, όπου k είναι ο αριθμός των γενικευμένων ασαφών αξιωμάτων και $|N^\Sigma|$ το πλήθος των στοιχείων του N^Σ . Επιπρόσθετα, επειδή όπως αναφέραμε στις ασαφείς ΠΛ η σημασιολογία του $C \sqsubseteq D$ δεν είναι ίδια με αυτή του $\top \sqsubseteq \neg C \sqcup D$ οι τεχνικές της εσωτερίκευσης[109] και της απορρόφησης (*absortion*)[127] που έχουν προταθεί για την βελτίωση της απόδοσης του κλασικού αλγορίθμου tableau με τη χρήση γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Το θέμα της πρακτικής εφαρμογής γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων στις ασαφείς ΠΛ είναι ακόμα ανοιχτό. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν έτσι ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του πολύ δαπανηρού υπολογιστικά αλγορίθμου για τα γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα στις ασαφείς ΠΛ. Παρακάτω παρουσιάζουμε κάποιες τεχνικές βελτιστοποίησης οι οποίες έχουν χωριστεί σε διάφορες κατηγορίες.

- **Μείωση των βαθμών στο κανόνα \sqsubseteq .** Ένα μεγάλο μέρος της αναποτελεσματικότητας του κανόνα \sqsubseteq οφείλεται στον αριθμό των βαθμών για τους οποίους πρέπει να εφαρμοστεί για κάθε γενικευμένο ή κυκλικό αξίωμα και για κάθε κόμβο x . Οι ακόλουθες τεχνικές χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τον αριθμό των βαθμών:

- *Διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμών:* Η χρήση της τεχνικής της διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αυτή την περίπτωση μειώνοντας σημαντικά το σύνολο N^Σ των βαθμών συμμετοχής που πρέπει να εξεταστούν από τον κανόνα του κανόνα \sqsubseteq .

- *Πεδίο ορισμού και σύνολο τιμών ενός ρόλου:* Σε ρεαλιστικές εφαρμογές ένας μεγάλος αριθμός των γενικευμένων αξιωμάτων προέρχεται από τα αξιώματα που ορίζουν το πεδίο και το σύνολο τιμών ενός ρόλου. Όπως σημειώνεται στο [205], τα αξιώματα αυτά μπορούν να χειριστούν με διαφορετικό τρόπο από τα υπόλοιπα γενικευμένα αξιώματα επειδή σε αυτά η χρήση της έννοιας \top οδηγεί σε αντίφαση. Πιο συγκεκριμένα, στην f_{KD} - \mathcal{SHLN} , η εφαρμογή του κανόνα \sqsubseteq στο αξίωμα συνόλου τιμών $\top \sqsubseteq \forall R.C$ θα προσθέσει την τριάδα συμμετοχής $\langle \text{lan } \top, \leq, n - \epsilon \rangle$ ή την $\langle \forall R.C, \geq, n \rangle$. Όπως είναι προφανές η πρώτη από αυτές τις τριάδες οδηγεί σε αντίφαση για οποιοδήποτε $n \in (0, 1]$. Επιπρόσθετα, έπειτα από την εφαρμογή του κανόνα \sqsubseteq οι συνδυασμοί που δεν περιέχουν αντίφαση περιέχουν $\langle \forall R.D, \geq, 1 \rangle \in \mathcal{L}(x)$ που κάνουν όλες τις τριάδες $\langle \forall R.D, \geq, n' \rangle \in \mathcal{L}(x)$, με $n' < 1$, περιττές. Επιπλέον αυτή η τριάδα συμμετοχής έχει μονάχα αποτέλεσμα όταν υπάρχει μια ακμή $\langle x, y \rangle$ που έρχεται σε αντίφαση με τη $\langle R, \leq, 0 \rangle$. Παρόμοια για τα αξιώματα πεδίου ορισμού $\exists R.T \sqsubseteq C$ με την η εφαρμογή του κανόνα \sqsubseteq προκύπτουν $\langle \exists R.T, \leq, n - \epsilon \rangle$ ή $\langle C, \geq, n \rangle$. Εάν σε αυτή την περίπτωση υπάρχει κάποιος $R_{\triangleright n_1}$ γείτονας τότε επειδή η εφαρμογή του $\langle \exists R.T, \leq, n_1 \rangle$ θα προκαλέσει αντίφαση θα έχουμε μόνο την $\langle C, \geq, n_1 \rangle$. Ως εκ τούτου προκύπτουν οι ντετερμινιστικοί κανόνες του Πίνακα 3.6.

- *Αξιώματα ξένων εννοιών:* Τα αξιώματα που ορίζουν ξένες έννοιες είναι επίσης μια μεγάλη πηγή γενικευμένων αξιωμάτων σε μια βάση γνώσης. Σε αυτή την περίπτωση για ένα αξίωμα της μορφής $A \sqcap B \sqsubseteq \perp$ προκύπτουν $\langle A \sqcap B, \leq, n - \epsilon \rangle$ ή $\langle \perp, \geq, n \rangle$ για κάθε $n \in (0, 1]$ και παρατηρούμε ότι για το δεύτερο προκύπτει πάντοτε αντίφαση. Επιπρόσθετα, οι τριάδες συμμετοχής $\langle A \sqcap B, \leq, n - \epsilon \rangle$ είναι περιττές εκτός της τριάδας που σχηματίζεται με το μικρότερο $n \in N^\Sigma$.

- *Γενικευμένα κυκλικά αξιώματα ισότητας της μορφής $C \equiv D$.* Ένα γενικευμένο κυκλικό αξίωμα ισότητας της μορφής $C \equiv D$ είναι ισοδύναμο με τα αξιώματα $C \sqsubseteq D$ και $D \sqsubseteq C$, στα οποία υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ίδιων εννοιών. Έτσι αντί για $(2^{|N^{A'}}|)^2$ συνδυασμούς, όπου $|N^{A'}|$ είναι το μέγεθος του $N^{A'}$, πολύ λιγότεροι συνδυασμοί προκύπτουν λόγω των αντιφάσεων μεταξύ των τριάδων συμμετοχής που σχηματίζονται. Πιο συγκεκριμένα το πλήθος των τριάδων συμμετοχής που προκύπτουν χωρίς αντίφαση είναι οι συνδυασμοί του συνόλου $|N^{A'}|$ ανά 2, μείον 1 και είναι οι παρακάτω τριάδες συμμετοχής

$$* \langle C \geq d_v \rangle, \langle D \geq d_v \rangle, \langle C \leq d_{v+1} - \epsilon \rangle, \langle D \leq d_{v+1} - \epsilon \rangle$$

Πίνακας 3.6: Κανόνες επέκτασης για τα αξιώματα συνόλου τιμής και πεδίου ορισμού ενός ρόλου.

Κανόνας	Περιγραφή
range	αν 1. $\top \sqsubseteq \forall R.C \in \mathcal{T}$, x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, και 2. x έχει έναν R_{\triangleright, n_1} -γείτονα y με $\langle C, \geq, 1 \rangle \notin \mathcal{L}(y)$ και $n_1 > 0$ τότε $\mathcal{L}(y) \rightarrow \mathcal{L}(y) \cup \{\langle C, \geq, 1 \rangle\}$
dom	αν 1. $\exists R.\top \sqsubseteq C \in \mathcal{T}$, x δεν είναι έμμεσα μπλοκαρισμένος, και 2. x έχει έναν R_{\triangleright, n_1} -γείτονα y με $\langle C, \geq, n_1 \rangle \notin \mathcal{L}(x)$ και $n_1 > 0$ τότε $\mathcal{L}(x) \rightarrow \mathcal{L}(x) \cup \{\langle C, \geq, n_1 \rangle\}$

$$* \langle C \geq d_{largest} \rangle, \langle D \geq d_{largest} \rangle$$

όπου d_v είναι ο v -οστός βαθμός που περιέχεται στο σύνολο N^A . Έτσι στις περιπτώσεις των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων ισότητας μπορούμε απ' ευθείας να υπολογίσουμε τις τριάδες συμμετοχής που δεν προκαλούν κάποια αντίφαση.

- **Στρατηγικές για την επέκταση του κανόνα \sqsubseteq :** Όπως είδαμε στις προηγούμενες ενότητες μια καλή στρατηγική μπορεί να είναι πολύ ωφέλιμη για τη μείωση των επιπτώσεων του μη-ντετερμινισμού. Για την βελτίωση της απόδοσης του του κανόνα \sqsubseteq χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες στρατηγικές:

- *Συντηρητική εφαρμογή του \sqsubseteq :* Το αποτέλεσμα του κανόνα \sqsubseteq μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν τον εφαρμόζουμε συντηρητικά. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε εφαρμόσει πρώτα κάθε άλλο κανόνα αφήνοντας την εφαρμογή του του κανόνα \sqsubseteq μόνο στο τέλος. Σε πολλές περιπτώσεις, η εφαρμογή άλλων κανόνων θα οδηγήσει σε σύγκρουση, αποφεύγοντας τη χρήση αυτού του εξαιρετικά υπολογιστικά δαπανηρού κανόνα.
- *Σχετικά γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα:* Κατά την επιλογή ενός γενικευμένου ή κυκλικού αξιώματος για την εφαρμογή του σε έναν κόμβο x , είναι πάντοτε σκόπιμο να χρησιμοποιούμε το αξίωμα εκείνο το οποίου περιέχει κάποια έννοια που εμφανίζεται στο $\mathcal{L}(x)$. Όπως είναι προφανές αν πρόκειται να εμφανιστεί αντίφαση θα προκύψει από την εφαρμογή ενός σχετικού γενικευμένου αξιώματος. Ακόμα με την εφαρμογή ενός γενικευμένου αξιώματος σε ένα κόμβο x είναι πιθανό να προκύψουν πρόσθετα σχετικά γενικευμένα αξιώματα.

Η διαχείριση των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων είναι υπολογιστικά δαπανηρή στις κλασικές ΠΛ και ακόμα πιο δαπανηρή στις ασαφείς ΠΛ. Οι τεχνικές που προτείνουμε για την διαχείριση των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων στις ασαφείς ΠΛ επιτρέπουν τη χρήση τους με δεδομένα πραγματικών εφαρμογών μια και μειώνουν σημαντικά το χώρο αναζήτησης του αλγορίθμου tableau. Επιπρόσθετα, οι τεχνικές που προτείνονται είναι ανεξάρτητες από την ασαφή λογική που χρησιμοποιείται για την απόδοση ερμηνειών, οπότε μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις ασαφείς ΠΛ. Το μοναδικό μειονέκτημα των παραπάνω τεχνικών για τη διαχείριση των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων είναι ότι εξαρτώνται από τη βάση γνώσης και

σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να μην προσφέρουν κάποια σημαντική βελτίωση στην απόδοση του αλγορίθμου tableau.

Κεφάλαιο 4

Συστήματα Συλλογιστικής για Εκφραστικές Ασαφείς Περιγραφικές Λογικές

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE (Fuzzy Reasoning Engine)[194] το οποίο ήταν το πρώτο συστήματα ασαφούς συλλογιστικής και μαζί με το fuzzyDL [217] είναι τα μόνα που υποστηρίζουν εκφραστικές ασαφείς ΠΛ. Πέραν όμως των υπηρεσιών συλλογιστικής, που κάθε σύστημα συλλογιστικής προσφέρει, στις ασαφείς ΠΛ υπάρχει μια ακόμα ιδιαιτερότητα. Λόγω της διαφορετικής τους σύνταξης, σε σχέση με τις κλασικές ΠΛ, είναι απαραίτητο ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον μέσω του οποίου να είναι δυνατή η δημιουργία και η επεξεργασία ασαφών βάσεων γνώσης. Έτσι, το αντικείμενο της ενότητας 4.1 είναι η σύνταξη, το γραφικό περιβάλλον και οι υπηρεσίες συλλογιστικής που υποστηρίζονται από το FiRE.

Στην συνέχεια, στην ενότητα 4.2 παρουσιάζεται μια αξιολόγηση του συστήματος όσο αφορά τις υπηρεσίες συλλογιστικής χρησιμοποιώντας ασαφείς βάσεις γνώσης διαφορετικών μεγεθών και εκφραστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια σύγκριση της απόδοσης του συστήματος συλλογιστικής FiRE με τη χρήση των τεχνικών βελτιστοποίησης και χωρίς αυτές για τα ίδια ερωτήματα συλλογιστικής έτσι ώστε να παρουσιαστεί το ουσιαστικό όφελος σε χρόνο λόγω των τεχνικών βελτιστοποίησης.

Στην ενότητα 4.3, παρουσιάζεται η εργασία μας σε δύο άλλα πολύ σημαντικά θέματα των ασαφών ΠΛ, το πρόβλημα της αποθήκευσης μιας ασαφούς βάσης γνώσης και των συζευκτικών ερωτημάτων. Η διαφορετική σύνταξη των ασαφών ΠΛ δεν επιτρέπει την αποθήκευση τους στα συστήματα αποθήκευσης που υπάρχουν για τις κλασικές ΠΛ, τα οποία στην πλειοψηφία τους υποστηρίζουν συζευκτικά ερωτήματα. Επιπρόσθετα, η ασαφή επέκταση των ΠΛ και η διαφορετική τους ερμηνεία από τις κλασικές ΠΛ είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία νέων ειδών συζευκτικών ερωτημάτων που προτάθηκαν στη βιβλιογραφία [198]. Για να είναι δυνατή η αποθήκευση μιας ασαφούς βάσης γνώσης προτείνουμε μια σύνταξη για την αναπαράσταση τους σε RDF τριάδες. Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη εισαγωγή των ασαφών συζευκτικών ερωτημάτων και έπειτα παρουσιάζεται η ενσωμάτωση του συστήματος Sesame στο σύστημα συλλογιστικής FiRE που πραγματοποιήθηκε με σκοπό να τα υποστηρίζει. Η ενότητα αυτή ολοκληρώνεται με μια πειραματική αξιολόγηση του τελικού συστήματος. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως το πρόβλημα

των συζευκτικών επερωτημάτων παραμένει ανοιχτό στις κλασικές ΠΛ και πως η εργασία μας ήταν η πρώτη απόπειρα στο χώρο των συζευκτικών επερωτημάτων για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ.

4.1 Το Σύστημα Ασαφούς Συλλογιστικής FiRE

Μέχρι στιγμής είδαμε πως οι ΠΛ επεκτάθηκαν με την χρήση της θεωρίας των ασαφών συνόλων, καθώς και τον αλγόριθμο του f_{KD} -*SHLN* tableau με κάποιες τεχνικές για την βελτιστοποίηση του. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE (Fuzzy Reasoning Engine)[194]. Το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE ήταν το πρώτο σύστημα ασαφούς συλλογιστικής που προτάθηκε για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ. Στην συνέχεια ακολούθησαν το σύστημα *FuzzyDL*[217] που υποστηρίζει την fuzzy *SHIf* καθώς και το σύστημα *DeLorean*[215] το οποίο υποστηρίζει την ΠΛ f_{KD} - *SRIOQ*, χρησιμοποιώντας όμως τον αλγόριθμο αναγωγής μιας ασαφούς βάσης γνώσης σε μια κλασική [172, 214], και έπειτα τη μηχανή συλλογιστικής Pellet για τη συλλογιστική.

Το FiRE είναι μια ερευνητική υλοποίηση της ασαφούς ΠΛ f_{KD} -*SHLN* με τη χρήση της προγραμματιστικής γλώσσας JAVA, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω ενός φιλικού γραφικού περιβάλλοντος, ή σαν *διεπαφή προγράμματος εφαρμογής (application programming interface-API)*. Η JAVA επιλέχθηκε σαν γλώσσα υλοποίησης για το FiRE λόγω της πλούσιας βιβλιοθήκης που διαθέτει καθώς και για το γεγονός ότι τα αρχεία που μεταγλωττίζει (compile) είναι ανεξάρτητα από το λειτουργικό στο οποίο θα εκτελεστούν. Το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE μπορεί να βρεθεί στη διεύθυνση www.image.ece.ntua.gr/~nsimou/FiRE με οδηγίες εγκατάστασης, καθώς και παραδείγματα. Στην συνέχεια της ενότητας θα παρουσιαστεί η σύνταξη που χρησιμοποιείται για να δηλωθεί μια ασαφής βάση γνώσης, το γραφικό του περιβάλλον, και οι υπηρεσίες συλλογιστικής που προσφέρει στο χρήστη.

4.1.1 Σύνταξη

Για τη σύνταξη μιας βάσης γνώσης καθώς και για τις ερωτήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε αυτή έχει οριστεί το πρότυπο *Knowledge Representation System Specification-KRSS* [5]. Το πρότυπο αυτό τηρείται από κάποια συστήματα συλλογιστικής [63, 93], η ραγδαία ανάπτυξη όμως των γλωσσών για την ανάπτυξη οντολογιών, έχει επηρεάσει τις πιο σύγχρονες μηχανές συλλογιστικής. Η W3C, που είναι ο οργανισμός που ασχολείται με την ανάπτυξη και προτυποποίηση τεχνολογιών για τον Παγκόσμιο Ιστό, έχει αναπτύξει αρκετές γλώσσες αναπαράστασης γνώσης. Η πιο εκφραστική από αυτές είναι η γλώσσα OWL [134] που έχει προτυποποιηθεί και υποστηρίζεται από τις μηχανές συλλογιστικής Pellet και Fact++. [206, 113].

Στη περίπτωση των ασαφών ΠΛ, όπως είδαμε, η κύρια διαφορά από πλευράς σύνταξης βρίσκεται στο σώμα ισχυρισμών, όπου οι ισχυρισμοί έχουν επεκταθεί με τη χρήση βαθμών συμμετοχής. Το συντακτικό της μηχανής ασαφούς συλλογιστικής FiRE, στηρίζεται στο πρότυπο KRSS. Η επιλογή του συγκεκριμένου προτύπου έναντι της OWL έγινε για διάφορους λόγους. Αρχικά, η προτυποποίηση της OWL έγινε σχετικά πρόσφατα και η W3C λόγω των περιορισμών της [189] αναπτύσσει συνεχώς νέα πρότυπα για την αναπαράσταση γνώσης όπως η OWL 1.1 [188, 187] και η OWL 2 [229]. Επιπρόσθετα, η γλώσσα OWL είναι αρκετά πιο περίπλοκη στην σύνταξή της

από το πρότυπο KRSS, και μέχρι πρόσφατα δεν υπήρχε κάποιος λεκτικός αναλυτής που να την υποστηρίζει [201]. Από την άλλη, το πρότυπο KRSS είχε προταθεί αποκλειστικά για συστήματα αναπαράστασης γνώσης και συλλογιστικής, είναι πιο απλό στην σύνταξη, γεγονός που διευκόλυνε την υλοποίηση ενός λεκτικού αναλυτή, καθώς και την απαιτούμενη επέκταση του για ασάφεια. Παρόλο όμως που το γραφικό περιβάλλον του FiRE χρησιμοποιεί το πρότυπο KRSS, το FiRE επιτρέπει την εισαγωγή μιας βάσης γνώσης σε OWL όπως και την εξαγωγή μιας βάσης KRSS σε OWL.

Για τη σύνταξη μιας βάσης γνώσης οι ΠΛ χρησιμοποιούν ένα αλφάβητο που αποτελείται από τα σύνολα των διακεκριμένων ατομικών εννοιών (atomic concepts) (**C**), των ατομικών ρόλων (atomic roles) (**R**) και των ατόμων (individuals) (**I**) του πεδίου αναπαράστασης. Έτσι αρχικά για τον ορισμό μια ασαφούς βάσης γνώσης στο FiRE δηλώνεται αυτό το αλφάβητο. Ένα παράδειγμα φαίνεται παρακάτω.

Παράδειγμα 4.1.1 *Έστω μια βάση γνώσης με το παρακάτω αλφάβητο*

$$\mathbf{C} = \{\text{Άνθρωπος, Γυναίκα, Άντρας, Ψηλός, Κοντός, Αδύνατος, Παχουλός}\}$$

$$\mathbf{R} = \{\text{Έχει - Γονιό, Έχει - Παιδί, Έχει - Φίλο}\}$$

$$\mathbf{I} = \{\text{ΒΑΓΓΕΛΗΣ, ΜΑΡΙΑ, ΜΑΝΩΛΗΣ}\}$$

στο FiRE συντάσσεται

```
(signature :atomic-concepts (Άνθρωπος Γυναίκα Άντρας
                             Ψηλός Κοντός Αδύνατος Παχουλός)
 :roles ((Έχει-Γονιό)
         (Έχει-Παιδί :inverse Έχει-Γονιό)
         (Έχει-Φίλο)
        )
 :individuals (ΒΑΓΓΕΛΗΣ ΜΑΡΙΑ ΜΑΝΩΛΗΣ))
```

(Έχει καθιερωθεί στην σύνταξη KRSS οι έννοιες και οι ρόλοι να έχουν το πρώτο τους γράμμα κεφάλαιο, ενώ τα άτομα να γράφονται με όλους τους χαρακτήρες με κεφαλαία ή με πεζά)

Η λέξη κλειδί **signature** χρησιμοποιείται για να δηλωθεί το αλφάβητο μιας ασαφούς βάσης γνώσης στο FiRE, ενώ οι λέξεις κλειδιά **atomic-concepts**, **roles** και **individuals** χρησιμοποιούνται για τη δήλωση των εννοιών, των ρόλων, και των ατόμων αντίστοιχα. Οι έννοιες και τα άτομα δηλώνονται έπειτα από την αντίστοιχη λέξη κλειδί, μέσα σε παρενθέσεις και η μια από την άλλη διαχωρίζονται με τουλάχιστον ένα κενό ανάμεσα τους. Οι ρόλοι, λόγω των επιπρόσθετων ιδιοτήτων τους, δηλώνονται σε ξεχωριστές παρενθέσεις, ανά ρόλο, μαζί με τις ιδιότητες τους. Πιο συγκεκριμένα, για να δηλωθεί πως μια έννοια είναι μεταβατική χρησιμοποιείται η λέξη κλειδί **transitive** ακολουθούμενη από το γράμμα t (true) ή από το γράμμα f (false). (Αν δεν χρησιμοποιηθεί η λέξη κλειδί **transitive** το σύστημα FiRE θεωρεί πως ο ρόλος δεν είναι μεταβατικός). Για την δήλωση του αντίστροφου ρόλου χρησιμοποιείται η λέξη κλειδί **inverse** ακολουθούμενη από τον αντίστροφο ρόλο, ενώ παρόμοια για τη δήλωση ιεραρχίας ρόλων χρησιμοποιείται η λέξη κλειδί **parent** ακολουθούμενη από τον πατέρα ρόλο. Επιπρόσθετα, για να δηλωθεί το πεδίο τιμών και το σύνολο τιμών

ενός ρόλου χρησιμοποιούνται οι λέξεις κλειδιά **domain** και **range** ακολουθούμενες από την έννοια που ορίζει το πεδίο τιμών και το σύνολο τιμών αντίστοιχα.

Με τις ιδιότητες των ρόλων είδαμε στην ουσία πως συντάσσεται και το σώμα ρόλων μιας ασαφούς βάσης γνώσης. Το ασαφές σώμα ορολογίας, από την άλλη, μπορεί να περιέχει αξιώματα υπαγωγής και ισότητας της μορφής.

$$(\text{implies } f_{KD}\text{-SHLN} - \text{έννοια}_1 \ f_{KD}\text{-SHLN} - \text{έννοια}_2)ή$$

$$(\text{equivalent } f_{KD}\text{-SHLN} - \text{έννοια}_1 \ f_{KD}\text{-SHLN} - \text{έννοια}_2)$$

Τα αξιώματα συντάσσονται μέσα σε παρενθέσεις με την χρήση των λέξεων κλειδιά **implies** για τα αξιώματα υπαγωγής και **equivalent** για τα αξιώματα ισότητας, την $f_{KD}\text{-SHLN}$ έννοια που ορίζεται ακολουθούμενη από μια $f_{KD}\text{-SHLN}$ έννοια την περιγράφει. Η λέξη κλειδί για τον τύπο του αξιώματος καθώς και οι δύο έννοιες διαχωρίζονται μεταξύ τους με τουλάχιστον ένα κενό. Ο τρόπος που συντάσσονται οι κατασκευαστές της $f_{KD}\text{-SHLN}$ στο FiRE φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.1: Η σύνταξη των $f_{KD}\text{-SHLN}$ κατασκευαστών στο FiRE.

Σύνταξη FiRE	Σύνταξη ΠΛ	Κατασκευαστής
top	\top	Καθολική έννοια
bottom	\perp	Κενή έννοια
(not C)	$\neg C$	Άρνηση
(and C₁...C_n)	$C_1 \sqcap \dots \sqcap C_n$	Σύζευξη
(or C₁...C_n)	$C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$	Διάζευξη
(some RC)	$\exists R.C$	Υπαρξιακός περιορισμός
(all RC)	$\forall R.C$	Περιορισμός τιμής
(at most nR)	$\leq nR$	Περιορισμός το πολύ
(at least nR)	$\geq nR$	Περιορισμός το λιγότερο

Παράδειγμα 4.1.2 Ας θεωρήσουμε το αλφάβητο που ορίστηκε στο παράδειγμα 4.1.1. Τα αξιώματα Άντρας \sqsubseteq Άνθρωπος και Πατέρας \sqsubseteq Άντρας \sqcap Έχει-Παιδί Άνθρωπος στο FiRE συντάσσονται

$$(\text{implies } \text{Άντρας } \text{Άνθρωπος})$$

$$(\text{equivalent } \text{Πατέρας } (\text{and } \text{Άντρας } (\text{some } \text{Έχει-Παιδί } \text{Άνθρωπος})))$$

Παρατηρούμε ότι η έννοια Πατέρας δεν έχει δηλωθεί στο αλφάβητο της γνώσης και ορίζεται σαν μια νέα έννοια μέσω του αξιώματος.

Τέλος, η δήλωση του ασαφούς σώματος ισχυρισμών γίνεται με τη χρήση των λέξεων κλειδιών **instance** και **related**. Οι δηλώσεις ασαφών ισχυρισμών εννοιών είναι της μορφής.

$$(\text{instance } \text{άτομο } f_{KD}\text{-SHLN}\text{-έννοια } \bowtie \text{ βαθμός})$$

Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιούμε την λέξη κλειδί **instance** ενώ ακολουθεί το άτομο το οποίο θα πρέπει να έχει δηλωθεί στο αλφάβητο της γνώσης, η $f_{KD}\text{-SHLN}$ -έννοια,

το σύμβολο ανισότητας \bowtie που είναι ένα από τα $>, <, \geq, \leq$ και ο βαθμός συμμετοχής ο οποίος ανήκει στο σύνολο $[0, 1]$. Ο ισχυρισμός περιέχεται σε παρενθέσεις και κάθε στοιχείο του ισχυρισμού διαχωρίζεται από τα άλλα με τουλάχιστον ένα κενό. Στη περίπτωση που ο βαθμός συμμετοχής της έννοιας στο άτομο είναι 1 (πλήρης συμμετοχή), τότε το σύμβολο ανισότητας όπως και ο βαθμός συμμετοχής μπορούν να παραλειφθούν. Ανάλογα οι ισχυρισμοί ρόλων είναι της μορφής.

(related άτομο₁ άτομο₂ $f_{KD-SHIN}$ -ρόλος \bowtie βαθμός)

Αντίστοιχα η συσχέτιση δυο ατόμων με ένα ρόλο γίνεται με την χρήση της λέξης κλειδί **related**, ακολουθούμενη από τα άτομα που συνδέονται και το ρόλο που τα συνδέει. Για την δήλωση του ισχυρισμού, τον διαχωρισμό των στοιχείων του, καθώς και το βαθμό συμμετοχής ισχύει ότι και παραπάνω.

Παράδειγμα 4.1.3 Οι παρακάτω ισχυρισμοί

(BAΓΓΕΛΗΣ : Άντρας) ≥ 1

(BAΓΓΕΛΗΣ : (Ψηλός \sqcap Αδύνατος) ≥ 0.7

((BAΓΓΕΛΗΣ, ΜΑΝΩΛΗΣ) : Έχει-Παιδί) ≥ 1

((ΜΑΝΩΛΗΣ, ΜΑΡΙΑ) : Έχει-Φίλο) ≥ 0.8

στο FiRE συντάσσονται

```
( instance ΒΑΓΓΕΛΗΣ Άντρας )
( instance ΒΑΓΓΕΛΗΣ (and Ψηλός Αδύνατος) >= 0.7)
( related ΒΑΓΓΕΛΗΣ ΜΑΝΩΛΗΣ Έχει-Παιδί )
( related ΜΑΝΩΛΗΣ ΜΑΡΙΑ Έχει-Φίλο >= 0.8 )
```

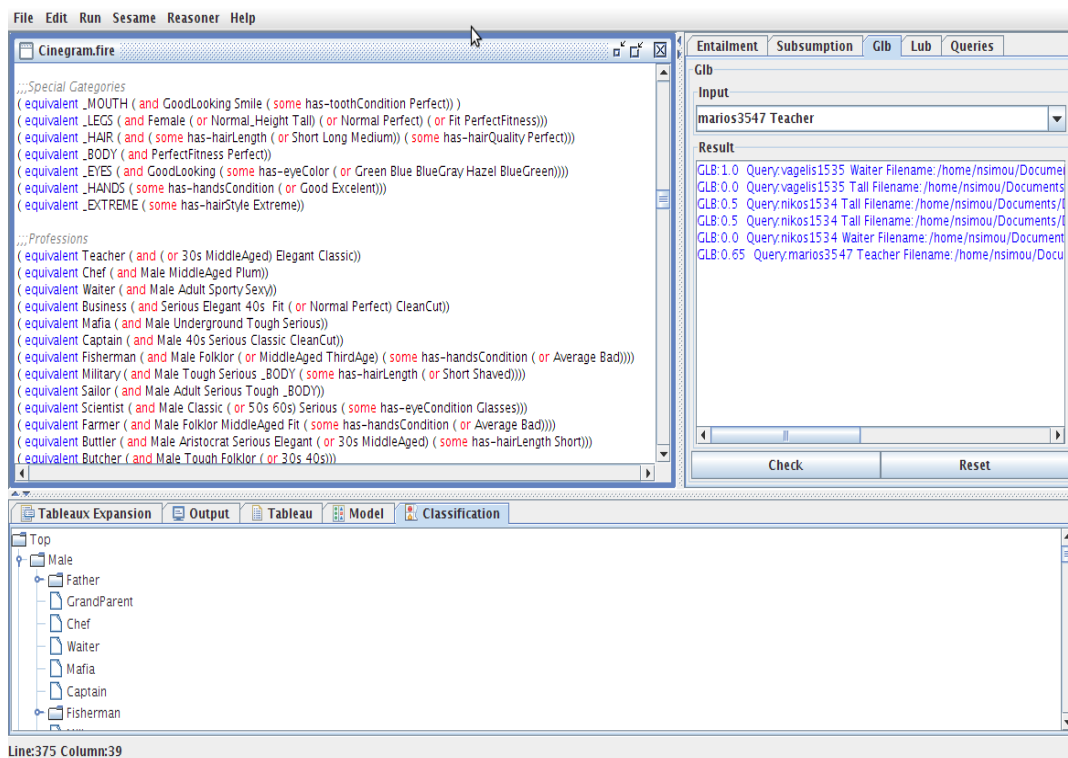
4.1.2 Γραφικό Περιβάλλον

Το γραφικό περιβάλλον του συστήματος ασαφούς συλλογιστικής FiRE φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Αποτελείται από τρία κύρια τμήματα, το τμήμα επεξεργασίας γνώσης πάνω αριστερά, το τμήμα των ερωτήσεων πάνω δεξιά και το τμήμα των πληροφοριών κάτω.

Στο τμήμα επεξεργασίας της γνώσης που βρίσκεται πάνω αριστερά ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μια ασαφή βάση γνώσης ή να επεξεργαστεί μια υπάρχουσα γνώση σε σύνταξη fuzzy KRSS. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE υποχρεώνει το χρήστη να έχει δηλώσει ένα λεξιλόγιο, για να είναι έγκυρη η γνώση του, ενώ η δήλωση αξιωμάτων καθώς και ισχυρισμών είναι προαιρετική.

Χρησιμοποιώντας το τμήμα ερωτήσεων ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει διαφορετικά είδη ερωτήσεων που αφορούν τη βάση γνώσης. Οι ερωτήσεις αυτές μπορεί να είναι ερωτήσεις λογικής συνεπαγωγής ενός ισχυρισμού (*entailment queries*), ερωτήσεις υπαγωγής εννοιών (*subsumption queries*), ερωτήσεις μέγιστου κάτω φράγματος (*glb queries*) και ελάχιστου άνω φράγματος (*lub queries*) ενός ισχυρισμού ή διαφορετικά είδη ασαφών συζευκτικών ερωτημάτων (*fuzzy conjunctive queries*). Οι υπηρεσίες συλλογιστικής που υποστηρίζονται από το FiRE είναι το αντικείμενο της επόμενης ενότητας όπου θα παρουσιαστεί αναλυτικά η σύνταξη των ερωτημάτων μαζί με παραδείγματα. Όλα τα είδη των ερωτήσεων πραγματοποιούνται με τον ίδιο τρόπο,

Σχήμα 4.1: Το γραφικό περιβάλλον του FiRE.



επιλέγοντας δηλαδή την κατάλληλη ετικέτα (tab) από το τμήμα ερωτήσεων, έπειτα τυπώνοντας την ερώτηση στο πεδίο εισόδου (Input) και πατώντας το κουμπί έλεγχου (Check). Τα αποτελέσματα του ερωτήματος παρουσιάζονται στο χώρο αποτελεσμάτων (Result), ακριβώς κάτω από το πεδίο εισόδου. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα πατώντας το κουμπί της επαναφοράς αρχικών ρυθμίσεων (Reset) να σβήσει τις αποθηκευμένες ερωτήσεις στην στοίβα εισόδου, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών από το χώρο αποτελεσμάτων.

Στο τμήμα των πληροφοριών προβάλλονται χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν το χρηστή ανάλογα με την λειτουργία που εκτελείται από το FiRE. Στην επιφάνεια με την ετικέτα «Tableau expansion» παρουσιάζεται αναλυτικά η δημιουργία του tableau καθώς και ο τρόπος που επεκτείνεται από την εφαρμογή των κανόνων. Στην επιφάνεια με ετικέτα «Output» παρουσιάζονται τα πιθανά συντακτικά λάθη της βάσης γνώσης ή στη περίπτωση που η βάση γνώσης είναι σωστά ορισμένη παρουσιάζεται το λεξιλόγιο της, τα αξιώματα και το σώμα ισχυρισμών που έχουν οριστεί. Στην επιφάνεια με ετικέτα «Tableau» παρουσιάζεται συνοπτικά το τελικό Tableau που κατασκευάστηκε για μια ικανοποιήσιμη γνώση, ενώ στην επιφάνεια με ετικέτα «Model» παρουσιάζεται ένα μοντέλο της γνώσης. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει καθολική ταξινόμηση των εννοιών της οποίας το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην επιφάνεια με ετικέτα «Classification» με τη μορφή δέντρου.

4.1.3 Υπηρεσίες Συλλογιστικής

Οι βασικότερες υπηρεσίες συλλογιστικής που υποστηρίζονται από μια μηχανή συλλογιστικής είναι ο έλεγχος ικανοποιησιμότητας μιας βάσης γνώσης, ο έλεγχος υπαγωγής δυο εννοιών και ο έλεγχος για τη λογική συνεπαγωγή ενός ισχυρισμού σύμφωνα με μια βάση γνώσης. Οι υπηρεσίες αυτές είναι διαθέσιμες και στις ασαφείς

ΠΛ και επιπρόσθετα, λόγω των ασαφών ισχυρισμών, υποστηρίζονται δύο ακόμα υπηρεσίες συλλογιστικής, αυτές του μέγιστου κάτω φράγματος και του ελάχιστου άνω φράγματος.

Ο έλεγχος ικανοποιησιμότητας μιας βάσης γνώσης (*satisfiability of a KB*) γίνεται με την κατασκευή ενός ασαφούς f_{KD} -*SHIN* tableau κάνοντας χρήση των τεχνικών βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Αναλυτικότερα, αρχικά εφαρμόζεται η τεχνική για κανονικοποίηση των βαθμών και έπειτα η διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμών. Στη συνέχεια, σύμφωνα με το σώμα ορολογίας και τις τεχνικές της λεκτικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης, του οκνηρού ξεδιπλώματος και των λοιπών τεχνικών όταν αυτές είναι εφαρμόσιμες, εφαρμόζονται οι κανόνες επεκτάσεις για το σώμα ισχυρισμών. Εάν εφαρμοστούν όλοι οι κανόνες σε όλους τους κόμβους (δηλαδή σε όλα τα επιμέρους τμήματα του σώματος ισχυρισμών) χωρίς να σχηματιστεί κάποια αντίφαση, βρεθεί δηλαδή μοντέλο, τότε η βάση γνώσης είναι ικανοποιήσιμη. Ο έλεγχος αυτός από το γραφικό περιβάλλον εργασίας πραγματοποιείται επιλέγοντας «Abox Consistency» από το μενού «Run».

Όπως είδαμε οι έλεγχοι για τη λογική συνεπαγωγή ενός ισχυρισμού βάσει μιας βάσης γνώσης καθώς και ο έλεγχος υπαγωγής δυο εννοιών ανάγονται στο πρόβλημα της ικανοποιησιμότητας όπως γίνεται και στις κλασικές ΠΛ. Πιο συγκεκριμένα, για να ελεγχθεί η λογική συνεπαγωγή κάποιου ισχυρισμού φ τέτοιου ώστε $\Sigma \models \varphi \triangleright n$ θα πρέπει $\langle T, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{\neg\varphi \triangleright n\} \rangle$ να είναι μη-ικανοποιήσιμη. Σε αυτή την περίπτωση ελέγχεται μονάχα το τμήμα εκείνο του σώματος ισχυρισμών στο οποίο ανήκει το άτομο που περιέχεται στον ισχυρισμό φ . Εάν δηλαδή ζητείται ο έλεγχος του ισχυρισμού $(a : C)$, τότε μονάχα στο τμήμα του σώματος ισχυρισμού που περιλαμβάνει το άτομο a θα γίνει έλεγχος ικανοποιησιμότητας, εφαρμόζοντας έπειτα τις τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο έλεγχος για την λογική συνεπαγωγή μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του FiRE πραγματοποιείται με εκφράσεις της μορφής

(instance άτομο f_{KD} -*SHIN*-έννοια \bowtie βαθμός)ή

άτομο f_{KD} -*SHIN*-έννοια \bowtie βαθμός

στο τμήμα ερωτήσεων με ετικέτα «Entailment».

Παράδειγμα 4.1.4 Για την λογική συνεπαγωγή του ισχυρισμού ((ΒΑΓΓΕΛΗΣ : Ψηλός) ≥ 0.7) μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του FiRE γράφουμε

(instance ΒΑΓΓΕΛΗΣ Ψηλός ≥ 0.7)

ΒΑΓΓΕΛΗΣ Ψηλός ≥ 0.7

Από την άλλη για τον έλεγχο της υπαγωγής δυο εννοιών $C \sqsubseteq D$ βάσει μιας Σ θα πρέπει $\langle T, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{(a : C) \geq n, (a : D) < n\} \rangle$ να είναι μη-ικανοποιήσιμη για κάθε $n \in [0, 1]$. Επειδή όμως ο έλεγχος της μη-ικανοποιησιμότητας μιας βάσης γνώσης για κάθε βαθμό $n \in [0, 1]$ δεν είναι δυνατή, γίνεται έλεγχος για τη μη-ικανοποιησιμότητα της βάσης γνώσης μόνο για δυο τυχαία επιλεγμένες τιμές από τα διαστήματα $(0, 0.5]$ και $(0.5, 1]$ όπως αποδεικνύεται στο [94]. Πιο αναλυτικά, το FiRE για τον έλεγχο $C \sqsubseteq D$ μ.β.τ Σ κατασκευάζει δυο σώματα ισχυρισμών για ένα τυχαίο άτομο a δηλαδή $\langle T, \mathcal{R}, \mathcal{A} \cup \{(a : C) \geq n, (a : D) < n\} \rangle$ με $n \in \{0.21, 0.71\}$ τα οποία για να ισχύει η υπαγωγή θα πρέπει να είναι μη-ικανοποιήσιμα. Ο έλεγχος για την υπαγωγή δύο f_{KD} -*SHIN* εννοιών " f_{KD} -*SHIN* – έννοια₁" και " f_{KD} -*SHIN* – έννοια₂" μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του FiRE πραγματοποιείται με εκφράσεις της μορφής

(implies f_{KD} -*SHIN* – έννοια₁ f_{KD} -*SHIN* – έννοια₂)ή

$$f_{KD-SHIN} - \text{έννοια}_1 \quad f_{KD-SHIN} - \text{έννοια}_2$$

στο τμήμα ερωτήσεων με ετικέτα «Subsumption».

Παράδειγμα 4.1.5 Για τον έλεγχο υπαγωγής Άντρας \sqsubseteq Άνθρωπος μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του FiRE γράφουμε

```
( implies Άντρας Άνθρωπος )
Άντρας Άνθρωπος
```

Οι υπηρεσίες συλλογιστικής του μέγιστου κάτω και του ελάχιστου άνω φράγματος είναι υπηρεσίες που υπάρχουν μονάχα στις ασαφείς ΠΛ και βασίζονται στο γεγονός ότι ένα άτομο μπορεί να συμμετέχει σε μια έννοια με περισσότερους από ένα βαθμούς. Σκοπός λοιπόν αυτών των υπηρεσιών είναι να βρεθεί το μέγιστο κάτω και το ελάχιστο κάτω φράγμα αντίστοιχα, με το οποίο μπορεί ένα άτομο να συμμετέχει σε μια έννοια. Ο υπολογισμός τους ανάγεται στην ικανοποιησιμότητα, οπότε και σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζονται οι τεχνικές βελτιστοποίησης για τον αλγόριθμο του ασαφή tableau που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Εκτενέστερα, για τον υπολογισμό του μέγιστου κάτω φράγματος, όπως είδαμε, πέρα από τις τεχνικές βελτιστοποίησης ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία, που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.4.6, έτσι ώστε να μειωθεί ο χώρος αναζήτησης. Από την άλλη το ελάχιστο άνω φράγμα υπολογίζεται βάσει του μέγιστου κάτω φράγματος μια και όπως αποδεικνύεται στο [94] $\text{lub}(\Sigma, a : C) = 1 - \text{glb}(\Sigma, a : \neg C)$. Ο έλεγχος για το μέγιστο κάτω ή για το ελάχιστο άνω φράγμα ενός ισχυρισμού "άτομο $f_{KD-SHIN} - \text{έννοια}$ " μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του FiRE πραγματοποιείται με εκφράσεις της μορφής

```
(instance άτομο  $f_{KD-SHIN} - \text{έννοια}$  )ή
      άτομο  $f_{KD-SHIN} - \text{έννοια}$ 
```

στο τμήμα ερωτήσεων με ετικέτα «Glb» και «Lub» αντίστοιχα.

Παράδειγμα 4.1.6 Για τον έλεγχο του μέγιστου κάτω ή του ελάχιστου άνω φράγματος του ισχυρισμού ((ΒΑΓΓΕΛΗΣ : Πατέρας)) μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του FiRE γράφουμε

```
( instance ΒΑΓΓΕΛΗΣ Πατέρας )
ΒΑΓΓΕΛΗΣ Πατέρας
```

Τέλος, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να βρει το μέγιστο κάτω ή το ελάχιστο άνω φράγμα όλων των ατόμων της βάσης γνώσης σε όλες έννοιες της βάσης γνώσης (άπλες ή έννοιές που έχουν δηλωθεί στο σώμα ορολογίας) επιλέγοντας «Global Glb» ή «Global Lub» αντίστοιχα από το μενού «Run». Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο με την παρακάτω σύνταξη

άτομο: $f_{KD-SHIN} - \text{έννοια}:\text{βαθμός}$

Παράδειγμα 4.1.7 Εάν υποθέσουμε πως το MKΦ του ατόμου ΒΑΓΓΕΛΗΣ στις έννοιες Ψηλός, Αδύνατος, Άντρας και Πατέρας είναι 0.6, 0.5, 1 και 1 αντίστοιχα και του ατόμου ΜΑΡΙΑ στις έννοιες Γυναίκα, Αδύνατος 1 και 0.8, ενώ το MKΦ των υπόλοιπων ατόμων του παραδείγματος 4.1.1 στις έννοιες είναι 0, τότε το αρχείο που δημιουργείται έπειτα από την εφαρμογή του συνολικού MKΦ θα έχει την παρακάτω μορφή.

ΒΑΓΓΕΛΗΣ: Ψηλός: 0.6
ΒΑΓΓΕΛΗΣ: Αδύνατος: 0.5
ΒΑΓΓΕΛΗΣ: Άντρας: 1
ΒΑΓΓΕΛΗΣ: Πατέρας: 1
ΜΑΡΙΑ: Γυναίκα: 1
ΜΑΡΙΑ: Αδύνατος: 0.8

4.2 Αξιολόγηση των Υπηρεσιών Συλλογιστικής του FiRE

Οι ασαφείς ΠΛ αποτελούν μια σχετικά πρόσφατη επέκταση των ΠΛ και προς το παρόν δεν υπάρχει για αυτές κάποια προτυποποίηση έτσι ώστε να υποστηρίζονται ασαφείς ισχυρισμοί σε μια οντολογία τύπου OWL. Για αυτό το λόγο δεν υπάρχει και κάποια ασαφή οντολογία η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ασαφών συστημάτων συλλογιστικής. Οι οντολογίες που υπάρχουν για την αξιολόγηση των κλασικών συστημάτων συλλογιστικής, από την άλλη, δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν, μια και στην πλειοψηφία τους δεν περιέχουν κάποιο σώμα ισχυρισμών. Οι οντολογίες αυτές έχουν κατασκευαστεί για την αξιολόγηση της υπηρεσίας της ταξινόμησης εννοιών των κλασικών συστημάτων συλλογιστικής, για την οποία υπάρχουν ειδικές κατηγορίες βελτιστοποίησης όπως οι βελτιστοποιήσεις υπαγωγής και μερικής διάταξης [42, 77, 76]. Η εργασία μας στην συλλογιστική για ασαφείς ΠΛ εστιάστηκε σε τεχνικές για την βελτιστοποίηση της συλλογιστικής με ασαφή σώματα ισχυρισμών. Περιοριστήκαμε σε αυτές τις τεχνικές γιατί στην περίπτωση της f_{KD} -*SHLN* δεν χρησιμοποιείται ασαφής υπαγωγή [162] και η υπαγωγή εννοιών της ταυτίζεται με αυτή της κλασικής *SHLN*. Οι ήδη υπάρχουσες οντολογίες που περιέχουν σώμα ισχυρισμών, από την άλλη, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από το FiRE. Το γεγονός, όμως, πως οι τεχνικές βελτιστοποίησης που προτείνουμε λειτουργούν με ελέγχους βάσει των βαθμών του σώματος ισχυρισμών επιβραδύνει σημαντικά την απόδοση του FiRE, για κλασικές βάσεις γνώσης, έτσι δεν θα μπορούσαμε να έχουμε μια αντικειμενική αξιολόγηση του συστήματος. Έτσι για την αξιολόγηση του συστήματος ασαφούς συλλογιστικής FiRE ήταν απαραίτητη η δημιουργία μιας ασαφούς βάσης γνώσης.

Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως επιχειρήθηκε μια σύγκριση με τα συστήματα συλλογιστικής FuzzyDL [217] και DeLoorean [215]. Το μεν DeLoorean βασίζεται σε έναν αλγόριθμο αναγωγής μια ασαφούς βάσης γνώσης σε μια κλασική και δεν είναι διαθέσιμο. Παρόλο που η τεχνική αυτή υπόσχεται αποδοτικούς τρόπους συλλογιστικής για τις ασαφείς ΠΛ, μέσω της χρήσης των βελτιστοποιημένων αλγορίθμων των κλασικών ΠΛ, δεν έχει αξιολογηθεί στην πράξη. Μάλιστα η τεχνική αυτή δημιουργεί πολύ μεγάλες ιεραρχίες ρόλων, οι οποίες είναι γνωστό από τις κλασικές ΠΛ ότι επιφέρουν σημαντική μείωση της απόδοσης των αλγορίθμων συλλογιστικής [65]. Από την άλλη μεριά, το σύστημα FuzzyDL [217], το οποίο είναι διαθέσιμο, παρουσιάζει απρόβλεπτη συμπεριφορά με αποτέλεσμα μια σύγκριση να μην ήταν δυνατή.

Το αντικείμενο αυτής της ενότητας είναι η αξιολόγηση του συστήματος συλλογιστικής FiRE και πιο συγκεκριμένα των τεχνικών βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πιο αναλυτικά, στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται ο τρόπος που δημιουργήσαμε μια ασαφή βάση γνώσης από πραγματικά δεδομένα,

έτσι ώστε να αξιολογήσουμε την απόδοση του FiRE. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση των τεχνικών βελτιστοποίησης καθώς και μια σύγκριση της απόδοσης του συστήματος μας κάνοντας χρήση των τεχνικών βελτιστοποίησης και χωρίς αυτές.

4.2.1 Δημιουργία της Ασαφούς Βάσης Γνώσης

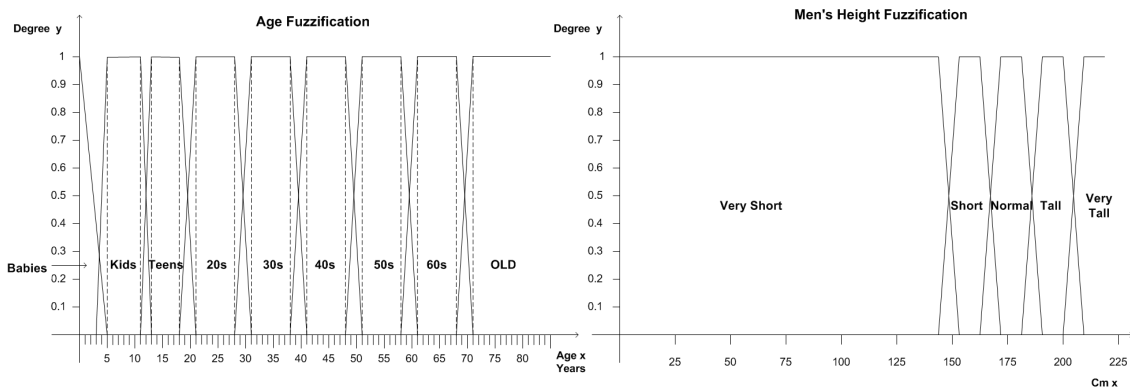
Για τη δημιουργία της ασαφούς βάσης γνώσης, που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος FiRE, τροποποιήσαμε την βάση δεδομένων μιας εταιρίας παραγωγής διαφημίσεων. Σε αυτή τη βάση δεδομένων η εταιρία είχε αποθηκευμένα τα χαρακτηριστικά 2140 μοντέλων, τα οποία είχαν περάσει από δοκιμαστικό, έχοντας σαν στόχο την εύρεση του μοντέλου με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ανάλογα με το διαφημιστικό. Τέτοιου είδους χαρακτηριστικά ήταν το ύψος, η ηλικία, ο σωματότυπος, το βάρος, η κατάσταση των δοντιών, το χρώμα και η κατάσταση των ματιών, το χρώμα, το μήκος των μαλλιών και το κούρεμα, η κατάσταση των χεριών κ.α. Εκτός των παραπάνω, χαρακτηρίζαν τα μοντέλα με κάποια ειδικά χαρακτηριστικά, βάσει της εμφάνισής τους, όπως το εμφανίσιμος, αθλητικός, άγριος κ.α. Τα χαρακτηριστικά αυτά έπαιζαν ιδιαίτερη σημασία για διαφημιστικά στα οποία απαιτούνταν μοντέλα για να παίξουν ρόλους συγκεκριμένων επαγγελματιών, όπως για παράδειγμα καθηγητής, μάγισσας κ.α.

4.2.1.1 Το Σώμα Ισχυρισμών

Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα υλοποιήσαμε μια ασαφή βάση γνώσης για την αξιολόγηση του συστήματος FiRE. Αρχικά, κάθε καταχωρημένο μοντέλο στη βάση δεδομένων της εταιρίας παραγωγής διαφημιστικών αποτελεί ένα άτομο της βάσης γνώσης. Το όνομα του ατόμου δίνεται από το μικρο όνομα του μοντέλου μαζί με το μοναδικό αριθμό καταχώρησης του. Για την δημιουργία του ασαφούς σώματος ισχυρισμών χρησιμοποιήθηκαν ασαφείς διαμερίσεις, για τις καταχωρήσεις που δινόταν αριθμητικές τιμές όπως το ύψος, η ηλικία, το βάρος και άλλες, δηλώνοντας νέες ονομαστικές έννοιες. Για τις καταχωρήσεις που κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατό, χρησιμοποιήθηκαν είτε κλασικοί ισχυρισμοί, είτε τυχαία δήλωση βαθμών συμμετοχής. Έτσι για παράδειγμα ο διαμερισμός όσο αφορά την ηλικία έδωσε τις έννοιες Μωρό, Παιδί, Έφηβος, 20άρης, 30άρης, 40άρης, 50άρης, 60άρης, και Γέρος. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από την γραφική των ασαφών διαμερίσεων που φαίνεται στο Σχήμα 4.2, κάποιος που είναι 29 ετών συμμετέχει στις έννοιες 20άρης και 30άρης με βαθμούς 0.35 και 0.65 αντίστοιχα. Με παρόμοιο τρόπο από την ασαφή διαμέριση του ύψους πήραμε τις έννοιες Πολύ-Κοντός, Κοντός, Κανονικού-Ύψους, Ψηλός και Πολύ-Ψηλός. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως λόγω της ιδιαιτερότητας του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού (όπως και του βάρους) χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ασαφείς διαμερίσεις για τους άντρες και για τις γυναίκες μοντέλα.

Επιπρόσθετα, κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αναπαραστάθηκαν με τη δημιουργία ρόλων. Για παράδειγμα για την περιγραφή της κατάστασης των δοντιών ενός μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο ρόλος έχει-ΚατάστασηΔοντιών σε συνδυασμό με κάποιες ασαφείς έννοιες που περιέγραφαν την κατάσταση των δοντιών όπως π.χ. η έννοια Καλή. Για τέτοιου είδους ασαφείς έννοιες που περιέγραφαν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκε τυχαία δήλωση βαθμών. Πρέπει να επισημάνουμε

Σχήμα 4.2: Οι ασαφείς διαμερίσεις για την ηλικία και το ύψος ενός άντρα.



πως στους ισχυρισμούς ρόλων δεν ήταν δυνατή η χρήση κάποιας ασαφούς διαμέρισης και για αυτό το λόγο οι ισχυρισμοί ρόλων αυτού του είδους έχουν γίνει με βαθμό συμμετοχής 1.

Παράδειγμα 4.2.1 *Ένα απόσπασμα του σώματος ισχυρισμών για το μοντέλο michalis1539 το οποίο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια των ασαφών διαμερίσεων φαίνεται παρακάτω.*

$$\begin{aligned} &\langle michalis1539 : 20άρης \geq 0.66 \rangle, \\ &\langle michalis1539 : 30άρης \geq 0.33 \rangle, \\ &\langle michalis1539 : \text{Κανονικού} - \Upsilon\psiους \geq 0.5 \rangle, \\ &\langle michalis1539 : \Psiηλός \geq 0.5 \rangle, \\ &\langle michalis1539 : \text{Εμφανίσιμος} \geq 1 \rangle, \\ &\langle (michalis1539, \text{κόμβος}) : \text{έχει} - \text{ΚατάστασηΔοντιών} \geq 1 \rangle, \\ &\langle \text{κόμβος} : \text{Καλή} \geq 0.7 \rangle \end{aligned}$$

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ένα σώμα ορολογίας με κατά μέσο όρο 33 ισχυρισμούς για κάθε άτομο. Παρόλο που το σώμα ισχυρισμών είναι αντιπροσωπευτικό για το συγκεκριμένο πεδίο αναπαράστασης δεν αποτελεί το μέσο τυπικό ασαφές σώμα ισχυρισμών που μπορεί να έχουμε για μια εφαρμογή. Αυτό συμβαίνει γιατί σύμφωνα με την παραπάνω αναπαράσταση το κάθε άτομο του σώματος ισχυρισμών δεν συνδέεται με κάποιο από τα άλλα άτομα. Επιπλέον, η χρήση των ασαφών διαμερίσεων δεν επιτρέπει τη δημιουργία αντιφάσεων σε ένα κόμβο λόγω της ύπαρξης της ίδιας έννοιας με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής μια και κάθε έννοια εμφανίζεται μονάχα μια φορά σε ένα κόμβο. Ακόμα, οι έννοιες που χρησιμοποιούνται στο σώμα ισχυρισμών είναι ονομαστικές και όχι σύνθετες έννοιες. Για τους παραπάνω λόγους τροποποιούσαμε το αρχικό σώμα ισχυρισμών, δημιουργώντας παραλλαγές του, ανάλογα με τις τεχνικές βελτιστοποίησης που δοκιμάζαμε.

4.2.1.2 Το Σώμα Ορολογίας και το Σώμα Ρόλων

Στο σώμα ορολογίας της βάσης γνώσης δηλώσαμε έννοιες σύμφωνα με τις απαιτήσεις των παραγώγων για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Έτσι συνδυάζοντας τις ονομαστικές έννοιες κατασκευάστηκαν σύνθετες έννοιες που αφορούν χαρακτηριστικά των μοντέλων όπως η ηλικία, κάποιο ειδικό χαρακτηριστικό γνώρισμα και κάποια

επαγγέλματα που θα μπορούσαν να υποδυθούν σε ένα διαφημιστικό. Για παράδειγμα η έννοια *Επιστήμονας* ορίστηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις των διαφημιστικών σαν άντρας, ηλικίας γύρω στα 50 με 60 με κλασικό παρουσιαστικό. Ακόμη ορίστηκαν αξιώματα για να δηλώσουν πως κάποιες έννοιες είναι ξένες, όπως οι έννοιες *Άντρας* και *Γυναίκα*, καθώς και αξιώματα που όριζαν το σύνολο τιμής και το πεδίο ορισμού των ρόλων, όπως ότι το πεδίο ορισμού του *έχει-ΚατάστασηΔοντιών* είναι η έννοια *Άνθρωπος* ενώ το σύνολο τιμών του είναι μια από τις έννοιες *Καλή*, *ΠολύΚαλή* και *Κακή*. Ένα απόσπασμα του σώματος ορολογίας που δηλώθηκε φαίνεται στον Πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2: Ένα απόσπασμα του σώματος ορολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του FiRE.

$\mathcal{T} = \{\text{Άνθρωπος}$	\sqsubseteq	$\text{Άντρας} \sqcup \text{Γυναίκα},$
ΚατάστασηΔοντιών	\equiv	$\text{Καλή} \sqcup \text{ΠολύΚαλή} \sqcup \text{Κακή},$
$\text{Άντρας} \sqcap \text{Γυναίκα}$	\sqsubseteq	$\perp,$
$\text{Έχει-ΚατάστασηΔοντιών.}\mathcal{T}$	\sqsubseteq	$\text{Άνθρωπος},$
\mathcal{T}	\sqsubseteq	$\text{Έχει-ΚατάστασηΔοντιών.ΚατάστασηΔοντιών},$
Μαθητής	\equiv	$\text{Παιδί} \sqcup \text{Έφηβος},$
Μεσήλικας	\equiv	$40\text{άρης} \sqcup 50\text{άρης},$
Πατέρας	\equiv	$\text{Άντρας} \sqcap (30\text{άρης} \sqcup \text{Μεσήλικας}),$
Παππούς	\equiv	$\text{Άντρας} \sqcap \text{ΤρίτηςΗλικίας} \sqcap \text{Φολκλόρ},$
Πόδια	\equiv	$\text{Γυναίκα} \sqcap (\text{Κανονικό-Ύψος} \sqcup \text{Ψηλός})$ $\sqcap (\text{Κανονικό-Σωματότυπο} \sqcup \text{Τέλειο-Σωματότυπο})$ $\sqcap (\text{Αδύνατος} \sqcup \text{Γυμνασμένος}),$
Μάτια	\equiv	$\text{Εμφανίσιμος} \sqcap \text{Έχει-χρώμαΜατιών.}(\text{Πράσινα}$ $\sqcup \text{Μπλέ} \sqcup \text{Γαλάζιο-Γκρί} \sqcup \text{Μελί} \sqcup \text{Γαλαζοπράσινα}),$
Δάσκαλος	\equiv	$(30\text{άρης} \sqcup \text{Μεσήλικας}) \sqcap \text{Κομφός} \sqcap \text{Κλασικός},$
Ψαράς	\equiv	$\text{Άντρας} \sqcap \text{Φολκλόρ} \sqcap (\text{Μεσήλικας} \sqcup \text{ΤρίτηςΗλικίας}),$
Επιστήμονας	\equiv	$\text{Άντρας} \sqcap \text{Κλασικός} \sqcap (50\text{άρης} \sqcup 60\text{άρης})$ $\sqcap \text{Σοβαρός} \sqcap \text{Έχει-ΚατάστασηΜατιών.Γυαλιά} \}$

Με παρόμοιο τρόπο ορίσαμε 83 έννοιες εκ των οποίων οι 22 είναι γενικευμένα ή κυκλικά αξιώματα. Για την αξιολόγηση του συστήματος FiRE χρησιμοποιήσαμε διαφορετικά σώματα ορολογίας τα οποία διαφοροποιούνται σύμφωνα με την εκφραστικότητα της ΠΛ που χρησιμοποιούσαμε για την δήλωση των αξιωμάτων.

Τέλος, όσον αφορά το σώμα ρόλων δημιουργήθηκαν 18 αξιώματα υπαγωγής ρόλων όπως *έχει-ΧρώμαΜαλλιών* \sqsubseteq *έχει-Μαλλία*, ενώ οι ρόλοι *έχει-Συνεργαστεί* και *έχει-Φίλο* δηλώθηκαν σαν μεταβατικοί και αντίστροφοι.

4.2.2 Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος συλλογιστικής FiRE, με την βοήθεια των τεχνικών βελτιστοποίησης που προτείναμε, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που μελετήσαμε, όπως είδαμε και στην προηγούμενη ενότητα, μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες. Στις βελτιστοποιήσεις μείωσης απαιτήσεων αποθήκευσης, στις βελτιστοποιήσεις προεπεξεργασίας, και στις βελτιστοποιήσεις ικανοποιησιμότητας. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά οι τροποποιήσεις που έγιναν στη βάση γνώσης για την επιμέρους αξιολόγηση αυτών των τεχνικών, μαζί με τα αποτελέσματα. Όλα τα παρακάτω πειράματα πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το σύστημα συλλογιστικής FiRE σε

υπολογιστή με επεξεργαστή Core 2 Duo 2G και 2Gb μνήμης στον οποίο ήταν εγκατεστημένο το λειτουργικό Ubuntu 9.04.

4.2.2.1 Τεχνικές Μείωσης Απαιτήσεων Χώρου

Στις τεχνικές μείωσης απαιτήσεων χώρου ανήκουν η τεχνική κανονικοποίησης των βαθμών και η διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμών. Για να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητα αυτών των τεχνικών πραγματοποιήσαμε μια σειρά πειραμάτων, με διαφορετικά σώματα ισχυρισμών, εξετάζοντας το χρόνο που χρειάζεται το σύστημα συλλογιστικής FiRE για να υπολογίσει τη συνέπεια του σώματος ισχυρισμών με, και χωρίς τη χρήση των τεχνικών μείωσης απαιτήσεων χώρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εκφραστικότητα του σώματος ορολογίας δεν κάνει διαφορά, έτσι χρησιμοποιήθηκε σώμα ορολογίας εκφραστικότητας f_{KD} - ALC χωρίς τη χρήση γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων. Επειδή, όμως, οι ασαφείς διαμερίσεις που χρησιμοποιήσαμε για τη δημιουργία του σώματος ισχυρισμών δεν επιτρέπει την ύπαρξη αντιφάσεων, λόγω ισχυρισμών της ίδιας έννοιας στον ίδιο κόμβο αλλά ούτε τη σύνδεση των ατόμων μεταξύ τους, χρησιμοποιήσαμε διάφορες παραλλαγές του σώματος ισχυρισμών. Ενώσαμε το 50% και το 80% των ατόμων για να τροποποιήσουμε τον αριθμό των τμημάτων του σώματος ισχυρισμών που σχηματίζονταν, επηρεάζοντας έτσι την τεχνική της διχοτόμησης. Με αυτό το τρόπο δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά σώματα ισχυρισμών μεγέθους 2140, 1070 και 428 αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, προσθέσαμε από 1-5 ισχυρισμούς για την ίδια σύνθετη f_{KD} - $SHIN$ έννοια σε ένα κόμβο επιτρέποντας και μη την δημιουργία αντίφασης, για να μελετήσουμε την απόδοση της τεχνικής της κανονικοποίησης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας, για μια ασαφή βάση γνώσης με 2140 άτομα, φαίνονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση των τεχνικών μείωσης απαιτήσεων χώρου.

Τμήματα ABox	Είδος Ισχυρισμών	FiRE	B-FiRE
2140	1 για κάθε έννοια	8.523 ms	2.263 ms
1070	1 για κάθε έννοια	8.523 ms	3.625 ms
428	1 για κάθε έννοια	8.523 ms	4.771 ms
2140	$1 \geq$ για κάθε έννοια-χωρίς αντίφαση	18.390 ms	3.096 ms
1070	$1 \geq$ για κάθε έννοια-χωρίς αντίφαση	18.390 ms	4.399 ms
428	$1 \geq$ για κάθε έννοια-χωρίς αντίφαση	18.390 ms	5.452 ms
2140	$1 \geq$ για κάθε έννοια-πιθανή αντίφαση	3.284 ms	508 ms
1070	$1 \geq$ για κάθε έννοια-πιθανή αντίφαση	3.284 ms	508 ms
428	$1 \geq$ για κάθε έννοια-πιθανή αντίφαση	3.284 ms	508 ms

Όπως παρατηρούμε η τεχνική της κανονικοποίησης καθώς και της διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών, βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος FiRE. Στην περίπτωση που έχουμε μόνο έναν ισχυρισμό, για κάθε έννοια, παρατηρούμε πως ο χρόνος απόκρισης του μη βελτιστοποιημένου FiRE είναι ανεξάρτητος από τα τμήματα του σώματος ισχυρισμών που σχηματίζονται, γεγονός αναμενόμενο. Από την άλλη, το FiRE με τη χρήση των τεχνικών μείωσης των απαιτήσεων χώρου αποδίδει πολύ καλύτερα. Σε αυτή την περίπτωση ενεργεί μόνο η τεχνική διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών, αφού η τεχνική της κανονικοποίησης των βαθμών και της

πρώρης ανίχνευσης αντίφασης δεν έχουν κάποιο αποτέλεσμα για 1 ισχυρισμό ανά έννοια. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι στην περίπτωση που κανένα άτομο δεν είναι ενωμένο, μέσω ενός ρόλου, με κάποιο άλλο άτομο και έχουμε 2140 διαφορετικά τμήματα του σώματος ισχυρισμών ο χρόνος απόκρισης έχει μειώνεται σημαντικά, ενώ για λιγότερα τμήματα ο χρόνος αυξάνεται. Στις περιπτώσεις που είναι πιθανό να έχουμε πάνω από έναν ισχυρισμό ανά έννοια, αλλά χωρίς να σχηματίζεται αντίφαση, έχουμε σχεδόν τριπλάσιο χρόνο απόκρισης στο μη βελτιστοποιημένο σύστημα, ενώ πολύ μικρή απόκλιση στο χρόνο του βελτιστοποιημένου σε σύγκριση με τις προηγούμενες τιμές του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο βελτιστοποιημένο σύστημα πρώτα γίνεται ο έλεγχος για κανονικοποίηση και πρόωρη αντίφαση και έπειτα για την διχοτόμηση του σώματος ισχυρισμών, άρα η διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις είναι δικαιολογημένα πολύ μικρή. Τέλος, στις περιπτώσεις που μπορεί να υπάρχει αντίφαση σε ένα κόμβο, παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ χαμηλότερο χρόνο απόκρισης και στις δυο περιπτώσεις. Αυτό στη περίπτωση του μη βελτιστοποιημένου αλγορίθμου εξηγείται γιατί μόλις εντοπιστεί κάποια αντίφαση σταματάει ο αλγόριθμος tableau, ενώ στη περίπτωση του βελτιστοποιημένου συστήματος η αντίφαση εντοπίζεται πολύ γρήγορα λόγω των κανόνων της πρόωρης αντίφασης.

4.2.2.2 Τεχνικές Προεπεξεργασίας

Στις τεχνικές προεπεξεργασίας συγκαταλέγονται το οκνηρό ξεδίπλωμα και η λεκτική κανονικοποίηση και κωδικοποίηση. Για την εξέταση της απόδοσης αυτών των τεχνικών μελετήσαμε το χρόνο που χρειάζεται το σύστημα συλλογιστικής FiRE για να υπολογίσει τη συνέπεια του σώματος ισχυρισμών. Όπως πριν, έτσι και σε αυτή την περίπτωση έπρεπε να τροποποιήσουμε το σώμα των ισχυρισμών κατάλληλα διότι, το αρχικό σώμα ορολογίας που προήλθε από τις διαμερίσεις, επιτρέπει μόνο την ύπαρξη ονομαστικών εννοιών σε ένα κόμβο. Για να αξιολογήσουμε το οκνηρό ξεδίπλωμα προσθέσαμε στους κόμβους 1-5 τριάδες συμμετοχής με έννοιες για τις οποίες είχαν οριστεί αξιώματα στο σώμα ορολογίας επιτρέποντας και μη την εμφάνιση αντίφασης. Σε αυτή την περίπτωση το σώμα ορολογίας ήταν εκφραστικότητας $f_{KD-SHIN}$ χωρίς γενικευμένα ή κυκλικά αξιώματα, ενώ χρησιμοποιήσαμε σώμα ισχυρισμών με 1000 άτομα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση της τεχνικής του οκνηρού ξεδιπλώματος.

Είδος Ισχυρισμών	FiRE	B-FiRE
χωρίς αντίφαση	11.981 ms	6.347 ms
με πιθανή αντίφαση	7.523 ms	1.425 ms

Όπως παρατηρούμε, και στις δύο περιπτώσεις η τεχνική του οκνηρού ξεδιπλώματος επιταχύνει το χρόνο απόκρισης του αλγορίθμου. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποια αντίφαση αυτό συμβαίνει γιατί μειώνεται σημαντικά ο χώρος του αλγορίθμου, ενώ στην περίπτωση που υπάρχει αντίφαση, αυτή εντοπίζεται πολύ πιο γρήγορα.

Για την αξιολόγηση της τεχνικής της λεξικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης λειτουργήσαμε αντίστροφα από πριν. Έτσι σε αυτή την περίπτωση αντί να προσθέσουμε έννοιες που έχουν δηλωθεί στο σώμα ορολογίας, προσθέσαμε τις ισοδύναμες τους

σύνθετες έννοιες. Όπως και παραπάνω χρησιμοποιήσαμε έννοιες εκφραστικότητας $f_{KD-SHLN}$ και βάση γνώσης με 1000 άτομα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Αξιολόγηση της απόδοσης του *FiRE* με και χωρίς την χρήση της τεχνικής της λεκτικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης.

Είδος Ισχυρισμών	FiRE	B-FiRE
χωρίς αντίφαση	12.121 ms	13.090 ms
με πιθανή αντίφαση	12.455 ms	2.525 ms

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε πως η τεχνική της λεξικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης όταν δεν σχηματίζεται αντίφαση στη βάση γνώσης μπορεί να επιβαρύνει την απόδοση του αλγορίθμου, ενώ αντίθετα εάν υπάρχει κάποια αντίφαση αυτή εντοπίζεται πολύ πιο γρήγορα βελτιώνοντας το χρόνο απόκρισης.

Τέλος, για να έχουμε μια συνολική αξιολόγηση του συστήματος με τη χρήση των τεχνικών προεπεξεργασίας πραγματοποιήσαμε και ένα τρίτο πείραμα. Αυτή την φορά προσθέσαμε από 4-7 τριάδες συμμετοχής με έννοιες που έχουν δηλωθεί στο σώμα ορολογίας, αλλά και τις ισοδύναμες τους σύνθετες έννοιες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Αξιολόγηση της απόδοσης του *FiRE* με και χωρίς την χρήση των τεχνικών προεπεξεργασίας.

Είδος Ισχυρισμών	FiRE	B-FiRE
χωρίς αντίφαση	13.897 ms	9.463 ms
με πιθανή αντίφαση	9.355 ms	2.001 ms

Γενικότερα, λοιπόν, παρατηρούμε ότι οι τεχνικές της προεπεξεργασίας βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος.

4.2.2.3 Τεχνικές Ικανοποιησιμότητας

Στις τεχνικές ικανοποιησιμότητας ανήκουν τεχνικές τριών διαφορετικών ειδών. Αρχικά η τεχνική των ιχνών και η πρώτη αναζήτηση κατά βάθος οι οποίες έχουν σαν σκοπό να μειώσουν το χώρο αναζήτησης της δομής tableau, σε βάσεις γνώσης διαφορετικής εκφραστικότητας, τροποποιώντας τη σειρά εφαρμογής των κανόνων επέκτασης. Στη συνέχεια οι τεχνικές της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης, της τοπικής απλοποίησης και της σημασιολογικής διακλάδωσης που αποσκοπούν στη καλύτερη διαχείριση των διαζεύξεων που οδηγούν τον αλγόριθμο tableau σε, πολύ δαπανηρές για το χώρο του, διακλαδώσεις. Τέλος, οι βελτιστοποιήσεις για το μέγιστο κάτω φράγμα αφορούν τη συγκεκριμένη υπηρεσία συλλογιστικής, ενώ οι τεχνικές για τη διαχείριση των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων βελτιώνει την απόδοση του αλγορίθμου με χρήση γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων. Έτσι, για την αξιολόγηση των τεχνικών για την ικανοποιησιμότητα πραγματοποιήσαμε τριών ειδών πειράματα. Αρχικά, για την τεχνική των ιχνών χρησιμοποιήσαμε από 1-5 ισχυρισμούς εκφραστικότητας f_{KD-ALL}

σε κάθε κόμβο και βάσεις γνώσης διαφορετικών μεγεθών, για τον υπολογισμό της συνέπειας του σώματος ισχυρισμών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: Αξιολόγηση της απόδοσης του *FiRE* με και χωρίς τη χρήση της τεχνικής των ιχνών.

Άτομα ΒΣ	FiRE	B-FiRE
500	2.446 ms	1.124 ms
700	5.131 ms	2.899 ms
1000	7.709 ms	5.983 ms
2140	18.294 ms	8.752 ms

Παρατηρούμε ότι το βελτιστοποιημένο σύστημα με τη χρήση της τεχνικής των ιχνών απαντάει σε πολύ λιγότερο χρόνο για όλες τις βάσεις γνώσης, σχεδόν υποδιπλασιάζοντας το χρόνο απόκρισης. Αυτό οφείλεται στην πολύ καλή διαχείριση του χώρου που επιτυγχάνεται με αυτή την τεχνική όταν δεν υπάρχουν αντίστροφοι ρόλοι. Με παρόμοιο σκεπτικό για την αξιολόγηση της τεχνικής που πρώτα κάνει αναζήτηση βάθους χρησιμοποιήσαμε από 1-5 ισχυρισμούς εκφραστικότητας f_{KD} -*SHLN* σε κάθε κόμβο, με βάσεις γνώσης διαφορετικών μεγεθών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Αξιολόγηση της απόδοσης του *FiRE* με και χωρίς τη πρώτη αναζήτηση κατά βάθος.

Άτομα ΒΣ	FiRE	B-FiRE
500	3.920 ms	2.004 ms
700	8.131 ms	5.263 ms
1000	12.776 ms	7.195 ms
2140	23.183 ms	12.529 ms

Όπως παραπάνω, έτσι και τώρα παρατηρούμε πως η απόδοση του βελτιστοποιημένου συστήματος είναι πολύ καλύτερη ως προς το χρόνο απόκρισης, ανεξάρτητα από το μέγεθος της βάσης γνώσης. Παρατηρούμε ακόμη πως σε σύγκριση με τις προηγούμενες μετρήσεις εδώ ο χρόνος απόκρισης είναι μεγαλύτερος γεγονός που οφείλεται στην υψηλότερη εκφραστικότητα. Στη συνέχεια για την αξιολόγηση των τεχνικών που διαχειρίζονται με πιο αποτελεσματικό τρόπο τις διαζεύξεις τροποποιήσαμε το σώμα ισχυρισμών προσθέτοντας έννοιες που έχουν οριστεί στο σώμα ορολογίας και περιέχουν διαζεύξεις. Δημιουργήσαμε 2 ειδών σώματα ορολογίας για τα οποία υπήρχε μοντέλο, αλλά στο ένα ήταν πιθανό να υπάρχει κάποια αντίφαση μεταξύ των εννοιών στις διαζεύξεις, ενώ στο άλλο όχι. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων για βάση γνώσης με 1000 άτομα, εκφραστικότητας f_{KD} -*SHLN* για κάθε μια από τις τεχνικές ξεχωριστά και όλες μαζί φαίνεται στον Πίνακα 4.9.

Παρατηρούμε ότι, στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποια πιθανή αντίφαση μεταξύ των τριάδων συμμετοχής που προκαλείται από τις διαζεύξεις, ο χρόνος απόκρισης του βελτιστοποιημένου συστήματος είναι μεγαλύτερος από ότι είναι στο μη βελτιστοποιημένο. Αυτό φαίνεται παράξενο με μια πρώτη ματιά, είναι όμως φυσιολογικό μια και αυτές οι τεχνικές πραγματοποιούν επιπλέον ελέγχους που για τη συγκεκριμένη βάση

Πίνακας 4.9: Αξιολόγηση της απόδοσης του FiRE με και χωρίς την χρήση των τεχνικών για αποτελεσματική διαχείριση των διαζεύξεων.

Τεχνική	Είδος Ισχυρισμών	FiRE	B-FiRE
Οδηγούμενη οπισθοδρόμηση	Χωρίς αντίφαση	15.192 ms	16.006 ms
Τοπική Απλοποίηση	Χωρίς αντίφαση	15.192 ms	15.309 ms
Σημασιολογική Διακλάδωση	Χωρίς αντίφαση	15.192 ms	15.502 ms
Όλες	Χωρίς αντίφαση	15.192 ms	16.602 ms
Οδηγούμενη οπισθοδρόμηση	Με πιθανή αντίφαση	19.481 ms	8.440 ms
Τοπική Απλοποίηση	Με πιθανή αντίφαση	19.481 ms	12.184 ms
Σημασιολογική Διακλάδωση	Με πιθανή αντίφαση	19.481 ms	9.128 ms
Όλες	Με πιθανή αντίφαση	19.481 ms	9.034 ms

γνώσης δεν έχουν κάποια εφαρμογή. Στην περίπτωση, όμως, που υπάρχει μοντέλο αλλά είναι πιθανό να διαμορφωθεί κάποια αντίφαση μεταξύ των τριάδων συμμετοχής, που μπορεί όμως να αποφευχθεί λόγω των διαζεύξεων, παρατηρούμε και βελτίωση στην απόδοση. Η τοπική απλοποίηση είναι η μόνη που και στις 2 περιπτώσεις συμπεριφέρεται παρόμοια, και αυτό επειδή η απόδοση της είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη βάση γνώσης και μάλιστα όπως έχει αποδειχθεί αποδίδει καλύτερα με τυχαία δεδομένα [58].

Τέλος, οι τεχνικές για τον υπολογισμό του μέγιστου κάτω φράγματος, όπως και για την αποτελεσματική διαχείριση των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων αποτελούν ιδιαίτερες βελτιστοποιήσεις οι οποίες συνδυάζουν όλες τις τεχνικές βελτιστοποίησης. Έτσι, λοιπόν, για να κάνουμε μια γενική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος FiRE με τη χρήση όλων των τεχνικών βελτιστοποίησης που προτείνουμε υπολογίσαμε το συνολικό μέγιστο κάτω φράγμα για βάσεις γνώσης διαφορετικού μεγέθους και διαφορετικής εκφραστικότητας. Το σώμα ορολογίας της βάσης γνώσης που χρησιμοποιήσαμε ήταν εκφραστικότητας $f_{KD-SHIN}$ στο οποίο ορίστηκαν 83 έννοιες και 22 γενικευμένα ή κυκλικά αξιώματα. Τα 16 από τα γενικευμένα ή κυκλικά αξιώματα ορίζουν το πεδίο ορισμού και το σύνολο τιμών ρόλων όπως και ξένες έννοιες. Τέλος, όσον αφορά το σώμα ισχυρισμών, τα άτομα ήταν μερικώς συνδεδεμένα μεταξύ τους (σχηματίζονταν 1070 τμήματα του σώματος ισχυρισμών) ενώ για κάθε άτομο υπήρχαν κατά μέσο όρο 6 ισχυρισμοί με $f_{KD-SHIN}$ έννοιες. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στον Πίνακα 4.10.

Όπως παρατηρούμε οι τεχνικές βελτιστοποίησης βοηθούν να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος απόκρισης του συστήματος για τον υπολογισμό του συνολικού μέγιστου κάτω φράγματος. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι το μη βελτιστοποιημένο σύστημα δεν μπορεί να αποκριθεί ικανοποιητικά για βάσεις γνώσης με παραπάνω από 1000 άτομα καθώς απαιτούνται πάνω από 72 λεπτά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το μη βελτιστοποιημένο σύστημα αυξάνει το μέγεθος της δομής tableau ανάλογα με το μέγεθος των ατόμων. Από την άλλη, το βελτιστοποιημένο σύστημα με τη χρήση της τεχνικής της διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών μειώνει σημαντικά το χώρο του αλγορίθμου. Επιπρόσθετα, με τις βελτιστοποιήσεις για τον υπολογισμό του ΜΚΦ αποφεύγεται η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή των ίδιων κανόνων επέκτασης γλιτώνοντας με αυτό το τρόπο χώρο αλλά και χρόνο. Όσο αφορά τα γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα παρατηρούμε ότι η απόδοση του βελτιστοποιημένου συστήματος είναι εκπληκτικά καλή, ενώ το μη βελτιστοποιημένο σύστημα μπορεί να αποφανθεί

Πίνακας 4.10: Η συνολική αξιολόγηση του συστήματος για τον υπολογισμό του συνολικού ΜΚΦ για βάσεις γνώσης διαφορετικού μεγέθους και διαφορετικής εκφραστικότητας.

Γεν. Αξιώματα	Άτομα	FiRE	B-FiRE
0	500	1.967.567 ms	364.133 ms
	1000	4.356.328 ms	698.261 ms
	1550	7.764.582 ms	1094.098 ms
	2140	10.221.445 ms	1534.663 ms
5	20	4.351.771 ms	31.345 ms
	500	-	380.616 ms
	1000	-	736.145 ms
	1550	-	1.117.752 ms
22	2140	-	1.592.315 ms
	500	-	636.445 ms
	1000	-	1.042.260 ms
	1550	-	1.509.626 ms
	2140	-	2.084.888 ms

μόνο για μια μικρή βάση γνώσης με λίγα γενικευμένα αξιώματα. Η διαχείριση των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων κάνει το χρόνο απόκρισης σχεδόν κλιμακωτό, επιτρέποντας τη συλλογιστική με γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα σε σχετικά μεγάλες βάσεις γνώσης.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως ιδιαίτερο ρόλο στην συνολική απόδοση του βελτιστοποιημένου συστήματος παίζει το γεγονός ότι το σώμα ισχυρισμών ήταν μερικώς συνδεδεμένο (τα μισά τμήματα από τον αριθμό ατόμων) γεγονός που κάνει την τεχνική της διχοτόμησης πολύ αποδοτική. Επιπρόσθετα, τα γενικευμένα και κυκλικά αξιώματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι στη πλειοψηφία τους αξιώματα που δηλώνουν το πεδίο ή το σύνολο τιμών ενός ρόλου για τα οποία η τεχνική που προτείνουμε λειτουργεί πολύ καλά. Στην χειρότερη δυνατή περίπτωση που τα άτομα του σώματος ισχυρισμών είναι 100% συνδεδεμένα και τα γενικευμένα και κυκλικά αξιώματά δεν υποπίπτουν στις περιπτώσεις που ξεχωρίσαμε, τότε το βελτιστοποιημένο σύστημα μπορεί να έχει παρόμοια συμπεριφορά με το μη βελτιστοποιημένο.

4.3 Ασαφή Συζευκτικά Επερωτήματα σε Εκφραστικές Περιγραφικές Λογικές

Μέχρι τώρα, έχουμε δει πως μπορεί κάποιος να δημιουργήσει μια βάση γνώσης και να χρησιμοποιήσει τις βασικές υπηρεσίες συλλογιστικής, μέσω της μηχανής ασαφούς συλλογιστικής FiRE, καθώς και μια αξιολόγηση του συστήματος. Πέραν, όμως, από τη σύνταξη και τις υπηρεσίες συλλογιστικής, τις οποίες παρέχει το FiRE, σε πρακτικές εφαρμογές είναι απαραίτητη η αποθήκευση μεγάλων βάσεων γνώσης καθώς και η δυνατότητα πραγματοποίησης συζευκτικών επερωτημάτων σε αυτές. Συστήματα που ικανοποιούν αυτές τις προδιαγραφές είναι διαθέσιμα για τις κλασικές ΠΛ, όμως η διαφορετική σύνταξη των ασαφών ΠΛ καθώς και η διαφορετική τους σημασιολογία τα κάνει ακατάλληλα για χρήση με ασαφείς ΠΛ. Τα μόνα συστήματα που υποστηρίζουν αποθήκευση μεγάλων βάσεων γνώσης και συζευκτικά επερωτήματα για ασαφείς ΠΛ

είναι του Straccia [197] και του Pan [198]. Οι εργασίες αυτές, όμως, βασίζονται στην ασαφή επέκταση της ΠΛ DL-Lite [119, 139] που αποτελεί μια ΠΛ με χαμηλή εκφραστικότητα και με αλγόριθμους συλλογιστικής χαμηλής πολυπλοκότητας, στόχος της οποίας είναι η συλλογιστική σε βάσεις δεδομένων. Οι παρακάτω ενότητες περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο επεκτάθηκε το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE κάνοντας χρήση του Triple Store Sesame, έτσι ώστε να επιτρέπει την αποθήκευση εκφραστικών ασαφών βάσεων γνώσης καθώς και τη πραγματοποίηση συζευκτικών επερωτημάτων σε αυτές.

4.3.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Αποθήκευσης Οντολογιών

Ένας από τους κυριότερους στόχους του *Σημασιολογικού Ιστού* (*Semantic Web*) [95] είναι η αναπαράσταση της πληροφορίας σε μια μορφή που να επιτρέπει τη χρήση της από πράκτορες λογισμικού διευκολύνοντας με αυτό το τρόπο την διάδοση και την ορθή χρήση της. Οι οντολογίες και οι διάφορες γλώσσες αναπαράστασης [86, 134] δημιουργήθηκαν για να εξυπηρετήσουν αυτό το σκοπό. Σαν άμεση εξέλιξη ήταν η δημιουργία διαφόρων συστημάτων που μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες βάσεις γνώσης σε αυτές τις γλώσσες, υποστηρίζοντας παράλληλα συζευκτικά επερωτήματα [1, 2, 3, 4, 10], τα οποία ονομάζονται *συστήματα αποθήκευσης οντολογιών* (*triple stores*). Σε αυτή την ενότητα κάνουμε μια πολύ σύντομη εισαγωγή σε ένα από αυτά, το Sesame [4], το οποίο χρησιμοποιήσαμε για να επεκτείνουμε το FiRE έτσι ώστε να υποστηρίζει την αποθήκευση ασαφών βάσεων γνώσης και την πραγματοποίηση συζευκτικών επερωτημάτων σε αυτές.

Το Sesame είναι ένα ελεύθερο λογισμικό για την αποθήκευση βάσεων γνώσης με μορφή RDF/RDFS που υποστηρίζει και επερωτήματα σε αυτές. Το Sesame μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα κεντρικό υπολογιστή (Server) με τον οποίο οι εφαρμογές μπορούν να επικοινωνήσουν σύμφωνα με το πρωτόκολλο HTTP. Για την επικοινωνία χρησιμοποιούνται δυο κύριες διεπαφές προγράμματος εφαρμογής (APIs) αυτή του στρώματος αποθήκευσης και συμπεράσματος (Storage And Inference Layer-SAIL) και η διεπαφή αποθήκης API (Repository API).

Η διεπαφή του στρώματος αποθήκευσης και συμπεράσματος (Storage And Inference Layer-SAIL) είναι μια χαμηλού επιπέδου διεπαφή, η οποία χρησιμοποιείται από τα συστήματα RDF (RDF stores) και τα συστήματα συλλογιστικής. Ο σκοπός της είναι να κάνει απλή και αφαιρετική τη διαδικασία αποθήκευσης και συλλογιστικής, επιτρέποντας με αυτό το τρόπο τη χρήση διαφόρων τύπων αποθήκευσης. Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές αυτής της διεπαφής, παραδείγματος χάριν το MemoryStore που αποθηκεύει τα στοιχεία RDF στην κύρια μνήμη, και το NativeStore που χρησιμοποιεί τον σκληρό δίσκο για την αποθήκευση.

Η διεπαφή αποθήκης (Repository API) είναι μια υψηλότερου επιπέδου διεπαφή που προσφέρει μεθόδους για τη διαχείριση δεδομένων σε μορφή RDF. Ο κύριος σκοπός αυτής της διεπαφής είναι να διευκολύνει το χρήστη προσφέροντας διάφορες μεθόδους για την αποθήκευση αρχείων, τις ερωτήσεις και την εξόρυξη δεδομένων από αυτά. Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές αυτής της διεπαφής, όπως το SailRepository και το HTTPRepository. Το μεν SailRepository μεταφράζει τις κλήσεις σε μια εφαρμογή SAIL, ενώ το HTTPRepository προσφέρει επικοινωνία κεντρικών υπολογιστών-πελατών (client-server) με έναν κεντρικό υπολογιστή Sesame (Sesame Server) σύμφωνα με το HTTP.

Στην υλοποίηση που περιγράφεται παρακάτω χρησιμοποιήθηκε το Sesame 2 beta 6. Τα είδη RDF που υποστηρίζονται από αυτή την έκδοση είναι τα RDF/XML, N-triples, N3, TriG, TriX και Turtle. Όσο αφορά τις γλώσσες για την πραγματοποίηση επερωτημάτων, υποστηρίζεται μερικώς η SPARQL [192] καθώς και μια γλώσσα επερωτημάτων που έχει αναπτυχθεί σαν κομμάτι του Sesame η SeRQL (Sesame RDF Query Language). (Για μια λεπτομερή παρουσίαση του Sesame ο αναγνώστης παραπέμπεται στην ιστοσελίδα του <http://www.openrdf.org/>)

4.3.2 Αποθήκευση μίας Ασαφούς Βάσης Γνώσης

Το πρώτο μας μέλημα έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρησιμοποίηση του Sesame για την αποθήκευση ασαφών βάσεων γνώσης, καθώς και για την πραγματοποίηση συζευκτικών επερωτημάτων σε αυτές ήταν η αναπαράσταση της ασαφής γνώσης σε σύνταξη RDF/XML. Με άλλα λόγια, για τη σύνταξη ασαφών γνώσεων σε RDF θα έπρεπε να επεκταθεί κατάλληλα η αντιστοίχιση της OWL σύνταξης και σημασιολογίας σε RDF, που γίνεται στο [125]. Σε αυτό το πεδίο είχε προηγηθεί κάποια εργασία και πιο συγκεκριμένα η δουλειά του Mazzieri [149] στην οποία η αποθήκευση βαθμών επιτυγχάνεται με την χρήση *reification* καθώς και η δουλειά της Vanekova [148] στην οποία χρησιμοποιούνται τύποι δεδομένων (*datatypes*). Από την μια όμως η σύνταξη της *fuzzy-RDF/XML* με χρήση του RDF *reification*, που είναι ο περιγραφικός επαναπροσδιορισμός μιας δήλωσης, έχει αποδειχθεί ανίσχυρη, γεγονός που οφείλεται στην ελλιπή της σημασιολογία καθώς και στο ότι δεν υποστηρίζεται από διάφορα εργαλεία για RDF. Από την άλλη, η χρήση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων όπως οι τύποι δεδομένων για την αναπαράσταση ασαφούς πληροφορίας δεν είναι σημασιολογικά σωστή.

Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιούμε ένα πιο απλουστευμένο μοντέλο που κάνει χρήση των νέων κόμβων `frdf:membership`, `frdf:degree` και `frdf:ineqType` των οποίων η σύνταξη παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.11. Η επέκταση σε σχέση με την γλώσσα OWL έχει γίνει έτσι ώστε στον ορισμό των ισχυρισμών να είναι δυνατή η δήλωση του βαθμού συμμετοχής αλλά και του τύπου της ανισότητας που θέλουμε να χρησιμοποιηθεί. Για το λόγο αυτό η *membership* αντιπροσωπεύει μια γενικότερη δήλωση συμμετοχής και αποτελείται από δυο επιμέρους στοιχεία, το *ineqType* και το στοιχείο *degree*. Το στοιχείο του *ineqType* χρησιμοποιείται για να δηλωθεί ο τύπος της ανισότητας. Έτσι λοιπόν οι δυνατές τιμές που μπορεί να πάρει είναι ένα από τα αλφαριθμητικά " $>=$ ", " $<=$ ", " $>$ " και " $<$ " αλλά και η αυστηρή ισότητα (" $=$ "). Τέλος, το στοιχείο *degree* χρησιμοποιείται για να δηλώσουμε το βαθμό συμμετοχής του συγκεκριμένου ατόμου στην αντίστοιχη έννοια (κλάση), το οποίο είναι τύπου πραγματικού αριθμού από το διάστημα $[0, 1]$.

Πίνακας 4.11: Αφηρημένη σύνταξη της γλώσσας *f-OWL*.

Άτομο	::=	'Άτομο('[άτομοID] {σχόλιο} {'type'(type)' membership} {value membership })'
membership	::=	[ineqType] [degree]
ineqType	::=	'=' | '>=' | '>' | '<=' | '<'
degree	::=	'degree(' πραγματικός αριθμός μεταξύ 0 και 1)'

Οι αγκύλες χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν ότι τα πεδία *ineqType* και *degree*

είναι προαιρετικά. Στην περίπτωση που σε κάποιο ισχυρισμό δε δηλωθούν είναι διαισθητικά λογικό να υποθέσουμε ότι ο βαθμός ο οποίος υπονοείται είναι αυτός του 1 (δηλαδή πλήρης συμμετοχή) ενώ ως τύπο ανισότητας να λάβουμε την αυστηρή ισότητα ($=$). Έτσι λοιπόν η επέκτασή μας είναι απολύτως συμβατή με την κλασική OWL καθώς τα μη ασαφή γεγονότα της OWL ερμηνεύονται ως ασαφή γεγονότα στα οποία υπάρχει πλήρης συμμετοχή του ατόμου στην κλάση.

Η σύνταξη που χρησιμοποιείται γίνεται εύκολα αντιληπτή με τα παρακάτω παραδείγματα.

Παράδειγμα 4.3.1 Έστω ότι θέλουμε να αναπαραστήσουμε τον ασαφή ισχυρισμό ((ΠΑΥΛΟΣ : Ψηλός) $\geq n$). Οι τριάδες RDF που αναπαριστούν αυτόν τον ισχυρισμό παρουσιάζονται παρακάτω

ΠΑΥΛΟΣ	<code>frdf:membership</code>	<code>_:ΠΑΥΛΟΣmembΨηλός</code> .
<code>_:ΠΑΥΛΟΣmembΨηλός</code>	<code>rdf:type</code>	<code>Ψηλός</code> .
<code>_:ΠΑΥΛΟΣmembΨηλός</code>	<code>frdf:degree</code>	<code>"n^^xsd:float"</code> .
<code>_:ΠΑΥΛΟΣmembΨηλός</code>	<code>frdf:ineqType</code>	<code>"="</code> .

όπου `_:ΠΑΥΛΟΣmembΨηλός` είναι ένας κενός κόμβος που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της ασαφής συμμετοχής του ατόμου ΠΑΥΛΟΣ στην έννοια Ψηλός.

Από την άλλη, η αναπαράσταση ασαφών ισχυρισμών ρόλων είναι πιο περίπλοκη γιατί η RDF δεν επιτρέπει τη χρήση κενών κόμβων σε θέσεις κατηγορημάτων (*predicate*) και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μια καινούργια ιδιότητα (*property*) για κάθε ασαφή ισχυρισμό ρολου.

Παράδειγμα 4.3.2 Έστω ότι θέλουμε να αναπαραστήσουμε τον ασαφή ισχυρισμό ρόλου ((ΠΑΥΛΟΣ, ΤΑΣΟΣ) : ΦίλοςΤου $\geq n$). Οι τριάδες RDF που αναπαριστούν αυτόν τον ισχυρισμό παρουσιάζονται παρακάτω

ΠΑΥΛΟΣ	<code>frdf:ΠΑΥΛΟΣΦίλοςΤουΤΑΣΟΣ</code>	<code>ΤΑΣΟΣ</code> .
<code>frdf:ΠΑΥΛΟΣΦίλοςΤουΤΑΣΟΣ</code>	<code>rdf:type</code>	<code>ΦίλοςΤου</code> .
<code>frdf:ΠΑΥΛΟΣΦίλοςΤουΤΑΣΟΣ</code>	<code>frdf:degree</code>	<code>"n^^xsd:float"</code> .
<code>frdf:ΠΑΥΛΟΣΦίλοςΤουΤΑΣΟΣ</code>	<code>frdf:ineqType</code>	<code>"="</code> .

όπου `frdf:ΠΑΥΛΟΣΦίλοςΤουΤΑΣΟΣ` είναι μια νέα ιδιότητα (*property*) που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της ασαφής συσχέτισης του ατόμου ΠΑΥΛΟΣ με το άτομο ΤΑΣΟΣ μέσω του ρόλου ΦίλοςΤου.

4.3.3 Ασαφή Συζευκτικά Επερωτήματα

Ένα από τα πολύ μεγάλα πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης (*persistent storage systems*) όπως οι σχεσιακές βάσεις δεδομένων ή τα συστήματα αποθήκευσης RDF είναι το γεγονός ότι υποστηρίζουν συζευκτικά επερωτήματα. Τα συζευκτικά επερωτήματα γενικεύουν το πρόβλημα της πραγματοποίησης (*realization*) και της εύρεσης (*retrieval*) των κλασικών ΠΛ [102]. Είναι δηλαδή ερωτήματα που ζητάνε όλα τα άτομα μιας δεδομένης έννοιας, λαμβάνοντας υπ' όψη το συνδυασμό (σύζευξη) εννοιών

και ρόλων. Τυπικά ένα συζευκτικό επερώτημα (*conjunctive query* - CQ) q είναι μια ερώτηση της μορφής

$$q(X) \leftarrow \exists Y. \text{conj}(X, Y) \quad (4.1)$$

ή απλά $q(X) \leftarrow \text{conj}(X, Y)$, όπου το $q(X)$ λέγεται η κεφαλή, το $\text{conj}(X, Y)$ λέγεται το σώμα, το διάνυσμα X περιλαμβάνει τις διακεκριμένες μεταβλητές (*distinguished variables*), το Y περιλαμβάνει τις υπαρκτικά προσοδεικτούμενες μεταβλητές οι οποίες ονομάζονται μη-διακεκριμένες μεταβλητές (*non-distinguished variables*), και τα $\text{conj}(X, Y)$ είναι μια σύζευξη ΠΛ ατόμων της μορφής $A(v), R(v_1, v_2)$, όπου τα A, R είναι αντίστοιχα, ατομικές κλάσεις και ρόλοι και τα v, v_1 και v_2 είναι μεταβλητές ατόμων από τα διανύσματα X και Y ή άτομα που εμφανίζονται στη βάση γνώσης. Μια αποτίμηση (*evaluation*) $[X \mapsto S]$ είναι μια αντικατάσταση των μεταβλητών του X με άτομα από το σύνολο ατόμων S . Μια επερώτηση $q(X) \leftarrow \exists Y. \text{conj}(X, Y)$ ερμηνεύεται σε μια ερμηνεία \mathcal{I} ως το σύνολο $q^{\mathcal{I}}$ των πλειάδων S τέτοιο ώστε το σώμα της επερώτησης $\exists Y. \text{conj}(X, Y)$ αποτιμάται σε αληθές στην αποτίμηση $[X \mapsto S]$ και την ερμηνεία \mathcal{I} . Δοθείσας μια αποτίμησης $[X \mapsto S]$, αν κάθε μοντέλο \mathcal{I} της βάσης γνώσης ικανοποιεί την $q_{[X \mapsto S]}$, λέμε ότι η βάση γνώσης συνεπάγεται λογικά το $q_{[X \mapsto S]}$. Στην περίπτωση αυτή, το S ονομάζεται λύση (*solution*) της q . Μια διαζευκτικό επερώτημα (*disjunctive query* - DQ) είναι ένα σύνολο από συζευκτικά επερωτήματα τα οποία μοιράζονται την ίδια κεφαλή.

Δεδομένου ότι στην περίπτωση μας οι κλασικοί ισχυρισμοί έχουν επεκταθεί στους ασαφείς ισχυρισμούς, νέες μέθοδοι για επερωτήματα τα οποία θα χρησιμοποιούν την ασαφή πληροφορία έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, στο [198] τα συνηθισμένα συζευκτικά επερωτήματα επεκτείνονται σε μια οικογένεια πιο εκφραστικών επερωτημάτων, τα οποία κληρονομούν χαρακτηριστικά από τους τομείς της ασαφής ανάκτησης πληροφοριών [43]. Αυτά τα επερωτήματα εκμεταλλεύονται τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφών ισχυρισμών με την εισαγωγή των βαρών ή των κατώτατων ορίων στα άτομα ερώτησης και είναι τα επερωτήματα κατωφλίων και τα γενικευμένα ασαφή επερωτήματα των οποίων η σημασιολογία περιγράφεται συνοπτικά στις επόμενες υποενότητες.

4.3.3.1 Επερωτήματα Κατωφλίων

Το πρόβλημα της συνεπαγωγής ενός κλασικού ισχυρισμού είναι μια ειδική περίπτωση των συζευκτικά επερωτημάτων. Εφόσον οι ασαφείς ΠΛ αποτελούν επεκτάσεις των κλασικών ΠΛ με ασαφείς ισχυρισμούς, στο [198] προτείνεται μια γλώσσα επερωτημάτων με γενίκευση του προβλήματος της συνεπαγωγής ενός ασαφούς ισχυρισμού για την f_{KD} -DL-Lite. Η γλώσσα επερωτημάτων με αυτό το τρόπο επιτρέπει στους χρήστες να περιγράφουν τη σύζευξη ασαφών ισχυρισμών στα επερωτήματα. Έτσι ορίζουν τα συζευκτικά επερωτήματα κατωφλίων (*conjunctive threshold queries* - CTQ) τα οποία επεκτείνουν τα άτομα $A(v), R(v_1, v_2)$ των συζευκτικών επερωτημάτων της εξίσωσης 4.1 στην ακόλουθη μορφή $A(v) \geq t_1, R(v_1, v_2) \geq t_2$, όπου τα $t_1, t_2 \in (0, 1]$ είναι κατώφλια. Είναι προφανές ότι τα επερωτήματα κατωφλίων είναι πιο εκφραστικά και ευέλικτα από αυτά της εξίσωσης 4.1 εφόσον οι χρήστες μπορούν να επιβάλουν διαφορετικά κατώφλια για διαφορετικά άτομα του επερωτήματος.

4.3.3.2 Γενικευμένα Ασαφή Επερωτήματα

Επιπρόσθετα, λόγω των ασαφών ισχυρισμών, στο [198] προτείνουν επερωτήματα που επιτρέπουν στην αποτίμησή τους το συσχετισμό βαθμών συμμετοχής με τις πλειάδες που ανήκουν στο σύνολο λύσεων. Με άλλα λόγια μια πλειάδα να ανήκει στο σύνολο λύσεων σε κάποιο βαθμό συμμετοχής. Όπως είδαμε κάτι τέτοιο δε συμβαίνει με τα συζευκτικά επερωτήματα κατωφλίων στα οποία μια λύση είτε ανήκει είτε όχι στο σύνολο λύσεων. Για το λόγο αυτό εισάγουν τα γενικευμένα ασαφή επερωτήματα. Συντακτικά, τα *γενικευμένα ασαφή συζευκτικά επερωτήματα* (*general fuzzy conjunctive queries* - GFCQ) επεκτείνουν τα άτομα $A(v), R(v_1, v_2)$ των συζευκτικών επερωτημάτων της εξίσωσης 4.1 σε άτομα της ακόλουθης μορφής $A(v) : k_1, R(v_1, v_2) : k_2$, όπου οι $k_1, k_2 \in (0, 1]$ είναι βαθμοί.

Οι γλώσσες αυτές είχαν ήδη προταθεί στο [19] για τις ασαφείς σχεσιακές βάσεις δεδομένων, όμως οι προσεγγίσεις που ακολούθησαν πρότειναν συγκεκριμένες συναρτήσεις ερμηνείας [21, 18, 24, 9]. Ακολουθώντας της σημασιολογία και τη φιλοσοφία που προτάθηκε για την ασαφή γλώσσα SWRL [176] (μια επέκταση της γλώσσας κανόνων SWRL του Σημασιολογικού Ιστού [115] με ασαφείς ισχυρισμούς), στο [198] επιλέγουν τη σημασιολογία του τελεστή σύζευξης (G) και αυτόν του τελεστή που υπολογίζει το βαθμό που έχει προσαρτηθεί σε κάθε άτομο με το βαθμό του ατόμου (a) ελεύθερο. Όπως αποδείχθηκε και στα [50, 142] οι παραπάνω προσεγγίσεις έχουν κάποια κοινά στοιχεία και μπορούν να αναπαρασταθούν από γενικευμένους ασαφείς τελεστές.

Τα άτομα των γενικευμένων ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων αναπαριστώνται με $atom_i(\bar{v})$. Έτσι λοιπόν δοθείσας μιας f_{KD} -DL-Lite οντολογίας \mathcal{O} , μιας ασαφής ερμηνείας \mathcal{I} της \mathcal{O} , ενός γενικευμένου ασαφή συζευκτικού επερωτήματος q_F και μιας αποτίμησης $[X \mapsto S]$, ο βαθμός αληθείας της q_F στην \mathcal{I} για την αποτίμηση αυτή δίνεται από τη σχέση

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \{G_{i=1}^n a(k_i, atom_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']})\}$$

όπου τα k_i ($1 \leq i \leq n$) και τα $atom_i$ είναι όπως περιγράψαμε παραπάνω, η G είναι μια συνάρτηση για την αποτίμηση των συζεύξεων και a είναι μια συνάρτηση για την αποτίμηση των βαθμών που έχουν προσαρτηθεί σε κάθε άτομο με αυτόν του ατόμου. Το $S : d$ ονομάζεται ενδεχόμενη λύση (*candidate solution*) της q_F . Όταν $d > 0$, τότε η $S : d$ ονομάζεται λύση της q_F . Επιπρόσθετα, η σημασιολογική συνάρτηση θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$\text{Αν } atom_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']} = 0 \text{ για κάθε αποτίμηση } S' \text{ και } i \in [1, n], \text{ τότε } d = 0. \quad (4.2)$$

Μια *γενικευμένη ασαφής διάζευξη επερωτημάτων* (*general fuzzy disjunctive query* - GFDQ) αποτελείται από ένα σύνολο γενικευμένων ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων τα οποία μοιράζονται την ίδια κεφαλή. Η διάζευξη ερμηνεύεται ως η σ-νόρμα (u) των διαζεύξεων.

Με αυτό το τρόπο αφήνουν ελεύθερη την ερμηνεία των συζεύξεων και των προσαρμοσμένων βαθμών με τη χρήση των συναρτήσεων G και a επιτρέποντας με αυτό το τρόπο αρκετές επιλογές για τον ορισμό της σημασιολογίας για τα γενικευμένα ασαφή συζευκτικά επερωτήματα. Παρακάτω παρουσιάσουμε τις επιλογές καθορίζοντας τις συναρτήσεις αυτές που έγιναν στο [198].

1. **Επερωτήματα Ασαφών Κατωφλίων (fuzzy threshold queries):** Όπως είδαμε τα επερωτήματα κατωφλίων κάνουν μια κλασική, δηλαδή μη-ασαφή αποτίμηση ερωτήσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι αν έχουμε έναν ισχυρισμό της μορφής $(a : C) \geq 0.18$ και ένα επερωτήμα κατωφλίου της μορφής $q_T(v) \leftarrow C(v) \geq 0.2$ το a δε θα συμπεριλαμβανόταν στο σύνολο λύσεων καθώς δεν πληροί τον περιορισμό. Αν παρόλα αυτά επιλέξουμε μια τ-νόρμα (t) ως τη συνάρτηση αποτίμησης συζεύξεων και τις R -συνεπαγωγές ως τη συνάρτηση αποτίμησης των προσαρτημένων βαθμών και των ατόμων, τότε λαμβάνουμε τις επερωτήσεις ασαφών κατωφλίων, στις οποίες ο βαθμός αληθείας της q_F στην \mathcal{I} δίνεται από την εξίσωση:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \{t_{i=1}^n \omega_i(k_i, atom_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']})\}.$$

Δοθέντος κάποιου συνόλου S' , αν για όλα τα άτομα του επερωτήματος έχουμε ότι $atom_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']} \geq k_i$, εφόσον $\mathcal{J}_R(x, y) = 1$ όταν $y \geq x$ [45], τότε έχουμε ότι $d = 1$, το οποίο δίνει τη σημασιολογία των επερωτημάτων κατωφλίων. Στη συνέχεια αν για κάποιο άτομο ισχύει $atom_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']} < k_i$ τότε η R -συνεπαγωγή αρχίζει σταδιακά (σε αντίθεση με τα συζευκτικά επερωτήματα κατωφλίων) να φιλτράρει (να δίνει μια ποινή) το βαθμό του ατόμου σε σχέση με το βαθμό k_i .

Όπως αποδεικνύεται στο [50] πολλές από τις προτάσεις για σημασιολογία σταθμισμένων επερωτημάτων που είχαν προταθεί [21, 18, 23] εμπίπτουν στην κατηγορία των επερωτημάτων ασαφών κατωφλίων

2. **Κλασική γλώσσα συζευκτικών επερωτημάτων (conjunctive queries)** [170]: Είναι μια ειδική περίπτωση των επερωτημάτων ασαφών κατωφλίων, όπου όλα τα $k_i = 1$. Εφόσον $\mathcal{J}_R(1, y) = y$ [45], ο βαθμός αληθείας της q_F στην \mathcal{I} δίνεται από τη σχέση:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \{t_{i=1}^n atom_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']}\}.$$

3. **Επερωτήματα Ασαφών Συναθροίσεων (fuzzy aggregation queries):** Αν χρησιμοποιήσουμε συναρτήσεις ασαφούς συναθροίσεως [45], όπως η συνάρτηση $G(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n k_i}$, για την αποτίμηση των συζεύξεων και η συνάρτηση $a(k_i, y) = k_i * y$ για την αποτίμηση των προσαρτημένων βαθμών και των βαθμών των ατόμων, λαμβάνουμε τα επερωτήματα ασαφών συναθροίσεων, στις οποίες ο βαθμός αληθείας της q_F στην \mathcal{I} δίνεται από τη σχέση:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \frac{\sum_{i=1}^n k_i * atom_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']}}{\sum_{i=1}^n k_i}.$$

Επιπρόσθετα, μπορούμε να δείξουμε ότι πολλές από τις προτάσεις που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία για σημασιολογία σταθμισμένων επερωτημάτων [24, 9] αποτελούν ουσιαστικά μέλος της οικογένειας των επερωτημάτων ασαφών συναθροίσεων. Πιο συγκεκριμένα οι Salton, Fox και Wu προτείνουν την παρακάτω συνάρτηση ερμηνείας:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\text{atom}_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']})^w}{n} \right)^{1/w}.$$

όπου $w_1 = w_2 = \dots = w_n = w$ και $w \in (0, +\infty]$. Από την άλλη οι S.-J. Chen και S.-M. Chen προτείνουν ως συνάρτηση ερμηνείας το γεωμετρικό μέσο (geometric mean) [9]:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \left(\prod_{i=1}^n \text{atom}_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']} \right)^{1/w}.$$

Κάτω όμως από το γενικό πρίσμα των επερωτημάτων ασαφών συναθροίσεων, όπως φαίνεται από τη θεωρία των ασαφών συναθροιστικών συναρτήσεων [45] οι συναρτήσεις αυτές αποτελούν παραλλαγές της συνάρτησης του γενικευμένου μέσου (generalized mean) η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$d_w = \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_i^w}{n} \right)^{1/w}$$

όπου $w \in \mathbb{R}^*$. Αν $w \in (0, +\infty]$ τότε έχουμε την προσέγγιση των Salton, Fox και Wu [24], ενώ αν $w \rightarrow 0$ τότε η συνάρτηση d τείνει προς το γεωμετρικό μέσο [45]. Επιπρόσθετα, από την ανάλυση αυτή μπορούμε πολύ εύκολα να οδηγηθούμε σε μια νέα σημασιολογία για τα σταθμισμένα επερωτήματα όπως για παράδειγμα επιλέγοντας $w = -1$ και λαμβάνοντας τη συνάρτηση του αρμονικού μέσου (harmonic mean) [45]:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{atom}_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']}}}.$$

4. **Επερωτήματα σταθμισμένων ασαφών τ-νορμών (fuzzy weighted t-norms)**: Αν χρησιμοποιήσουμε σταθμισμένες ασαφείς τ-νόρμες [168] ως συνάρτηση συζεύξεων και προσαρτημένων βαθμών, λαμβάνουμε τις επερωτήσεις των ασαφών βαρών, στις οποίες ο βαθμός αληθείας της q_F στην \mathcal{I} δίνεται από τη σχέση:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \left\{ \min_{i=1}^n u(\bar{k} - k_i, t(\bar{k}, \text{atom}_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']})) \right\},$$

όπου $\bar{k} = \max_{i=1}^n k_i$. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τους τελεστές αυτούς ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [168].

Ο Yager [27], προτείνει τη χρήση των S -συνεπαγωγών [45] (σε αντίθεση με τις R -συνεπαγωγές των επερωτημάτων ασαφών κατωφλίων), δηλαδή τη συνάρτηση:

$$d = \sup_{S' \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \dots \times \Delta^{\mathcal{I}}} \left\{ \min_{i=1}^n u(1 - k_i, \text{atom}_i^{\mathcal{I}}(\bar{v})_{[X \mapsto S, Y \mapsto S']}) \right\},$$

Η προσέγγιση αυτή είναι ειδική περίπτωση των επερωτημάτων σταθμισμένων ασαφών τ-νορμών, όπου $\bar{k} = 1$, διότι $t(1, a) = a$. Παρόμοια προσέγγιση έγινε και από τον Sanchez [30].

Είναι εύκολο να δείξουμε ότι τα παραπάνω γενικευμένα ασαφή συζευκτικά επερωτήματα ικανοποιούν τη συνθήκη 4.2.

4.3.4 Υλοποίηση Ασαφών Επερωτημάτων με το FiRE

Το σύστημα συλλογιστικής FiRE εμπλουτίστηκε από τις υπηρεσίες του συστήματος αποθήκευσης Sesame για δεδομένα σε RDF, για την υλοποίηση των ασαφών επερωτημάτων. Πιο αναλυτικά, μέσω του συστήματος FiRE μπορεί να επιλεγθεί ένας κεντρικός υπολογιστής Sesame με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί επικοινωνία. Για την επίτευξη αυτής της επικοινωνίας χρησιμοποιήθηκε η διεπαφή SAIL με τη βοήθεια της οποίας γίνεται ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του FiRE και της αποθήκης του κεντρικού υπολογιστή Sesame. Με αυτό το τρόπο χρησιμοποιώντας το FiRE ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει μια ασαφή βάση γνώσης στη σύνταξη που περιγράφηκε στη Ενότητα 4.3.2, και να πραγματοποιήσει επερωτήματα κατωφλίων καθώς και γενικευμένα ασαφή επερωτήματα με τις σημασιολογίες που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Επιπρόσθετα, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει μια ασαφή βάση γνώσης από ένα κεντρικό υπολογιστή Sesame στο FiRE, να την τροποποιήσει ή να πραγματοποιήσει υπηρεσίες συλλογιστικής και έπειτα να αποθηκεύσει στην αποθήκη του κεντρικού υπολογιστή Sesame τις αλλαγές ή την καινούργια υπονοούμενη γνώση που εξαχθή.

Τα επερωτήματα κατωφλίων, καθώς και αυτά των γενικευμένων ασαφών επερωτημάτων υλοποιούνται στο FiRE με την χρήση των υπηρεσιών συλλογιστικής της f_{KD} -SHIN και της SPARQL [192] που υποστηρίζεται από το Sesame. Όπως αναφέραμε τα συζευκτικά επερωτήματα ανάγονται στο πρόβλημα της συνεπαγωγής ενός ασαφή ισχυρισμού. Στις πολύ εκφραστικές ΠΛ όμως οι αλγόριθμοι συζευκτικών επερωτημάτων έχουν αυξημένη πολυπλοκότητα [171], ενώ από την άλλη στις εκφραστικές ασαφείς ΠΛ το πρόβλημα των επερωτημάτων παραμένει ανοιχτό, χωρίς να έχει προηγηθεί κάποια άλλη δουλειά για συζευκτικά επερωτήματα σε εκφραστικές ασαφείς ΠΛ έκτος του συστήματος μας [225].

Η διαδικασία που ακολουθείται στην προσέγγισή μας είναι η παρακάτω. Αρχικά η ασαφής βάση γνώσης ελέγχεται για ικανοποιησιμότητα, ώστε να διασφαλίσουμε ότι η υπονοούμενη γνώση που θα εξαχθεί είναι σωστή. Έπειτα πραγματοποιείται ο έλεγχος του μέγιστου κάτω φράγματος για τους ισχυρισμούς που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τους συνδυασμούς όλων των ατόμων της βάσης γνώσης με όλες τις έννοιες που δηλώνονται στη βάσης γνώσης. Μετά από αυτή τη διαδικασία τα αποτελέσματα αποθηκεύονται με την σύνταξη που περιγράφεται στο 4.3.2 στην αποθήκη του κεντρικού υπολογιστή Sesame.

Τυπικά, για μια ικανοποιήσιμη βάση γνώσης $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \rangle$ με το παρακάτω αλφάβητο

$$\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_n\},$$

$$\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_m\},$$

$$\mathbf{I} = \{i_1, i_2, \dots, i_l\}$$

της οποίας το σώμα ορολογίας \mathcal{T} είναι

$$\mathcal{T} = \{C_1^d, C_2^d, \dots, C_k^d\}$$

όπου με C^d συμβολίζεται μια έννοια που ορίζεται στο σώμα ορολογίας, έχουμε

$$\text{αποθήκευσεΣεΚεντΥπSesame}((i_1 : C_1) = \text{glb}(\Sigma, (i_1 : C_1)))$$

$\text{αποθήκευσε}\Sigma\epsilon\text{Κεντρ}\Upsilon\pi\text{Sesame}((i_1 : C_2) = \text{glb}(\Sigma, (i_1 : C_2)))$
 \dots
 $\text{αποθήκευσε}\Sigma\epsilon\text{Κεντρ}\Upsilon\pi\text{Sesame}((i_l : C_n) = \text{glb}(\Sigma, (i_l : C_n)))$
 $\text{αποθήκευσε}\Sigma\epsilon\text{Κεντρ}\Upsilon\pi\text{Sesame}((i_1 : C_1^d) = \text{glb}(\Sigma, (i_1 : C_1^d)))$
 \dots
 $\text{αποθήκευσε}\Sigma\epsilon\text{Κεντρ}\Upsilon\pi\text{Sesame}((i_l : C_k^d) = \text{glb}(\Sigma, (i_l : C_k^d)))$.

Η αποθήκευση $\Sigma\epsilon\text{Κεντρ}\Upsilon\pi\text{Sesame}$ είναι μια συνάρτηση που χρησιμοποιεί τη διεπαφή SAIL και αποθηκεύει τον ασαφή ισχυρισμό που της δίνεται σε έναν κεντρικό υπολογιστή Sesame.

Με αυτό το τρόπο οι ισχυρισμοί της βάσης γνώσης, καθώς και ένα μεγάλο κομμάτι της υπονοούμενης γνώσης που μπορεί να εξαχθεί, βρίσκονται αποθηκευμένα στον κεντρικό υπολογιστή Sesame. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει τα επερωτήματα κατωφλίων επιλέγοντας την ετικέτα «Queries». Στη περίπτωση των γενικευμένων ασαφών επερωτημάτων μπορεί να επιλέξει κάποια από τις σημασιολογίες των ασαφών κατωφλίων (fuzzy threshold queries), των σταθμισμένων ασαφών τ-νορμών (fuzzy weighted t-norms) και των ασαφών συναθροίσεων (fuzzy aggregation queries).

Παράδειγμα 4.3.3 Ένα επερωτήμα κατωφλίων και ο τρόπος που συντάσσεται στο FiRE φαίνεται παρακάτω

```
x,y <- Ψηλός(x) >= 0.8 ~ Έχει-Φίλο(x,y) >= 0.4 ~ Κοντός(y) >= 0.7
```

Τα επερωτήματα στο FiRE αποτελούνται από δυο μέρη, το πρώτο που ορίζει τα άτομα τα οποία θα υπολογιστούν, και το δεύτερο που ορίζει την συνθήκη που θα πρέπει να ικανοποιηθεί για τα άτομα. Το συγκεκριμένο επερωτήμα ζητάει να υπολογιστούν τα άτομα x και y , όπου το x θα πρέπει να συμμετέχει στην έννοια Ψηλός τουλάχιστον στον βαθμό που δίνεται, να συνδέεται μέσω του ρόλου Έχει-Φίλο με βαθμό μεγαλύτερο από 0.4 με το y , το οποίο με τη σειρά του θα πρέπει να συμμετέχει στην έννοια Κοντός τουλάχιστον με το βαθμό που δίνεται. Οι έννοιες που χρησιμοποιούνται στο σώμα των επερωτημάτων θα πρέπει να είναι ονομαστικές έννοιες της βάσης γνώσης ή να έχουν δηλωθεί για αυτές αξιώματα στο σώμα ορολογίας.

Στα επερωτήματα κατωφλίων, το επερωτήμα αρχικά μετατρέπεται από την σύνταξη του FiRE σε SPARQL. Σύμφωνα με την σύνταξη για την fuzzy OWL σε τριάδες RDF που ορίσαμε στην ενότητα 4.3.2, η ερώτηση του παραδείγματος 4.3.3 μετατρέπεται σε SPARQL όπως φαίνεται παρακάτω. Τα αποτελέσματα του επερωτήματος υπολογίζονται από τον κεντρικό υπολογιστή Sesame και εμφανίζονται στο γραφικό περιβάλλον του FiRE.

```

SELECT ?x ?y WHERE {
    ?x ns5:membership ?Node1 .
    ?Node1 rdf:type ?Concept1 .
    ?Node1 ns5:ineqType ?IneqType1 .
    ?Node1 ns5:degree ?Degree1 .
    FILTER regex (?Concept1 , "CONCEPTS#Ψηλός")
    FILTER regex (?IneqType1 , ">")

```

```

FILTER (?Degree1 >= "0.8^^xsd:float")

?BlankRole2 ns5:ineqType ?IneqType2 .
?BlankRole2 ns5:degree ?Degree2 .
?BlankRole2 rdf:type ?Role2 .
?x BlankRole2 ?y .
FILTER regex (?Role2 , "ROLES#Εχει-Φίλο")
FILTER regex (?IneqType1 , ">")
FILTER (?Degree2 >= "1.0^^xsd:float")

?y ns5:membership ?Node3,
?Node3 rdf:type ?Concept3 .
?Node3 ns5:ineqType ?IneqType3 .
?Node3 ns5:degree ?Degree3 .

FILTER regex (?Concept3 , "CONCEPTS#Κοντός")
FILTER regex (?IneqType1 , ">")
FILTER (?Degree1 >= "0.7^^xsd:float")
}

```

Παράδειγμα 4.3.4 Στα γενικευμένα ασαφή ερωτήματα γίνεται χρήση του ":" ακολουθούμενο από ένα βαθμό που υποδηλώνει την σημασία κάθε δήλωσης, αντί του βαθμού συμμετοχής. Έτσι μπορούμε να ζητήσουμε τις γυναίκες που είναι όμορφες και έχουν μακριά μαλλιά και να ζητήσουμε να αξιολογηθούν με μεγαλύτερο βαθμό εκείνες που έχουν μακριά μαλλιά.

```

x <- Γυναίκα(x) : 1 ^ Όμορφη(x) : 0.6
  ^ Έχει-ΜήκοςΜαλλιών(x,y) : 1 ^ Μακριά(y) : 0.8

```

Από την άλλη, στην περίπτωση των γενικευμένων ασαφών ερωτημάτων η διαδικασία είναι λίγο διαφορετική. Το ερωτήμα σε SPARQL δημιουργείται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιστρέφονται οι βαθμοί συμμετοχής για όλα τα άτομα της βάσης γνώσης που ικανοποιούν τα κριτήρια του ερωτήματος. Έπειτα, οι βαθμοί συμμετοχής που υπολογίστηκαν μαζί με τα βάρη που ορίστηκαν από τον χρήστη, επεξεργάζονται από το FiRE σύμφωνα με την σημασιολογία που έχει επιλεγεί, για να αξιολογηθούν οι απαντήσεις. Ένα κομμάτι της SPARQL ερώτησης που δημιουργείται για το παράδειγμα 4.3.4 ακολουθεί

```

SELECT ?x ?Degree1 ?Degree2...
WHERE {
  ?x ns5:membership ?Node1 .
  ?Node1 rdf:type ?Concept1 .
  ?Node1 ns5:ineqType ?IneqType1 .
  ?Node1 ns5:degree ?Degree1 .
  FILTER regex (?Concept1 , "CONCEPTS#Γυναίκα")
  FILTER regex (?IneqType1 , ">")
  FILTER (?Degree1 >= "0.0^^xsd:float")

  ?x ns5:membership ?Node2 .

```

```

?Node2 rdf:type ?Concept2 .
?Node2 ns5:ineqType ?IneqType2 .
?Node2 ns5:degree ?Degree2 .
FILTER regex (?Concept2 , "CONCEPTS#Όμορφη")
FILTER regex (?IneqType2 , ">")
FILTER (?Degree2 >= "0.0^^xsd:float")

...
}

```

Παράδειγμα 4.3.5 Έστω η βάση γνώσης $\Sigma = \langle \mathcal{T}, \mathcal{R}, \mathcal{A} \rangle$ με το παρακάτω αλφάβητο

$$\mathbf{C} = \{\text{Άντρας}, \text{Γυναίκα}, \text{Αδύνατος}, \text{Έξυπνος}, \text{Ψηλός}, \text{Όμορφος}\},$$

$$\mathbf{R} = \{\text{Έχει} - \text{Φίλο}\},$$

$$\mathbf{I} = \{\text{ΚΩΣΤΑΣ}, \text{ΠΕΤΡΟΣ}, \text{ΕΥΗ}\}$$

της οποίας το σώμα ορολογίας \mathcal{T} είναι

$$\mathcal{T} = \{\text{Μοντέλο} \equiv \text{Γυναίκα} \sqcap \text{Αδύνατος} \sqcap \text{Ψηλός} \sqcap \text{Όμορφος}\}$$

και το σώμα ισχυρισμών \mathcal{A}

$$\mathcal{A} = \{(\text{ΠΕΤΡΟΣ} : \text{Άντρας}) \geq 1, (\text{ΚΩΣΤΑΣ} : \text{Άντρας}) \geq 1,$$

$$(\text{ΠΕΤΡΟΣ} : \text{Έξυπνος}) \geq 0.65, (\text{ΚΩΣΤΑΣ} : \text{Έξυπνος}) \geq 0.85, (\text{ΕΥΗ} : \text{Ψηλός}) \geq 0.8,$$

$$(\text{ΕΥΗ} : \text{Όμορφος}) \geq 0.9, (\text{ΕΥΗ} : \text{Αδύνατος}) \geq 0.7, (\text{ΚΩΣΤΑΣ}, \text{ΕΥΗ}) : \text{Έχει} - \text{Φίλο} \geq 0.75\}$$

Η παραπάνω βάση γνώσης είναι ικανοποιήσιμη. Εάν κάνουμε την παρακάτω ερώτηση κατωφλίων

```

x,y <- Άντρας ^ Έξυπνος(x) > 0.3
      ^ Έχει-Φίλο(x,y) > 0.4 ^ Μοντέλο(y) > 0.6

```

θα πάρουμε σαν αποτέλεσμα

```

x
  ΚΩΣΤΑΣ
y
  ΕΥΗ

```

Αν από την άλλη πραγματοποιηθεί το παρακάτω γενικευμένο ασαφές επερωτημά

```

x,y <- Άντρας(x) : 1 ^ Έξυπνος(x) : 0.3
      ^ Έχει-Φίλο(x,y) : 0.4 ^ Μοντέλο(y) : 0.6

```

η απάντηση εξαρτάται από το είδος της σημασιολογίας των ερωτήσεων. Στην περίπτωση των επερωτημάτων ασαφών κατωφλίων η απάντηση είναι

```

<x,y>
<ΚΩΣΤΑΣ ΕΥΗ> : 1.0

```

στην περίπτωση της κλασικής γλώσσας συζευκτικών επερωτημάτων η απάντηση είναι

<x, y>
<ΚΩΣΤΑΣ ΕΤΗ> : 0.30

στην περίπτωση επερωτημάτων ασαφών συναθροίσεων η απάντηση είναι

<x, y>
<ΚΩΣΤΑΣ ΕΤΗ> : 0.85

ενώ τέλος στην περίπτωση επερωτημάτων σταθμισμένων ασαφών τ-νορμών είναι

<x, y>
<ΚΩΣΤΑΣ ΕΤΗ> : 0.7

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο τρόπος αυτός για την απάντηση συζευκτικών επερωτημάτων σε εκφραστικές ασαφείς ΠΛ είναι ορθός (sound) για τα αποτελέσματα που υπολογίζονται, άλλα δεν είναι πλήρης (complete). Αυτό συμβαίνει γιατί τα επερωτήματα πραγματοποιούνται στους ισχυρισμούς που έχουν αποθηκευτεί στον κεντρικό υπολογιστή Sesame. Το γεγονός ότι αρχικά πραγματοποιείται η υπηρεσία συλλογιστικής του μέγιστου κάτω φράγματος, για όλη την βάση γνώσης, μειώνει σημαντικά την απώλεια αποτελεσμάτων. Ο χρήστης του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιήσει στα σώματα των επερωτημάτων έχει μονάχα έννοιες που είναι ονομαστικές ή έννοιες που έχουν δηλωθεί στο σώμα ορολογίας. Με αυτό το τρόπο μπορεί να δηλώσει τις σημαντικές για την συγκεκριμένη εφαρμογή έννοιες και να τις χρησιμοποιήσει για επερωτήματα. Δεν μπορεί όμως να χρησιμοποιήσει σύνθετες f_{KD} - $SHIN$ έννοιες κατευθείαν στο σώμα επερωτημάτων. Επιπρόσθετα, οι μεταβατικοί όπως και οι αντίστροφοι ρόλοι στα επερωτήματα δεν ερμηνεύονται σωστά με τη χρήση του Sesame.

Παρόλα αυτά, το πρόβλημα των συζευκτικών επερωτημάτων παραμένει ανοικτό ακόμα και για τις κλασικές ΠΛ, ενώ η προσπάθεια μας αποτελεί την πρώτη απόπειρα συζευκτικών επερωτημάτων σε εκφραστικές ασαφείς ΠΛ. Η σημασία της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι πολύ μεγάλη, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου αλγόριθμοι εξάγουν χαρακτηριστικά, βάσει των οποίων αρχικοποιείται ένα ασαφές σώμα ισχυρισμών. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτές τις περιπτώσεις αναζητούνται πιο σύνθετα χαρακτηριστικά που είναι δυνατό να έχουν οριστεί σε ένα σώμα ορολογίας σαν σύνθετες έννοιες, επιτρέποντας έτσι την ορθή ανάκτηση δεδομένων. Τέτοιου είδους εφαρμογές, στις οποίες παρουσιάζεται η σημασία των ασαφών επερωτημάτων, μελετώνται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.3.5 Αξιολόγηση Ασαφών Συζευκτικών Επερωτημάτων για Εκφραστικές Ασαφείς Περιγραφικές Λογικές

Για να αξιολογήσουμε το σύστημα για τα ασαφή συζευκτικά επερωτήματα για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ χρησιμοποιήσαμε μια τροποποίηση της ασαφής βάσης γνώσης που δημιουργήσαμε από τη βάση δεδομένων μιας διαφημιστικής εταιρίας. Σε αυτή τη περίπτωση για κάθε άτομο της βάσης γνώσης μας (2140 σύνολο) δημιουργήθηκαν περίπου 33 ασαφείς ισχυρισμοί, ενώ το σώμα ορολογίας περιείχε 33 αξιώματα εννοιών εκφραστικότητας f_{KD} - $SHIN$. Με τη χρήση της υπηρεσίας του μέγιστου κάτω φράγματος εξαγόταν για κάθε άτομο κατά μέσο όρο 13 υπονοούμενοι ισχυρισμοί. Οι ισχυρισμοί αυτοί μετατράπηκαν σε ασαφείς τριάδες RDF, σύμφωνα με την σύνταξη που προτείνεται, σχηματίζοντας 529.926 τριάδες RDF. Τα παρακάτω πειράματα πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν Pentium 4, με συχνότητα 2.4GHz, 2 GB μνήμη

RAM, και λειτουργικό σύστημα Windows XP. Το σύστημα συλλογιστικής FiRE των παρακάτω πειραμάτων χρησιμοποιεί μόνο τις τεχνικές μείωσης των απαιτήσεων αποθήκευσης.

Ο μέσος χρόνος για την υπηρεσία συλλογιστικής του συνολικού μέγιστου κάτω φράγματος ενός ατόμου, καθώς και για την μετατροπή των ισχυρισμών που εξάγονταν σε ασαφείς τριάδες RDF, ήταν 1112 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Από την άλλη, ο χρόνος που απαιτούνταν για να αποθηκευτούν στο κεντρικό υπολογιστή Sesame εξαρτιόνταν από το είδος της αποθήκης του Sesame το οποίο μπορεί να είναι η μνήμη ή ένας σκληρός δίσκος (Memory ή Native), καθώς και από το πόσες τριάδες RDF ήταν ήδη αποθηκευμένες σε αυτό. Έτσι λοιπόν, ο μέσος ελάχιστος χρόνος σε μια σχεδόν άδεια αποθήκη (repository) (0-10.000 τριάδες RDF) ήταν 213 χιλιοστά του δευτερολέπτου, ενώ ο μέσος μέγιστος χρόνος σε μια σχεδόν γεμάτη αποθήκη (πάνω από 500.000 τριάδες RDF) ήταν 700 χιλιοστά του δευτερολέπτου.

Όσον αφορά την απόδοση του συστήματος χρησιμοποιώντας επερωτήματα κατωφλίου και γενικευμένα ασαφή επερωτήματα, αυτή εξαρτάται από δύο παράγοντες, την πολυπλοκότητα του επερωτήματος και το μέγεθος και είδος της αποθήκης. Τα επερωτήματα, τα οποία χρησιμοποιούν ρόλους σε συνδυασμό με αποθήκες που έχουν αποθηκευμένες πολλές τριάδες, μπορούν να αυξήσουν αισθητά το χρόνο απόκρισης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι χρόνοι απόκρισης για επερωτήματα με διαφορετική πολυπλοκότητα, σε διαφορετικά είδη και μεγέθη αποθήκης. Παρόλα αυτά η εκφραστικότητα των ερωτήσεων που μπορούν να διατυπωθούν είναι πολύ μεγάλη, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς ότι έννοιες όπως Καθηγητής, Επιστήμονας είναι σύνθετες έννοιες. Επιπρόσθετα, ο επιπλέον χρόνος που απαιτείται για τις πιο εκφραστικές ερωτήσεις, είναι πολύ μικρός συγκριτικά με τον χρόνο που θα απαιτούνταν για την απάντηση τους ελέγχοντας την λογική συνεπαγωγή των επιμέρους εννοιών.

Πίνακας 4.12: Αξιολόγηση ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ.

Επερωτήματα	Σκληρός Δίσκος			Μνήμη		
	100.000	250.000	500.000	100.000	250.000	500.000
$x \leftarrow \text{Επιστήμονας}(x)$	1042ms	2461ms	3335ms	894ms	2364ms	3332ms
$x \leftarrow \text{Πατέρας}(x) \geq 1 \wedge \text{Καθηγητής}(x) \geq 0.8$ $\wedge \text{Κανονικό_Ύψος}(x) \geq 0.5.$	1068ms	2694ms	3935ms	994ms	2524ms	3732ms
$x \leftarrow \text{ΜακρυνάΠόδια}(x) \geq 0.9 \wedge \text{ΌμορφαΜάτια}(x) \geq 0.8$ $\wedge 20s(x) \geq 0.5 \wedge \text{έχει-ΜήκοςΜαλλιών}(x, y)$ $\wedge \text{Μακρυνά}(y) \geq 0.8$	2667ms	4652ms	8348ms	3171ms	5643ms	7639ms
$x \leftarrow \text{Άντρας}(x) \geq 1 \wedge \text{Ψηλός}(x) \geq 0.8 \wedge 20s(x) \geq 0.5$ $\wedge \text{έχει-ΜήκοςΜαλλιών}(x, y) \wedge \text{Κοντά}(y) \geq 0.6$ $\wedge \text{έχει-ΧρώμαΜατιών}(x, z) \wedge \text{Πράσινα}(z)$	4310ms	7092ms	12982ms	5513ms	9234ms	10903ms
$x \leftarrow \text{Επιστήμονας}(x) : 0.8$	2562ms	4173ms	5235ms	3042ms	4543ms	6027ms
$x \leftarrow \text{Πατέρας}(x) : 0.6 \wedge \text{Καθηγητής}(x) : 0.7$ $\wedge \text{Κανονικό_Ύψος}(x) : 0.8.$	4318ms	6694ms	8935ms	4341ms	7896ms	9306ms
$x \leftarrow \text{ΜακρυνάΠόδια}(x) \geq 1 \wedge \text{ΌμορφαΜάτια}(x) \geq 0.8$ $\wedge 20s(x) \geq 0.5 \wedge \text{έχει-ΜήκοςΜαλλιών}(x, y)1$ $\wedge \text{Μακρυνά}(y) : 0.8$	5941ms	9223ms	14250ms	6109ms	11924ms	13580ms
$x \leftarrow \text{Άντρας}(x) \geq 1 \wedge \text{Ψηλός}(x) : 0.8 \wedge 20s(x) : 0.5$ $\wedge \text{έχει-ΜήκοςΜαλλιών}(x, y) \wedge \text{Κοντά}(y) : 0.6$ $\wedge \text{έχει-ΧρώμαΜατιών}(x, z) \wedge \text{Πράσινα}(z)$	7209ms	10580ms	18348ms	7982ms	11001ms	15712ms

Κεφάλαιο 5

Σημασιολογική Τεκμηρίωση Πολυμεσικού Περιεχομένου

Ένα από τα θέματα που απασχόλησε σημαντικό κομμάτι της εργασίας μας είναι η σημασιολογική τεκμηρίωση πολυμεσικού περιεχομένου. Η γέννηση του Σημασιολογικού Ιστού [95], σε συνδυασμό με το γεγονός πως στο τομέα της ανάλυσης πολυμεσικού υλικού είχε ήδη γίνει σημαντική δουλειά, έθεσαν τα θεμέλια για την αυτόματη σημασιολογική τεκμηρίωση πολυμεσικού υλικού. Τα αποτελέσματα των αλγορίθμων ανάλυσης πολυμεσικών κειμένων μπορούν να αποτελέσουν το σώμα ισχυρισμών σε μια οντολογία που το σώμα ορολογίας της θα έχει σκοπό την εξαγωγή πιο σύνθετων εννοιών, που δύσκολα μπορούν να ανιχνευτούν, καθώς και την κατηγοριοποίηση του πολυμεσικού υλικού. Σε αυτό το πρόβλημα, όμως, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κλασικές ΠΛ. Αυτό συμβαίνει γιατί, παρόλο που η απόδοση των αλγορίθμων ανάλυσης πολυμεσικού υλικού είναι σχετικά υψηλή, τα αποτελέσματα που παράγουν τις περισσότερες φορές εμπεριέχουν ασάφεια. Για αυτό το λόγο η χρήση των ασαφών ΠΛ για την αναπαράσταση πολυμεσικού υλικού κρίνεται επιτακτική. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η εργασία μας στο πρόβλημα της σημασιολογικής τεκμηρίωσης πολυμεσικού περιεχομένου. Αρχικά, στην ενότητα 5.1 παρουσιάζεται μια οντολογία που βασίζεται σε οπτικούς περιγραφείς για την συλλογιστική σε πολυμεσικά κείμενα, η οποία αποτελεί και την αρχική μας προσέγγιση στο πρόβλημα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις για τη σημασιολογική τεκμηρίωση πολυμεσικού περιεχομένου εφαρμόζοντας ασαφείς ΠΛ με τη χρήση του συστήματος συλλογιστικής FiRE. Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα 5.2 παρουσιάζεται η εργασία μας για τη σημασιολογική ταξινόμηση βυζαντινών εικόνων, ενώ στην ενότητα 5.3 η εργασία μας για την ταξινόμηση και δεικτοδότηση εικόνων από διακοπές. Τέλος, στην ενότητα 5.4 παρουσιάζεται μια προσέγγιση μας για τη σημασιολογική περιήγηση σε βίντεο αγώνων ποδοσφαίρου.

5.1 Η Οντολογία των Οπτικών Περιγραφέων

Μια από τις αρχικές μας απόπειρες για τη συλλογιστική σε πολυμεσικά κείμενα ήταν η δημιουργία μιας οντολογίας που βασιζόταν στους οπτικούς περιγραφείς του προτύπου MPEG-7 [167, 156]. Στόχος αυτής της οντολογίας ήταν να επιτρέψει σε διάφορους αλγόριθμους ανάλυσης την αποτελεσματική χρήση των οπτικών περιγραφέων του προτύπου MPEG-7 για συλλογιστική σε πολυμεσικά κείμενα. Στην περι-

γραφή του προτύπου MPEG-7 τα χαρακτηριστικά του αναπαριστώνται με τη χρήση του σχήματος XML. Παρόλο, όμως, που το συντακτικό του σχήματος XML παρέχει περιορισμούς πληθικότητας και περιορισμούς στους τύπους δεδομένων (datatypes), που είναι απαραίτητοι από το MPEG-7, αδυνατεί να προσφέρει τη σημασιολογική διαλειτουργικότητα που απαιτείται για να καταστήσει τους οπτικούς περιγραφείς του MPEG-7 εφαρμόσιμους από τους αλγόριθμους.

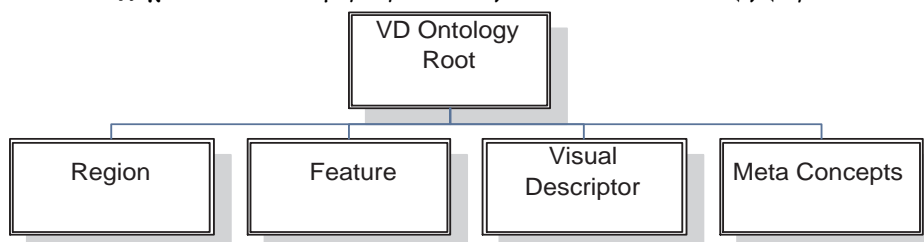
Μια πρώτη απόπειρα για τη δημιουργία μιας οντολογίας που θα βασίζεται στο MPEG-7 είχε γίνει από την Jane Hunter στο [81]. Επειδή, όμως, το MPEG-7 είναι πάρα πολύ μεγάλο είναι πολύ δύσκολο να αναπαρασταθούν όλα τα χαρακτηριστικά του με την απαραίτητη λεπτομέρεια σε μια οντολογία. Για να απλοποιήσουν τη διαδικασία χρησιμοποίησαν ένα υποσύνολο χαρακτηριστικών του προτύπου MPEG-7, μαζί με μια από επάνω προς τα κάτω (top down) προσέγγιση για την κατασκευή της οντολογίας. Η οντολογία που κατασκευάστηκε, όμως, ήταν πολύ γενική και ακατάλληλη για τις εφαρμογές πολυμέσων. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων, οδηγηθήκαμε στην κατασκευή μιας Οντολογίας μόνο των Οπτικών Περιγραφών του MPEG-7 (ΟΟΠ - *Visual Descriptor Ontology - VDO*), που κατασκευάστηκε με μεγάλη λεπτομέρεια σύμφωνα με το τρόπο που περιγράφεται το οπτικό μέρος του προτύπου MPEG-7.

5.1.1 Η Δομή της Οντολογίας Οπτικών Περιγραφών

Η *Οντολογία Οπτικών Περιγραφών* ΟΟΠ υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το Ontoedit [105] ένα περιβάλλον που υποστηρίζει την ανάπτυξη και την επεξεργασία των οντολογιών με τη χρήση γραφικών μέσων. Χρησιμοποιώντας αυτό το εργαλείο ήταν δυνατή η δημιουργία μιας οντολογίας που μπορούσε να εξαχθεί σε RDF και DAML+OIL. Η *οπτική περιγραφή* (*Visual Description*) ακολουθεί την προδιαγραφή του *οπτικού μέρους* (*Visual Part*) του προτύπου MPEG-7, με διάφορες τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να τροποποιηθεί το σχήμα XML του προτύπου MPEG-7 σε μια οντολογία.

Το δέντρο της ΟΟΠ αποτελείται από τις κύριες έννοιες *Τμήμα* (Region), *Χαρακτηριστικό* (Feature), *Οπτικός Περιγραφέας* (VisualDescriptor) και *Μεταέννοιες* (Metaconcepts) όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.1. Καμία από αυτές τις έννοιες δεν συμπεριλαμβάνεται στο σχήμα XML που ορίζει το πρότυπο MPEG-7, όμως η δημιουργία τους ήταν απαραίτητη προκειμένου να δημιουργηθεί μια σωστή ιεραρχία εννοιών για την οντολογία. Η έννοια *Οπτικός Περιγραφέας* η οποία θα περιγραφεί συνοπτικά παρακάτω, περιέχει τους οπτικούς περιγραφείς όπως αυτοί καθορίζονται από το πρότυπο MPEG-7. Από την άλλη, οι έννοιες *Μεταέννοιες*, *Τμήμα* και *Χαρακτηριστικό* περιέχουν μερικές πρόσθετες έννοιες που ήταν απαραίτητες για την VDO αλλά δεν είναι σαφώς ορισμένες στο σχήμα XML του προτύπου MPEG-7.

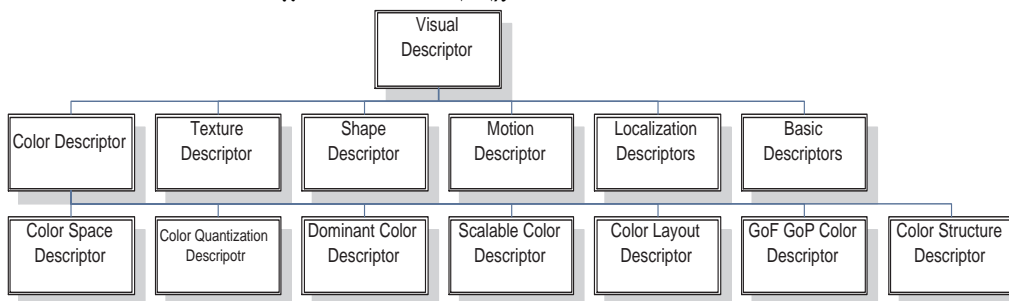
Σχήμα 5.1: Η δομή της οντολογία των οπτικών περιγραφών.



Επειδή η ΟΟΠ κατασκευάστηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η ενσωμάτωση του

οπτικού μέρους του προτύπου MPEG-7, ένας συσχετισμός του οπτικού περιεχομένου (*Visual Content*) και των οπτικών περιγραφέων (*Visual Descriptor*) ήταν απαραίτητος. Οι έννοιες **Τμήμα** και **Χαρακτηριστικό** παρέχουν μια αφηρημένη προδιαγραφή του οπτικού περιεχομένου που περιγράφεται, συσχετίζοντας το κατάλληλα με τους οπτικούς περιγραφείς. Επομένως, η έννοια **Τμήμα** είναι μια έννοια που αντιπροσωπεύει μια περιοχή ενός οπτικού περιεχομένου και θέτει την σχέση έχει-**ΟπτικόςΠεριγραφέας** να έχει σαν σύνολο τιμών άτομα της έννοιας **ΟπτικόςΠεριγραφέας**. Με άλλα λόγια, αυτή η σχέση εξασφαλίζει ότι μια περιοχή έχει έναν οπτικό περιγραφέα που διευκρινίζει την περιγραφή και την σημασιολογία της έννοιας **ΟπτικόςΠεριγραφέας**. Με παρόμοιο τρόπο, η έννοια **Χαρακτηριστικό** αποτελείται από τέσσερις υπο-έννοιες που είναι οι έννοιες **Χρώμα** (*Color*), **Σχήμα** (*Shape*), **Κίνηση** (*Κίνηση*) και **Υφή** (*Texture*) που σχετίζονται με τις σχετικές υποκατηγορίες της έννοιας **ΟπτικόςΠεριγραφέας**, **ΠεριγραφέαςΧρώματος** (*ColorDescriptor*), **ΠεριγραφέαςΣχήματος** (*ShapeDescriptor*), **ΠεριγραφέαςΚίνησης** (*ΚίνησηDescriptor*) και **ΠεριγραφέαςΥφής** (*TextureDescriptor*).

Σχήμα 5.2: Η ιεραρχία του *Dominant Color*.



Η έννοια **ΟπτικόςΠεριγραφέας** είναι η κορυφαία έννοια στην ιεραρχία της οντολογίας μας, επειδή περιέχει όλους τους οπτικούς περιγραφείς. Ως εκ τούτου, αποτελείται από έξι υποκατηγορίες, μια για κάθε κατηγορία που ορίζεται στο πρότυπο MPEG-7. Αυτοί είναι το χρώμα (*color*), η μορφή (*shape*), η υφή (*texture*), κίνηση (*motion*), εντοπισμός (*localization*) καθώς και οι βασικοί περιγραφείς που είναι απαραίτητοι για τον καθορισμό των άλλων. Κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες περιλαμβάνει τους σχετικούς περιγραφείς που ορίζονται ως έννοιες στην οντολογία ΟΟΠ. Η μόνη κατηγορία που έχει τροποποιηθεί και δεν περιέχει όλους τους περιγραφείς του MPEG-7 είναι οι **ΒασικοίΠεριγραφείς** (*Basic Descriptors*). Αυτή η κατηγορία περιγραφών, στο πρότυπο MPEG-7 αποτελείται από πέντε περιγραφείς, από τους οποίους μόνο οι **Χωρικές2ΔΣυντεταγμένες** (*Spatial2DCoordinates*) και η **ΧρονικήΠαρεμβολή** (*TemporalInterpollation*) χρησιμοποιήθηκαν. Η παράλειψη των λοιπων περιγραφών (**ΔιάταξηΠλέγματος** (*GridLayout*), **ΔιάταξηΠλέγματος** (*TimeSeries*), **ΠολλαπλέςΟπτικέςΓωνίες** (*MultipleView*)) έγινε επειδή δεν ήταν δυνατό να υπολογιστούν από κάποιο αλγόριθμο ανάλυσης.

Εκτός της έννοιας **ΒασικοίΠεριγραφείς** οι άλλοι περιγραφείς αναπαράστηκαν όπως καθορίζεται από το πρότυπο MPEG-7. Οι οπτικοί περιγραφείς ορίζονται με τη χρησιμοποίηση άλλων συστατικών που τους διευκρινίζουν. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτή η αναπαράσταση στην οντολογία, καθορίσαμε πρώτα τα συστατικά κάθε ενός περιγραφέα και έπειτα χρησιμοποιώντας σχέσεις ορίσαμε το σύνολο τιμής τους. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται η αναπαράσταση της έννοιας **ΠεριγραφέαςΚυρίαρχουΧρώματος** (*DominantColorDescriptor*). Στο πρότυπο MPEG- 7 το κυρίαρχο χρώμα (*dominant color*) είναι ένας περιγραφέας

χρώματος (Color Descriptor) και πιο συγκεκριμένα, είναι ένας από τους επτά MPEG-7 περιγραφείς χρώματος. Επομένως, καθορίσαμε την έννοια ΠεριγραφέαςΚυρίαρχουΧρώματος ως υποέννοια της έννοιας ΠεριγραφέαςΧρώματος και ανάλογα την έννοια ΠεριγραφέαςΧρώματος ως υποέννοια της ΟπτικόςΠεριγραφέας.

Το επόμενο βήμα έπειτα από την εξασφάλιση της δομής του προτύπου MPEG-7 στη ΟΟΠ, ήταν η διασφάλιση των επιμέρους συστατικών της αναπαράστασης. Το κυρίαρχο χρώμα αντιπροσωπεύεται στο XML σχήμα του MPEG-7 ως σύνθετος τύπος και περιγράφεται από τα επιμέρους συστατικά του. Ορίζοντας την έννοια ΠεριγραφέαςΚυρίαρχουΧρώματος ως μια έννοια δημιουργήσαμε το σύνθετο τύπο και, ως εκ τούτου, την απαραίτητη μετατροπή για την ΟΟΠ. Τα συστατικά που διευκρινίζουν το κυρίαρχο χρώμα είναι οι τιμές (values), η χωρική συνεκτικότητα (spatialCoherency), ο χρωματικός χώρος (colorSpace) και ο κβαντισμός χρώματος (colorQuantization) που ορίζονται ως σχέσεις. Μεταξύ αυτών των σχέσεων μόνο η χωρική συνεκτικότητα ήταν δυνατό να διευκρινιστεί, χρησιμοποιώντας τους δεδομένους από το σχήμα XML. Τα υπόλοιπα συστατικά που όριζαν την έννοια ΠεριγραφέαςΚυρίαρχουΧρώματος ήταν σύνθετου τύπου, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη μιας νέας έννοιας που θα τα αναπαριστούσε. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η έννοια Μεταέννοιες, η οποία περιλαμβάνει τις έννοιες που παρά το γεγονός ότι δεν ήταν εμφανείς με μια πρώτη ματιά, κατά την εξέταση του XML σχήματος του προτύπου MPEG-7 ήταν απαραίτητες για την υλοποίηση της ΟΟΠ.

5.1.2 Αξιολόγηση της Οντολογίας Οπτικών Περιγραφών

Κατά την διάρκεια της υλοποίησης της ΟΟΠ υπήρχαν κάποια προβλήματα. Η χρήση του Ontoedit για την ανάπτυξη της ΟΟΠ μας επέτρεψε την εξαγωγή σε μορφή RDF ή DAML+OIL, που τότε χρησιμοποιούνταν, αλλά παρουσίαζαν προβλήματα με τους τύπους δεδομένων. Εξετάζοντάς την αναπαράσταση της έννοιας ΠεριγραφέαςΚυρίαρχουΧρώματος, μπορεί να παρατηρηθεί ότι πρέπει να διευκρινίσουμε τύπους δεδομένων των συστατικών της. Η έννοια ΠεριγραφέαςΚυρίαρχουΧρώματος αποτελείται από τις τιμές, την χωρική συνεκτικότητα, τον χρωματικό χώρο και τον κβαντισμό χρώματος. Η χωρική συνεκτικότητα είναι τύπου double το οποίο κληρονομείται από το XMLSchema, είτε η οντολογία εξαχθεί σε RDF ή DAML+OIL.

Εκτός από αυτό το συστατικό, έπρεπε να αναπαραστήσουμε τα υπόλοιπα συστατικά της έννοιας ΠεριγραφέαςΚυρίαρχουΧρώματος και δεδομένου ότι αυτά περιγράφονταν από σύνθετους τύπους δημιουργήσαμε πρόσθετες έννοιες. Δυστυχώς όμως, αυτό ήταν μια πρόχειρη λύση του προβλήματος μια και η RDF είναι περιοριστική όσο αφορά την δήλωση ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες λοιπόν που δηλώνονται έπρεπε να έχουν ορισμένο σύνολο τιμών, που να είναι ένας τύπος δεδομένων του σχήματος XML. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που συναντήσαμε ήταν οι απαριθμήσεις του σχήματος XML στο πρότυπο MPEG-7. Ο τρόπος με τον οποίο προσπαθήσαμε να τους αναπαραστήσουμε ήταν ο καθορισμός κατάλληλων περιορισμών πληθικότητας στις σχέσεις της ΟΟΠ. Αυτή η λύση ήταν μερικώς ικανοποιητική δεδομένου ότι οι περιορισμοί πληθικότητας ήταν μόνο διαθέσιμοι σε DAML+OIL.

Παρά τα παραπάνω προβλήματα της, η ΟΟΠ εφαρμόστηκε αποτελεσματικά για την αναπαράσταση γνώσης και την τεκμηρίωση εγγράφων πολυμεσικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, σε συνεργασία με άλλους ερευνητές [122, 161, 183], παρουσιάστηκε μια υποδομή γνώσης και μια πλατφόρμα για τη σημασιολογική τεκμηρίωση με

σκοπό να γεφυρωθεί το χάσμα των δύο μέχρι τότε προσεγγίσεων που βασίζονταν είτε σε χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου (όπως το `dominantColor`) ή σε σημασιολογικούς χαρακτηρισμούς (π.χ. αμάξι, ρόδα). Επιπλέον, παρουσιάστηκε ένα εργαλείο που επιτρέπει τη σύνδεση χαμηλού επιπέδου MPEG-7 οπτικών περιγραφέντων στις οντολογίες. Με αυτό το τρόπο κατασκευάστηκαν οντολογίες που περιλάμβαναν πρωτότυπους χαρακτηρισμούς υψηλού επιπέδου εννοιών περιοχών μαζί με τους αντίστοιχους οπτικούς περιγραφείς. Η υποδομή αυτή χρησιμοποιήθηκε από ένα πλαίσιο που διαχειριζόταν προβλήματα όπως η κατάτμηση (*segmentation*), η παρακολούθηση (*tracking*), η εξαγωγή και το ταίριασμα χαρακτηριστικών, με σκοπό να ταξινομεί σκηνές, να προσδιορίζει και να ονοματίζει αντικείμενα, και κατά συνέπεια να δημιουργεί αυτόματα σημασιολογικά μεταδεδομένα.

5.2 Ταξινόμηση Βυζαντινών Εικόνων

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, σημαντικές πρωτοβουλίες ψηφιοποίησης έχουν λάβει χώρα παγκοσμίως με σκοπό τη διατήρηση της πολιτισμικής κληρονομιάς. Λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας, έχει αρχίσει, με ταχύτατους ρυθμούς, η ψηφιοποίηση πολιτιστικού υλικού και η δημιουργία ψηφιακών συλλογών. Εντούτοις, διάφορα θέματα προέκυψαν σχετικά με τη δημιουργία των ψηφιακών πολιτιστικών δεδομένων και την αποθήκευσή τους καθώς και με τη δημιουργία συστημάτων για αναζήτηση και ανάκτηση του ψηφιακού υλικού, την ασφάλεια στη μεταφορά του και τη σωστή χρήση του. Όσον αφορά τη δημιουργία των ψηφιακών πολιτιστικών συλλογών, σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, εκδόθηκαν σε κάθε χώρα κανόνες σωστής ψηφιοποίησης των πολιτιστικών δεδομένων, ανά κατηγορία, καθώς και χρήση κοινών προτύπων, για τις διάφορες μορφές μεταδεδομένων, με σκοπό την αποτελεσματική τεκμηρίωση του υλικού.

Διάφορα πρότυπα, τα οποία εξασφαλίζουν την διαλειτουργικότητα, έχουν αναπτυχθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί κατά τη διαδικασία τεκμηρίωσης υλικού, με παράλληλη χρήση τεχνολογιών σημασιολογικού Ιστού [95], έχοντας ως στόχο τη σημασιολογική περιγραφή των ψηφιακών πολιτιστικών συλλογών. Σε αυτό το πλαίσιο, ο σημασιολογικός σχολιασμός του πολιτιστικού περιεχομένου απαιτεί ειδικούς τεκμηριωτές ανά κατηγορία πολιτιστικού υλικού, γεγονός που συνεπάγεται χρονοβόρες και πολυέξοδες διαδικασίες, αν αναλογιστεί κανείς τον τεράστιο όγκο του υλικού προς τεκμηρίωση. Αυτοί ήταν και οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση τεχνικών για την αυτόματη ή ημιαυτόματη ανάλυση και ταξινόμηση του ψηφιοποιημένου πολιτιστικού υλικού.

Η χρήση των τεχνικών ψηφιακής ανάλυσης εικόνας έχει αρχίσει να προτείνεται στην ερευνητική κοινότητα ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο τις συνεργασίες μεταξύ ερευνητικών ομάδων από διαφορετικά ερευνητικά πεδία (π.χ. ιστορικών τέχνης και μηχανικών υπολογιστών) [218] [219]. Τον Ιούλιο του 2008, στο περιοδικό του IEEE Signal Processing Magazine, παρουσιάστηκαν μερικές ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες εφαρμογές της ανάλυσης εικόνας στην περιοχή της πολιτιστικής κληρονομιάς. Στην εργασία [226], περιγράφεται η πολυφασματική ανάλυση του ψηφιοποιημένου έργου Mona Lisa, ενώ στην εργασία [220] προτείνεται μια πρωτότυπη πολυφασματική τεχνική ψηφιακής απεικόνισης για περιοχές εικόνων σε ένα σύνολο εικόνων που περιέχουν παρόμοια χαρακτηριστικά όταν εκτίθενται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτή η τεχνική παρέχει τον εντοπισμό του υλικού και τον προσδιορισμό της θέσης του μέσα σε ολόκληρη την ζωγραφισμένη επιφάνεια. Η συνεργασία μεταξύ

διαφορετικών ερευνητικών περιοχών είναι εμφανής στην εργασία [218], όπου τρεις ερευνητικές ομάδες ανέπτυξαν σύστημα που προσδιορίζει αυτόματα το ζωγράφο ενός πίνακα βάσει των χαρακτηριστικών πινελιών- της τεχνοτροπίας δηλαδή του έργου. Αυτά τα χαρακτηριστικά προσδιορίστηκαν από τους ιστορικούς τέχνης, σύμφωνα με τη γνώση και τις τεχνικές που χρησιμοποιούν, όταν καλούνται να επικυρώσουν ένα έργο.

Οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούν μόνο τη χαμηλού επιπέδου ανάλυση των εικόνων, χωρίς να χρησιμοποιούν τη γνώση του πεδίου. Για αυτό το λόγο προέκυψαν κάποιες δυσκολίες σχετικά με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης εικόνων με σκοπό τον αυτόματο χαρακτηρισμό ψηφιακών πολιτιστικών εικόνων. Η πρώτη είναι η αποτυχία των σημασιολογικών αλγορίθμων κατάτμησης και ανάλυσης εικόνας υπό πραγματικές συνθήκες. Αυτό οφείλεται στην υψηλή μεταβλητότητα του περιεχομένου της εικόνας και σε περιβαλλοντικές παραμέτρους (όπως φωτεινότητα), τα οποία συμβάλλουν στην πολυπλοκότητα του προβλήματος. Η δεύτερη δυσκολία είναι η εκτενής και ασαφής φύση της γνώσης του πολιτιστικού περιεχομένου της εικόνας, το οποίο περιπλέκει την αναπαράσταση της τυπικής γνώσης και της συλλογιστικής.

Ωστόσο, αν περιορίσουμε την μεταβλητότητα των παραμέτρων, μπορούμε να ορίσουμε πολιτιστικές περιοχές που είναι κατάλληλες για χρήση αυτόματων μεθόδων ανάλυσης εικόνας και τεκμηρίωσης. Οι βυζαντινές εικόνες ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία. Το προκαθορισμένο περιεχόμενο εικόνας και η χαμηλή μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών της οδηγεί στην επιτυχή εφαρμογή των μεθόδων ανάλυσης εικόνας. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύξαμε ένα σύστημα που εκμεταλλεύεται τη γνώση του πεδίου για να αναλύσει αυτόματα τις εικόνες. Το σύστημά μας ανιχνεύει ένα σύνολο εννοιών και ιδιοτήτων που απεικονίζονται στην εικόνα, σύμφωνα με το οποίο αναγνωρίζεται το πρόσωπο της Άγιας μορφής, και συνεπώς γίνεται σημασιολογική ταξινόμησή της και ανίχνευση συγκεκριμένων μορφών σε Βυζαντινές εικόνες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η γνώση του πεδίου, όπως αυτή καταγράφηκε στο [11] καθώς και το σύστημα που αναπτύχθηκε σε αυτό το πλαίσιο.

5.2.1 Ερμηνεία της Βυζαντινής Τέχνης

Με τον όρο Βυζαντινή τέχνη αναφερόμαστε γενικά στην καλλιτεχνική παραγωγή και έκφραση που αναπτύχθηκε την περίοδο της Βυζαντινής Αυτοκρατορίας μεταξύ του 4ου αιώνα μ.Χ. και της άλωσης της Κωνσταντινούπολης το 1453. Η βυζαντινή τέχνη θεωρείται ότι αναπτύχθηκε αρχικά στην πρωτεύουσα της αυτοκρατορίας, την Κωνσταντινούπολη, αλλά επεκτάθηκε στο μεγαλύτερο τμήμα του μεσογειακού κόσμου και ανατολικά ως την Αρμενία. Υπήρξε αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της αρχαίας ελληνικής παράδοσης και της ανατολικής επίδρασης και θρησκευτικότητας. Με την επικράτηση του Χριστιανισμού, η βυζαντινή τεχνοτροπία χαρακτηρίζεται από τα στοιχεία μιας αμιγώς θρησκευτικής τέχνης, που θεωρήθηκε παράδοση για τους ορθόδοξους χριστιανούς, που έζησαν υπό τον οθωμανικό κλοιό, τη μεταβυζαντινή περίοδο (16ος- 19ος αιώνας).

Στις αρχές του 17ου αιώνα γράφτηκαν διάφορα εγχειρίδια τα οποία περιέγραφαν τις τάσεις τις εποχής όσο αφορά τη βυζαντινή τέχνη. Η κυριότερη από αυτές τις εργασίες ήταν "Η ερμηνεία της Ζωγραφικής Τέχνης" του Διονύσιου εκ Φουρνά Ευρητανίας [11] στην οποία ορίζονται ακριβείς κανόνες και τεχνοτροπίες που πρέπει οι ζωγράφοι να χρησιμοποιούν στα έργα τους.

Η βυζαντινή εικονογραφία ακολουθεί μια μοναδική σύμβαση της ζωγραφικής. Η

καλλιτεχνική γλώσσα των βυζαντινών ζωγράφων χαρακτηρίζεται από την προφανή απλότητα και λιτότητα, από πλασματικά και συμβολικά χρώματα, από την έλλειψη προοπτικής και τις παράξενες αναλογίες. Οι μορφές των Αγίων τίθενται πέρα από πραγματικό χρόνο και χώρο μέσω της χρήσης των χρυσών φόντων. Η πιο σημαντική μορφή της εικόνας απεικονίζεται σε μετωπική θέση, εστιάζοντας στα μάτια, στην έκφραση του προσώπου και στα χέρια. Αυτή η στάση της μορφής βοηθά στην άμεση επαφή με τον θεατή. Η σαφήνεια είναι ο κανόνας, όχι μόνο στην περιγραφή των μορφών αλλά και στην τοποθέτηση πολλών μορφών σε μία εικόνα με σκοπό την δημιουργία ισορροπημένων συνθέσεων που να αποδίδουν παραστάσεις από την θρησκευτική πίστη. Τα πρόσωπα των μορφών συνήθως έχουν μεγάλα μάτια και αυτιά, μακριές και λεπτές μύτες, μικρά στόματα, και κάθε ένα από αυτά χρωματίζεται βάσει συγκεκριμένων κανόνων.

Κατά την απεικόνιση των διάφορων μορφών, ένας ζωγράφος βυζαντινών έργων είναι υποχρεωμένος να ακολουθεί τους κανόνες του εγχειριδίου του Διονυσίου εκ Φουρνά [11] σχετικά με τη στάση του σώματος, το στυλ των μαλλιών και της γενειάδας, την ενδυμασία και άλλες ιδιότητες. Κατά αυτόν τον τρόπο, συγκεκριμένες μορφές καθορίζονται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προσώπου. Παραδείγματος χάριν, ο Ιησούς απεικονίζεται ως νέος με μακριά, σπαστά και πυκνά και σκούρα μαλλιά και με κοντή, ίσια και σκούρη γενειάδα.

Σύμφωνα με το εικονογραφικό μέρος του έργου του Διονυσίου εκ Φουρνά, μια εικόνα που περιέχει μια μορφή Αγίου μπορεί να χωρισθεί σε σημασιολογικές περιοχές, καθεμία από τις οποίες έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που την κάνουν διαχωρίσιμη. Η πρώτη περιοχή είναι το κεφάλι που περιέχει και τα πιο διακριτά χαρακτηριστικά της Αγίας μορφής που απεικονίζεται όπως το τα μαλλιά, το μούσι κ.α. Οι υπόλοιπες περιοχές μιας εικόνας περιλαμβάνουν το στήθος, την μέση και τα πόδια της μορφής που απεικονίζεται.

Η κεφαλή είναι σε ελλειπτικό σχήμα, εστιάζοντας στα μάτια και στην έκφραση του προσώπου. Ο μεγάλος άξονας είναι κατά μήκος του κάθετου μέρους της κεφαλής και το μήκος του είναι ίσο με τέσσερις φορές το μέγεθος της μύτης (H). (Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του Διονυσίου εκ Φουρνά το μήκος της μύτης χρησιμεύει ως μια μέτρηση για την αρμονική αναλογίες για την αναπαράσταση του προσώπου και του σώματος.) Ο μικρότερος άξονας είναι το οριζόντιο τμήμα της κεφαλής και είναι ίσος με 3H. Η περιοχή του κεφαλιού μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα ίσα τμήματα, τα μαλλιά, το μέτωπο, η μύτη και το υπόλοιπο της κεφαλής κάτω από τη μύτη.

Τα χρώματα των σαρκωμάτων του προσώπου καθορίζονται μοναδικά από τον αγιογράφο. Αρχικά, ο αγιογράφος δημιουργεί το βασικό χρώμα για τα σαρκώματα που καλείται *σάρκωμα*. Αναμιγνύοντας το σάρκωμα με μαύρο χρώμα δημιουργεί το σκούρο χρώμα που καλείται *σκούρεμα* απλώνεται ως βάση σ' όλη την επιφάνεια των σαρκωμάτων και είναι ο τόνος που θα μείνει στο τέλος στο σκιαζόμενο μέρος. Με την ανάμειξη των δύο χρωμάτων δημιουργείται ένα ενδιάμεσο χρώμα που καλείται *προπλασμός* και χρησιμοποιείται για να ενώσει τα σημεία του σαρκώματος με τα σημεία σκουρέματος, δημιουργώντας μια ομαλή μετάβαση. Έπειτα αναμιγνύοντας το σάρκωμα με λευκό χρώμα δημιουργείται το χρώμα που χρησιμοποιείται για τα φωτίσματα του προσώπου και καλείται *φώτισμα*. Το φώτισμα ουσιαστικά συμβάλλει στο να είναι ικανοποιητικός ο όγκος που θα πάρει το πρόσωπο. Στο τελικό στάδιο, ο αγιογράφος για να τονίσει τα φωτίσματα βάζει τις ψιμμυθιές, πολύ λεπτές πινελιές σε καθαρό, σχεδόν άσπρο χρώμα, με τις οποίες επεμβαίνει καθοριστικά στην έκφραση του προσώπου της μορφής. Με ανάλογο τρόπο σχεδιάζονται τα μαλλιά, η γενειάδα και το

μουστάκι.

5.2.2 Σύστημα Ταξινόμησης Βυζαντινών Εικόνων

Παρά το γεγονός ότι η εργασία του Διονύσιου εκ Φουρνά αναφέρεται σε ασαφείς έννοιες όπως για παράδειγμα τα "μακριά μαλλιά" ή το "νεαρό πρόσωπο" κ.α. αυτές προσδιορίζονται με αυστηρό τρόπο. Συνεπώς η γνώση που περιγράφεται στην εργασία του Διονύσιου εκ Φουρνά μπορεί να αναπαρασταθεί τυπικά σε μια βάση γνώσης. Από την άλλη, όμως, κανένας αλγόριθμος ανάλυσης εικόνας δεν μπορεί να παράγει ακριβή αποτελέσματα ειδικά για ένα σύνολο δεδομένων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Επιπρόσθετα, πολλά από τα Βυζαντινά έργα είναι δυνατό να παρερμηνευτούν λόγω της φθοράς που έχουν υποστεί εξαιτίας της ηλικίας τους. Εκτός των παραπάνω, η ανακριβής φύση των εννοιών όπως η απόσταση, το χρώμα και το μήκος εισάγουν την ασάφεια στην κατηγοριοποίηση των αντικειμένων. Για παράδειγμα πολλές φορές μια αγιογραφία αναπαριστά ένα νεαρό πρόσωπο αλλά μόνο σε ένα συγκεκριμένο βαθμό. Επειδή σε τέτοιες περιπτώσεις οι κλασικές ΠΛ δεν μπορούν να αναπαραστήσουν αποτελεσματικά την γνώση χρησιμοποιήσαμε ασαφείς ΠΛ.

Πιο συγκεκριμένα, για να αναγνωρίσουμε τη μορφή που απεικονίζεται σε μια αγιογραφία, η οποία στη Βυζαντινή τέχνη έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, συνδυάσαμε αλγόριθμους ανάλυσης εικόνας με την εκφραστική δύναμη των ασαφών ΠΛ. Η γνώση που περιγράφεται στο εγχειρίδιο του Διονύσιου εκ Φουρνά μετατράπηκε σε ένα σώμα ορολογίας μιας βάσης γνώσης που το σώμα ισχυρισμών αρχικοποιούνταν από τα αποτελέσματα των αλγόριθμων ανάλυσης στην ψηφιοποιημένη αγιογραφία. Έπειτα, με τη χρήση του συστήματος συλλογιστικής FiRE και σύμφωνα με το σώμα ορολογίας που ορίσαμε προσδιορίζουμε την μορφή που απεικονίζεται στην αγιογραφία. Η αρχιτεκτονική του συστήματος για την κατηγοριοποίηση Βυζαντινών εικόνων φαίνεται στο Σχήμα 5.3 και αποτελείται από δύο υποσυστήματα, το σύστημα ανάλυσης Βυζαντινών εικόνων και το σύστημα αναπαράστασης γνώσης και συλλογιστικής τα οποία παρουσιάζονται στις παρακάτω υποενότητες.

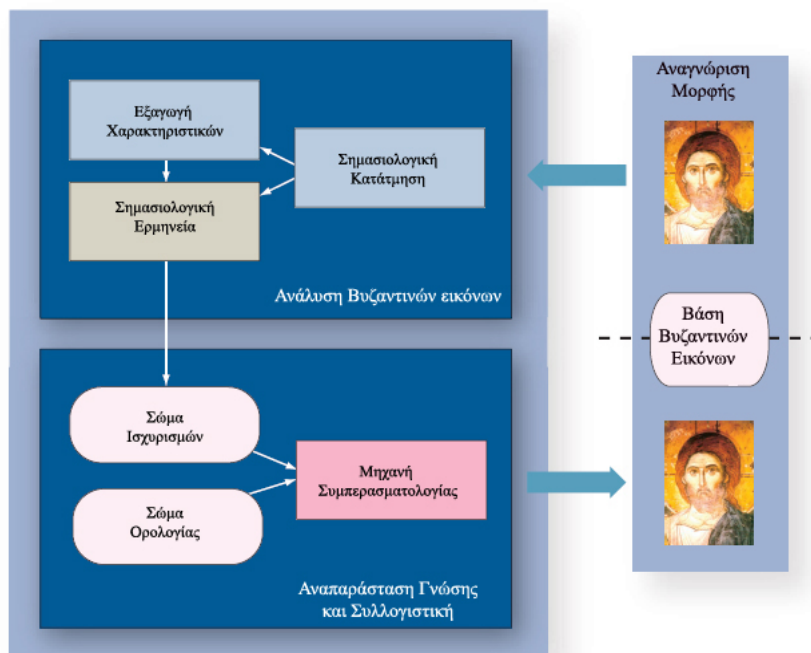
5.2.2.1 Ανάλυση Βυζαντινών Εικόνων

Το υποσύστημα της ανάλυσης Βυζαντινών εικόνων χρησιμοποιώντας την γνώση του Διονύσιου εκ Φουρνά για την επεξεργασία των εικόνων παράγει το ασαφές σώμα ισχυρισμών της βάσης γνώσης¹. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τη *σημασιολογική κατάτμηση*, την *εξαγωγή χαρακτηριστικών* και τη *σημασιολογική ερμηνεία* των εξαγόμενων τμημάτων.

Το πρώτο βήμα της *σημασιολογικής κατάτμησης* είναι ο εντοπισμός του προσώπου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, ενώ έπειτα εντοπίζονται τα μάτια της μορφής. Σύμφωνα με τον Διονύσιο εκ Φουρνά, η απόσταση μεταξύ των ματιών είναι ίση με το ύψος της μύτης, οπότε εντοπίζοντας τις ακριβείς θέσεις των ματιών και μετρώντας την μεταξύ τους απόσταση, έχουμε μια αρχική προσέγγιση για το ύψος της μύτης. Στη συνέχεια εντοπίζεται ο άξονας συμμετρίας, ο οποίος ορίζεται στο εγχειρίδιο του Διονύσιου εκ

¹Την υλοποίηση αυτού του υποσυστήματος επιμελήθηκε η συνεργάτης μας σε αυτή την εργασία Δρ. Παρασκευή Τζούβελη και για αυτό το λόγο σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να παρουσιαστεί συνοπτικά η διαδικασία δημιουργίας του σώματος ισχυρισμών για την κατανόηση των επόμενων ενότητων. Ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται για λεπτομέρειες που αφορούν τους αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας που χρησιμοποιήθηκαν παραπέμπεται στο [231].

Σχήμα 5.3: Η αρχιτεκτονική του συστήματος για την κατηγοριοποίηση Βυζαντινών εικόνων.

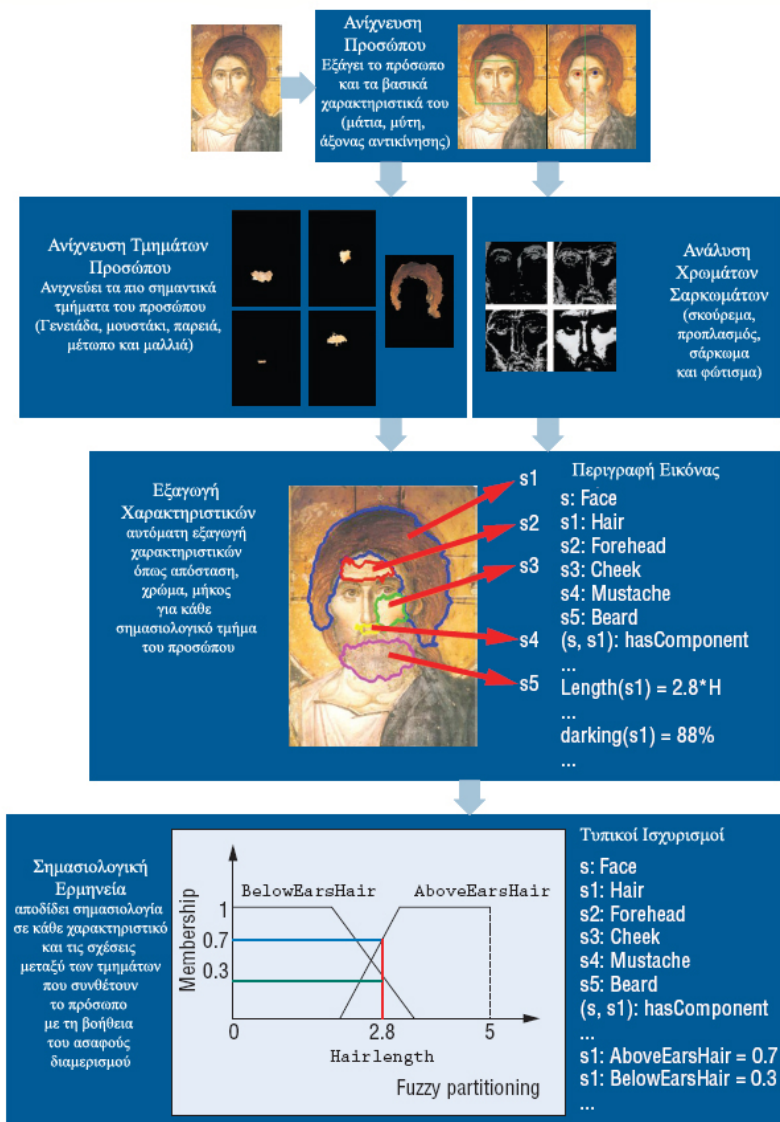


Φουρνά και είναι καθοριστικός επειδή μας φανερώνει την πλευρά του προσώπου που έχει τα πιο έντονα χαρακτηριστικά από τα οποία εξάγονται πληροφορίες.

Έχοντας υπολογίσει το ύψος, τη θέση της μύτης και τον άξονα συμμετρίας, γνωρίζουμε όλα τα τμήματα στα οποία χωρίζεται η μορφή. Επόμενο στάδιο λοιπόν είναι η ανίχνευση και η εξαγωγή των χαρακτηριστικών της μορφής όπως ορίζονται από το Διονύσιο εκ Φουρνά που είναι τα μαλλιά, το μέτωπο, οι παρειές, η γενειάδα και το μουστάκι. Για την υλοποίηση αυτού του βήματος έχει υιοθετηθεί ο αλγόριθμος που προτείνεται από τους Boykon et al. [85]. Στη συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός των χρωμάτων που ο αγιογράφος έχει χρησιμοποιήσει στην περιοχή του προσώπου. Γι'αυτό το σκοπό έχει χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος κατάτμησης που προτάθηκε από τον Otsu [20] εξάγοντας τα τέσσερα βασικά χρώματα, σκούρεμα, προπλασμό, σάρκωμα και φώτισμα της μορφής.

Η εξαγωγή των ιδιοτήτων του κάθε σημασιολογικού τμήματος μας οδηγεί στην σημασιολογική ερμηνεία του κάθε τμήματος ανά ιδιότητα (π.χ. μήκος, χρώμα, μορφή) σύμφωνα με εγχειρίδιο του Διονύσιου εκ Φουρνά. Έτσι εξάγονται κάποιες σημαντικές ονομαστικές έννοιες όπως "Μαυρομάλλης", "Βουρλομάλλης", "Μαυρογένης", "Δασογένης" κ.α. βάσει των οποίων χαρακτηρίζονται κάποιες άγιες μορφές. Έχοντας εξάγει τα χαρακτηριστικά από κάθε σημασιολογικό τμήμα μπορούμε να προχωρήσουμε στην καταγραφή αυτών με τη μορφή ασαφών ισχυρισμών. Η ασάφεια εισάγεται επειδή δεν μπορούμε με σαφήνεια να καθορίσουμε, εάν π.χ. η μορφή έχει την ιδιότητα μακρυμάλλης βάσει του μήκους. Αυτή η δυσκολία οφείλεται στην ασάφεια του ορισμού του μήκους και στην ανακρίβεια που εισάγεται από την εξαγωγή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, όπως φαίνεται και στην εικόνα με τις κατατμήσεις των τμημάτων. Για να αποσαφηνίσουμε αυτού του είδους τις ανακρίβειες χρησιμοποιήθηκαν ασαφείς διαμερίσεις από τις οποίες καθορίζεται ο βαθμός συμμετοχής κάθε τμήματος της αγιογραφίας στην έννοια που ορίζεται από τα χαρακτηριστικά της.

Σχήμα 5.4: Ανάλυση βυζαντινής εικόνας.



5.2.2.2 Αναπαράσταση Γνώσης για Βυζαντινές Εικόνες

Όπως είδαμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποτελούν το ασαφές σώμα ισχυρισμών της βάσης γνώσης. Έχοντας, λοιπόν, σαν στόχο την κατηγοριοποίηση των Βυζαντινών αγιογραφιών, κατασκευάσαμε ένα σώμα ορολογίας χρησιμοποιώντας τις εξαγόμενες από το υποσύστημα της ανάλυσης έννοιες, στο οποίο οι κανόνες που όριζε ο Διονύσιος εκ Φουρνά στην εργασία του είχαν μετατραπεί σε αξιώματα.

Με βάση την τεχνογνωσία που αποκτήθηκε από τη μελέτη και εφαρμογή του εργαλείου του Διονυσίου εκ Φουρνά και με τη βοήθεια των ειδικών σε θέματα Βυζαντινής αγιογραφίας δημιουργήθηκε το σώμα ορολογίας. Για τη δημιουργία της γνώσης έγινε η υπόθεση ότι μία αγιογραφία αποτελείται από τμήματα (Segments) τα οποία αποτελούν το σύνολο των ατόμων (\mathcal{I}). Τα βασικά τμήματα τα οποία εντοπίζονται αρχικά είναι το πρόσωπο, τα μάτια και η μύτη βάσει των οποίων εντοπίζονται στη συνέχεια τα τμήματα που αποτελούν το μέτωπο, το μαλλί, το μουστάκι, την παρειά και το γενειάδα. Το σύνολο των εννοιών που αποτελούν το αλφάβητο της βάσης γνώσης μας περιέχει τις έννοιες που εξάγονται από το υποσύστημα της ανάλυσης και προσδιο-

ρίζουν τις ιδιότητες του κάθε σημασιολογικού τμήματος. Για παράδειγμα, οι έννοιες που μπορούν να χαρακτηρίσουν το τμήμα του μαλλιού είναι οι Δασυμάλλης, Ολιγομάλλης, Γκρίζομάλλης, Πολιασμένος, Ισιοκέφαλος κ.α. Τέλος, οι ρόλοι της βάσης γνώσης μας που εξάγονται από το υποσύστημα της ανάλυσης ορίζουν τις χωρικές σχέσεις. Για παράδειγμα με τον ρόλο έχει-Τμήμα δηλώνουμε ότι μια εικόνα έχει-Τμήμα όλα τα παραπάνω τμήματα καθώς και ότι το τμήμα του προσώπου έχει-Τμήμα όλα τα τμήματα τα οποία είναι χαρακτηριστικά του προσώπου (δηλαδή το μέτωπο, το μαλλί, το μουστάκι κτλ), ενώ με τους ρόλους είναιΔεξιάΑπό, είναιΑριστεράΑπό κ.α. δηλώνονται πιο αναλυτικές χωρικές σχέσεις. Αναλυτικά το αλφάβητο που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη βάση γνώσης φαίνεται παρακάτω.

$C = \{\text{Δασυμάλλης, Ολιγομάλλης, ΠάνωΑποΑυτιά, ΚάτωΑποΑυτιά, ΠλοχμόςΑριστερά, ΠλοχμόςΔεξιά, ΠλοχμόςΚαιΣτους2Ωμους, Μαυρομάλλης, Γκρίζομάλλης, Πολιασμένος, Ισιοκέφαλος, Αγριοκέφαλος, Σγουροκέφαλος. ΜέτωποΝέου, ΜέτωποΓέρου, ΜουστάκιΣγουρό, ΜουστάκιΊσιο, Δασυγένης, Ολιγογένης, Κοντογένης, ΜακρυγένηςΟυΠολλά, Μακρυγένης, ΜακρυγένηςΩςΤηΜέση, ΜακρυγένηςΩςΤηΖώνη, ΜακρυγένηςΩςΤαΓόνατα, Οξυγένης, ΣτρογγυλογένηςΟλίγον, Στρογγυλογένης, Πλατυγένης, Φουντογένης, Βαδαρογένης, ΤρίχαςΗγριωμένας, έχειΚυματισμό, Κατζαρογένης, ΠηγούνιΜεΤρίχας, Γυμνοπώγων, ΑνοικτόχρωμοΓένυ, ΣκουρόχρωμοΓένυ}\}$.

$R = \{\text{είναιΠάνωΑπό, είναιΚάτωΑπό, είναιΔεξιάΑπό, είναιΑριστεράΑπό, έχειΤμήμα}\}$

Το σώμα ορολογίας που δημιουργήθηκε εστιάζει στο πρόσωπο της μορφής, μια και αυτή η περιοχή είναι σημασιολογικά πλούσια, σύμφωνα με τον Διονύσιο εκ Φουρνά. Χρησιμοποιώντας το παραπάνω αλφάβητο ορίσαμε τις κύριες έννοιες του, που είναι η Αγιογραφία, το Πρόσωπο και το ΤμήμαΤουΠροσώπου. Οι έννοιες αυτές συνδέονται με τον ρόλο έχει-Κομμάτι καθώς και τον υπορόλο του έχει-Τμήμα για να προσδιορίσουμε εάν ένα τμήμα περιέχεται σε κάποιο άλλο. Επιπρόσθετα, ορίστηκε μια ιεραρχία των εννοιών που εξάγονται από το υποσύστημα της ανάλυσης. Για παράδειγμα, ορίστηκε η έννοια Μαλλιά σαν το υπερσύνολο των εννοιών που δίνουν χαρακτηριστικά των μαλλιών μιας μορφής που απεικονίζεται σε μια αγιογραφία. Ακόμα, ορίστηκαν αξιώματα για να δηλώσουμε ξένες έννοιες όπως και περιορισμούς, όπως για παράδειγμα ότι οι έννοιες ΜαλλιάΠάνωΑπόΑυτιά και ΜαλλιάΠάνωΑπόΑυτιά είναι ξένες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω έννοιες ορίσαμε κάποιες πιο περίπλοκες έννοιες, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που ορίζονται στο εγχειρίδιο του Διονύσιου εκ Φουρνά. Για παράδειγμα, ορίσαμε την έννοια ΠρόσωποΝεαρού σαν μια μορφή με μάυρα μαλλιά και γένια που δεν έχει ρυτίδες στο μέτωπο. Τέλος, με τη χρήση ορίσαμε έννοιες με τα χαρακτηριστικά κάποιων Αγίων, όπως το ΠρόσωποΧριστού, σύμφωνα με τον τρόπο που αναπαριστώνται βάσει του εγχειριδίου του Διονύσιου εκ Φουρνά. Ένα απόσπασμα του σώματος ορολογίας για τη κατηγοριοποίηση βυζαντινών εικόνων φαίνεται στον Πίνακα 5.1.

Για την συλλογιστική χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία συλλογιστικής του μέγιστου κάτω φράγματος. Στο Σχήμα 5.5 βλέπουμε πως γίνεται η αρχικοποίηση του σώματος ισχυρισμών και σύμφωνα με το σώμα ορολογίας ανιχνεύεται η εικόνα του Χριστού. Θάλλασα

Πίνακας 5.1: Ένα απόσπασμα του σώματος ορολογίας για τη κατηγοριοποίηση βυζαντινών εικόνων.

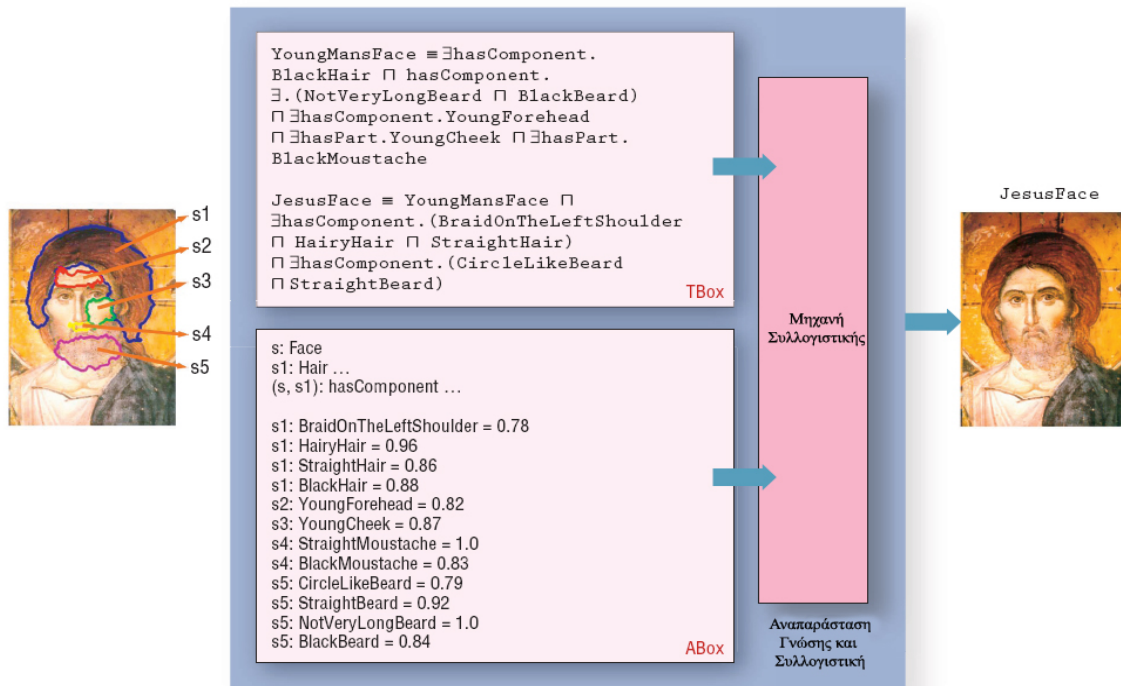
$T = \{$ Μαλλιά	\equiv	Δασυμάλλης \sqcup Ολιγομάλλης \sqcup ΠάνωΑποΑυτιά \sqcup ΚάτωΑποΑυτιά \sqcup ΠλοχμόςΑριστερά \sqcup ΠλοχμόςΔεξιά \sqcup ΠλοχμόςΚαιΣτους2Ωμους \sqcup Μαυρομάλλης \sqcup Γκριζομάλλης \sqcup Πολιασμένος \sqcup Ισοκέφαλος \sqcup Αγριοκέφαλος \sqcup Σγουροκέφαλος,
ΠυκνότηταΜούσιου	\equiv	Δασυγένης \sqcup Ολιγογένης,
ΜήκοςΜούσιου	\equiv	Κοντογένης \sqcup ΜακρυγένηςΟυΠολλά \sqcup ΜακρυγένηςΟυΠολλά \sqcup Μακρυγένης \sqcup ΜακρυγένηςΩςΤηΜέση \sqcup ΜακρυγένηςΩςΤηΖώνη \sqcup ΜακρυγένηςΩςΤαΓόνατα,
ΣχήμαΜούσιου	\equiv	Οξυγένης \sqcup ΣτρογγυλογένηςΟλίγον \sqcup Στρογγυλογένης \sqcup Πλατυγένης \sqcup Φουντογένης \sqcup Βαδαρογένης \sqcup ΜεΤρίχαςΗγριωμέναςΜούσιΜεΚυματισμό \sqcup Κατζαρογένης,
ΧρώμαΜούσιου	\equiv	ΑνοιχτόχρωμοΓένυ \sqcup ΣκουρόχρωμοΓένυ,
Μούσι	\equiv	ΠυκνότηταΜούσιου \sqcap ΜήκοςΜούσιου \sqcap ΣχήμαΜούσιου \sqcap ΧρώμαΜούσιου,
Πηγούνι	\equiv	ΠηγούνιΜεΤρίχας \sqcup Γυμνοπώγων,
Μέτωπο	\equiv	ΜέτωποΝέου \sqcup ΜέτωποΓέρου,
Μουστάκι	\equiv	ΜουστάκιΣγουρό \sqcup ΜουστάκίΊσιο,
ΤμήμαΤουΠροσώπου	\equiv	Μούσι \sqcup Πηγούνι \sqcup Μέτωπο \sqcup Μαλλιά \sqcup Μουστάκι,
Πρόσωπο	\equiv	Ύχει-Τμήμα. ΤμήμαΤουΠροσώπου,
Αγιογραφία	\equiv	Ύχει-Τμήμα.Πρόσωπο,
\perp	\sqsupseteq	ΜαλλιΘάλλασαΑπάνωΑπόΑυτιά \sqcap ΜαλλιάΚάτωΑπόΑυτιά,
ΠρόσωποΝεαρού	\equiv	Ύχει-Τμήμα.Μαυρομάλλης \sqcap Ύχει-Τμήμα. (Μαυρογένης \sqcap Κοντογένης) \sqcap Ύχει-Τμήμα.ΜέτωποΝέου \sqcap Ύχει-Τμήμα.ΠηγούνιΝέου \sqcap Ύχει-Τμήμα.ΜαύροΜουστάκι,
ΠρόσωποΧριστού	\equiv	ΠρόσωποΝεαρού \sqcap Ύχει-Τμήμα. (ΚοτσίδαΣτοΔεξίΌμο \sqcap ΠυκνόΜαλί \sqcap ΊσιοΜαλί) \sqcap Ύχει-Τμήμα. (Στρογγυλογένης \sqcap Ισογένης)}
\mathcal{R}	$=$	{έχειΤμήμα, είναιΑριστεράΑπό ⁻ = είναιΔεξιάΑπό, είναιΠάνωΑπό ⁻ = είναιΚάτωΑπό}

5.2.3 Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση του συστήματος για την ταξινόμηση βυζαντινών εικόνων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το Ίδρυμα του Όρους Σινά στην Ελλάδα το οποίο περιέχει 2000 ψηφιοποιημένες αγιογραφίες του 13ου αιώνα. Οι εικόνες αυτές απεικονίζουν πάνω από 50 αγίους που σύμφωνα με το εγχειρίδιο του Διονύσιου εκ Φουρνά έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η απόδοση του συστήματος αξιολογείται με το μέτρο της ορθότητας και ανάκλησης. Η ακρίβεια και η ανάκληση των μέτρων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους τύπους. Πιο συγκεκριμένα το μέτρο της ακρίβειας απεικονίζει την ακρίβεια του ταξινομητή, ενώ από την άλλη πλευρά, η ανάκληση δείχνει η γενίκευση του ταξινομητή. Μια περιοχή θεωρείται ότι έχει ταξινομηθεί σε μια συγκεκριμένη κατηγορία, αν έχει κερδίσει το μεγαλύτερο βαθμό από τον ταξινομητή.

$$\text{Ακρίβεια} = \frac{\text{Σωστά εκτιμώμενα τμήματα σε μια κατηγορία}}{\text{Συνολικός αριθμός ταξινομημένων τμημάτων στη κατηγορία}} \quad (5.1)$$

Σχήμα 5.5: Συλλογιστική για βυζαντινές εικόνες.



$$\text{Ανάκληση} = \frac{\text{Σωστά εκτιμώμενα τμήματα σε μια κατηγορία}}{\text{Συνολικός αριθμός τμημάτων στη κατηγορία}} \quad (5.2)$$

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για 20 από τις 50 κατηγορίες εικόνων που διαθέτει το σύνολο δεδομένων μας. Είναι φανερό ότι όσο περισσότερα χαρακτηριστικά του προσώπου περιέχονται στο σώμα ορολογίας τόσο πιο βελτιωμένο και ακριβές είναι το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης για την αγιογραφία. Αντίθετα, η απόδοση της μεθόδου μας μειώνεται όταν οι μορφές των Αγίων έχουν όμοια χαρακτηριστικά όπως π.χ. επειδή οι περισσότερες Αγίες φορούν μαντήλι.

5.3 Σημασιολογική Δεικτοδότηση και Ανάκληση Εικόνων

Το πρόβλημα της σημασιολογικής τεκμηρίωσης πολυμεσικού περιεχομένου είναι εγγενώς ασαφές και οι αλγόριθμοι ανάλυσης πολυμεσικού υλικού μπορούν να παράγουν πλούσια, αλλά ανακριβή πληροφορία για ένα πολυμεσικό έγγραφο που τις περισσότερες φορές παραμένει ανεκμετάλλευτη. Εκτός από το πολιτιστικό περιεχόμενο, που όπως είδαμε μπορεί να έχει συγκεκριμένους κανόνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση, η εισαγωγή γνώσης μπορεί να γίνει και σε άλλα πεδία εφαρμογής με διαφορετικό σκοπό. Αναπαριστώντας σωστά την ασαφή πληροφορία που εξάγεται από τους αλγόριθμους ανάλυσης, χρησιμοποιήσαμε την ασαφή ΠΛ $f_{KD-SHIN}$, με τη χρήση της μηχανής συλλογιστικής FiRE και προτείνουμε νέες προσεγγίσεις για την ανάλυση εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, σε συνεργασία με τον Δρ. Θάνο Αθανασιάδη προτείνουμε μια μεθοδολογία για τη σημασιολογική δεικτοδότηση (*semantic indexing*) και την σημασιολογική ανάκτηση (*semantic retrieval*)

Πίνακας 5.2: Αξιολόγηση συστήματος με τη χρήση των μέτρων ορθότητας και ανάκλησης

Κατηγορία	Σύνολο δεδομένων κατηγορία	FiRE Εκτιμώμενα	Ορθά Εκτιμώμενα	FiRE Συνολικά Εκτιμώμενα	Ορθότητα	Ανάκληση
Χριστός	70	58		67	0,87	0,83
Παναγία	60	43		54	0,80	0,72
Αγ.Πέτρος	50	38		44	0,86	0,76
Αγ.Παύλος	50	39		44	0,89	0,78
Αγ.Αικατερίνη	40	30		35	0,86	0,75
Αγ.Ιωάννης	40	29		37	0,78	0,73
Αγ.Λουκάς	40	28		33	0,85	0,70
Αγ.Ανδρέας	40	29		33	0,88	0,73
Αγ.Στέφανος	30	24		27	0,89	0,80
Αγ.Κων/νος	40	30		36	0,83	0,75
Αγ.Δημήτριος	40	31		36	0,86	0,78
Αγ.Γεώργιος	40	32		37	0,86	0,80
Αγ.Ελένη	40	31		37	0,84	0,78
Αγ.Πελαγία	20	15		17	0,88	0,75
Αγ.Νικόλαος	40	33		38	0,87	0,83
Αγ.Βασίλειος	40	31		37	0,84	0,78
Αγ.Αντώνιος	30	20		27	0,74	0,67
Αγ.Ευθύμιος	25	18		23	0,78	0,72
Αγ.Θωμάς	35	26		32	0,81	0,74
Αγ.Μηνάς	20	14		17	0,82	0,70

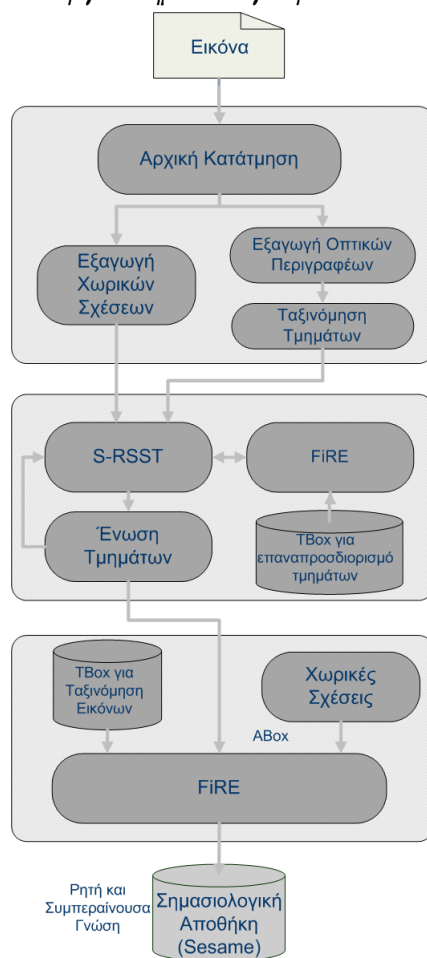
εικόνων, κατά την οποία χρησιμοποιούνται τεχνικές κατάτμησης (*segmentation*) και ταξινόμησης (*classification*) εικόνας καθώς και το σύστημα συλλογιστικής FiRE [8].

5.3.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος για Σημασιολογική Δεικτοδότηση και Ανάκληση Εικόνων

Το πρόβλημα της σημασιολογικής δεικτοδότησης (*semantic indexing*) και της σημασιολογικής ανάκτησης (*semantic retrieval*) αποτελεί πρόκληση για την ερευνητική κοινότητα και για την ορθή αντιμετώπιση του απαιτείται συνεισφορά από διαφορετικούς τομείς της επιστήμης. Αρχικά, είναι απαραίτητες αποδοτικές τεχνικές για την ανάλυση και επεξεργασία πολυμεσικού περιεχομένου, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή πληροφοριών. Επιπλέον, οι τεχνολογίες γνώσης είναι υπεύθυνες για την αποτελεσματική αναπαράσταση των παρεχόμενων πληροφοριών καθώς και για την εξαγωγή νέας υπονοούμενης πληροφορίας, οπότε είναι αυτό δυνατό. Τέλος, η γνώση που εξάχθηκε, υπονοούμενη και ρητή, πρέπει να αποθηκεύεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι προσιτή μέσω ενός φιλικού προς το χρήστη περιβάλλοντος.

Οι περισσότερες προσεγγίσεις σχετικά με τη σημασιολογική ανάλυση και δεικτοδότηση στηρίζονται στην ανίχνευση εννοιών. Η αξιολόγηση αυτών των τεχνικών δείχνει ότι ένα καλό επίπεδο ωριμότητας έχει επιτευχθεί [175, 92, 195]. Συγχρόνως, η κατάτμηση εικόνας (*image segmentation*) και η αναγνώριση αντικειμένων (*object recognition*) έχουν χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα, αντί διαδοχικά, στοχεύοντας στη βελτίωση και των δυο διαδικασιών. Τέτοιες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τους

Σχήμα 5.6: Η αρχιτεκτονική για σημασιολογική δεικτοδότηση και ανάκτηση εικόνων.



αλγορίθμους ελαχιστοποίησης με περικοπή γράφων (*graph cuts*) [154], τον ασαφή χαρακτηρισμό περιοχής (*fuzzy region labeling*) για την αύξηση της σημασιολογικής περιοχής (*semantic region growing*) [212] ή την ενσωμάτωση από κάτω προς τα επάνω και από επάνω προς τα κάτω προσεγγίσεων [117]. Από την άλλη, η πλειοψηφία των τεχνικών ταξινόμησης χρησιμοποιεί στοχαστικά μοντέλα για την αντιστοίχιση χαμηλού επιπέδου οπτικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων με μεσαίου επιπέδου έννοιες [92, 164]. Τέτοιες δημοφιλείς τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση περιοχών της εικόνας είναι τα *νευρωνικά δίκτυα* (*neural networks*) και οι *διανυσματικές μηχανές υποστήριξης* (*Support Vector Machines-SVMs*) [96].

Η πληροφορία που εξάγεται από τους αλγορίθμους ανάλυσης πολυμέσων απαιτεί αποτελεσματική διαχείριση ικανή να εξάγει περίπλοκες έννοιες. Σε αυτό το πλαίσιο διάφορες προσπάθειες έχουν εξεταστεί, χρησιμοποιώντας ταξινομίες και οντολογίες. Ο Hollink [137] προσπάθησε να διευκρινίσει τις απαραίτητες απαιτήσεις μιας οπτικής οντολογίας για τον τηλεοπτικό σχολιασμό προτείνοντας τη χρήση ενός wordNet/MPEG-7 συνδυασμού οντολογίας για εκείνο το πεδίο. Οι Hoogs et al. [114] συνδυάζουν τεχνικές αναγνώρισης αντικειμένων και γεγονότων σε ανάλυση εικόνας με τη σημασιολογία του WordNet, εκμεταλλευόμενοι την ιεραρχική δομή των σχέσεων του. Το WordNet χρησιμοποιήθηκε επίσης για τις λεξιλογικές σχέσεις μεταξύ των ανιχνευμένων μεσαίου επιπέδου εννοιών [195], ενώ στο [165] οι συγγραφείς εστιάζουν στη χρήση μιας οντολογίας για την ανάλυση και το σημασιολογικό σχολιασμό του πολυμεσικού περιεχομένου.

Η αρχιτεκτονική που προτείνουμε για την σημασιολογική δεικτοδότηση και ανάκτηση εικόνων φαίνεται στο Σχήμα 5.6, και πραγματοποιείται σε τρία βήματα. Αρχικά, μια εικόνα κατατμήται σύμφωνα με κριτήρια χρώματος και μορφής και ταυτόχρονα εξάγονται οπτικοί περιγράφοι, βάσει των οποίων, ταξινομούνται οι περιοχές της εικόνας σε ένα σύνολο εννοιών. Με αυτό το τρόπο, όμως, οι αλγόριθμοι κατάτμησης εικόνας αποτυγχάνουν να εξαγάγουν σωστά τις περιοχές της εικόνας, και σαν συνέπεια η σημασιολογική τεκμηρίωση για κάποιες περιοχές να είναι επίσης λανθασμένη. Για το λόγο αυτό, στο επόμενο βήμα, χρησιμοποιείται μια *σημασιολογική αυξανόμενη μεθοδολογία περιοχών* (*semantic region growing*) που ενσωματώνει την ανίχνευση αντικειμένου ταυτόχρονα με τη συγχώνευση περιοχών, παρέχοντας έτσι τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα για την ταξινόμηση της περιοχής (*Semantic Recursive Shortest Spanning Tree- S-RSST*). Θέλοντας να βελτιώσουμε, περαιτέρω, αυτή τη λειτουργία χρησιμοποιούμε τη μηχανή ασαφούς συλλογιστικής FiRE. Το σώμα ορολογίας σε αυτό το βήμα ορίστηκε προκειμένου να βελτιώνει την ταξινόμηση περιοχής στηριζόμενο στις χωρικές σχέσεις και την αρχική ταξινόμηση των περιοχών. Με αυτό το τρόπο, παρέχεται για κάθε περιοχή της εικόνας μια ταξινόμηση στο σύνολο εννοιών με ένα βαθμό συμμετοχής, το οποίο αποτελεί το ασαφές σώμα ισχυρισμών. Τέλος, στο τρίτο στάδιο ο σκοπός μας είναι να χρησιμοποιήσουμε αυτές τις πληροφορίες προκειμένου να εξαχθεί πρόσθετη, υπονοούμενη γνώση, και να προκύψουν έννοιες που αφορούν όχι μόνο τις περιοχές, αλλά και ολόκληρη την εικόνα. Για αυτό το λόγο, στο τρίτο βήμα ορίστηκε ένα σώμα ορολογίας με πιο εκφραστικές έννοιες που χρησιμοποιείται στο τελικό στάδιο από το FiRE. Τα τελικά αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μια σημασιολογική αποθήκη σε ένα κεντρικό υπολογιστή Sesame, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιτρέποντας την ανάκτηση εικόνων και τη δεικτοδότηση τους με τη χρήση των ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων.

5.3.2 Αναπαράσταση Γνώσης για το πεδίο Διακοπών

Προκειμένου να ταξινομηθούν αποτελεσματικά οι εικόνες και να βελτιωθεί η διαδικασία σημασιολογικής κατάτμησης δημιουργήθηκε ένα εκφραστικό σώμα ορολογίας. Η ορολογία ορίζει νέες έννοιες που χαρακτηρίζουν μια εικόνα ή ένα τμήμα (segment) της εικόνας, καθώς και έννοιες που επεξεργάζονται περαιτέρω τις πληροφορίες που εξάγονται από τον αλγόριθμο ταξινόμησης, συνδυάζοντας τις χωρικές σχέσεις των χαρακτηρισμένων περιοχών.

Για την καλύτερη κατανόηση του σώματος ορολογίας που δημιουργήθηκε, αρχικά παρουσιάζουμε τις έννοιες και τους ρόλους που εξάγονται από το κομμάτι της ανάλυσης, αποτελούν το αλφάβητο της ασαφούς βάσης γνώσης και ανήκουν στο πεδίο των διακοπών:

$C = \{\text{Ουρανός, Κτήριο, Άνθρωπος, Βράχος, Δέντρο, Βλάστηση, Θάλασσα, Γρασίδι, Έδαφος, Άμμος, Κορμός, Φυτό, Πεζοδρόμιο, Βάρκα, Κύμα}\}$

$R = \{\text{είναιΠάνωΑπό, είναιΚάτωΑπό, είναιΔεξιάΑπό, είναιΑριστεράΑπό, Περιέχει}\}$

Το σύνολο των ατόμων αποτελείται από τις περιοχές που ανιχνεύτηκαν για κάθε εικόνα, μαζί με ένα άτομο που αναπαριστά όλη την εικόνα όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα.

Παράδειγμα 5.3.1 Ένα απόσπασμα του σώματος ισχυρισμού για μια εικόνα αναπαριστάται, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 & (image1_seg01 : Ουρανός) \geq 0.744, \\
 & (image1_seg01 : Άνθρωπος) \geq 0.514 \\
 & (image1_seg03 : Ουρανός) \geq 0.831 \\
 & (image1_seg09 : Θάλασσα) \geq 0.557, \\
 & (image1_seg09 : Άνθρωπος) \geq 0.510, \\
 & \dots \\
 & ((image1, image1_seg01) : Περιέχει \geq 1), \\
 & ((image1, image1_seg03) : Περιέχει \geq 1), \\
 & ((image1, image1_seg09) : Περιέχει \geq 1), \\
 & \dots \\
 & ((image1_seg01, image1_seg09) : είναιΠάνωΑπό \geq 1), \\
 & \dots
 \end{aligned}$$

Από την άλλη, ένα απόσπασμα από το σώμα ορολογίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.3. Όπως είπαμε, το σώμα ορολογίας αποτελείται από δύο επίπεδα. Το πρώτο ή χαμηλότερο επίπεδο, έχει σαν σκοπό τον επαναπροσδιορισμό κάποιων εννοιών, σύμφωνα με τις χωρικές σχέσεις και την αρχική ταξινόμηση των περιοχών. Το κομμάτι αυτό του σώματος ορολογίας χρησιμοποιείται μονάχα σε συνεργασία με το κομμάτι S-RSST, με σκοπό να βελτιωθεί η διαδικασία της σημασιολογικής τμηματοποίησης και τεκμηρίωσης. Έτσι λοιπόν, αφού αρχικά ο ταξινομητής έχει εκπαιδευτεί, θεωρούμε ότι η εκτίμηση του θα είναι σωστή, με πιθανόν λανθασμένη εκτίμηση του βαθμού συμμετοχής. Για παράδειγμα, η έννοια *ΤμήμαΘάλασσας* επαναπροσδιορίστηκε σαν ένα τμήμα της εικόνας που έχει χαρακτηριστεί με την έννοια *Θάλασσα* από τον ταξινομητή, ενώ τα γειτονικά του τμήματα μπορούν να έχουν χαρακτηριστεί με μια από τις έννοιες *Κύμα*, *Θάλασσα* ή *Ουρανός*. Με άλλα λόγια, θεωρούμε ότι κάποιες έννοιες χαρακτηρίζουν τα γειτονικά τμήματα και, ως εκ τούτου, για ένα τμήμα που έχει χαρακτηριστεί με μια έννοια και οι γείτονες του έχουν χαρακτηριστεί με κάποιες συγκεκριμένες έννοιες, μπορούμε να αυξάνουμε το βαθμό συμμετοχής του σύμφωνα με αυτούς που έχουν τα γειτονικά του τμήματά. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούμε μια μικρή παραλλαγή της υπηρεσίας συλλογιστικής του μέγιστου κάτω φράγματος με σκοπό να αλλάξουμε τον αρχικό βαθμό συμμετοχής που έχει υπολογιστεί από τον ταξινομητή. Έτσι αρχικά υπολογίζεται το μέγιστο κάτω φράγμα (ΜΚΦ) του τμήματος ενδιαφέροντος στην έννοια ενδιαφέροντος (π.χ. *ΤμήμαΘάλασσας*). Έπειτα, υπολογίζεται το ΜΚΦ του τμήματος ενδιαφέροντος στη έννοια που αποτελεί το κριτήριο για το γειτονικό τμήμα (εάν η έννοια ενδιαφέροντος είναι η *Τμήμα-Θάλασσας* τότε η έννοια που ορίζει το κριτήριο για το γειτονικό τμήμα είναι η $((\exists \text{είναιΔεξιάΑπό.}(\text{Άμμος} \sqcup \text{Κύμα})) \sqcup (\exists \text{είναιΑριστεράΑπό.}(\text{Άμμος} \sqcup \text{Κύμα})) \sqcup \dots)$). Εάν αυτό το ΜΚΦ (δηλαδή της έννοιας κριτήριο για το γειτονικό τμήμα) είναι μεγαλύτερο από το ΜΚΦ της έννοιας ενδιαφέροντος, τότε ο βαθμός συμμετοχής του τμήματος ενδιαφέροντος αλλάζει σε αυτόν του ΜΚΦ της έννοιας κριτήριο για το γειτονικό τμήμα, διαφορετικά παραμένει όπως αρχικά υπολογίστηκε.

Παράδειγμα 5.3.2 *Ας θεωρήσουμε το σώμα ισχυρισμών που φαίνεται στο παράδειγμα 5.3.1 και ας εξετάσουμε το τμήμα *image1_seg09* που έχει χαρακτηριστεί με την έννοια *Θάλασσα* με βαθμό μεγαλύτερο του 0.557. Το τμήμα *image1_seg01* συνδέεται με το ρόλο *είναιΠάνωΑπό* με το τμήμα *image1_seg09* αλλά επειδή ο ρόλος *είναιΠάνωΑπό* έχει σαν αντίστροφο το ρόλο *είναιΚάτωΑπό* (Πίνακας 5.3) είναι ισοδύναμο σαν να έχουμε τον ισχυρισμό ότι το τμήμα *image1_seg09* σχετίζεται με το ρόλο *είναι-**

Πίνακας 5.3: Ένα κομμάτι του σώματος ορολογίας για το πεδίο των διακοπών.

$\mathcal{T} = \{\text{Τμήμα}\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha\}$	\equiv	$\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcap ((\exists\text{είναι}\Delta\epsilon\chi\acute{\iota}\acute{\alpha}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Αριστερά}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Πάνω}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Κάτω}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα} \sqcup \text{Ουρανός}))),$
ΤμήμαΆμμου	\equiv	Άμμος $\sqcap ((\exists\text{είναι}\Delta\epsilon\chi\acute{\iota}\acute{\alpha}\text{Από.}(\text{Άμμος} \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Αριστερά}\text{Από.}(\text{Άμμος} \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Πάνω}\text{Από.}(\text{Άμμος} \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Κάτω}\text{Από.}(\text{Άμμος} \sqcup \text{Κύμα} \sqcup \Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha))),$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Κάτω}\text{Από.}(\text{Άμμος} \sqcup \text{Κύμα} \sqcup \Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha))),$
ΤμήμαΚύμματος	\equiv	Κύμα $\sqcap (\exists(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Αριστερά}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Πάνω}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))$ $\sqcup(\exists\text{είναι}\text{Κάτω}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))),$
ΘάλασσαΜεΚύμα	\equiv	Θάλασσα \sqcap Κύμα,
ΑμμώδηςΠαραλία	\equiv	Θάλασσα \sqcap Άμμος,
ΤμήμαΚτηρίου	\equiv	Κτήριο $\sqcap (\exists\text{είναι}\text{Αριστερά}\text{Από.}\text{Κτήριο} \sqcup \exists\text{είναι}\Delta\epsilon\chi\acute{\iota}\acute{\alpha}\text{Από.}\text{Κτηρίο}),$
Παραλία	\equiv	$\exists\text{Περιέχει.}\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcap \exists\text{Περιέχει.}\text{Ουρανός},$
Τοπίο	\equiv	$\exists\text{Περιέχει.}\text{Βλάστηση},$
Πόλη	\equiv	$\exists\text{Περιέχει.}\text{Κτήριο} \sqcup \exists \text{Περιέχει.}\text{Πεζοδρόμιο}\}$
$\mathcal{R} = \{\text{Περιέχει, είναι}\text{Αριστερά}\text{Από}^- = \text{είναι}\Delta\epsilon\chi\acute{\iota}\acute{\alpha}\text{Από, είναι}\text{Πάνω}\text{Από}^- = \text{είναι}\text{Κάτω}\text{Από}\}$		

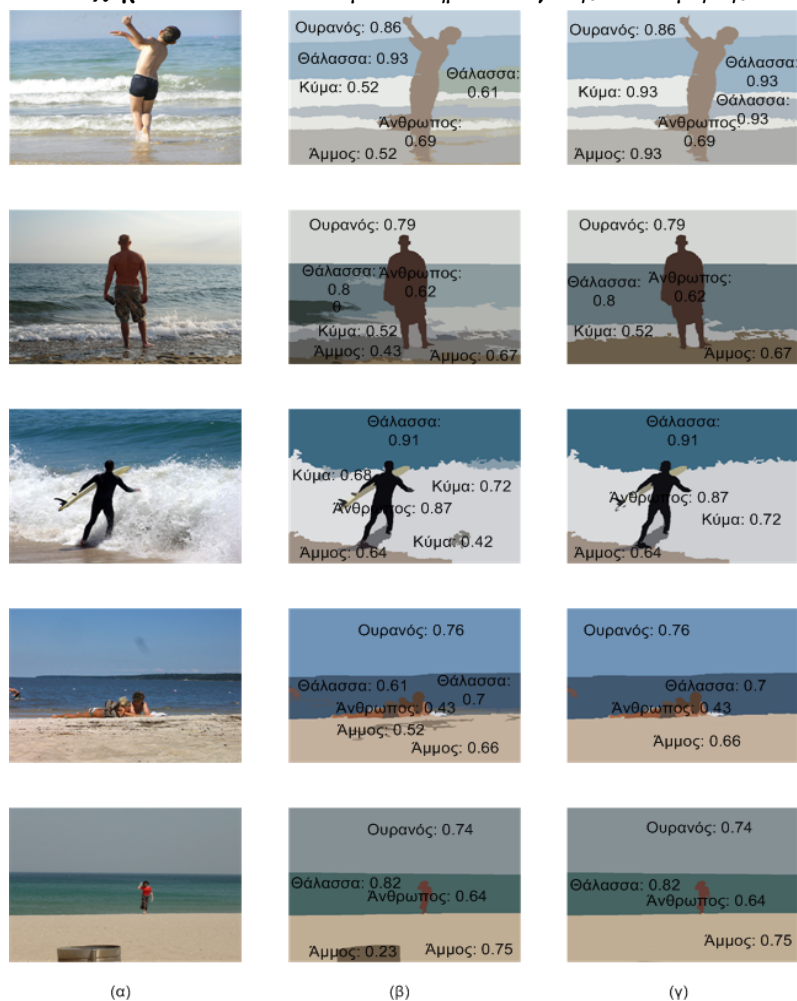
ΚάτωΑπό με το τμήμα *image1_seg01*. Επιπρόσθετα το τμήμα *image1_seg01* έχει χαρακτηριστεί με την έννοια Ουρανός με βαθμό μεγαλύτερο του 0.744. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε το τμήμα *image1_seg09* ικανοποιεί τα κριτήρια που ορίζει η έννοια ΤμήμαΘάλασσας με το MKΦ του 0.557, ίσο με το βαθμό συμμετοχής που αρχικά απέδωσε ο ταξινομητής. Αυτό σημαίνει πως η έννοια που ορίζει τα κριτήρια για τους γείτονες (i.e. $\sqcap(\exists\text{είναι}\Delta\epsilon\chi\acute{\iota}\acute{\alpha}\text{Από.}(\Theta\acute{\alpha}\lambda\alpha\sigma\sigma\alpha \sqcup \text{Κύμα}))\dots$) της ορισμένης στο σώμα ορολογίας έννοιας ΤμήμαΘάλασσας ικανοποιείται με βαθμό τουλάχιστον 0.557. Έτσι υπολογίζουμε το MKΦ του τμήματος *image1_seg09* στην έννοια που αποτελεί το κριτήριο για τους γείτονες το οποίο είναι 0.744 και αλλάζουμε το βαθμό συμμετοχής του τμήματος *image1_seg09* στην έννοια ΤμήμαΘάλασσας σε αυτή τη τιμή. (σημειώνεται πως αν ο βαθμός συμμετοχής στην έννοια Ουρανός ήταν 0.3 τότε ο βαθμός συμμετοχής του τμήματος στην έννοια Θάλασσα θα παρέμενε όμως είχε αρχικά υπολογιστεί).

Το Σχήμα 5.3.2 παρουσιάζει το τρόπο που επιτυγχάνονται τα αποτελέσματα της σημασιολογικής κατάτμησης. Η πρώτη στήλη παρουσιάζει την αρχική εικόνα, η δεύτερη την αρχική κατάτμηση μαζί με την αρχική ταξινόμηση, και τέλος η τρίτη στήλη παρουσιάζει την τελική σημασιολογική κατάτμηση που επιτυγχάνεται από το S-RSST, έπειτα από την αλλαγή των βαθμών κάνοντας χρήση της υπηρεσίας συλλογιστικής MKΦ του FiRE.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας αποτελούν το σώμα ισχυρισμών για το δεύτερο επίπεδο του σώματος ορολογίας, το οποίο περιλαμβάνει πιο περίπλοκες έννοιες. Τέτοιες έννοιες μπορεί να αφορούν τμήματα της εικόνας, όπως οι έννοιες ΘάλασσαΜεΚύμα και ΑμμώδηςΠαραλία, αλλά και να χαρακτηρίζουν όλη την εικόνα όπως η έννοια Παραλία.

Σύμφωνα με το ορισμένο σώμα ορολογίας εξάγεται υπονοούμενη γνώση. Για κάθε εικόνα πραγματοποιείται η υπηρεσία συλλογιστικής του MKΦ για όλες τις έννοιες

Σχήμα 5.7: Αποτελέσματα σημασιολογικής κατάτμησης.



που έχουν οριστεί στο σώμα ορολογίας και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα κεντρικό υπολογιστή Sesame.

Παράδειγμα 5.3.3 Για να κατανοήσουμε καλύτερα την λειτουργία του ΜΚΦ ως θεωρήσουμε το σώμα ισχυρισμού που χρησιμοποιήσαμε προηγούμενα. Έπειτα από τη διαδικασία αλλαγής των βαθμών συμμετοχής έχουμε τους ισχυρισμούς

$$(image1_seg01 : Ουρανός \geq 0.744)$$

$$(image1_seg03 : Ουρανός \geq 0.831)$$

$$(image1_seg09 : Θάλασσα \geq 0.744)$$

$$((image1, image1_seg01) : Περιέχει \geq 1)$$

$$((image1, image1_seg03) : Περιέχει \geq 1)$$

$$((image1, image1_seg09) : Περιέχει \geq 1)$$

Στο σώμα ορολογίας έχουμε ορίσει την έννοια Παραλία σαν μια εικόνα που περιλαμβάνει τμήματα τα οποία έχουν ταξινομηθεί στις έννοιες Ουρανός και Θάλασσα. Εύκολα παρατηρούμε ότι τα παραπάνω κριτήρια ικανοποιούνται από το άτομο image1 έτσι

και χαρακτηρίζεται με την έννοια *Παραλία* με το ΜΚΦ που ικανοποιεί την έννοια, που είναι 0.744. Αυτό συμβαίνει επειδή η έννοια *Παραλία* ορίστηκε κάνοντας χρήση της σύζευξης που ερμηνεύεται με το τελεστή *min* (Πίνακα 2.2). Έτσι παρόλο που έχουμε τον ισχυρισμό (*image1_seg03* : Ουρανός \geq 0.831) το ελάχιστο όριο ορίζεται από τον ισχυρισμό (*image1_seg09* : Θάλασσα \geq 0.744) καταλήγοντας στο (*image1* : *Παραλία* \geq 0.744).

5.3.3 Δεικτοδότηση Εικόνων

Με τη χρήση του συστήματος FiRE και της αρχιτεκτονικής που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορούμε να αποθηκεύσουμε τη ρητή και υπονοούμενη γνώση που εξάχθηκε σε μια σημασιολογική αποθήκη ενός κεντρικού υπολογιστή Sesame. Με αυτό το τρόπο, κάνοντας χρήση των επερωτημάτων με κατώφλια άλλα και των γενικευμένων ασαφών επερωτημάτων, μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάκληση αλλά και δεικτοδότηση εικόνων. Έτσι λοιπόν ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει ασαφή επερωτήματα κατωφλίων (ΑΕΚ) όπως το παρακάτω

Παράδειγμα 5.3.4 $x, y \leftarrow \text{Παραλία}(x) \geq 0.4 \wedge \text{Περιέχει}(x, y) \geq 1.0$
 $\wedge \text{Άνθρωπος}(y) \geq 0.8$

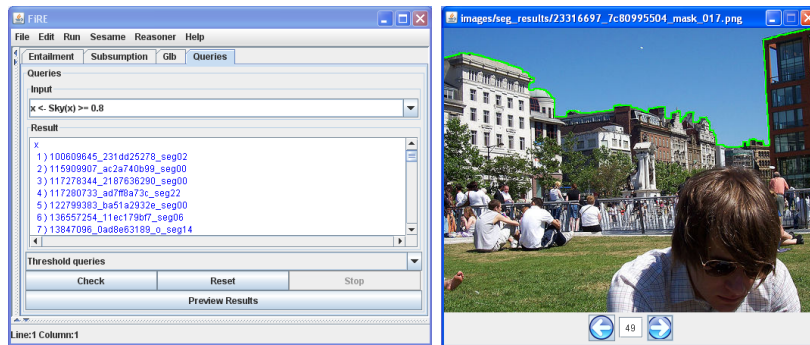
Σε αυτά τα ερωτήματα η σημασιολογία των βαθμών κληρονομείται από τις τιμές του ταξινομητή. Με άλλα λόγια όταν ο χρήστης γράφει στο επερωτήματα *Άνθρωπος*(y) \geq 0.8, αναζητά ένα τμήμα y τέτοιο ώστε να έχει ταξινομηθεί από τον ταξινομητή *Άνθρωπος* με βαθμό μεγαλύτερο του 0.8. Λόγω της μη ακριβής φύσης των περισσότερων ταξινομητών, μόνο μερικά τμήματα θα ταξινομηθούν σε μια έννοια με τον βαθμό 1. Έτσι τα τμήματα που θα έχουν χαρακτηριστεί ως *Άνθρωπος*(y) \geq 0.8 είναι πολύ πιθανόν να είναι όντως πρόσωπά, ενώ από την άλλη τα τμήματα που ικανοποιούν *Άνθρωπος*(y) \geq 0.5 είναι πιθανόν να είναι ένα πρόσωπο, που όμως αποτυπώνεται θολά στην εικόνα. Είναι πολύ σημαντικό να παρατηρήσουμε σε αυτό το σημείο το πόσο εκφραστικές ερωτήσεις μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αναζητώντας εικόνες που όχι μόνο απεικονίζουν μια περιοχή της έννοιας *Παραλία* αλλά περιέχουν και περιοχές που ανήκουν στην έννοια *Άνθρωπος*. Επιπρόσθετα, με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή και η ανάκτηση μόνο περιοχών της εικόνας, έτσι στο Σχήμα 5.8 φαίνεται το πλαίσιο των επερωτημάτων που αποτελείται από την επιφάνεια που γίνονται οι ερωτήσεις και την επιφάνεια που φαίνονται οι απαντήσεις, ενώ στην δεξιά πλευρά απεικονίζονται οι εικόνες ή οι περιοχές που ικανοποιούν την ερώτηση.

Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται οι πρώτες 8 εικόνες που επιστρέφονται και ικανοποιούν την ερώτηση του Παραδείγματος 5.3.4. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι ερωτήσεις κατωφλίων ικανοποιούν ή όχι τα κριτήρια που έχουν τεθεί ενώ από την άλλη οι γενικευμένες ασαφείς ερωτήσεις όπως η ερώτηση του παρακάτω παραδείγματος προσφέρουν μια δεικτοδότηση των αποτελεσμάτων σύμφωνα με το βαθμό βαρύτητας του κάθε σκέλους της ερώτησης.

Παράδειγμα 5.3.5 $x \leftarrow \text{Παραλία}(x) : 0.6 \wedge \text{Περιέχει}(x, y) : 1$
 $\wedge \text{Άνθρωπος}(y) : 0.8$

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων φαίνονται στο Πίνακα 5.4. Η έννοια *Παραλία* ορίστηκε σαν μια εικόνα που περιέχει περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί με τις έννοιες *Θάλασσα* και *Ουρανός*. Για αυτό το λόγο παρουσιάζουμε

Σχήμα 5.8: Το γραφικό περιβάλλον του FiRE για την ανάκτηση εικόνων.



(α')

(β')

Σχήμα 5.9: Οι εικόνες που ανακτήθηκαν για την ερώτηση "άνθρωπος σε παραλία".



τους βαθμούς συμμετοχής των εικόνων στις συγκεκριμένες έννοιες και το βαθμό που προκύπτει από το ΜΚΦ για την έννοια Παραλία, που είναι ο μικρότερος από τους δύο σύμφωνα με την σημασιολογία της. Με παρόμοιο σκεπτικό παρουσιάζεται και ο βαθμός συμμετοχής των τμημάτων κάθε εικόνας στην έννοια Άνθρωπος και αφού οι χωρικές σχέσεις ορίζονται με βαθμό 1 υπολογίζουμε σαν το ελάχιστο βαθμό την αξιολόγηση της εικόνας με χρήση των ασαφών ερωτημάτων με κατώφλι του Άνθρωπος και Παραλία προκειμένου να γίνει σημασιολογική σύγκριση με τις γενικευμένες ασαφείς επερωτήσεις (ΓΑΕ). Η αξιολόγηση των εικόνων με την χρήση επερωτήσεις ασαφών Κατωφλίων (fuzzy threshold) και επερωτημάτων ασαφών συναθροίσεων (fuzzy aggregation) γενικευμένα ασαφών επερωτημάτων φαίνεται στις στήλες ΑΚ και ΑΣ αντίστοιχα.

Η αξιολόγηση των εικόνων με τη χρήση των επερωτημάτων ασαφών κατωφλίων γίνεται σύμφωνα με την διάφορα των βαθμών συμμετοχής των εικόνων από τους βαθμούς για την βαρύτητα κάθε σκέλους της ερώτησης. Έτσι οι εικόνες (ζ), (β) και (δ) στο Πίνακα 5.4 που έχουν μεγαλύτερους βαθμούς συμμετοχής από ότι οι βαθμοί βαρύτητας της ερώτησης έχουν αξιολογηθεί με 1. Από την άλλη, με τα επερωτημάτων ασαφών συναθροίσεων ο βαθμός βαρύτητας λειτουργεί σαν συντελεστής για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Έτσι, παρόλο στις εικόνες (β) και (δ) μπορούμε να δούμε αισθητή διαφορά στους βαθμούς συμμετοχής της έννοιας Παραλία, η αξιολόγηση τους είναι κοντά επειδή τα βάρη για την έννοια Άνθρωπος είναι μεγαλύτερα επηρεάζοντας έτσι προς αυτή την κατεύθυνσή την αξιολόγηση τους.

Πίνακας 5.4: Δεικτοδότηση αποτελεσμάτων για το ερώτημα "Άνθρωπος σε παραλία" (από τα παραδείγματα 5.3.4 και 5.3.5).

Εικόνα	Θάλασσα	Ουρανός	Παραλία	Άνθρωπος	ΑΕΚ	ΓΑΕ	
						ΑΚ	ΑΣ
(η)	0.90	0.87	0.87	0.86	0.86	1.00	0.92
(β)	0.83	0.91	0.83	0.80	0.80	1.00	0.89
(δ)	0.69	0.66	0.66	0.81	0.66	1.00	0.85
(θ)	0.60	0.83	0.60	0.85	0.60	1.00	0.84
(α)	0.47	0.92	0.47	0.84	0.47	0.87	0.81
(ζ)	0.63	0.47	0.47	0.85	0.47	0.87	0.81
(γ)	0.46	0.91	0.46	0.86	0.46	0.86	0.81
(ε)	0.44	0.73	0.44	0.83	0.44	0.84	0.80

5.4 Σημασιολογική Περιήγηση σε Βίντεο

Η χρήση της μηχανής ασαφούς συλλογιστικής FiRE εφαρμόστηκε και για την σημασιολογική περιήγησή σε βίντεο. Πιο συγκεκριμένα, συνεργαστήκαμε με άλλους ερευνητές [196] και χρησιμοποιήσαμε τα αποτελέσματα των τεχνικών τους για την ανάλυση βίντεο, έτσι ώστε μέσω ασαφούς συλλογιστικής να ανιχνευτούν σκηνές σημασιολογικού ενδιαφέροντος σε βίντεο. Το πεδίο εφαρμογής που είχε επιλεχθεί ήταν οι αγώνες ποδοσφαίρου γιατί προσέφεραν ένα προκαθορισμένο περιβάλλον που θα διευκόλυνε την ανάλυση βίντεο. Επιπρόσθετα, για τους ποδοσφαιρικούς αγώνες μπορεί να βρεθούν χαρακτηρισμοί σε διάφορες ιστοσελίδες στο διαδίκτυο εκ των οποίων εξάγονταν κάποιες έννοιες που χρησιμοποιούσαμε στη συλλογιστική.

5.4.1 Αρχιτεκτονική του Συστήματος για Σημασιολογική Περιήγηση σε Βίντεο

Η αρχιτεκτονική αυτής της εφαρμογής είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα όσο αφορά τη μηχανή συλλογιστικής FiRE, δηλαδή την αποθήκευση της ρητής αλλά και υπονοούμενης γνώσης σε ένα κεντρικό υπολογιστή Sesame. Από την άλλη, όμως, σε αυτή την περίπτωση το σώμα ισχυρισμών σχηματίζεται από δυο υποσυστήματα ανάλυσης. Το πρώτο υποσύστημα είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των κείμενων στο διαδίκτυο που συνοδεύουν τον ποδοσφαιρικό αγώνα. Έτσι έπειτα από την επεξεργασία για κάθε λεπτό παιχνιδιού αναγνωρίζονται κάποιες έννοιες κλειδιά. Μια τέτοια έννοια για παράδειγμα μπορεί να είναι η έννοια Γκολ η οποία όμως εάν εμφανιστεί για ένα αγώνα σε ένα συγκεκριμένο λεπτό δεν σημαίνει απαραίτητα πως σημειώθηκε κάποιο Γκολ σε εκείνο το λεπτό.

Το δεύτερο υποσύστημα είναι υπεύθυνο για την ανάλυση του βίντεο του αγώνα και χαρακτηρίζει κάθε είκοσι δευτερόλεπτα του βίντεο. Η ανάλυση αυτή εξήγαγε πληροφορίες που αφορούσαν τα κοντινά πλάνα, τα πλάνα σε θεατές και τα πλάνα που έδειχναν κίνηση με κάποιο βαθμό βεβαιότητας. Επιπρόσθετα, μέσω της ανάλυσής για τον ήχο, όταν η ένταση ξεπερνούσε κάποιο κατώφλι το οποίο οριζόταν από το μέσο ήχο στο βίντεο τότε εξάγονταν η έννοια Ήχος με κάποιο βαθμό. Τέλος, σύμφωνα

με την γωνία που σχηματίζουν οι γραμμές του γηπέδου στο πλάνο μπορούσαν να εξαχθούν οι έννοιες που αφορούσαν το που στο γήπεδο διαδραματίζεται το πλάνο.

Το τρίτο υποσύστημα ήταν το σύστημα συλλογιστικής και αποθήκευσης της ρητής και υπονοούμενης γνώσης σε ένα κεντρικό υπολογιστή Sesame. Η γνώση που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην παρακάτω ενότητα

5.4.2 Αναπαράσταση Γνώσης για Σημασιολογική Περιήγηση σε Αγώνες Ποδοσφαίρου

Το αλφάβητο των εννοιών που σχηματιζόταν από αυτές τις δομικές ενότητες αποτελείται από τις παρακάτω έννοιες:

$C = \{ \text{ΕυκαιρίαΓιαΓκολ-EK, ΕκτόςΓηπέδου, Κλωτσιά, Σκοράρισμα, Φάουλ, Κόρνερ, Τρίπλα, Ελεύθερο, Παγίδα, Σούτ, Αράουτ, Πάσα, ΚατοχήΜπάλας, Offside-EK, Αλλαγή-EK, Τακλιν, ΑλλαγήΚατοχής, Ένταση, Λόμπα, Ποδιά, ΒουτιάΤουΤερματοφύλακα, Μλοκάρισμα, Απόκρουση, Ποινή, ΚοντάΣεΕστία, ΠαχνίδιΣτοΚέντρο, Κερκίδες, Κίνηση, Κοντινό, Ήχος} \}$

Επειδή όμως, όπως είπαμε, κάποια από τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξάγονται ανά λεπτό, ενώ κάποια άλλα ανά είκοσι δευτερόλεπτα (οι έννοιες αυτές φαίνονται με έντονα γράμματα) χρησιμοποιήσαμε σαν άτομα για τη ασαφή βάση γνώσης μας τις χρονικές αυτές στιγμές όπως φαίνεται παρακάτω:

Άτομα = {min0 sec20 sec40 sec60 min1 sec80 sec100 sec120...},

Με αυτό το τρόπο το min0 αναπαριστά το πρώτο λεπτό του παιχνιδιού ενώ το sec20 την πρώτη περίοδο 20 δευτερολέπτων. Κάθε λεπτό συνδέεται με το ρολό Περιέχει, που είναι και ο μοναδικός ρόλος που χρησιμοποιείται σε αυτή την βάση γνώσης, με τέσσερις περιόδους 20 δευτερολέπτων. Η χρονική περίοδος του λεπτού επεκτείνεται σε 80 δευτερόλεπτα εκ των οποίων η μια περίοδος των 20 δευτερολέπτων είναι από το προηγούμενο λεπτό. Οπότε ένα απόσπασμα του σωματος ισχυρισμού φαίνεται παρακάτω.

$$((min1, sec60) : \text{Περιέχει}) \geq 1$$

$$((min1, sec80) : \text{Περιέχει}) \geq 1$$

$$((min1, sec100) : \text{Περιέχει}) \geq 1$$

$$((min1, sec120) : \text{Περιέχει}) \geq 1$$

$$(min1 : \text{Κλωτσιά}) \geq 1$$

$$(min1 : \text{Σκοράρισμα}) \geq 1$$

$$(sec80 : \text{Ήχος}) \geq 0.060$$

$$(sec80 : \text{Κερκίδες}) \geq 0.231$$

$$(sec80 : \text{Κίνηση}) \geq 0.060$$

$$(sec80 : \text{ΚοντάΣεΕστία}) \geq 0.05$$

$$(sec80 : \text{ΠαχνίδιΣτοΚέντρο}) \geq 0.350$$

...

Με αυτή την αναπαράσταση και έχοντας σαν αλφάβητο τις παραπάνω έννοιες ορίστηκαν κάποια γεγονότα ποδοσφαιρικών αγώνων. Έτσι, για να ανιχνευτεί η έννοια

του Γκολ βάσει της σώματος ορολογίας που ορίστηκε, θα πρέπει να έχει βρεθεί η έννοια Σκοράρισμα στα κείμενα που σχολιάζουν το παιχνίδι και το συγκεκριμένο λεπτό να σχετίζεται με χρονικές περιόδους που να είναι ΚοντάΣεΕστία (δηλαδή στην άκρη του γηπέδου) καθώς και Ήχος δηλαδή να έχει ανιχνευτεί θόρυβος από τον κόσμο. Ένα απόσπασμα του σώματος ορολογίας φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 5.5: Απόσπασμα του σώματος ορολογίας για την σημασιολογική περιήγηση σε βίντεο

$\mathcal{T} = \{\text{Γκολ}$	\equiv	Σκοράρισμα \sqcap (ΞΠεριέχει.ΉχοςΚοντάΣεΕστία),
ΜακρυνήΠάσα	\equiv	(Πάσα \sqcup Κλωτσιά \sqcup Σούτ) \sqcap (ΞΠεριέχει.Κίνηση),
ΕκτέλεσηΚόρνερ	\equiv	Κόρνερ \sqcap (ΞΠεριέχει.Κίνηση) \sqcap (ΞΠεριέχει.ΚοντάΣεΕστία),
Αλλαγή	\equiv	Αλλαγή-ΕΚ \sqcap (ΞΠεριέχειΚίνηση) \sqcap (ΞΠεριέχειΠαχνίδιΣτοΚέντρο),
ΣκληρόΦάουλ	\equiv	Ποινή \sqcap (Φάουλ \sqcup Τακλιν) (ΞΠεριέχει. \sqcap (Κοντινό \sqcup Ήχος)),
OffSide	\equiv	Offside-ΕΚ \sqcap (ΞΠεριέχει.ΚοντάΣεΕστία),
ΕυκαιρίαΓιαΓκολ	\equiv	ΕυκαιρίαΓιαΓκολ-ΕΚ \sqcap (ΞΠεριέχειΚοντάΣεΕστία) \sqcap (Clear \sqcup Σούτ \sqcup Κλωτσιά \sqcup Βουτιά Του Τερματοφύλακα \sqcup Μλοκάρισμα \sqcup Απόκρουση)

Παρατηρούμε ακόμα πως κάποιες από τις έννοιες που εξάγονται από την επεξεργασία κειμένου (συμβολίζονται με ΕΚ στο σύνολο των εννοιών) ορίζονται στο σώμα ορολογίας σημασιολογικά σύμφωνα με επιπλέον χαρακτηριστικά. Είναι σημαντικό επίσης να παρατηρήσουμε ότι με αυτή την αναπαράσταση τα γεγονότα συνδέονται με το χρόνο στον οποίο εμφανίστηκαν. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμο για διάφορους λόγους. Αρχικά, στις αθλητικές περιοχές όπως το ποδόσφαιρο ο ακριβής χρόνος στον οποίο ένα γεγονός πραγματοποιείται είναι πολύ σημαντικός. Ένας χρήστης παραδείγματος χάριν, μπορεί να κοιτάξει σημασιολογικά το βίντεο, ανακτώντας όλες τις σκηνές του παιχνιδιού στις οποίες σημειώθηκαν γκολ ή έγινε κάποιο σκληρό μαρκάρισμα χρησιμοποιώντας τις ασαφείς επερωτήσεις κατωφλίου μέσω του FIRE.

Επιπλέον, μια σχέση των μικρών χρονικών περιόδων (π.χ. 5 λεπτά) με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που τα δευτερόλεπτα σχετίζονται με τα λεπτά θα μπορούσε να παραγάγει υψηλότερη υπονοούμενη γνώση. Μια τέτοια περίοδος για παράδειγμα, που αποτελείται από λεπτά με σκληρά μαρκάρια και ποινές κάρτας θα υπονοούσαν ένα σκληρό παιχνίδι. Επιπλέον, αυτή η αναπαράσταση επιτρέπει τη διαμόρφωση μιας ακολουθίας γεγονότων ποδοσφαίρου, δεδομένου ότι περιγράφονται μαζί με τα πιθανά επόμενα γεγονότα.

Κεφάλαιο 6

Προσαρμογή Νευρωνικών Δικτύων για την Κατάτμηση Εικόνων

Η αυτοματοποιημένη κατάτμηση εικόνων και βίντεο αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα στην επεξεργασία εικόνας και την όραση υπολογιστών. Για αυτό το σκοπό έχει προταθεί μια πληθώρα τεχνικών στη βιβλιογραφία, που περιλαμβάνει προσεγγίσεις που βασίζονται στην συσταδοποίηση χαρακτηριστικών (feature clustering) [104, 100], στη μαθηματική μορφολογία (mathematical morphology) [31] και σε τεχνικές γράφων (graph based) [26, 120]. Επιπρόσθετα σε πολλές περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning) για την ταξινόμηση εικόνων ή τμημάτων των εικόνων [92, 164, 96, 73]. Τα τελευταία χρόνια έχει επικεντρωθεί η προσοχή της ερευνητικής κοινότητας στη χρήση σημασιολογικής επεξεργασίας εικόνας [153] η οποία αντανακλάται και μέσω των ευρωπαϊκών έργων όπως τα Acemedia, Muscle, K-Space, X-Media και Mesh. Πιο συγκεκριμένα, έχει γίνει προσπάθεια να συνδυαστεί η γνώση για ένα συγκεκριμένο πεδίο, στο οποίο ανήκει μια εικόνα, με στόχο μια κατάτμηση εικόνας της οποίας τα τμήματα έχουν σημασιολογικό νόημα. Έχοντας αυτόν το στόχο ο Borenstein et al. στο [117] πρότειναν μια προσέγγιση που συνδυάζει την από πάνω προς τα κάτω και την από κάτω προς τα πάνω κατάτμηση, όπου οι πληροφορίες για την εικόνα μπορούν να λύσουν προβλήματα κατά τη διάρκεια της κατάτμησης. Στο [88] ένα Bayesian δίκτυο χρησιμοποιήθηκε για να εισάγει χαρακτηριστικά χαμηλού και μεσαίου επιπέδου για την ταξινόμηση εικόνων εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, ενώ μη επιβλεπόμενη ασαφής ταξινόμηση των τμημάτων μιας εικόνας προτείνεται στο [99]. Τέλος, πληροφορία σχετικά με τις χωρικές σχέσεις των τμημάτων μιας εικόνας χρησιμοποιήθηκε για να μειωθούν οι πιθανοί συνδυασμοί κατάτμησης, αυξάνοντας με αυτό το τρόπο την ακρίβεια στην κατάτμηση και την αναγνώριση προτύπων [108].

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια προσέγγιση που προτείναμε για την κατάτμηση εικόνων η οποία βασίζεται στην προσαρμογή ενός νευρωνικού δικτύου σύμφωνα με τα αποτελέσματά που εξάγονται από την συλλογιστική για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται το σύστημα για την σημασιολογική προσαρμογή νευρωνικών δικτύων στη κατάτμηση εικόνας, ο αλγόριθμος προσαρμογής του νευρωνικού δικτύου, η βάση γνώσης που αναπτύχθηκε για το συγκεκριμένο πεδίο, η αξιολόγηση του συστήματος και μια

σύγκριση με άλλες τεχνικές.

6.1 Σύστημα Προσαρμογής Νευρωνικών Δικτύων στη Κατάτμηση Εικόνων

Η αρχιτεκτονική που προτάθηκε για την σημασιολογική προσαρμογή ενός νευρωνικού δικτύου για την κατάτμηση εικόνων φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Αρχικά μια εικόνα ή ένα καρέ ενός βίντεο υποβάλλεται σε επεξεργασία από έναν αλγόριθμο κατάτμησης [159] που το χωρίζει σε διάφορες περιοχές, οι οποίες μοιράζονται κάποια κοινά χαρακτηριστικά και συχνά έχουν μια συμβολική ερμηνεία. Οι περιοχές αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός γράφου συσχέτισης ιδιοτήτων (ΓΣΙ - Attribute Relation Graph ARG) [83] ο οποίος αποτελεί μια εσωτερική συσχέτιση της εικόνας. Ταυτόχρονα από αυτή τη διαδικασία εξάγονται κάποια MPEG-7 οπτικά χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου για τις περιοχές τα οποία αποθηκεύονται στο γράφο για κάθε περιοχή. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν την είσοδο του ενός ταξινομητή νευρωνικού δικτύου, ο οποίος έχει εκπαιδευτεί έτσι ώστε να ορίζει ένα σημασιολογικό χαρακτηρισμό με βάση κάποιες έννοιες, μαζί με ένα βαθμό εμπιστοσύνης για κάθε περιοχή. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα ταξινόμησης υποβάλλονται σε επεξεργασία από την εφαρμογή ένα σημασιολογικό αλγόριθμο κατάτμησης (S-RSST), ο οποίος ταυτόχρονα εξάγει τις χωρικές σχέσεις των περιοχών.

Σχήμα 6.1: Η αρχιτεκτονική για την σημασιολογική προσαρμογή ενός νευρωνικού δικτύου.



Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης καθώς και οι χωρικές σχέσεις των περιοχών αποτελούν την είσοδο για το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE. Τα τμήματα της εικόνας αποτελούν το σύνολο των ατόμων της βάσης γνώσης, ενώ η συμμετοχή τους στις κατηγορίες ταξινόμησης και οι χωρικές σχέσεις τους αποτελούν το σώμα ισχυρισμών. Το σώμα ορολογίας αποτελείται από αξιώματα τα οποία περιγράφουν κάποιες από τις κατηγορίες που εξάγονται από τον ταξινομητή χρησιμοποιώντας την εκτίμηση του ταξινομητή και τις χωρικές σχέσεις.

Αυτή η αναπαράσταση επιτρέπει την εξαγωγή νέας γνώσης για τα τμήματα της εικόνας η οποία διορθώνει κάποιες ταξινομήσεις που αποδόθηκαν λανθασμένα από το νευρωνικό δίκτυο - ταξινομητή. Τα αποτελέσματα αυτά περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το πεδίο αναπαράστασης και αποτελούν την είσοδο του ταξινομητή. Με αυτό το τρόπο ο ταξινομητής χρησιμοποιεί τα σημασιολογικά διορθωμένα αποτελέσματα της συλλογιστικής για την προσαρμογή του έτσι ώστε να βελτιώσει:

- την γνώση του για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής

- την απόδοσή του για τα επόμενα καρέ βίντεο ή για εικόνες παρόμοιου περιεχομένου.

Αυτός ο κύκλος της συλλογιστικής και της προσαρμογής του δικτύου μπορεί να εφαρμοστεί παραπάνω από μια φορά ανάλογα με την πολυπλοκότητα της εικόνας ή του καρέ του βίντεο. Τέλος, τα βελτιωμένα αποτελέσματα του δικτύου θα αποτελέσουν την είσοδο στον σημασιολογικό αλγόριθμο κατάτμησης που θα συγχωνεύσει τις γειτονικές περιοχές που μοιράζονται κοινούς σημασιολογικούς χαρακτηρισμούς και ικανοποιούν ορισμένα κριτήρια για να διαμορφώσει μια βελτιωμένη κατάτμηση της εικόνας.

6.2 Σημασιολογικός Αλγόριθμος Προσαρμογής Νευρωνικών Δικτύων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου - ταξινομητή. Η τεχνική προσαρμογής μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικές αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων για αυτό και παρακάτω θεωρούμε μια γενική αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου. Η αρχιτεκτονική του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε στη προσέγγισή μας παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 6.5.1.

Το νευρωνικό δίκτυο ταξινομητής δέχεται σαν είσοδο ένα διάνυσμα \bar{x}_i που περιέχει τα χαρακτηριστικά που εξήχθησαν για κάθε τμήμα της εικόνας από τον αλγόριθμο της κατάτμησης και το κατηγοριοποιεί σε μια κατηγορία p από τις πιθανές κατηγορίες ω_j . Το διάνυσμα εξόδου $\bar{y}(\bar{x}_i)$ είναι της μορφής

$$\bar{y}(\bar{x}_i) = [p_{\omega_1}^i p_{\omega_2}^i \dots p_{\omega_p}^i]^T \quad (6.1)$$

όπου το $p_{\omega_j}^i$ συμβολίζει την πιθανότητα να ανήκει το i^{th} τμήμα στην j^{th} κατηγορία.

Το νευρωνικό δίκτυο αρχικά εκπαιδεύεται για ταξινόμηση χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο σύνολο εκπαίδευσης $S_b = \{(\bar{x}'_1, \bar{d}'_1), \dots, (\bar{x}'_{m_b}, \bar{d}'_{m_b})\}$, όπου τα διανύσματα \bar{x}'_i και \bar{d}'_i με $i = 1, 2, \dots, m_b$ συμβολίζουν το i διάνυσμα εισόδου και το αντίστοιχο επιθυμητό διάνυσμα εξόδου που αποτελείται από p στοιχεία. Σε αυτή την περίπτωση τα διανύσματα εισόδου αποτελούνται από τα χαμηλού επιπέδου χαρακτηριστικά των περιοχών της εικόνας. Το διάνυσμα χαρακτηριστικών που υπολογίζεται χρησιμοποιείται από το νευρωνικό δίκτυο για τη δημιουργία της αρχικής ταξινόμησης των τμημάτων της εικόνας σε σημασιολογικές έννοιες. Στη συνέχεια στο νευρωνικό δίκτυο δίνονται τα χαρακτηριστικά μιας νέας εικόνας η καρέ βίντεο.

Η ανίχνευση των τμημάτων της εικόνας που δεν έχουν ταξινομηθεί σωστά και επομένως για τα οποία απαιτείται προσαρμογή του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της σύγκρισης της ταξινόμησης του νευρωνικού δικτύου με το αποτέλεσμα της συλλογιστικής για το ίδιο τμήμα της εικόνας. Μια και ο βαθμό συμμετοχής που δίνει το νευρωνικό δίκτυο ανήκει στο σύνολο $[0,1]$, όταν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι, το οποίο ορίζεται ανάλογα με το πρόβλημα (και στην περίπτωση μας τέθηκε ίσο με 0.1), ενεργοποιείται η διαδικασία προσαρμογής του δικτύου. Με αυτό το τρόπο όταν η απόδοση του νευρωνικού εκτιμάται σαν όχι πολύ ακριβής ή λανθασμένη υπολογίζονται διαφορετικά βάρη για το νευρωνικό δίκτυο.

Η διαδικασία προσαρμογής των βαρών του δικτύου επιτυγχάνεται με τη παρακάτω διαδικασία. Έστω ότι το \bar{w}_b περιλαμβάνει όλα τα βάρη του νευρωνικού δικτύου πριν από την προσαρμογή του και \bar{w}_a το νέο διάνυσμα των βαρών του νευρωνικού δικτύου το οποίο δημιουργείται έπειτα από τη διαδικασία προσαρμογής. Για να πραγματοποιηθεί η προσαρμογή, σχηματίζεται ένα σύνολο εκπαίδευσης S_c , το οποίο περιλαμβάνει χαρακτηριστικά από m_c διαφορετικά τμήματα εικόνας των οποίων η κατηγορία-σημασιολογική έννοια έχει τροποποιηθεί από την συλλογιστική. $S_c = \{(\bar{x}_1, \bar{d}_1), \dots, (\bar{x}_{m_c}, \bar{d}_{m_c})\}$ όπου \bar{x}_i και \bar{d}_i με $i = 1, 2, \dots, m_c$ δείχνουν την i είσοδο και την επιθυμητή έξοδο αντίστοιχα που θα χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή του δικτύου. Ο αλγόριθμος της προσαρμογής του δικτύου υπολογίζει τα νέα βάρη \bar{w}_a , ελαχιστοποιώντας τα παρακάτω κριτήρια λάθους που αφορούν τα βάρη.

$$E_a = E_{c,a} + \eta E_{f,a} \quad (6.2)$$

$E_{c,a}$ είναι το λάθος στο σύνολο εκπαίδευσης S_c ("τρέχουσα" γνώση - "current" knowledge) και $E_{f,a}$ το αντίστοιχο λάθος στο σύνολο εκπαίδευσης S_b (προηγούμενη γνώση - "former" knowledge). Τα $E_{c,a}$ και $E_{f,a}$ δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$E_{c,a} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_c} \|\bar{z}_a(\bar{x}_i) - \bar{d}_i\|_2$$

$$E_{f,a} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_b} \|\bar{z}_a(\bar{x}'_i) - \bar{d}'_i\|_2$$

$\bar{z}_a(\bar{x}_i)$ και $\bar{z}_a(\bar{x}'_i)$ είναι τα διανύσματα εξόδου που αντιστοιχούν στα διανύσματα εισόδου \bar{x}_i και \bar{x}'_i του δικτύου που περιέχει τα βάρη \bar{w}_a . Αντίστοιχα, το $\bar{z}_b(\bar{x}_i)$ αναπαριστά την έξοδο του δικτύου που περιέχει τα βάρη \bar{w}_b όταν δέχεται σαν διάνυσμα εισόδου το \bar{x}_i . Η παράμετρος η είναι ένας συντελεστής στάθμισης για τη σημασία της τρέχουσας εκπαίδευσης που σε σύγκριση με την προηγούμενη μιας και το σύμβολο $\|\cdot\|_2$ υποδηλώνει την L_2 -νόρμα.

Ο σκοπός της διαδικασίας της εκπαίδευσης είναι να ελαχιστοποιηθεί το $E_{f,a}$ και να υπολογιστούν τα νέα βάρη του νευρωνικού δικτύου \bar{w}_a . Αυτός ο αλγόριθμος για την προσαρμογή νευρωνικών δικτύων προτάθηκε στα [74][169] και προσφέρει μια αναλυτική και κλιμακωτή λύση για την εκτίμηση του \bar{w}_a .

Η εξίσωση (6.2) δείχνει ότι τα νέα βάρη του δικτύου εκτιμώνται λαμβάνοντας υπόψη τόσο την τρέχουσα όσο και την προηγούμενη γνώση του δικτύου. Για να τονιστεί, ωστόσο, η σημασία της τρέχουσας γνώσης στην εκπαίδευση (6.2), ο πρώτος όρος έχει αντικατασταθεί από τον περιορισμό ότι τα πραγματικά αποτελέσματα δικτύου είναι ίσα με τα επιθυμητά:

$$z_a(\bar{x}_i) = d_i, i = 1, \dots, m_c, \forall \bar{x} \in S_c \quad (6.3)$$

Επιπρόσθετα, η ελαχιστοποίηση του δεύτερου όρου της (6.2) εκφράζει το αποτέλεσμα των νέων βαρών του νευρωνικού δικτύου στο σύνολο δεδομένων S_b και μπορεί να θεωρηθεί ως η ελαχιστοποίηση της απόλυτης διαφοράς του σφάλματος στο σύνολο δεδομένων S_b όταν χρησιμοποιούνται η προηγούμενη και η τρέχουσα γνώση του δικτύου αντίστοιχα:

$$E_S = \|E_{f,a} - E_{f,b}\|_2 \quad (6.4)$$

με το $E_{f,b}$ να ορίζεται παρόμοια με το $E_{f,a}$, όταν το \bar{z}_a αντικαθίσταται από το \bar{z}_b στη (6.2).

Στο [33] αποδεικνύεται ότι η εξίσωση 6.4 παίρνει τη μορφή

$$E_S = \frac{1}{2}(\Delta\bar{w})^T \cdot K^T \cdot K \cdot \Delta\bar{w} \quad (6.5)$$

όπου τα στοιχεία του πίνακα K εκφράζονται με χρήση των προηγούμενων βαρών του δικτύου w_b και του σύνολο εκπαίδευσης S_b . Το σφάλμα που ορίζεται από την εξίσωση 6.5 αποτελεί κυρτή συνάρτηση. Η μέθοδος προβολής της κλίσης χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των νέων παραμέτρων του δικτύου στα [74] [169].

Χρησιμοποιώντας αυτή τη τεχνική για την προσαρμογή, το νευρωνικό δίκτυο βελτιώνει αισθητά την απόδοσή του στην ταξινόμηση τμημάτων παρόμοιων εικόνων ή καρέ βίντεο.

6.3 Αναπαράσταση Γνώσης για την Προσαρμογή Νευρωνικών Δικτύων

Όπως είδαμε στην αρχιτεκτονική του συστήματος, σκοπός μας ήταν να ορίσουμε ένα σώμα ορολογίας, σύμφωνα με το οποίο η ταξινόμηση ενός τμήματος μιας εικόνας ή ενός καρέ βίντεο θα επαναπροσδιοριστεί. Κατά συνέπεια, θα είναι δυνατή η σημασιολογική επικύρωση της απόδοσης του νευρωνικού δικτύου. Επιπλέον, οι νέοι βαθμοί συμμετοχής που υπολογίζονται από το σύστημα συλλογιστικής FiRE για τα τμήματα που έχουν ταξινομηθεί εσφαλμένα από το νευρωνικό δίκτυο, αποτελούν ένα νέο σύνολο επιθυμητών τιμών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου.

Έχοντας αυτό το στόχο, ορίσαμε ένα εκφραστικό σώμα ορολογίας. Η σημασιολογική μονάδα ανάλυσης υπολογίζει τις χωρικές σχέσεις για κάθε τμήμα της εικόνας, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τη θέση τους ως προς τα γειτονικά τμήματα. Ακόμα, το νευρωνικό δίκτυο ταξινομεί κάθε τμήμα της εικόνας με ένα βαθμό συμμετοχής σε ορισμένες κατηγορίες. Ως εκ τούτου, το αλφάβητο της ασαφούς βάσης γνώσεων μας αποτελείται από τις εξαγόμενες σχέσεις που εκπροσωπούνται από τους ρόλους στο σώμα ορολογία μας και σχηματίζουν το παρακάτω σύνολο :

$\mathbf{R} = \{\text{περιέχει, είναι Πάνω Από, είναι Κάτω Από, είναι Αριστερά Από, είναι Δεξιά Από}\}$.
καθώς και από τις κατηγορίες που ο ταξινομητής μπορεί να εκτιμήσει, και αναπαραστάθηκαν σαν έννοιες σχηματίζοντας το παρακάτω σύνολο :

$\mathbf{C} = \{\text{Τμ Ουρανού Ταξ, Τμ Κτηρίου Ταξ, Τμ Ανθρώπου Ταξ, Τμ Βράχου Ταξ, Τμ Δέντρου Ταξ, Τμ Βλάστησης Ταξ, Τμ Θάλασσας Ταξ, Τμ Γρασιδιού Ταξ, Τμ Εδάφους Ταξ, Τμ Άμμου Ταξ, Τμ Κορμού Ταξ, Τμ Φυτού Ταξ, Τμ Πεζοδρομίου Ταξ, Τμ Βάρκας Ταξ, Τμ Κύματος Ταξ}\}$

Τέλος, οι εκτιμώμενες περιοχές της εικόνας από την αρχική κατάτμηση αναπαριστούν τα άτομα της βάσης γνώσης.

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω αλφάβητο δηλώθηκε το σώμα ορολογίας που φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

Τα τμήματα της εικόνας ή των καρέ του βίντεο που έχουν εκτιμηθεί από τον ταξινομητή ότι δείχνουν θάλασσα, συμμετέχουν με ένα βαθμό στην έννοια Τμ Θάλασσας Ταξ (Τμήμα Θάλασσας εκτιμώμενο από τον ταξινομητή). Έχοντας σαν στόχο να

Πίνακας 6.1: Το σώμα ορολογίας για την προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου ταξινομητή.

$\mathcal{T} = \{$	$\text{ΕπΤμΘάλασσας} \sqsubseteq$	$\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcap ((\exists \text{είναιΔεξιάΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΑριστεράΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΠάνωΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΚάτωΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΟυρανούΤαξ}))),$
ΕπΤμΆμμου	\sqsubseteq	$\text{ΤμΆμμουΤαξ} \sqcap ((\exists \text{είναιΔεξιάΑπό.}(\text{ΤμΆμμουΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΑριστεράΑπό.}(\text{ΤμΆμμουΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΠάνωΑπό.}(\text{ΤμΆμμουΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΚάτωΑπό.}(\text{ΤμΆμμουΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΘάλασσαςΤαξ}))),$
ΕπΤμΚύματος	\sqsubseteq	$\text{ΤμΚύματοςΤαξ} \sqcap ((\exists \text{είναιΔεξιάΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΑριστεράΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΠάνωΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ})) \sqcup (\exists \text{είναιΚάτωΑπό.}(\text{ΤμΘάλασσαςΤαξ} \sqcup \text{ΤμΚύματοςΤαξ}))),$
$\mathcal{R} = \{$		$\text{περιέχει, είναιΠάνωΑπό, είναιΚάτωΑπό, είναιΑριστεράΑπό, είναιΔεξιάΑπό, είναιΚάτωΑπό}^- = \text{είναιΠάνωΑπό, είναιΑριστεράΑπό}^- = \text{είναιΔεξιάΑπό}\}$

επαναπροσδιορίσουμε τα τμήματα αυτά ορίστηκε η έννοια **ΕπΤμΘάλασσας** (Επαναπροσδιορισμός Τμήματος Θάλασσας) σαν ένα τμήμα εικόνας που έχει εκτιμηθεί σαν θάλασσα (δηλαδή **ΤμΘάλασσαςΤαξ**) και τα γειτονικά του τμήματα έχουν εκτιμηθεί σαν κύμα (**ΤμΚύματοςΤαξ**), θάλασσα (**ΤμΘάλασσαςΤαξ**) ή ουρανός (**ΤμΟυρανούΤαξ**). Η κύρια ιδέα πίσω από αυτή την αναπαράσταση είναι ότι αφού ο ταξινομητής έχει εκπαιδευτεί αρχικά σε ένα σύνολο δεδομένων, χαρακτηρίζει κάθε τμήμα σε όλες τις πιθανές κατηγορίες αλλά με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Έτσι είναι πιθανό για ένα τμήμα να μην πάρει τον υψηλότερο βαθμό συμμετοχής για τη σωστή κατηγορία. Όμως, χρησιμοποιώντας τις κατηγορίες στις οποίες τα γειτονικά του τμήματα έχουν ταξινομηθεί, σαν σημείο αναφοράς, μπορεί να επιτευχθεί μια σημασιολογική ερμηνεία της κατηγορίας στην οποία ανήκει το τμήμα. Με αυτό το τρόπο η γνώση μας για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, που είναι εικόνες και βίντεο από διακοπές, χρησιμοποιείται για τον επαναπροσδιορισμό κάποιων κατηγοριών. Με παρόμοιο τρόπο ορίστηκαν οι έννοιες **ΕπΤμΆμμου** και **ΕπΤμΚύματος**. Επιπρόσθετα, οι αντίστροφοι των ρόλων όπως ότι ο αντίστροφος του ρόλου **είναιΑριστεράΑπό** είναι ο ρόλος **είναιΔεξιάΑπό** ορίστηκαν στο σώμα ρόλων.

Είναι πολύ σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως οι έννοιες που ορίστηκαν για τον επαναπροσδιορισμό κατηγοριών του ταξινομητή είναι αυτές που ήταν δυνατό να έχουν μια σημασιολογική ερμηνεία. Με άλλα λόγια, οι κατηγορίες για τις οποίες ορίστηκαν αξιώματα είναι μονάχα εκείνες οι οποίες μπορούν να περιγραφούν από γενικά ορισμένα αξιώματα σύμφωνα με τους γείτονες τους. Ως εκ τούτου, ο επαναπροσδιορισμός των περιοχών που απεικονίζουν πρόσωπα δεν είναι δυνατός, γιατί ένα άτομο μπορεί να εμφανιστεί οπουδήποτε σε μια εικόνα ή σε ένα βίντεο καρέ, ενώ από την άλλη ένα τμήμα θάλασσας αναμένεται να έχει συγκεκριμένους γείτονες. Ωστόσο, τα αξιώματα που ορίζονται για τις κατηγορίες, χρησιμοποιώντας την ταξινόμηση των γειτονικών τμημάτων, δεν περιγράφουν κατ' ανάγκη όλα τα πιθανά σενάρια. Για παράδειγμα, σε μια φωτογραφία που τραβήχτηκε από ένα σκάφος, η θα-

λάσσια περιοχή θα είναι κάτω από την περιοχή της άμμου, αυτές όμως οι περιπτώσεις αποτελούν εξαιρέσεις της γενικής γνώσης για το συγκεκριμένο πεδίο.

6.4 Σημασιολογική Κατάτμηση

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια συνοπτική της τεχνικής κατάτμησης που χρησιμοποιήθηκε στην προσέγγιση μας και αποτελεί μια τροποποίηση της Recursive Shortest Spanning Tree (RSST) [26].¹ Το υποσύστημα S-RRST παίζει δύο ρόλους κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσαρμογής. Κατά πρώτον, εξάγει τις χωρικές σχέσεις των τμημάτων που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία βελτίωσης με τη συλλογιστική, και συγχωνεύει τις γειτονικές περιοχές με βάση τις ταξινομήσεις του προσαρμόσιμου νευρωνικού δικτύου. Επιπλέον, σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις που έγιναν για την κατάτμηση καρέ από βίντεο.

6.4.1 Σημασιολογική Κατάτμηση Εικόνας

Ο αλγόριθμος RSST είναι ένας αλγόριθμος κατάτμησης ο οποίος ξεκινά από πίξελ και λειτουργώντας επαναληπτικά ενώνει γειτονικές περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά έως ότου να πληρούνται ορισμένα κριτήρια τερματισμού. Χρησιμοποιεί ένα γράφο συσχέτισης ιδιοτήτων (ΓΣΙ) [83] που είναι μια εσωτερική αναπαράσταση γράφου των περιοχών της εικόνας. Στην αρχή, όλες οι ακμές του ΓΣΙ ταξινομούνται σύμφωνα με ένα κριτήριο βαρύτητας, όπως είναι η ανομοιότητα στο χρώμα των δύο περιοχών που συνδέονται, χρησιμοποιώντας την Ευκλείδεια απόσταση των στοιχείων του χρώματος. Η ακμή με τη λιγότερη βαρύτητα προσδιορίζεται και οι δύο περιοχές που συνδέονται με αυτήν, στη συνέχεια ενώνονται. Μετά από κάθε βήμα, τα χαρακτηριστικά της νέας περιφέρειας (π.χ. μέσο χρώμα περιοχής) που προκύπτει υπολογίζονται εκ νέου. Επιπρόσθετα υπολογίζεται εκ νέου το βάρος των σχετικών ακμών και οι νέες τιμές επαναταξινομούνται. Με αυτόν τον τρόπο, σε κάθε βήμα, η ακμή με το λιγότερο βάρος έχει επιλεγεί και η διαδικασία συνεχίζεται αναδρομικά, έως ότου ο αλγόριθμος πληρεί τα κριτήρια τερματισμού. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να ποικίλλουν, αλλά συνήθως ορίζονται με βάση είτε τον αριθμό των περιφερειών, ή ένα όριο για την απόσταση ανομοιότητας.

Ο αλγόριθμος αυτός τροποποιήθηκε έτσι ώστε να λειτουργεί χρησιμοποιώντας ασαφή σύνολα και χαμηλού επιπέδου χαρακτηριστικά (όπως το χρώμα, η υφή, κλπ.). Αυτή η τροποποίηση ακολουθεί τον τρόπο λειτουργίας τον κλασικού αλγόριθμο RSST, με τις απαραίτητες προσαρμογές για ασαφή σύνολα. Ο σημασιολογικός αλγόριθμος S-RSST αποσκοπεί στην βελτίωση του κλασικού αλγόριθμου RSST που παρουσιάζει την συμπεριφορά της υπερ-κατάτμησης (oversegmentation) ενσωματώνοντας τα αποτελέσματα της ταξινόμησης των περιοχών στη διαδικασία της κατάτμησης. Η τροποποίηση του παραδοσιακού αλγόριθμου στον S-RSST βασίζεται στον ορισμό των παρακάτω κριτηρίων:

1. Το κριτήριο της ομοιότητας μεταξύ δύο γειτονικών περιοχών a και b (κορυφές v_a και v_b στο ΓΣΙ), βάσει των οποίων οι ακμές του ΓΣΙ είναι ταξινομημένες, και

¹Η τροποποίηση αυτή προτάθηκε από τον συνεργάτη μας σε αυτή την εργασία Δρ Αθανάσιο Αθανασιάδης και ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται για περαιτέρω λεπτομέρειες παραπέμπεται στο [212]

2. το κριτήριο τερματισμού.

Με σκοπό να υπολογιστεί η ομοιότητα δυο τμημάτων χρησιμοποιείται μια μέτρηση μεταξύ δύο ασαφών σύνολων που αντιστοιχεί στις έννοιες με τις οποίες έχουν χαρακτηριστεί οι δύο γειτονικές περιοχές. Αυτή η τιμή ανομοιότητας υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο και θεωρείται ως το βάρος της ακμής e_{ab} του ΓΣΙ:

$$w(e_{ab}) = 1 - \sup_{c_k \in C} (t_G(\mu_a(c_k), \mu_b(c_k))) \quad (6.6)$$

όπου τα a και b είναι δυο γειτονικά τμήματα, $t_G(a, b) = \min(a, b)$, είναι η Gödel τ-νόρμα και $\mu_a(c_k)$ είναι ο βαθμός συμμετοχής της έννοιας $c_k \in C$ στο ασαφές σύνολο L_a .

Ας εξετάσουμε τώρα μία επανάληψη του αλγορίθμου S-RSST. Αρχικά επιλέγεται η άκμη e_{ab} με τη μικρότερη βαρύτητα, στη συνέχεια τα τμήματα a και b συγχωνεύονται. Η κορυφή v_b διαγράφεται από το ΓΣΙ, ενώ η v_a ανανεώνεται κατάλληλα. Αυτή η διαδικασία ανανέωσης αποτελείται από τις ακόλουθες δύο ενέργειες:

1. Επαναξιολόγηση των βαθμών συμμετοχής του ασαφούς συνόλου εννοιών σε ένα σταθμισμένο μέσο όρο (μ.β.τ. μέγεθος των τμημάτων).
2. Αναπροσαρμογή των ακμών του ΓΣΙ αφαιρώντας την ακμή e_{ab} και επαναξιολόγηση του βάρους των ακμών που επηρεάζονται.

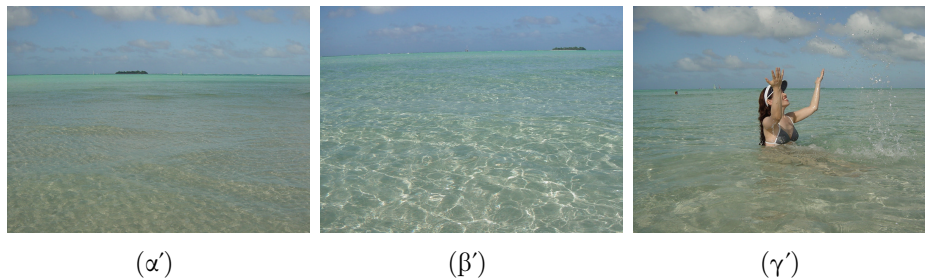
Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η ακμή με τη μικρότερη βαρύτητα στο ΓΣΙ e^* , να είναι μεγαλύτερη από ένα όριο: $w(e^*) > T_w$. Το όριο αυτό υπολογίζεται στην αρχή του αλγορίθμου, με βάση το ιστόγραμμα των βαρών στο σύνολο όλων των ακμών.

6.4.2 Σημασιολογική Κατάτμηση Βίντεο

Ο αλγόριθμος S-RSST που περιγράφηκε στην παραπάνω ενότητα μπορεί να εφαρμοστεί και σε μια αλληλουχία από καρέ βίντεο. Τα καρέ βίντεο μπορούν να αντιμετωπίζονται με το ίδιο τρόπο με τις εικόνες και ομοίως, τα MPEG-7 χαρακτηριστικά μπορούν να εξαχθούν από αυτά και να σχηματίσουν την είσοδο του νευρωνικού δικτύου - ταξινομητή. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα καρέ που συνθέτουν μια ακολουθία βίντεο είναι συνήθως παρόμοια, οι ταξινομήσεις τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως επιπλέον κριτήριο για περαιτέρω επεξεργασία. Ως εκ τούτου, διαδοχικά καρέ αποτυπώνουν παρόμοιες σκηνές και κατατάσσονται στις ίδιες κατηγορίες, που έχουν επίσης παρόμοιες χωρικές σχέσεις. Έτσι λοιπόν τα διαδοχικά καρέ που δεν πήραν παρόμοιες ταξινομήσεις είτε απεικονίζουν μια αλλαγή της σκηνής ή μπορεί να έχουν υπολογιστεί εσφαλμένα.

Σε αυτό το σημείο, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθούν οι δυσκολίες που εμφανίζονται στην ανάλυση βίντεο. Η κίνηση της κάμερας, καθώς και η μεγέθυνση (zoom in) ή η σμίκρυνση (zoom out) ή τα πλάνα με κινούμενα αντικείμενα μπορούν να κάνουν την ανάλυση πολύ περίπλοκη. Τα παραπάνω είναι ειδικές περιπτώσεις και δεν προσδίδουν κάποια πληροφορία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση. Για τους λόγους αυτούς, η προσαρμογή του ταξινομητή χρησιμοποιώντας καρέ βίντεο απαιτεί πρώτα μία διαδικασία φιλτραρίσματος των διαδοχικών περιοχών, με βάση κριτήρια ομοιότητας. Ως εκ τούτου, προκειμένου να επιλέξουμε το καταλληλότερο

Σχήμα 6.2: Καρέ από μια ακολουθία βίντεο.



καρέ βίντεο για την προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου ταξινομητή, μια ακολουθία διαδοχικών καρέ πρέπει να πληρεί τα ακόλουθα κριτήρια:

- Πρέπει να περιέχει τον ίδιο αριθμό τμημάτων, και
- τα ίδια τμήματα σε διαδοχικά καρέ να έχουν ταξινομηθεί από το νευρωνικό δίκτυο ταξινομητή στις ίδιες, έστω 5, κατηγορίες (ανεξάρτητα από τους βαθμούς συμμετοχής).

Με μια τέτοια επιλογή, η διαδικασία προσαρμογής μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και στις εικόνες, ώστε να βελτιωθεί περαιτέρω η απόδοση του ταξινομητή. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του ταξινομητή για την ίδια περιοχή διαδοχικών εικόνων, πρόσθετες πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν. Εάν, για παράδειγμα, σε μια σειρά πλαισίων που ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια για την προσαρμογή, ένα τμήμα αξιολογείται από τον ταξινομητή με τις ετικέτες *ΤμΘάλασαςΤαξ* και *ΤμΟυρανούΤαξ*, τότε μόνο η κυρίαρχη έννοια, σύμφωνα με τα κριτήρια ομοιότητας που παρουσιάζεται στο προηγούμενο τμήμα (6.4.1), χρησιμοποιείται για την προσαρμογή. Στο Σχήμα 6.2 εμφανίζονται ορισμένα καρέ από μια ακολουθία βίντεο από τα οποία μόνο τα καρέ «α» και «β», πληρούν τα κριτήρια προσαρμογής, δεδομένου ότι το πλαίσιο «γ» απεικονίζει μια διαφορετική σκηνή. Όπως και με τις εικόνες, οι βελτιωμένες επιδόσεις του ταξινομητή μαζί με το υποσύστημα S-RSST παράγουν καλύτερη κατάτμηση.

6.5 Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Αρχικά παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου μαζί με τα αποτελέσματα για την επίδοσή του μετά την αρχική εκπαίδευση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η χρήση της ασαφούς συλλογιστικής με το FiRE για τη βελτίωση της ταξινόμησης. Τέλος, οι εκτιμώμενες από τη συλλογιστική τιμές αποτελούν ένα νέο σύνολο των επιθυμητών εξόδων που χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή του ταξινομητή ώστε να βελτιώνει σημαντικά την επίδοσή του.

6.5.1 Η Αρχιτεκτονική του Νευρωνικού Δικτύου

Όπως είδαμε στην αρχιτεκτονική του συστήματος στην ενότητα 6.2 επεξεργαζόμαστε μια εικόνα ή ένα καρέ βίντεο αρχικά με έναν αλγόριθμο κατάτμησης που εξάγει κάποια χαρακτηριστικά για κάθε τμήμα της εικόνας. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν την

είσοδο του νευρωνικού δικτύου - ταξινομητή. Η επιλογή των χαρακτηριστικών που θα αποτελέσουν την είσοδο του δικτύου μας είναι πολύ σημαντική, επειδή πρέπει να παρέχει στο νευρωνικό δίκτυο πλούσια και καθοριστική πληροφορία για τις επιθυμητές κατηγορίες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ταξινόμηση σε αυτές. Στην περίπτωση μας, οι κατηγορίες ταξινόμησης ορίστηκαν από το σύνολο δεδομένων για το πεδίο των διακοπών και είναι η θάλασσα, ο ουρανός, η άμμος κ.α. Σημαντικές πληροφορίες για αυτές τις κατηγορίες δίνονται από τα χαρακτηριστικά χρώματος. Για αυτό το λόγο τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από τους παρακάτω MPEG-7 περιγραφείς: Περιγραφέας Δομής Χρώματος (Color Structure descriptor), Περιγραφέας Βαθμωτού χρώματος (Scalable Color descriptor) και Περιγραφέας Ομοιογενούς Υφής (Homogeneous Texture descriptor). Ο Περιγραφέας Δομής Χρώματος ορίζεται από 64 τιμές που ανήκουν στο σύνολο $[0,255]$ και είναι ένα χαρακτηριστικό που αποτυπώνει τα χρώματα (παρόμοια με το ιστόγραμμα χρώματος) και ακόμα πληροφορίες όσον αφορά στη δομή των χρωμάτων του. Ο Περιγραφέας Βαθμωτού χρώματος ορίζεται από 256 αριθμούς που ανήκουν στο σύνολο $[-180,230]$ και είναι ένα ιστόγραμμα χρώματος σε HSV Color Space, το οποίο κωδικοποιείται από μια συνάρτηση Haar. Τέλος, ο Περιγραφέας Ομοιογενούς Υφής ορίζεται από 62 αριθμούς οι οποίοι ανήκουν στο σύνολο $[0,255]$. Ο Περιγραφέας Ομοιογενούς Υφής έχει αναδειχθεί ως ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για την αναζήτηση και την περιήγηση εικόνων μέσα από μεγάλες συλλογές παρόμοιων εικόνων.

Το επόμενο βήμα ήταν να εκτελέσουμε μια στατιστική ανάλυση των δεδομένων, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύνολο εκπαίδευσης που θα παρέχει στο νευρωνικό δίκτυο τις πληροφορίες που απαιτούνται για την σωστή ταξινόμηση των δεδομένων. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο αριθμός των τμημάτων των ειδικών κατηγοριών ήταν μεγαλύτερος σε σύγκριση με τον αριθμό των τμημάτων άλλων κατηγοριών. Με άλλα λόγια, υπήρξαν 3.724 τμήματα θάλασσας στα δεδομένα μας, ενώ υπήρχαν μόνο 256 περιοχές κορμού δέντρου. Δεδομένου ότι η προσέγγισή μας βασίζεται σε ένα ταξινομητή που θα μπορούσε να προσφέρει ένα βαθμό εμπιστοσύνης για κάθε περιοχή σε όλες τις κατηγορίες, η δημιουργία ενός συνόλου εκπαίδευσης με σχεδόν ίσο αριθμό τμημάτων από κάθε κατηγορία ήταν πολύ βασικός. Γι αυτό το λόγο υπολογίστηκε η μέση τιμή της εμφάνισης τμημάτων ανά κατηγορία και χρησιμοποιήθηκε ως κατώτατο όριο για την επιλογή των τμημάτων κάθε κατηγορίας στο σύνολο της εκπαίδευσης. Με αυτόν τον τρόπο, διαμορφώθηκε ένα σύνολο εκπαίδευσης από 4654 τμήματα που αποτελείται από ένα μέσο όρο 400 τμημάτων ανά κατηγορία.

Το διάνυσμα εισόδου αποτελείται από 382 στοιχεία τα οποία δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν απευθείας σαν είσοδος στο νευρωνικό δίκτυο λόγω της μεγάλης διάστασής τους. Έτσι λοιπόν αρχικά εφαρμόστηκε ανάλυση πρωτογενών συνιστωσών (principal component analysis) ως απαραίτητη προεπεξεργασία για την μείωση των διαστάσεων των δεδομένων. Το αποτέλεσμα ήταν 72 κανονικοποιημένα χαρακτηριστικά τα οποία αποτέλεσαν το διάνυσμα εισόδου για τον ταξινομητή. Το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης με 12 εξόδους, μια για κάθε κατηγορία. Χρησιμοποιήθηκε μια αρχιτεκτονική 2 κρυμμένων επιπέδων ενώ σταδιακά αυξάναμε τον αριθμό των νευρώνων. Η βέλτιστη απόδοση επιτεύχθηκε με μικρό συντελεστή μάθησης ($\eta \approx 0.1$) και 30 νευρώνες στο πρώτο επίπεδο και 25 νευρώνες στο δεύτερο με τη χρήση της μεθόδου Levenberg-Marquardt οπίσθιας διάδοσης [12]. Η αρχιτεκτονική του δικτύου δεν ήταν πλήρως συνδεδεμένη και επιτεύχθηκε με χρήση της τεχνικής εξασθένισης των βαρών (weight-decay pruning technique) [29].

Πέρα από το σφάλμα εκπαίδευσης και ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των επιδόσεων των νευρωνικών δικτύων, για την αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής χρησιμοποιήσαμε τα μέτρα της ακρίβειας και της ανάκλησης που χρησιμοποιούνται ευρέως στις στατιστικές ταξινομήσεις (Εξισώσεις 5.2.3, 5.2.3). Οι επιδόσεις του ταξινομητή για το σύνολο εκπαίδευσης και ελέγχου φαίνεται στον Πίνακα 6.5.1.

Πίνακας 6.2: Η απόδοση του ταξινομητή μετά την εκπαίδευση.

Label	Σύνολο εκπαίδευσης			Σύνολο ελέγχου		
	Τμήματα	Ακρίβεια	Ανάκληση	Τμήματα	Ακρίβεια	Ανάκληση
Άνθρωπος	408	100%	100%	76	56.25%	47.30%
Άμμος	342	100%	96.40%	116	75.00%	51.70%
Κτήριο	378	100%	96.80%	108	58.80%	37.00%
Πεζοδρόμιο	312	80.95%	98.00%	64	25.00%	18.00%
Θάλασσα	408	100%	97.00%	80	68.10%	75.00%
Ουρανός	414	100%	98.50%	88	64.70%	50.00%
Κύμα	282	100%	100%	36	33.30%	66.60%
Φυτό	486	100%	97.50%	64	50.00%	37.50%
Γρασίδι	450	100%	100%	80	52.30%	55.00%
Δέντρο	414	97.14%	98.50%	92	63.10%	52.10%
Κορμός	264	100%	96.90%	72	57.10%	22.20%
Έδαφος	496	100%	96.70%	112	24.50%	53.50%
Σύνολο	4654	98.47%	98.02%	988	53.96%	47.29%

Όπως παρατηρούμε η απόδοση του νευρωνικού δικτύου ταξινομητή για το σύνολο εκπαίδευσης είναι πάρα πολύ καλή, ενώ η απόδοση του στο σύνολο ελέγχου είναι μέτρια. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την υψηλή πολυπλοκότητα του προβλήματος μια και ενώ ο ταξινομητής "έμαθε" το σύνολο εκπαίδευσης δεν μπορεί να ταξινομήσει σωστά δεδομένα στα οποία δεν έχει εκπαιδευτεί.

6.5.2 Διόρθωση Αποτελεσμάτων με τη χρήση του FiRE

Έχοντας σαν στόχο την προσαρμογή του νευρωνικού δικτύου για την βελτίωση της απόδοσής του στις κατηγορίες που δίνει λανθασμένες εκτιμήσεις, επαναπροσδιορίσαμε σημασιολογικά αυτές τις κατηγορίες στο σώμα ορολογίας του Πίνακα 6.1. Η διόρθωση των αποτελεσμάτων με τη χρήση του FiRE βασίστηκε στο γεγονός ότι ο ταξινομητής είχε εκπαιδευτεί. Έτσι, ενώ αρκετά συχνά έθετε το μεγαλύτερο βαθμό εμπιστοσύνης για ένα τμήμα εικόνας σε λανθασμένη κατηγορία, σχεδόν πάντα εκτιμούσε με έναν σχετικά μεγάλο βαθμό εμπιστοσύνης το ίδιο τμήμα στη σωστή κατηγορία. Για αυτό το λόγο το σώμα ισχυρισμών που χρησιμοποιήσαμε αποτελείται από τους ισχυρισμούς για τις χωρικές σχέσεις των τμημάτων και τους ισχυρισμούς για τις 5 υψηλότερες σύμφωνα με το βαθμό εμπιστοσύνης κατηγορίες για κάθε τμήμα. Για τον επαναπροσδιορισμό των τιμών για αυτές τις κατηγορίες μέσω της συλλογιστικής χρησιμοποιήσαμε την υπηρεσία συλλογιστικής του μέγιστου κάτω φράγματος

τροποποιημένη όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.3.2 και φαίνεται στο παράδειγμα 5.3.2.

Έπειτα από τον υπολογισμό του MKΦ, ένα νέο σύνολο εκπαίδευσης δημιουργείται που αποτελείται από τα αρχικά χαρακτηριστικά για τα τμήματα ενδιαφέροντος και τις επαναπροσδιορισμένες από το FiRE τιμές για αυτά, και το οποίο χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του ταξινομητή. Η διαδικασία προσαρμογής μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές ανάλογα με τις βελτιώσεις της συλλογιστικής, χρησιμοποιώντας τις νέες ταξινομήσεις του ταξινομητή. Έτσι, αν μετά από μια αρχική προσαρμογή του ταξινομητή, υπάρχουν περιοχές που μπορούν ακόμα να βελτιωθούν, σύμφωνα με το σώμα ορολογίας που έχει οριστεί, τότε η διαδικασία προσαρμογής μπορεί να επαναληφθεί. Πολλά πιθανά κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποφασίσουμε πότε θα σταματήσει η προσαρμογή, αλλά απαιτούν προσεκτική εξέταση. Αρχικά ένα κριτήριο κατωφλίου με βάση τον αριθμό των τμημάτων μιας συγκεκριμένης κατηγορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Συνεπώς, αν το ποσό των περιοχών από έχουν βελτιωθεί από το FiRE για μια κατηγορία είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με τον συνολικό αριθμό των περιοχών για αυτό το σήμα, τότε η διαδικασία προσαρμογής μπορεί να διακοπεί. Ένα άλλο πιθανό κριτήριο είναι να αξιολογηθεί η μέση τιμή της συνολικής βελτίωσης από το FiRE. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση λειτουργεί πολύ καλά μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω μεγάλων αλλαγών που ενδέχεται να προκύψουν για μια κατηγορία και συνεπώς μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή προσαρμογή. Εξ ου και στην προσέγγισή μας το κριτήριο για τη διακοπή της προσαρμογής ήταν να επαναπροσδιοριστούν από το FiRE λιγότερο από το 5% του συνόλου των περιφερειών ανά κατηγορία. Οι επιδόσεις του νευρωνικού δικτύου μετά την προσαρμογή απεικονίζεται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Η απόδοση του Νευρωνικού Δικτύου μετά την προσαρμογή.

Κατηγορία	Τμήματα	Απόδοση ΝΔ		Προσαρμοσμένο NN	
		Ακρίβεια	Ανάκληση	Ακρίβεια	Ανάκληση
Άμμος	116	75 %	51.7%	79.1%	65.5%
Θάλασσα	80	68.1%	75%	85%	77.2%
Κύμα	36	33.3%	66.6%	46.4%	72.2%

Παρατηρούμε πως, μετά την προσαρμογή, η απόδοση του ταξινομητή είναι σημαντικά βελτιωμένη για τις κατηγορίες που ορίστηκαν σημασιολογικά.

6.5.3 Σύγκριση με άλλες Τεχνικές

Σε αυτή την ενότητα αξιολογείται η απόδοση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής με 2 διαφορετικές προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν στο [228]. Οι δυο αλγόριθμοι έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά, επειδή ο στόχος τους είναι να ταξινομήσουν ένα τμήμα μιας εικόνας που εξήχθη από έναν αλγόριθμο κατάτμησης σε ένα σύνολο κατηγοριών. Στη πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιούνται μηχανές διανυσματικής υποστήριξης (ΜΔΥ- Support Vector Machine SVM) για κάθε μια από τις κατηγορίες για την ταξινόμηση των τμημάτων. Κάθε διανυσματική μηχανή εκπαιδεύεται με την τεχνική "ένα δείγμα ενάντια σε όλα" χρησιμοποιώντας το ίδιο σύνολο εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του νευρωνικού μας. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται

στη Particle Swarm Optimization (PSO) που βελτιώνει τα αποτελέσματα ενός δικτύου ταξινομητή αυτό-οργανούμενων χαρτών (AOX Self Organizing Map). Όπως και πριν και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η τεχνική "ένα δείγμα ενάντια σε όλα" για κάθε κατηγορία. Κατά την εκπαίδευση τα διανύσματα εκπαιδεύονται σύμφωνα με την συνάρτηση $m_d(t + 1) = m_d(t) + g_c d(t)[x - m_d(t)]$ όπου m_d είναι το βάρος των νευρώνων στο AOX δίκτυο, $g_c d(t)$ είναι η γειτονική συνάρτηση και d η διάσταση του διανύσματος εισόδου.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.3 και παρατηρείται πως η προτεινόμενη προσέγγιση αποδίδει πολύ καλύτερα από τις άλλες στο μέτρο της ακρίβειας. Από την άλλη, στο μέτρο της ανάκλησης η προσέγγιση με το AOX δίκτυο αποδίδει πολύ καλύτερα. Μπορούμε να πούμε, δηλαδή, ότι το σημασιολογικά προσαρμόσιμο δίκτυο είναι το πιο ακριβές σε σύγκριση με τα άλλα 2, ενώ η γενίκευση του (ανάκληση) παραμένει σε πολύ καλά επίπεδα. Αυτή η επίδοση προκύπτει λόγω της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος (δηλαδή τις συνθήκες υπό τις οποίες μια φωτογραφία λαμβάνονται, όπως φως, κλπ γωνία) που καθιστά πολύ δύσκολη την επίτευξη υψηλών μέτρων σε ανάκληση. Για τον λόγο αυτό η απόδοση του AOX στην ανάκληση είναι υψηλή αλλά ακολουθείται από πολύ χαμηλές επιδόσεις στην ακρίβεια, που δείχνει ασταθή λειτουργία.

Πίνακας 6.4: Σύγκριση της απόδοσης του Νευρωνικού Δικτύου (μετά την προσαρμογή) με δυο ανταγωνιστικές προσεγγίσεις: έναν ΜΔΥ και έναν AOX ταξινομητή

Κατηγορία	Προσαρμοσμένο ΝΔ		ΜΔΥ		AOX	
	Ακρίβεια	Ανάκληση	Ακρίβεια	Ανάκληση	Ακρίβεια	Ανάκληση
Άνθρωπος	56.25%	47.30%	36.12%	54.17%	35.72%	95.83%
Άμμος	79.10%	65.50%	30.62%	35.48%	30.45%	74.19%
Κτήριο	58.80%	37.00%	37.43%	74.65%	35.41%	98.59%
Πεζοδρόμιο	25.00%	18.00%	27.67%	33.93%	27.85%	60.71%
Θάλασσα	85.00%	77.20%	10.22%	72.22%	8.81%	77.78%
Ουρανός	64.70%	50.00%	86.83%	80.70%	84.87%	97.66%
Κύμα	46.40%	72.20%	46.04%	43.01%	46.39%	69.89%
Φυτό	50.00%	37.50%	7.95%	56.25%	7.95%	68.75%
Γρασίδι	52.30%	55.00%	15.12%	40.00%	15.21%	90.00%
Δέντρο	63.10%	52.10%	4.94%	40.00%	5.07%	100.00%
Κορμός	57.10%	22.20%	17.34%	45.71%	17.24%	65.71%
Έδαφος	24.50%	53.50%	19.30%	43.59%	19.34%	74.36%
Σύνολο	56.28%	49.29%	36.92%	52.17%	27.63%	82.61%

Κεφάλαιο 7

Σχετική Βιβλιογραφία

Η ανάγκη για την αναπαράσταση ασαφούς και ατελούς πληροφορίας, που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας, δημιούργησε πολλές προσεγγίσεις για την επέκταση γλωσσών αναπαράστασης γνώσης με ασάφεια. Η πρώτη παρουσίαση ασαφούς Περιγραφικής Λογικής έγινε από τον Yen στο [35]. Ο Yen παρουσιάζει τη σύνταξη και τη σημασιολογία της ασαφούς ΠΛ \mathcal{FL}_0 , η οποία προκύπτει από τη γλώσσα \mathcal{ALC} αφαιρώντας τον κατασκευαστή της άρνησης και του υπαρξιακού περιορισμού. Στην εργασία του αποδίδει έναν αλγόριθμο εξαγωγής συμπερασμάτων, ο οποίος βασίζεται στους δομημένους αλγορίθμους (structural algorithms). Οι αλγόριθμοι αυτοί είχαν προταθεί για τη διενέργεια συλλογιστικής στις ΠΛ τα πρώτα χρόνια μελέτης τους, στην πορεία όμως αποδείχθηκε ότι δεν μπορούν να διαχειριστούν περίπλοκους κατασκευαστές, όπως είναι αυτοί που χρησιμοποιεί η γλώσσα \mathcal{ALC} . Η πρώτη επέκταση για την \mathcal{ALC} έγινε από τους Tresp και Molitor [56]. Σε αυτή την προσέγγιση η σημασιολογία βασιζόταν στους γενικευμένους τελεστές των τ-νορμών και σ-νορμών, ενώ προτάθηκε η χρήση ενός επιπλέον τελεστή, του *τροποποιητή εννοιών* (concept modifier). Ο τελεστής αυτός επιτρέπει τη δημιουργία νέων ασαφών εννοιών τροποποιώντας τη συνάρτηση συμμετοχής των ήδη υπαρχόντων. Για παράδειγμα από την έννοια Έξυπνος μπορούμε να δημιουργήσουμε τις έννοιες πολύ(Έξυπνος) ή σχετικά(Έξυπνος), όπου οι τελεστές πολύ(·) και σχετικά(·) είναι συναρτήσεις που επενεργούν πάνω στο ασαφές σύνολο Έξυπνος και ονομάζονται τροποποιητές. Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στο [56] βασίζεται σε ένα συνδυασμό αλγορίθμων tableaux και μεθόδων βελτιστοποίησης με σκοπό την επίλυση των ασαφών εξισώσεων που δημιουργούνται από τους κανόνες επέκτασης.

Μια όμως πιο τυπική παρουσίαση της ασαφούς f- \mathcal{ALC} που βασίζεται στους αλγορίθμους tableau παρουσιάστηκε από τον Straccia [94, 59]. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε ήταν για την ασαφή ΠΛ $f_{KD}\text{-}\mathcal{ALC}$, δηλαδή την ασαφή γλώσσα \mathcal{ALC} με τους συγκεκριμένους ασαφείς, και όχι γενικευμένους, τελεστές. Ο Straccia μελετάει επίσης την αναγωγή των προβλημάτων στο πρόβλημα της ικανοποιησιμότητας αλλά και την πολυπλοκότητα της γλώσσας κάνοντας έτσι την πρώτη κλασική, συγκρίνοντας την με τις προσεγγίσεις για κλασικές ΠΛ, προσέγγιση στις ασαφείς ΠΛ. Η επέκταση του αλγορίθμου του Straccia για την προσθήκη τροποποιητών εννοιών έγινε από τον Hoelldobler στα [103, 144].

Οι παραπάνω εργασίες έδωσαν το έναυσμα για ασαφείς επεκτάσεις πιο εκφραστικών ΠΛ. Πιο συγκεκριμένα, οι Sanchez et al. [121] παρουσιάζουν την $f_{KD}\text{-}\mathcal{ALCQ}$ που είναι η πρώτη εργασία στην οποία ασαφοποιούνται οι ποσοδείκτες. Επιπλέον, ο Straccia στο [162] παρουσιάζει τη σύνταξη και τη σημασιολογία της ασαφούς ε-

πέκτασης της πολύ εκφραστικής ΠΛ $SHOIN(\mathcal{D})$, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζεται κάποιος αλγόριθμος συλλογιστικής. Η γλώσσα $SHOIN(\mathcal{D})$ είναι η $SHOIN$ μαζί με στέρεους χώρους (*concrete domains*). Οι στέρεοι χώροι χρησιμοποιούνται για την περιγραφή τύπων δεδομένων. Ο Straccia ασαφοποιεί τους στέρεους χώρους με σκοπό τη δυνατότητα ορισμού συναρτήσεων συμμετοχής μέσα από την ασαφή γλώσσα. Επιπρόσθετα, στο [162] γίνεται χρήση γενικευμένων τελεστών, το οποίο έχει σαν συνέπεια να μην παρουσιάζεται κάποια διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων. Επιπλέον, στο [162] δε γίνεται καμία μελέτη της σημασιολογίας των μεταβατικών ρόλων και των αξιωμάτων υπαγωγής ρόλων σε σχέση με τους περιορισμούς τιμής αλλά και της σημασιολογίας των περιορισμών πληθικότητας.

Οι παραπάνω εργασίες απευθύνονται σε ασθενείς ασαφείς ΠΛ, όπως είναι οι γλώσσες ALC , $ALC(\mathcal{D})$, $ALCQ$. Από την άλλη, οι σημαντικότερες εργασίες για πιο εκφραστικές ασαφείς ΠΛ παρουσιάστηκαν από τους Stoilos et al. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν αναλυτικούς (*analytic*) και εσωτερικούς (*internal*)¹ αλγόριθμους tableau για τις γλώσσες $f_{KD}\text{-}SI$ [146, 210], $f_{KD}\text{-}SHIN$ [145, 210] και $f_{KD}\text{-}SHOIN$ [147, 179]. Στις συγκεκριμένες εργασίες μελετάται η σημασιολογία των εκφραστικών κατασκευαστών, όπως είναι οι περιορισμοί πληθικότητας, τα αξιώματα υπαγωγής και μεταβατικών ρόλων και οι αντίστροφοι ρόλοι και αποδίδεται μια ορθή και πλήρης διαδικασία συλλογιστικής. Πιο αναλυτικά, οι συγγραφείς αποδεικνύουν ότι οι μεταβατικοί ρόλοι και οι ιεραρχίες ρόλων έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τις κλασικές ΠΛ και κατασκευάζουν κανόνες επέκτασης που να τους διαχειρίζονται αποδοτικά. Επιπρόσθετα, αποδεικνύουν ότι το πρόβλημα της συλλογιστικής με περιορισμούς πληθικότητας μπορεί να αναχθεί σε ένα πρόβλημα μετρήματος R -γειτόνων ενός ατόμου, ακριβώς όπως και στην κλασική περίπτωση. Τέλος, στο [181] μελετούν το πρόβλημα της συλλογιστικής με γενικευμένα και κυκλικά σώματα ορολογίας, παρουσιάζοντας έναν αλγόριθμο συλλογιστικής για την ασαφή ΠΛ $f_{KD}\text{-}ALC$. Μια διαφορετική προσέγγιση για τα γενικευμένα και κυκλικά σώματα προτάθηκε τον Li et al. στο [173].

Όλες οι παραπάνω εργασίες προτείνουν ασαφείς επεκτάσεις των ΠΛ με χρήση της ασαφής συνεπαγωγής του Kleene-Dienes, της τ -νόρμας και της σ -νόρμας του Gödel και της άρνηση του Lukasiewicz. Σημαντική εργασία, όμως, έχει γίνει και στην επέκταση των ασαφών ΠΛ με τη χρήση διαφορετικών ασαφών τελεστών. Αξιοσημείωτα παραδείγματα αποτελούν τα [138] και [6] στα οποία εξετάζονται οι γλώσσες $f_L\text{-}ALC$ και $f_{(c_L, t_P, u_P, \mathcal{J}_P)}\text{-}ALCf$. Πιο συγκεκριμένα, στο [138] παρουσιάζεται η διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων σε ασαφείς ΠΛ που περιέχουν στέρεους χώρους. Η σημασιολογία βασίζεται σε γενικευμένους τελεστές, όμως η διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων, περιορίζεται στις γλώσσες $f_{KD}\text{-}ALC(\mathcal{D})$ και $f_L\text{-}ALC(\mathcal{D})$. Η μέθοδος συλλογιστικής βασίζεται σε συνδυασμό αλγορίθμων tableaux και μεθόδων βελτιστοποίησης και όχι αναλυτικές μεθόδους tableaux. Ο Straccia στο [138] χρησιμοποιεί τη μέθοδο του Mixed Integer Linear Programming, ενώ οι Bobillo και Straccia επεκτείνουν τη μέθοδο αυτή στο [6], χρησιμοποιώντας Mixed Integer Quadratically Constrained Programming, για να παρέχουν έναν αλγόριθμο συλλογιστικής για τη γλώσσα $f_{(c_L, t_P, u_P, \mathcal{J}_P)}\text{-}ALCf$, δηλαδή την ασαφή γλώσσα $ALCf$ στην οποία χρησιμοποιείται η ασαφή λογική του γινομένου, στην οποία όμως έχει αντικατασταθεί το μη συνεχές συμπλήρωμα του Gödel με το συμπλήρωμα του Lukasiewicz. Επιπρόσθετα, οι ίδιοι συγγραφείς στο [221] ασχολήθηκαν με την σημασιολογία των προσοντούχων

¹Ως εσωτερικό ονομάζουμε έναν αλγόριθμο ο οποίος δουλεύει αποκλειστικά πάνω στα στοιχεία της γλώσσας χωρίς να καλεί εξωτερικά συστήματα βελτιστοποίησης και επίλυσης συστημάτων εξισώσεων

περιορισμών πληθικότητας χρησιμοποιώντας την ασαφή λογική του Lukasiewicz και προτείνοντας έναν αλγόριθμο συλλογιστικής.

Μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα συλλογιστικής των f_{KD} -ΠΛ γίνεται από τον Straccia στο [131], παρουσιάζοντας μια διαδικασία για την αναγωγή μιας f_{KD} - \mathcal{ALCH}_R^+ (f_{KD} - \mathcal{ALC} με αξιώματα υπαγωγής ρόλων) βάσης γνώσης σε μια βάση γνώσης \mathcal{ALCH}_R^+ , δηλαδή μια μέθοδο αναγωγής της ασαφής ΠΛ στην αντίστοιχη κλασική ΠΛ. Με τον τρόπο αυτό χρησιμοποιούνται οι βελτιστοποιημένες πλατφόρμες εξαγωγής συμπερασμάτων των κλασικών ΠΛ για την εκτέλεση διαδικασιών συλλογιστικής στις ασαφείς ΠΛ. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε από τον Li et. al. για την αναγωγή των γλωσσών f_{KD} - \mathcal{ALCN} και f_{KD} - \mathcal{ALCQ} στις αντίστοιχες κλασικές γλώσσες \mathcal{ALCN} και \mathcal{ALCQ} στα [143] και [190], αντίστοιχα. Τέλος, η μέθοδος αυτή επεκτείνεται περαιτέρω στα [172, 213, 214] και στη γλώσσα f_{KD} - \mathcal{SHOIN} . Παρόλο που οι τεχνικές αυτές υπόσχονται αποδοτικούς τρόπους συλλογιστικής για τις ασαφείς ΠΛ, μέσω της χρήσης των βελτιστοποιημένων αλγορίθμων των κλασικών ΠΛ, δεν έχουν αξιολογηθεί στην πράξη. Μάλιστα η τεχνική αυτή δημιουργεί πολύ μεγάλες ιεραρχίες ρόλων, οι οποίες είναι γνωστό από τις κλασικές ΠΛ ότι επιφέρουν σημαντική μείωση της απόδοσης των αλγορίθμων συλλογιστικής [65]. Έτσι λοιπόν η πρακτικής τους χρήση δεν είναι ακόμα αποδεδειγμένη.

Επειδή οι ασαφείς ΠΛ αποτελούν μια σχετικά πρόσφατη επέκταση των ΠΛ, η δουλειά που έχει γίνει πάνω σε συστήματα συλλογιστικής καθώς και σε τεχνικές βελτιστοποίησης για τους αλγορίθμους για ασαφή tableaux είναι περιορισμένη. Πιο συγκεκριμένα, τα πρώτα σύστημα που προτάθηκε για πολύ εκφραστικές ασαφείς ΠΛ είναι το σύστημα FiRE που υλοποιήσαμε. Το FiRE είναι μια υλοποίηση της ασαφούς ΠΛ f_{KD} - \mathcal{SHIN} βάσει του αλγορίθμου tableau που παρουσιάζεται στο [209]. Υλοποιήθηκε με τη χρήση της προγραμματιστικής γλώσσας JAVA, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω ενός φιλικού γραφικού περιβάλλοντος, ή σαν διεπαφή προγράμματος εφαρμογής από όλα τα λειτουργικά συστήματα και είναι διαθέσιμο στη www.image.ece.ntua.gr/~nsimou/FiRE. Επιπρόσθετα, στο FiRE υλοποιούνται οι τεχνικές βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 και είναι το μοναδικό σύστημα ασαφούς συλλογιστικής του οποίου αξιολογείται η απόδοση [233, 234]. Ένα άλλο σύστημα για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ είναι το FuzzyDL [217] το οποίο υποστηρίζει την fuzzy \mathcal{SHIf} . Το FuzzyDL υποστηρίζει τις ασαφείς λογικές του Zadeh και του Lukasiewicz και για συλλογιστική χρησιμοποιεί την μέθοδο που προτείνεται [6]. Τα κύρια μειονεκτήματα του όμως είναι ότι είναι διαθέσιμο μόνο για τα λειτουργικά συστήματα Mac και Unix, δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον και δεν έχει αξιολογηθεί η απόδοση του. Πρόσφατα παρουσιάστηκε το σύστημα DeLorean [215] το οποίο υποστηρίζει την ΠΛ f_{KD} - \mathcal{SROIQ} , χρησιμοποιώντας όμως τον αλγόριθμο αναγωγής μιας ασαφούς βάσης γνώσης σε μια κλασική [172, 214], και έπειτα τη μηχανή συλλογιστικής Pellet για τη συλλογιστική. Αξίζει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο πως το σύστημα DeLorean δεν είναι διαθέσιμο, ενώ όπως είπαμε και πριν, η τεχνική της αναγωγής δημιουργεί πολύ μεγάλες ιεραρχίες ρόλων οι οποίες μειώνουν σημαντικά την απόδοση των αλγορίθμων συλλογιστικής. Άλλα συστήματα συλλογιστικής για λιγότερο εκφραστικές ασαφείς ΠΛ είναι το GERDS [211] το οποίο υλοποιεί έναν αλγόριθμο ανάλυσης για την ασαφή \mathcal{ALC} η οποία έχει επεκταθεί με τη χρήση άρνησης ρόλων χρησιμοποιώντας τη λογική Lukasiewicz, και το YARDL [199] που υλοποιεί έναν αλγόριθμο ανάλυσης χρησιμοποιώντας τη λογική Lukasiewicz.

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα συλλογιστικής για τις κλασικές ΠΛ. Πιο συγκεκριμένα, οι βελτιστοποιήσεις για τον αλ-

γόριθμο tableau αποτελούν θέμα εκτενής έρευνας τα τελευταία 15 χρόνια. Οι Baader et al. ήταν οι πρώτοι που μελέτησαν τις τεχνικές βελτιστοποίησης και πραγματοποίησαν μια εμπειρική αξιολόγηση τους για συστήματα γνώσης τα οποία κατηγοριοποιούσαν σώματα ορολογίας (terminological representation systems) [42]. Στη συνέχεια οι Horrocks και Schneider θέτουν τις βάσεις για πρακτική συλλογιστική με τις τεχνικές που πρότειναν για την βελτίωση της απόδοσης της του ελέγχου υπαγωγής εννοιών [67]. Έκτοτε, σημαντική εργασία έχει πραγματοποιηθεί στις τεχνικές βελτιστοποίησης για την ταξινόμηση εννοιών [106, 112, 157, 178, 205], ενώ συγκεκριμένες τεχνικές βελτιστοποίησης έχουν προταθεί για τη συλλογιστική με χρήση πολύ μεγάλων σωμάτων ισχυρισμών [71, 84, 82, 87, 124].

Όσο αφορά τις τεχνικές βελτιστοποίησης για συλλογιστική σε ασαφείς ΠΛ, η μόνη υπάρχουσα εργασία είναι του Haarslev [204] η οποία είναι πολύ γενική και αφορά ένα πρότυπο σύστημα για συλλογιστική με αβεβαιότητα που υποστηρίζει την *ALC*. Στην εργασία μας, που παρουσιάζεται στην ενότητα 3 και στα [233, 234] επανεξετάσαμε πολλές τεχνικές βελτιστοποίησης που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε συστήματα συλλογιστικής για κλασικές ΠΛ, ώστε να κάνουμε δυνατή την εφαρμογή τους για ασαφείς ΠΛ. Επιπρόσθετα, παρουσιάσαμε νέες τεχνικές βελτιστοποίησης που αφορούν ειδικά τις ασαφείς ΠΛ, όπως η βελτιστοποίηση της υπηρεσίας συλλογιστικής του μέγιστου κάτω φράγματος, και παρουσιάζεται μια αξιολόγηση τους.

Στο πεδίο των επερωτημάτων για ασαφείς ΠΛ νέες μέθοδοι για επερωτήματα τα οποία θα χρησιμοποιούν την ασαφή πληροφορία έχουν προταθεί. Πιο συγκεκριμένα, στο [198] τα συνηθισμένα συζευκτικά επερωτήματα επεκτείνονται σε μια οικογένεια πιο εκφραστικών επερωτημάτων, τα οποία κληρονομούν χαρακτηριστικά από τους τομείς της ασαφής ανάκτησης πληροφοριών [43]. Αυτά τα επερωτήματα εκμεταλλεύονται τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφών ισχυρισμών με την εισαγωγή των βαρών ή των κατώτατων ορίων στα άτομα ερώτησης. Απο πλευράς συστημάτων, τα μόνα συστήματα που υποστηρίζουν αποθήκευση μεγάλων βάσεων γνώσης και συζευκτικά επερωτήματα για ασαφείς ΠΛ είναι του Straccia [197] και του Pan [198]. Από την άλλη, όμως, αυτές οι δουλειές βασίζονται στην ασαφή επέκταση της ΠΛ DL-Lite [119, 139] που αποτελεί μια ΠΛ με χαμηλή εκφραστικότητα και με αλγόριθμους συλλογιστικής χαμηλής πολυπλοκότητας, στόχος της οποίας είναι η συλλογιστική σε βάσεις δεδομένων. Η προσέγγιση που προτείναμε στο [225] και παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, αφορά πολύ εκφραστικές ασαφείς ΠΛ και πραγματοποιείται με την βοήθεια του triple store Sesame. Στις πολύ εκφραστικές ΠΛ, όμως, οι αλγόριθμοι συζευκτικών επερωτημάτων έχουν αυξημένη πολυπλοκότητα [171], ενώ από την άλλη στις εκφραστικές ασαφείς ΠΛ το πρόβλημα των επερωτημάτων παραμένει ανοιχτό, χωρίς να έχει προηγηθεί κάποια άλλη δουλειά για συζευκτικά επερωτήματα σε εκφραστικές ασαφείς ΠΛ έκτος του συστήματος μας [225].

Όσο αφορά την σημασιολογική ανάλυση πολυμεσικού υλικού οι περισσότερες προσεγγίσεις στηρίζονται στην ανίχνευση εννοιών. Η αξιολόγηση αυτών των τεχνικών δείχνει ότι ένα καλό επίπεδο ωριμότητας έχει επιτευχθεί [175, 92, 195]. Συγχρόνως, η κατάτμηση εικόνας (image segmentation) και η αναγνώριση αντικειμένων (object recognition) έχουν χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα, αντί διαδοχικά, στοχεύοντας στη βελτίωση και των δυο διαδικασιών. Τέτοιες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τους αλγόριθμους ελαχιστοποίησης με περικοπή γράφων (graph cuts) [154], τον ασαφή χαρακτηρισμό περιοχής (fuzzy region labeling) για την αύξηση της σημασιολογικής περιοχής (semantic region growing) [212] ή την ενσωμάτωση από κάτω προς τα επάνω και από επάνω προς τα κάτω προσεγγίσεων [117]. Από την άλλη, η πλειοψηφία

των τεχνικών ταξινόμησης χρησιμοποιεί στοχαστικά μοντέλα για την αντιστοίχιση χαμηλού επιπέδου οπτικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων με μεσαίου επιπέδου έννοιες [92, 164]. Τέτοιες δημοφιλείς τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση περιοχών της εικόνας είναι τα *νευρωνικά δίκτυα* (*neural networks*) και οι *διανυσματικές μηχανές υποστήριξης* (*Support Vector Machines-SVMs*) [96]. Επειδή όμως οι αλγόριθμοι αναγνώρισης δεν μπορούν να προσφέρουν τις περισσότερες φορές ακριβή αποτελέσματα, δεν είναι αρκετοί από μόνοι τους για τη σημασιολογική τεκμηρίωση. Με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων αναγνώρισης, έχει προταθεί στη βιβλιογραφία η εισαγωγή γνώσης στους αλγορίθμους αναγνώρισης. Η πρώτη απόπειρα έγινε από τους Meghini et al. [54, 89] που παρουσίασαν ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί τις ΠΛ με σκοπό την αναπαράσταση και αναζήτηση πολυμεσικής πληροφορίας. Η μέθοδος τους επικεντρώνεται στην αναζήτηση, ενώ η τεκμηρίωση της πολυμεσικής πληροφορίας γίνεται χειρωνακτικά. Μια παρόμοια προσέγγιση για την ανάκτηση εικόνων, η οποία όμως στηρίζεται στο σχήμα των αντικειμένων γίνεται και από τους Sciascio et al. [66]. Ακόμα, προσεγγίσεις για τη χρήση γλωσσών αναπαράστασης γνώσης με σκοπό την αναγνώριση ή *ερμηνεία* (*interpretation*) μιας σκηνής προτείνονται από τους Moeller et al. στα [70] και [185]. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ΠΛ αναπτύσσουν μια γνώση της οποίας τα αξιώματα βασίζονται σε χωρικές σχέσεις, όπως για παράδειγμα ότι μια πόλη δε μπορεί να βρίσκεται μέσα σε μια λίμνη, με σκοπό την αναγνώριση και την ερμηνεία αεροφωτογραφιών. Σε αυτή τη διατριβή (κεφάλαιο 5) παρουσιάσαμε τις προσεγγίσεις που προτείναμε σε συνεργασία με άλλους ερευνητές για την ανάλυση και τεκμηρίωση εικόνων και βίντεο που βασίζονται σε ασαφείς ΠΛ [196, 203, 8, 231]. Οι προσεγγίσεις μας χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα των αλγορίθμων ανάλυσης, που αποτελούν το ασαφές σώμα ισχυρισμών μιας πολυ εκφραστικής βάσης γνώσης, για την σημασιολογική κατάτμηση, την δεικτοδότηση εικόνων, την περιήγηση σε βίντεο και την τεκμηρίωση πολιτιστικού περιεχομένου. Οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν με άλλες προσεγγίσεις στα συγκεκριμένα προβλήματα παρουσιάζοντας πολύ καλά αποτελέσματα, γεγονός που οφείλεται στην ορθή αναπαράσταση της εγγενούς ασαφής πληροφορίας που προσφέρουν οι αλγόριθμοι ανάλυσης πολυμεσικού υλικού.

Τέλος, ένα σημαντικό ζήτημα που έχει απασχολεί έντονα την ερευνητική κοινότητα είναι η συνύφανση τεχνικών μηχανικής μάθησης με τις τεχνολογίες αναπαράστασης γνώσης [123, 64, 97, 36]. Το γεγονός που έδωσε το έναυσμα για αυτές τις εργασίες είναι ότι συνδυάζοντας τές μπορούν να κατασκευαστούν πιο αποτελεσματικά συστήματα ιδιαίτερα σε πεδία εφαρμογής που διαχειρίζονται θορυβώδη δεδομένα. Επιπρόσθετα, αυτές οι αρχιτεκτονικές υιοθετούν την ευρωστία των νευρωνικών δικτύων με την εκφραστικότητα των τεχνολογιών αναπαράστασης γνώσης. Για αυτούς τους λόγους, μια σειρά από συστήματα αναπτύχθηκε στη δεκαετία του '80 και του '90, όπως το σύστημα KBAN των Towell και Shavlik [37], το SHRUTI του Shastri [39], η εργασία των Pinkas et al. [36], των Holldobler et al. [123] και των Artur S. d'Avila Garcez et al. [64, 97]. Επιπρόσθετα η δυναμική αυτού του πεδίου αντανακλάται στο βιβλίο του Hitzler που συνοψίζονται οι τεχνικές που έχουν προταθεί για την συνύφανση τεχνικών μηχανικής μάθησης με τις τεχνολογίες αναπαράστασης γνώσης [207]. Επιπλέον, πρόσφατα προτάθηκε μια διαδικασία που συνδυάζει μηχανές διανυσματικής υποστήριξης για την απάντηση επερωτημάτων σε OWL [224] που είναι από τις πρώτες που συνδυάζουν εκφραστικές ΠΛ. Σε αυτό το πεδίο προτείναμε μια διαδικασία για το πρόβλημα της κατάτμησης εικόνων η οποία βασίζεται στην προσαρμογή ενός νευρωνικού δικτύου σύμφωνα με τα αποτελέσματά που εξάγονται

από την ασαφή συλλογιστική με χρήση της f_{KD} - $SHIN$ για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής [223, 230].

Κεφάλαιο 8

Συνεισφορά και Θέματα προς Έρευνα

Παρά τη μεγάλη εκφραστική τους δύναμη οι κλασικές Περιγραφικές Λογικές αδυνατούν να χρησιμοποιηθούν σε πεδία εφαρμογής που πραγματεύονται ατελή ή ασαφή πληροφορία. Η ασαφής πληροφορία όμως, αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας και η ανάγκη για την αναπαράσταση της είναι επιτακτική. Για αυτό το λόγο προτάθηκαν στη βιβλιογραφία ασαφείς επεκτάσεις για τις ΠΛ. Παρόλο όμως που η πρώτη εργασία για ασαφείς ΠΛ δημοσιεύτηκε το 1998 από τον Straccia [59], λίγη έρευνα έχει γίνει ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε πεδία τα οποία εμπιρεύουν αβέβαιη ή ασαφή πληροφορία. Οι περισσότερες εργασίες σε αυτό το χώρο παρουσιάζουν τη σύνταξη και τη σημασιολογία ασαφών ΠΛ, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς ασαφείς τελεστές [200, 6, 221, 227]. Εξαιρέσεις αποτελούν οι εργασίες των Stoilos et al. που πρώτοι παρουσίασαν αλγόριθμους συλλογιστικής για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ [145, 180, 209]. Η πιο εκφραστική από αυτές είναι η $f_{KD-SHLN}$ που παρουσιάστηκε στο [209], εργασία που έθεσε τις βάσεις για την πρακτική εφαρμογή των ασαφών ΠΛ, χωρίς να είναι όμως από μόνη της αρκετή.

Ο αλγόριθμος συλλογιστικής της $f_{KD-SHLN}$, για τον οποίο η ορθότητα και η πληρότητα έχουν αποδειχθεί, βασίζεται στη δομή tableau και έχει υψηλή θεωρητική πολυπλοκότητα (2-NEXPTIME) [209] που καθιστά την υλοποίησή του, βάσει του θεωρητικού φορμαλισμού, άνευ πρακτικής σημασίας. Από την άλλη, όμως, παρόμοιο πρόβλημα υπήρχε και με τους αλγόριθμους συλλογιστικής για τις κλασικές ΠΛ, το οποίο αντιμετωπίστηκε με τις τεχνικές βελτιστοποίησης που προτάθηκαν για τους αλγόριθμους tableau [42, 67]. Το γεγονός όμως ότι στις ασαφείς ΠΛ η ερμηνεία των τελεστών δίνεται από νόρμες ασαφούς συνολοθεωρίας, για τις οποίες ισχύουν συγκεκριμένες ιδιότητες, δεν επιτρέπει την εφαρμογή των τεχνικών βελτιστοποίησης που έχουν προταθεί.

Η κύρια συνεισφορά της εργασίας μας είναι η μελέτη και ανάπτυξη εργαλείων, που επιτρέπουν την πρακτική συλλογιστική με χρήση εκφραστικών ασαφών ΠΛ, καθώς και η αποτελεσματική εφαρμογή τους σε διαφορετικά πεδία. Για την επίτευξη των παραπάνω προτείναμε τεχνικές βελτιστοποίησης για την ασαφή ΠΛ $f_{KD-SHLN}$, υλοποιήσαμε την πρώτη μηχανή ασαφούς συλλογιστικής, και με τη χρήση της προτείναμε νέες προσεγγίσεις που στηρίζονται σε ασαφείς ΠΛ για το πρόβλημα της σημασιολογικής τεκμηρίωσης πολυμεσικού περιεχομένου καθώς και για την σημασιολογική προσαρμογή νευρωνικών δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, η συνεισφορά της εργασίας μας συνοψίζεται παρακάτω:

- *Τεχνικές βελτιστοποίησης για ασαφείς ΠΛ*: Επανεξετάσαμε πολλές τεχνικές βελτιστοποίησης που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε συστήματα συλλογιστικής για κλασικές ΠΛ, ώστε να κάνουμε δυνατή την εφαρμογή τους για ασαφείς ΠΛ. Οι ασαφείς ΠΛ αποτελούν μια γενίκευση των κλασικών ΠΛ, γεγονός που σημαίνει ότι ορισμένες τεχνικές βελτιστοποίησης μπορούν να γενικευθούν και να εφαρμοστούν σε ασαφείς ΠΛ. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για όλες τις τεχνικές βελτιστοποίησης. Επιπρόσθετα, παρουσιάσαμε νέες τεχνικές βελτιστοποίησης που αφορούν ειδικά τις ασαφείς ΠΛ. Οι ασαφείς ΠΛ εισάγουν νέες προκλήσεις και προβλήματα στην παροχή βελτιστοποιημένης συλλογιστικής. Για παράδειγμα, η υπηρεσία συλλογιστικής του μέγιστου κάτω φράγματος δεν υπάρχει στις κλασικές ΠΛ και, κατά συνέπεια, απαιτούνται νέες μέθοδοι για την διερεύνησή της. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που παρουσιάσαμε μπορούν να χωριστούν, ανάλογα με τον απώτερο σκοπό τους, σε τρεις κατηγορίες.

Αρχικά, τις τεχνικές βελτιστοποίησης μείωσης των απαιτήσεων χώρου (*reduce storage requirements optimizations*) που έχουν σαν στόχο τη μείωση χώρου του ασαφούς tableau. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν:

- η τεχνική κανονικοποίησης βαθμών (*degrees normalization*) και
- η τεχνική διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών (*Abox partitioning*),

Τις τεχνικές προεπεξεργασίας (*preprocessing optimizations*) που σκοπός τους είναι η τροποποίηση της βάσης γνώσης κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο έλεγχος της συνέπειας να γίνεται ευκολότερος. Στη παρούσα διατριβή παρουσιάστηκαν:

- το οκνηρό ξεδίπλωμα (*lazy unfolding*), και
- η λεκτική κανονικοποίηση και κωδικοποίηση (*lexical normalization and encoding*).

Τέλος, τις βελτιστοποιήσεις ικανοποιησιμότητας (*satisfiability*) που προσπαθούν να βελτιώσουν την τυπική απόδοση κατά τον έλεγχο ικανοποιησιμότητας. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν:

- η τεχνική των ιχνών (*trace technique*),
 - η τεχνική πρώτα αναζήτηση σε βάθος (*depth first search*),
 - η τεχνική της οδηγούμενης οπισθοδρόμησης (*dependency directed backtracking*),
 - η τεχνική της τοπικής απλοποίησης (*local simplification*),
 - η τεχνική της σημασιολογικής διακλάδωσης (*semantic branching*),
 - βελτιστοποιήσεις για το μέγιστο κάτω φράγμα (*optimizations for GLB*), και
 - τεχνικές για τη διαχείριση των γενικευμένων και κυκλικών αξιωμάτων (*managmnet of GCIs*).
- *Σύστημα ασαφούς συλλογιστικής*: Υλοποιήσαμε το σύστημα ασαφούς συλλογιστικής FiRE (Fuzzy Reasoning Engine)[194] το οποίο ήταν το πρώτο που

προτάθηκε και μαζί με το fuzzyDL [217] είναι τα μόνα που υποστηρίζουν εκφραστικές ασαφείς ΠΛ. Επιπρόσθετα πραγματοποιήσαμε πειραματική αξιολόγηση του συστήματος FiRE καθώς και των προτεινόμενων τεχνικών βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας βάσεις γνώσης που δημιουργήθηκαν από δεδομένα βιομηχανικής δυναμικής. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι το σύστημα συλλογιστικής FiRE αποδίδει πολύ καλά σε βάσεις γνώσης υψηλής εκφραστικότητας και με τη χρήση των τεχνικών βελτιστοποίησης μπορούμε να πούμε ότι σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζει κλιμακωτή απόδοση. Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να επισημάνουμε ότι το FiRE αποτελεί το μοναδικό σύστημα του οποίου η απόδοση έχει αξιολογηθεί, ενώ επίσης είναι το μόνο που διαθέτει γραφικό περιβάλλον για τη δημιουργία ασαφών βάσεων γνώσης.

- *Ασαφή συζευκτικά επερωτήματα για εκφραστικές ασαφείς Περιγραφικές Λογικές:* Προτείναμε μια σύνταξη σε RDF τριάδες για την αναπαράσταση μιας ασαφούς βάσης γνώσης ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευσή της σε συστήματα αποθήκευσης κλασικών βάσεων γνώσης. Επιπρόσθετα, βάσει της προτεινόμενης σύνταξης, ενσωματώσαμε στο σύστημα συλλογιστικής FiRE το σύστημα αποθήκευσης Sesame κάνοντας δυνατή την υποστήριξη των ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων, που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [198]. Εκτός της μεθοδολογίας, που ακολουθήθηκε κατά την υλοποίηση, παρουσιάζεται και η αξιολόγηση του συστήματος το οποίο δείχνει πολύ καλή απόδοση. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως το πρόβλημα των συζευκτικών επερωτημάτων παραμένει ανοιχτό στις κλασικές ΠΛ και πως η εργασία μας είναι η πρώτη απόπειρα στο χώρο των συζευκτικών επερωτημάτων για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ.
- *Σημσιολογική τεκμηρίωση πολυμεσικού περιεχομένου:* Εργαστήκαμε επισταμένα στο πρόβλημα της σημσιολογικής τεκμηρίωσης πολυμεσικού περιεχομένου παρουσιάζοντας διάφορες προσεγγίσεις. Αρχικά, παρουσιάσαμε μια οντολογία που βασίζεται σε οπτικούς περιγραφείς για τη συλλογιστική σε πολυμεσικά κείμενα. Η οντολογία αυτή ενσωματώθηκε, σε συνεργασία με άλλους ερευνητές, σε ένα εργαλείο ημιαυτόματης τεκμηρίωσης πολυμεσικού περιεχομένου και χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία [183].

Το γεγονός όμως ότι η επεξεργασία πολυμεσικών κειμένων είναι μια διαδικασία η οποία περιέχει εγγενή αβέβαιη και ασαφή πληροφορία, μας οδήγησε να στραφούμε στη χρήση των ασαφών ΠΛ και του συστήματος συλλογιστικής FiRE. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουμε πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ασαφείς ΠΛ σε ένα πεδίο στο οποίο έχει δοθεί πολύ προσοχή τα τελευταία χρόνια στην αυτοματοποιημένη τεκμηρίωση πολιτιστικών έργων. Το σημαντικό πλεονέκτημα του πολιτιστικού περιεχομένου είναι ότι τις περισσότερες φορές υπάρχει μια τεχνοτροπία που ακολουθείται. Έτσι, λοιπόν, μετατρέψαμε την τεχνοτροπία της Βυζαντινής Αγιογραφίας σε μια ασαφή βάση γνώσης και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα ανάλυσης σε ψηφιοποιημένες αγιογραφίες επιτύχαμε αυτοματοποιημένη κατηγοριοποίηση με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Επιπρόσθετα, σε συνεργασία με τον Δρ. Αθανάσιο Αθανασιάδη, προτείναμε νέες προσεγγίσεις για την σημσιολογική ανάλυση εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, ένας αλγόριθμος κατάτμησης χρησιμοποιεί με επιτυχία τα αποτελέσματα της συλλογιστικής, σύμφωνα με μια ασαφή βάση γνώσης που ορίστηκε για το συγ-

κεκριμένο πεδίο εφαρμογής, έτσι ώστε να πετύχει καλύτερη κατάτμηση. Ακόμα, με τη χρήση των ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων επιτυγχάνεται σημασιολογική δεικτοδότηση και αναζήτηση εικόνων ή και τμημάτων τους. Τέλος, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα ανάλυσης σε βίντεο αγώνων ποδοσφαίρου και παρόμοια μεθοδολογία με πριν, επιτεύχθηκε σημασιολογική περιήγηση στις σκηές ενδιαφέροντος.

- *Προσαρμογή νευρωνικών δικτύων για την κατάτμηση Εικόνων:* Συνδυάσαμε τη χρήση νευρωνικών δικτύων, που έχουν εφαρμοστεί επιτυχημένα σε προβλήματα εικόνας, με την εμπειρία που αποκομίσαμε από την ανάλυση εικόνας με χρήση ασαφών ΠΛ. Παρουσιάσαμε μια προσέγγιση για την κατάτμηση εικόνων ή καρέ βίντεο η οποία βασίζεται στην προσαρμογή ενός νευρωνικού δικτύου σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξάγονται από την συλλογιστική για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Το κυριότερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής είναι ότι χρησιμοποιεί προϋπάρχουσα γνώση για το πεδίο εφαρμογής μέσω ενός εκφραστικού σώματος ορολογίας, βάσει του οποίου προσαρμόζεται το νευρωνικό δίκτυο και βελτιώνει την απόδοσή του. Αξιολογήσαμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική συγκρίνοντας την απόδοσή της, με τα ίδια δεδομένα, με άλλες τεχνικές για το συγκεκριμένο πρόβλημα και αποκομίσαμε πολύ καλά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρουμε θέματα με τα οποία δεν ασχοληθήκαμε σε αυτή τη διατριβή και αποτελούν ανοιχτά θέματα προς περαιτέρω έρευνα.

- *Πρακτική Συλλογιστική για ασαφείς ΠΛ με άλλους τελεστές:* Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2, οι ασαφείς επεκτάσεις στις ΠΛ βασίζονται στην χρήση ασαφών τελεστών που δίνουν ερμηνεία στους κατασκευαστές εννοιών και ρόλων. Η εργασία μας για πρακτική συλλογιστική με χρήση των ασαφών ΠΛ έχει επικεντρωθεί στις επεκτάσεις που δίνονται με τη χρήση της λογική του Zadeh, δηλαδή χρησιμοποιούν το συμπλήρωμα Lukasiewicz, $c_L(a) = 1 - a$, την τ-νόρμα του Gödel που ορίζεται από την εξίσωση, $t_G(a, b) = \min(a, b)$, τη σ-νόρμα του Gödel που ορίζεται από τη σχέση, $u_G(a, b) = \max(a, b)$ και τη συνεπαγωγή Kleene-Dienes, $\mathcal{J}_{KD}(a, b) = \max(1 - a, b)$. Πέραν όμως από αυτούς τους τελεστές, που είναι οι πιο διαδεδομένοι, έχουν προταθεί και επεκτάσεις που χρησιμοποιούν διαφορετικούς. Στην εργασία μας για τις τεχνικές βελτιστοποίησης γινόταν αναφορά στο κατά πόσο μια τεχνική είναι εφαρμόσιμη και σε άλλες ασαφείς ΠΛ αλλά δεν παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται κάθε τεχνική από διαφορετικούς τελεστές.
- *Πρακτική Συλλογιστική για ασαφείς ΠΛ με ασαφή υπαγωγή ασαφών εννοιών:* Η ασαφής ΠΛ f_{KD} -*SHLN* χρησιμοποιεί τον ορισμό που βασίζεται στη σχέση υποσυνόλου ανάμεσα σε δύο ασαφή σύνολα [45] σύμφωνα με τον οποίο μια έννοια είτε υπάγεται είτε όχι σε μια άλλη. Με αυτό το τρόπο η ταξινόμηση των εννοιών μιας ασαφούς βάσης γνώσης f_{KD} -*SHLN* ταυτίζεται με αυτή μιας κλασικής βάσης γνώσης *SHLN*. Ο Straccia όμως στο [162], προτείνει την έννοια της ασαφούς υπαγωγής ασαφών εννοιών, η οποία επεκτείνει τη σύνταξη του σώματος ορολογίας. Ένα θέμα που θα είχε πολύ ενδιαφέρον να μελετηθεί θα ήταν οι τεχνικές βελτιστοποίησης για την ασαφή υπαγωγή ασαφών εννοιών.

- *Ασαφή συζευκτικά επερωτήματα για εκφραστικές ασαφείς ΠΛ:* Όπως έχει προαναφερθεί στη παρούσα διατριβή, παρουσιάστηκε μια πρώτη απόπειρα στο χώρο των ασαφών συζευκτικών επερωτημάτων για εκφραστικές ΠΛ. Θα παρουσίαζε, ωστόσο, ενδιαφέρον μια περαιτέρω έρευνα σε αυτό το χώρο με διαφορετικές προσεγγίσεις. Μια πιθανή απόπειρα, μια και όπως είδαμε η προσέγγιση μας είναι ορθή αλλά δεν είναι πλήρης, θα είναι η χρήση μιας σχεσιακής βάσης αντί του συστήματος Sesame. Παρόλο όμως που αυτή η προσέγγιση διαφοροποιείται λίγο από την υπάρχουσα θα μπορούσε να αποφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση του συστήματος.
- *Πρακτική Συλλογιστική για Επεκτάσεις Περιγραφικών Λογικών με Γλώσσες Κανόνων:* Ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά θέματα του Σημασιολογικού Ιστού είναι η επέκταση των γλωσσών οντολογιών, όπως είναι η OWL και οι ΠΛ, με γλώσσες κανόνων (*rule languages*). Οι γλώσσες κανόνων είναι μια άλλη πολύ σημαντική οικογένεια γλωσσών αναπαράστασης γνώσης [25, 49]. Διαισθητικά, ένα σύστημα κανόνων περιγράφει γνώση χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από κανόνες της μορφής AN-TOTE (IF-THEN). Δηλαδή περιγράφουμε μια συνθήκη η οποία, αν ισχύει, τότε κάποια αποτελέσματα πρέπει επίσης να ισχύουν. Για παράδειγμα, μπορεί κάποιος να περιγράψει τη γνώση ότι ο αδερφός του πατέρα του είναι ο θείος του γράφοντας, $\text{Πατέρας}(x, y) \wedge \text{Αδερφός}(y, z) \rightarrow \text{Θείος}(x, z)$. Συγκριτικά με τις ΠΛ οι γλώσσες κανόνων βασίζονται σε αρκετά διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά [184]. Για το λόγο αυτό και η σύνδεσή τους είναι ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα. Παρόλα αυτά αυτή τη στιγμή έχουν αναπτυχθεί αρκετές προτάσεις για τη σύνδεση βάσεων γνώσης ΠΛ με βάσεις κανόνων. Μερικά παραδείγματα τέτοιων προσεγγίσεων είναι η γλώσσα SWRL [129], η γλώσσα DL+log [174], το σύστημα CARIN [55], η RuleML [160], και τα πλ-προγράμματα (dl-programs) [116]. Για αρκετές από τις γλώσσες αυτές έχουν προταθεί ασαφείς επεκτάσεις τους, όπως είναι η *ασαφής SWRL (fuzzy-SWRL)* [176] και η *ασαφής RuleML (fuzzy-RuleML)*, [163] το *ασαφές CARIN* [208] και τα *fuzzy dl-programs* [182]. Στο [208] παρουσιάζεται ο αλγόριθμος συλλογιστικής που όμως είναι υψηλής πολυπλοκότητας και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές. Μια μελέτη του αλγορίθμου, έτσι ώστε να προταθούν τεχνικές βελτιστοποίησης που θα τον κάνουν πρακτικά εφαρμόσιμο, είναι ένα ενδιαφέρον ανοιχτό πρόβλημα.

Παράρτημα Α: Μαθηματικά Σύμβολα

χ_S	:	Η χαρακτηριστική συνάρτηση του κλασικού συνόλου S
μ_A	:	Η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφές συνόλου A
c	:	Τελεστής ασαφούς συμπληρώματος (άρνησης)
t	:	Τελεστής ασαφούς τομής (τ-νόρμα)
u	:	Τελεστής ασαφούς ένωσης (σ-νόρμα ή τ-κονόρμα)
\mathcal{J}	:	Τελεστής ασαφούς συνεπαγωγής
$\langle c, t, u \rangle$	:	Μια ασαφής τριάδα που περιέχει τους ασαφείς τελεστές c, t, u
$\langle c, t, u, \mathcal{J} \rangle$	:	Μια ασαφής τετράδα που περιέχει τους ασαφείς τελεστές c, t, u, \mathcal{J}
sup	:	supremum: Το ελάχιστο άνω φράγμα ενός συνόλου αριθμών
inf	:	infimum: Το μέγιστο κάτω φράγμα ενός συνόλου αριθμών
C	:	Το σύνολο των ατομικών εννοιών μιας ΠΛ γλώσσας
R	:	Το σύνολο των ατομικών ρόλων μιας ΠΛ γλώσσας
I	:	Το σύνολο των ατόμων μιας ΠΛ γλώσσας
\sqcup	:	Το σύμβολο της ένωσης δυο εννοιών
\sqcap	:	Το σύμβολο της τομής δυο εννοιών
\exists	:	Ο υπαρξιακός προσοδείκτης που στις ΠΛ χρησιμοποιείται στους υπαρξιακούς περιορισμούς
\forall	:	Ο καθολικός προσοδείκτης που στις ΠΛ χρησιμοποιείται στους περιορισμούς τιμής
\sqsubseteq	:	Το σύμβολο της υπαγωγής δυο εννοιών ή ρόλων
\neg	:	Το σύμβολο της άρνησης μιας έννοιας, ή γενικότερα ενός στοιχείου
\perp	:	Η κενή έννοια
\top	:	Η καθολική έννοια
R^-	:	Ο αντίστροφος του ρόλου R
\mathcal{T}	:	Ένα σώμα ορολογίας
\mathcal{R}	:	Ένα σώμα ρόλων
\mathcal{A}	:	Ένα σώμα ισχυρισμών
Trans(R)	:	Σύνταξη αξιώματος μεταβατικότητας

\mathcal{I}	:	Μια ερμηνεία (interpretation)
$\Delta^{\mathcal{I}}$	:	Ένας χώρος ερμηνείας (domain of interpretation) ο οποίος αποτελείται από ένα σύνολο αντικειμένων
$\cdot^{\mathcal{I}}$	:	Μια συνάρτησης ερμηνείας που ερμηνεύει τα στοιχεία μιας ΠΛ γλώσσας
\models	:	Το σύμβολο της λογικής συνεπαγωγής (entailment)
\mathbb{N}	:	Το σύνολο των φυσικών αριθμών
\mathbb{N}^*	:	Το σύνολο των φυσικών αριθμών χωρίς το στοιχείο 0
\boxtimes	:	Αντιπροσωπεύει μια από τις ανισότητες $\geq, >, \leq$ ή $<$
\triangleright	:	Αντιπροσωπεύει μια από τις ανισότητες \geq ή $>$
\triangleleft	:	Αντιπροσωπεύει μια από τις ανισότητες \leq ή $<$
\boxtimes^-	:	Αντιπροσωπεύει την αντανάκλαση μιας ανισότητας: π.χ. $\geq^- = \leq, <^- = >$
$+ \boxtimes$	:	Αντιπροσωπεύει την ισχυροποίηση ή εξασθένιση μιας ανισότητας: π.χ. $+ \geq = >, + < = \leq$
$\neg \boxtimes$	:	Αντιπροσωπεύει την άρνηση μιας ανισότητας: π.χ. $\neg \geq = <, \neg < = \geq$
\mathcal{F}	:	Ένα δάσος ολοκλήρωσης
$sub(C)$	:	Το σύνολο που είναι κλειστό ως προς τις υπο-έννοιες της C
$cl(C, \mathcal{R})$	:	Το σύνολο που είναι κλειστό ως προς τις υπο-έννοιες της C , της $\sim C$ αλλά και ως προς τις έννοιες που μπορούν να προκείψουν από το RBox \mathcal{R} , π.χ. $\forall R.C$ αν $\forall S.C$ και $R \sqsubseteq S$
T	:	Ένα ασαφές tableau
$\langle r, s \rangle$	:	Μια ακμή ενός ασαφούς tableau ή δάσους ή γράφου ολοκλήρωσης
$\mathcal{L}(s, C)$	:	Ο βαθμός συμμετοχής του στοιχείου s στην έννοια C
$\mathcal{E}(R, \langle r, s \rangle)$	:	Ο βαθμός συμμετοχής του ζεύγους στοιχείων $\langle r, s \rangle$ στο ρόλο R
$\mathcal{V}(a)$	:	Απεικόνιση του ατόμου a σε στοιχείο του ασαφούς tableau
$\mathcal{L}(x)$	:	Η ετικέτα τους κόμβου x η οποία περιέχει τριάδες συμμετοχής
$\mathcal{L}(\langle x, y \rangle)$	:	Η ετικέτα της ακμής $\langle x, y \rangle$ η οποία περιέχει τριάδες συμμετοχής
glb	:	Η συνάρτηση που επιστρέφει το βαθμό συμμετοχής ενός στοιχείου ενός ασαφούς tableau σε μια έννοια κοιτάζοντας τις τριάδες συμμετοχής του αντίστοιχου κόμβου στην έννοια αυτή στο δάσος ή δέντρο ολοκλήρωσης
$\\#\{\cdot\}$	:	Η πληθικότητα ενός συνόλου
$R^T(s, \triangleright, n)$	:	το σύνολο των στοιχείων $t \in \mathbf{S}$ τα οποία συμμετέχουν στο ρόλο R με το στοιχείο s και σε βαθμό, μεγαλύτερο ή ίσο, ή αυστηρά μεγαλύτερο (αναλόγως πώς ορίζεται από την ανισότητα \triangleright) από ένα δοθέν βαθμό n

□

Παράρτημα Β: Αποδόσεις Ξένων Όρων

absortion	: απορρόφηση
abstract syntax	: αφηρημένη σύνταξη
abnormal	: μη κανονική ασαφής ΠΛ
acyclic	: μη κυκλικό σώμα ορολογίας
adjoint	: παρακαείμενοι
ancestor	: πρόγονος
anti-symmetric	: αντι-συμμετρικός
assertion	: ισχυρισμός
associative	: προσεταιριστική
atomic	: ατομικός
blockable	: μπλοκαρίσιμος
blocking	: μπλοκάρισμα
bottom concept	: κενή έννοια
boundary condition	: οριακή συνθήκη
branching point	: διακλάδιση
branching point	: σημείο διακλάδισης
cardinality	: πληθυκότητα
characteristic function	: χαρακτηριστική συνάρτηση
clash	: αντίφαση
clash-free	: ελεύθερος αντιφάσεων
commutative	: αντιμεταθετική
complement	: συμπλήρωμα
complete (forest/graph)	: πλήρης (δάσος/γράφος)
completeness	: πληρότητα
completion-graph	: γράφος ολοκλήρωσης
complex	: σύνθετη (έννοια)
completion-forest	: δάσος ολοκλήρωσης
composition	: σύνθεση
concept	: έννοια
conjugates	: συγκρούεται
conjunctive query	: συζευκτικό επερώτημα

consistency	: συνέπεια
constructor	: κατασκευαστής
cyclic	: κυκλικό σώμα ορολογίας
datatypes	: τύποι δεδεμένων
degrees normalization	: κανονικοποίηση βαθμών
descriptions	: περιγραφές
decidable	: αποφάνσιμος
domain	: χώρος ή πεδίο
edge	: ακμή
encoding	: κωδικοποίηση
entailment	: λογική συνεπαγωγή
equivalence	: ισοδυναμία
early clash detection	: πρόωρη ανίχνευση αντίφασης
existential restriction	: υπαρξιακός περιορισμός
expansion	: επέκταση
expressive	: εκφραστικό
fact	: γεγονός
formal	: τυπικό
functional	: συναρτησιακός
fuzzy	: ασαφές
general axiom	: γενικευμένο αξίωμα
idempotent	: ταυτοδύναμη
imperfect	: ατελής (γνώση)
implication	: συνεπαγωγή (πράξη - κατασκευαστής)
implicit	: υπονοούμενη (γνώση)
individual	: άτομο
inferred	: συμπεραίνουσα (γνώση)
interoperability	: διαλειτουργικότητα
internalization	: εσωτερίκευση
interpretation	: ερμηνεία
intractable	: δύσβατο
involution	: ενειλιχτικό
irreflexive	: μη-ανακλαστική
knowledge base	: βάση γνώσης
label	: ετικέτα
lexical normalization	: λεκτική κανονικοποίηση
logic	: λογική
membership function	: συνάρτηση συμμετοχής
model	: μοντέλο
model-theoretic	: μοντελοθεωρητική
neighborhood	: γειτονιά ατόμου
node	: κόμβος
nominal	: ονοματικός
non-primitive	: μη πρωταρχικός
norm	: νόρμα
normal	: κανονική ασαφής ΠΛ

normalization	: κανονικοποίηση
number restriction	: περιορισμός πληθυκότητας
object	: αντικείμενο
ontology	: οντολογία
partitioning	: διχοτόμηση
pair-wise	: ζευγαρώματος
persistent storage systems	: συστήματα αποθήκευσης
possibilistic theory	: θεωρία δυνατοτήτων
precision	: ακρίβεια
precomplement	: προσυμπλήρωμα
precomplement	: προσυμπλήρωμα
predecates	: κατηγορήμα
predecessor	: προκάτοχος
primitive	: πρωταρχικός (ορισμός ή έννοια)
property	: ιδιότητα
probabilistic theory	: θεωρία πιθανοτήτων
quadruple	: τετράδα
qualifier	: προσοδείκτης
quantifier	: ποσοδείκτης
RDF reification	: περιγραφικός επαναπροσδιορισμός μιας δήλωσης RDF
reasoning	: συλογιστική
realization	: πραγματοποίηση
recall	: ανάκληση
recognition	: αναγνώριση
reflexive	: ανακλαστική
retrieval	: εύρεση
role	: ρόλος
satisfiability	: ικανοποιησιμότητα
semantics	: σημασιολογία
segment	: τμήμα ή περιοχή εικόνας
segmentation	: κατάτμηση
simple	: απλό (σώμα ορολογίας)
singleton	: μονοσύνολο
software agents	: πράκτορες λογισμικού
soundness	: ορθότητα
strict assertion	: αυστήρος ισχυρισμός
subsumption	: υπαγωγή
subidempotent	: υπο-ταυτοδύναμη
successor	: διάδοχος
symmetric	: συμμετρικός
syntactic sugar	: συντακτική ζάχαρη
termination	: τερματισμός
terminology	: ορολογία
top concept	: καθολική έννοια
tractable	: βατό

transitive	:	μεταβατικός
triple	:	τριάδα
triple stores	:	συστήματα αποθήκευσης οντολογιών
uncertainty	:	αβεβαιότητα
unfoldable	:	ξεδιπλώσιμο (σώμα ορολογίας)
unfolding	:	ξεδίπλωμα
unravelling	:	ξετύλιγμα
value restriction	:	περιορισμός τιμής
weighted query	:	σταθμισμένη επερώτηση
weighted t-norm	:	σταθμισμένη τριγωνική νόρμα
worst case complexity	:	πολυπλοκότητα χειρίστης περίπτωσης

□

Γλωσσάριο

Άτομο (individual) Μια οντότητα η οποία δίνει ταυτότητα σε ένα αντικείμενο στη σύνταξη της γλώσσας και με τη χρήση του οποίου μπορούμε να δημιουργήσουμε σχέσεις στιγμιοτύπου ανάμεσα σε αυτό και μια έννοια ή ανάμεσα σε αυτό, κάποιο άλλο άτομο και έναν ρόλο.

Αλγόριθμος Συλλογιστικής (Reasoning algorithm) Ένας αλγόριθμος ο οποίος αποφασίζει (decides) τα προβλήματα συλλογιστικής (υπηρεσίες εξαγωγής συμπερασμάτων) μιας γλώσσας αναπαράστασης γνώσης.

Αξίωμα υπαγωγής γενικευμένων εννοιών (general concept inclusion axiom) Ένα αξίωμα υπαγωγής εννοιών στο οποίο και οι δυο έννοιες που συμμετέχουν είναι σύνθετες έννοιες.

Ασαφές σύνολο (fuzzy set) Η γενίκευση ενός κλασικού (crisp) συνόλου, το οποίο περιλαμβάνει στοιχεία τα οποία ανήκουν στο ασαφές σύνολο σε κάποιο βαθμό συμμετοχής σε αντίθεση με το να ανήκουν ή όχι πλήρως.

Ατομική έννοια (ρόλος) (atomic concept (role)) Μια έννοια (ρόλος) που σε μια βάση γνώσης δεν αναλύεται σε άλλες απλούστερες, είναι δηλαδή πρωτογενής.

Αυστηρός ισχυρισμός (Strict Assertion) Οι ισχυρισμοί εννοιών ή ρόλου που χρησιμοποιούν $>$ ή $<$ σαν σύμβολο ανισότητας.

Βάση γνώσης (knowledge base) Ένα σύνολο αξιωμάτων το οποίο περιγράφει τα στοιχεία (έννοιες, σχέσεις, αντικείμενα ή άτομα) και τις μεταξύ τους συσχετίσεις σε ένα συγκεκριμένο πεδίο (domain).

Γειτονιά ατόμου (individual neighborhood) Ένα σύνολο που περιλαμβάνει όλους τους άτομα με τα οποία ένα άτομο συνδέεται με σχέση.

Γενικευμένο σώμα ορολογίας (General TBox) Ένα σώμα ορολογίας στο οποίο εμφανίζονται αξιώματα υπαγωγής γενικευμένων εννοιών.

Έννοια (concept) Ένα μοναδιαίο (unary) κατηγορημα το οποίο αντιπροσωπεύει ένα σύνολο αντικειμένων.

Ερμηνεία (interpretation) Μια μαθηματική δομή η οποία μας δίνει μια συγκεκριμένη τυπική σημασία για τα στοιχεία μιας γλώσσας και κατ' επέκταση και της βάσης γνώσης.

Εσωτερίκευση (Internalization) Η μέθοδος κωδικοποίησης όλων των αξιωμάτων ενός σώματος ορολογίας σε μια μόνο έννοια ή καμιά φορά και ένα μόνο αξίωμα.

Ισοδυναμία εννοιών (concept equivalence) Ένα αξίωμα της μορφής $C \equiv D$ το οποίο δηλώνει ότι οι έννοιες C και D είναι ισοδύναμες.

Ισχυρισμός (assertion) Μία σχέση στιγμιότυπου (ή αλλιώς αξίωμα ατόμων) ανάμεσα σε ένα άτομο και μια έννοια ή ανάμεσα σε ένα ζεύγος ατόμων και ένα ρόλο.

Κανονικοποίηση (Normalization) Η διαδικασία αντικατάστασης των ασαφών ισχυρισμών ενός σώματος ισχυρισμών που χρησιμοποιούν τις αυστηρές ανισότητες $>$ και $<$ με ισχυρισμούς που χρησιμοποιούν τις ανισότητες \geq και \leq .

Κυκλικό σώμα ορολογίας (Cyclic TBox) Ένα σώμα ορολογίας που εμφανίζονται αξιώματα στα οποία μια έννοια του αριστερού μέλους κάποιου αξιώματος ορίζεται είτε άμεσα είτε έμμεσα (μεταβατικά μέσω άλλων αξιωμάτων υπαγωγής εννοιών) από τον εαυτό της.

Λογική Συνεπαγωγή (entailment) Το σύνολο (πεδίο) πάνω στο οποίο ερμηνεύουμε τη βάση γνώσης μας.

Μη κυκλικό σώμα ορολογίας (Acyclic Terminology) Ένα σώμα ορολογίας το οποίο δεν περιέχει κυκλικά αξιώματα.

Μοντέλο (model) Μία ερμηνεία η οποία ικανοποιεί ένα αξίωμα υπαγωγής, ρόλων ή ατόμου, ένα σώμα ορολογίας, ρόλων ή ισχυρισμών ή μια βάση γνώσης.

Ξεδίπλωμα (Unfolding) Η διαδικασία αντικατάστασης των εννοιών ενός σώματος ορολογίας με τους ορισμούς τους έτσι ώστε κάθε έννοια να ορίζεται μόνο από ατομικές έννοιες.

Ξεδιπλώσιμο σώμα ορολογίας (Unfoldable Terminology) Ένα σώμα ορολογίας στο οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η διαδικασία ξεδίπλωσης.

Ξετύλιγμα (Unravelling) Η μέθοδος κατασκευής ενός απείρου (ασαφούς) tableau από ένα πεπερασμένο δάσος ή γράφο ολοκλήρωσης με την επαναληπτική αντιγραφή μονοπατιών του δάσους ή γράφου.

Πρωταρχική έννοια (Primitive Concept) Μια έννοια A ονομάζεται πρωταρχική εαν ορίζεται από ένα αξίωμα $A \sqsubseteq B$.

Ρόλος (role) Ένα δυαδικό (binary) κατηγορήμα το οποίο αντιπροσωπεύει ένα σύνολο από ζεύγη αντικειμένων.

Σημασιολογία (semantics) Μια μαθηματική θεωρία με βάση την οποία περιγράφεται το πώς μπορούμε να δώσουμε ερμηνεία (σημασία) στα στοιχεία μιας γλώσσας.

Σημείο διακλάδισης (Branching point) Ένας κόμβος στον οποίο εφαρμόζεται ένας κανόνας \sqcup_{\triangleright} ή \sqcap_{\triangleleft} που προκαλεί διακλάδιση στο δάσος ολοκλήρωσης

Στέρεος χώρος (concrete domain) Το **σταθερό** σύνολο (πεδίο) το οποίο αποτελεί την ερμηνεία των τύπων δεδομένων μας (datatypes).

Σύνθετη έννοια (Έννοια Περιγραφής) (Complex concept (Concept Description)) Μία έννοια η οποία χρησιμοποιεί τις ατομικές έννοιες με σκοπό να περιγράψει περισσότερο σύνθετες έννοιες.

Σώμα Ισχυρισμών (ABox) Ένα σύνολο από ισχυρισμούς.

Σώμα Ορολογίας (TBox) Ένα σύνολο από αξιώματα υπαγωγής ($C \sqsubseteq D$) και ισοδυναμίας εννοιών ($C \equiv D$).

Σώμα Ρόλων (RBox) Ένα σύνολο από αξιώματα ρόλων όπως είναι τα $\text{Trans}(R)$, $R \sqsubseteq S$, $\text{Ref}(R)$, $\text{Irr}(R)$, και άλλα, ανάλογα και με την εκφραστικότητα της Περιγραφικής Λογικής.

Υπαγωγή εννοιών (ρόλων) (concept (role) subsumption) Ένα αξίωμα της μορφής $C \sqsubseteq D$ ($R \sqsubseteq S$) το οποίο δηλώνει ότι η έννοια C (ρόλος R) είναι υπο-έννοια, εξειδίκευση ή αλλιώς λιγότερο γενική (υπο-ρόλος) της έννοιας D (του ρόλου S).

Χώρος ερμηνείας (domain of interpretation) Μια μαθηματική δομή η οποία μας δίνει μια συγκεκριμένη τυπική σημασία για τα στοιχεία μιας γλώσσας και κατ' επέκταση και της βάσης γνώσης.

Βιβλιογραφία

- [1] <http://jena.sourceforge.net/>.
- [2] <http://www.joseki.org/>.
- [3] <http://www.kowari.org/>.
- [4] <http://www.openrdf.org/>.
- [5] Description-logic knowledge representation system specification from the KRSS group of the ARPA knowledge sharing effort. <http://dl.kr.org/krss-spec.ps>.
- [6] BOBILLO, F., AND STRACCIA, U. A fuzzy description logic with product t-norm. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz IEEE-07)*, IEEE Computer Society, pp. 652--657.
- [7] STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., PAN, J. Z., AND HORROCKS, I. Fuzzy OWL: Uncertainty and the Semantic Web. In *Proc. of the OWL-ED 2005*.
- [8] SIMOU, N., ATHANASIADIS, T., STOILOS, G., AND KOLLIAS, S. Image indexing and retrieval using expressive fuzzy description logics. *Signal, Image and Video Processing* 2, 4, 321--335.
- [9] CHEN, S., AND CHEN, S. A new method for fuzzy information retrieval based on geometric-mean averaging operators. In *Workshop on Artificial Intelligence*.
- [10] Oracle® database semantic technologies developer's guide 11g release 1 (11.1). http://download.oracle.com/docs/cd/B28359_01/appdev.111/b28397.pdf.
- [11] OF FOURNA, D. *Hermeneia tis zografikis technis (Interpretation of the Byzantine art)*. B. Kirschbaum, 1909.
- [12] LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly Journal of Applied Mathematics II*, 2 (1944), 164--168.
- [13] TURING, A. M. Computing machinery and intelligence. *Mind* 59 (1950), 433--460.

- [14] DAVIS, M., LOGEMANN, G., AND LOVELAND, D. A machine program for theorem-proving. *Commun. ACM* 5, 7 (1962), 394--397.
- [15] ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (1965), 338--353.
- [16] QUILLIAN, R. *Word Concepts: A Theory and Simulation of some basic capabilities*. Behavioral Science, 1967.
- [17] KOWALSKI, R. Predicate logic as a programming language. In *Information Processing 74* (1974), pp. 569--574.
- [18] RADECKI, T. Fuzzy set theoretical approach to document retrieval. *Journal of Information Processing & Management* 15 (1979), 235--245.
- [19] WALLER, W., AND KRAFT, D. A mathematical model of a weighted boolean retrieval system. *Journal of Information Processing & Management* 15 (1979), 247--260.
- [20] OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics* 9, 1 (1979), 62--66.
- [21] BOOKSTEIN, A. Fuzzy requests: An approach to weighted boolean searches. *Journal of the American Society for Information Science* 31 (1980), 240--247.
- [22] MINSKI, M. *A Framework for Representing Knowledge*. Behavioral Science, 1981.
- [23] BUELL, D., AND KRAFT, D. Threshold values and boolean retrieval systems. *Journal of Information Processing & Management* 17 (1981), 127--136.
- [24] SALTON, G., FOX, E., AND WU, H. Extended boolean information retrieval. *Journal of Communications of ACM* 26 (1983), 1022--1036.
- [25] LLOYD, J. W. *Foundations of logic programming*. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, 1984.
- [26] MORRIS, O., LEE, M., AND CONSTANTINIDES, A. Graph theory for image analysis: An approach based on the shortest spanning tree. *Inst. Elect. Eng.* 133 (April 1986), 146--152.
- [27] YAGER, R. A note on weighted queries in information retrieval systems. *Journal of the American Society for Information Science* 38 (1987), 23--24.
- [28] OPPACHER, F., AND SUEN, E. Harp: a tableau-based theorem prover. *J. Autom. Reason.* 4, 1 (1988), 69--100.
- [29] HINTON, G. E. Connectionist learning procedures. *Artif. Intell.* 40, 1-3 (1989), 185--234.
- [30] SANCHEZ, E. Importance in knowledge systems. *Information Systems* 14, 6 (1989), 455--464.
- [31] MEYER, F., AND BEUCHER, S. Morphological segmentation. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 1, 1 (September 1990), 21--46.

- [32] NEBEL, B. *Reasoning and Revision in Hybrid Representation Systems*. Springer-Verlag, 1990.
- [33] PARK, D., EL-SHARKAWI, M. A., AND II, R. J. M. An adaptively trained neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks* 2 (1991), 334--345.
- [34] SCHAUSS, M., AND SMOLKA, G. Attributive concept descriptions with complements. *Artificial Intelligence* 48, 1 (1991), 1--26.
- [35] YEN, J. Generalising term subsumption languages to fuzzy logic. In *In Proc of the 12th Int. Joint Conf on Artificial Intelligence (IJCAI-91)* (1991), pp. 472--477.
- [36] PINKAS, G. Propositional non-monotonic reasoning and inconsistency in symmetric neural networks. In *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (1991), p. 525--530.
- [37] TOWELL, G., AND SHAVLIK, J. Refining symbolic knowledge using neural networks, 1991.
- [38] HALPERN, J. Y., AND MOSES, Y. A guide to completeness and complexity for modal logics of knowledge and belief. *Artificial Intelligence* 54, 3 (1992), 319--379.
- [39] SHASTRI, L., AND AJJANAGADDE, V. From simple associations to systematic reasoning: A connectionist representation of rules, variables and dynamic bindings using temporal synchrony. *Behavioral and Brain Sciences* 16 (1993), 417--494.
- [40] RUAN, D., AND KERRE, E. E. Fuzzy implication operators and generalized fuzzy method of cases. *Fuzzy Sets and Systems* 54, 1 (1993), 23--37.
- [41] DONINI, F. M., LENZERINI, M., NARDI, D., AND SCHAEFER, A. Deduction in concept languages: From subsumption to instance checking. *Journal of Logic and Computation* 4, 4 (1994), 423--452.
- [42] BAADER, F., FRANCONI, E., HOLLUNDER, B., NEBEL, B., AND PROFITLICH, H. An empirical analysis of optimization techniques for terminological representation systems or: Making KRIS get a move on. *Applied Artificial Intelligence. Special Issue on Knowledge Base Management* 4 (1994), 109--132.
- [43] CROSS, V. Fuzzy information retrieval. *Journal of Intelligent Information Systems* 3 (1994), 29--56.
- [44] HOLLUNDER, B. An alternative proof method for possibilistic logic and its application to terminological logics. *International Journal of Approximate Reasoning* 12 (1995), 85--109.
- [45] KLIR, G. J., AND YUAN, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice-Hall, 1995.

- [46] FREEMAN, J. W. *Improvements to propositional satisfiability search algorithms*. PhD thesis, Philadelphia, PA, USA, 1995.
- [47] BAKER, A. B. Intelligent backtracking on constraint satisfaction problems: Experimental and theoretical results, 1995.
- [48] GIUNCHIGLIA, F., AND SEBASTIANI, R. Building decision procedures for modal logics from propositional decision procedure - the case study of modal k. In *CADE-13: Proceedings of the 13th International Conference on Automated Deduction* (London, UK, 1996), Springer-Verlag, pp. 583--597.
- [49] LIFSCHITZ, V. Foundations of logic programming. 69--127.
- [50] BORDOGNA, G., BOSCH, P., AND PASI, G. Fuzzy inclusion in database and information retrieval query interpretation. In *Proceedings of the 1996 ACM symposium on Applied Computing* (1996), pp. 547--551.
- [51] FREEMAN, J. W. Hard random 3-sat problems and the davis-putnam procedure. *Artif. Intell.* 81, 1-2 (1996), 183--198.
- [52] BORGIDA, A. On the relative expressiveness of description logics and predicate logics. *Artificial Intelligence* 82 (1996), 353--367.
- [53] MENDELSON, E. *Introduction to Mathematical Logic*. Chapman & Hall/CRC, 1997.
- [54] MEGHINI, C., SEBASTIANI, F., AND STRACCIA, U. Reasoning about the form and content for multimedia objects (extended abstract). In *Proceedings of AAAI 1997 Spring Symposium on Intelligent integration and Use of Text, Image, Video and Audio* (Stanford University, California, 1997), pp. 89--94.
- [55] LEVY, A., AND ROUSSET, M.-C. Combining horn rules and description logics in CARIN. *Artificial Intelligence* 104 (1998), 165--209.
- [56] TRESP, C., AND MOLITOR, R. A description logic for vague knowledge. In *In proc of the 13th European Conf. on Artificial Intelligence (ECAI-98)* (1998).
- [57] CALVANESE, D., DE GIACOMO, G., LENZERINI, M., NARDI, D., AND ROSATI, R. Description logic framework for information integration. In *Proc. of the 6th Int. Conf. on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'98)* (1998), pp. 2--13.
- [58] HORROCKS, I., AND PATEL-SCHNEIDER, P. F. DL systems comparison. In *Proc. of the 1998 Description Logic Workshop (DL'98)* (1998), vol. 11 of *CEUR* (<http://ceur-ws.org/>), pp. 55--57.
- [59] STRACCIA, U. A fuzzy description logic. In *AAAI '98/IAAI '98: Proceedings of the fifteenth national/tenth conference on Artificial intelligence/Innovative applications of artificial intelligence* (1998), American Association for Artificial Intelligence, pp. 594--599.
- [60] FAGIN, R. Fuzzy queries in multimedia database systems. In *Proc. Seventeenth ACM Symp. on Principles of Database Systems* (1998), pp. 1--10.

- [61] HAJEK, P. *Metamathematics of fuzzy logic*. Kluwer, 1998.
- [62] HORROCKS, I. Using an expressive description logic: FaCT or fiction? In *Proc. of the 6th Int. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'98)* (1998), pp. 636--647.
- [63] HORROCKS, I. Using an expressive description logic: FaCT or fiction? In *Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Sixth International Conference (KR'98)* (1998), pp. 636--647.
- [64] GARCEZ, A. S. A., AND ZAVERUCHA, G. The connectionist inductive learning and logic programming system. *Applied Intelligence, Special Issue on Neural networks and Structured Knowledge 11* (1999), 59--77.
- [65] HORROCKS, I., AND SATTLER, U. A description logic with transitive and inverse roles and role hierarchies. *Journal of Logic and Computation* 9 (1999), 385--410.
- [66] SCIASCIO, E. D., AND DONINI, F. Description logics for image recognition: a preliminary proposal. In *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL 99)* (1999).
- [67] HORROCKS, I., AND PATEL-SCHNEIDER, P. F. Optimising description logic subsumption. *Journal of Logic and Computation* 9, 3 (1999), 267--293.
- [68] SALEMBIER, P., AND MARQUÉS, F. Region-based representations of image and video: Segmentation tools for multimedia services. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 9, 8 (1999), 1147--1169.
- [69] MASSACCI, F. Tancs non classical system comparison. In *In Proc. of the 3rd Int. Conf. on Analytic Tableaux and Related Methods (TABLEAUX99)* (1999), D. MacAllester, Ed., no. 1617 in Lecture notes in Artificial Intelligence.
- [70] MOELLER, R., NEUMANN, B., AND WESSEL, M. Towards computer vision with description logics-some recent progress. In *Workshop on Integration of Speech and Image Understanding* (1999), pp. 101--115.
- [71] HAARSLEV, V., AND MOLLER, R. Expressive abox reasoning with number restrictions, role hierarchies, and transitively closed roles. In *In: Proceedings of Seventh International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR2000)* (2000), Morgan Kaufmann, pp. 273--284.
- [72] SPACKMAN, K. Managing clinical terminology hierarchies using algorithmic calculation of subsumption: Experience with snomed-rt. *Journal of the American Medical Informatics Association* (2000).
- [73] PAPAMARKOS, N., STROUTHOPOULOS, C., AND ANDREADIS, I. Multithresholding of color and gray-level images through a neural network technique. *Image and Vision Computing* 18, 3 (2000), 213--222.

- [74] DOULAMIS, N., DOULAMIS, A., AND KOLLIAS, S. On-line retrainable neural networks: Improving performance of neural networks in image analysis problems. *IEEE Transactions on Neural Networks* 11 (2000), 1--20.
- [75] RECTOR, A. L., AND ROGERS, J. E. Ontological issues in using a description logic to represent medical concepts: Experience from galen. *Methods of Information in Medicine*, In Press (jan 2000).
- [76] HORROCKS, I., AND TOBIES, S. Optimisation of terminological reasoning. In *Proceedings of the International Workshop in Description Logics 2000 (DL2000)* (2000).
- [77] HORROCKS, I., AND TOBIES, S. Reasoning with axioms: Theory and practice. In *Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Seventh International Conference (KR2000)* (San Francisco, CA, 2000), A. G. Cohn, F. Giunchiglia, and B. Selman, Eds., Morgan Kaufmann Publishers.
- [78] HORROCKS, I., SATTLER, U., AND TOBIES, S. Reasoning with Individuals for the Description Logic *SHIQ*. In *CADE-2000* (2000), D. MacAllester, Ed., no. 1831 in LNAI, Springer-Verlag, pp. 482--496.
- [79] NAVARA, M. Satisfiability in fuzzy logic. *Neural Network World* 10, 5 (2000), 845--858.
- [80] BAADER, F., AND SATTLER, U. Tableau algorithms for description logics. In *Proceedings of the International Conference on Automated Reasoning with Tableaux and Related Methods (Tableaux 2000)* (St Andrews, Scotland, UK, 2000), R. Dyckhoff, Ed., vol. 1847 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, pp. 1--18.
- [81] HUNTER, J. Adding multimedia to the semantic web - building an mpeg-7 ontology. *Proceedings of the First Semantic Web Working Symposium* (2001), 261--281.
- [82] HAARSLEV, V., TIMMANN, M., AND MOLLER, R. Combining tableaux and algebraic methods for reasoning with qualified number restrictions. In *In: Proceedings International Workshop on Description Logics (DL-2001)* (2001), pp. 152--161.
- [83] BERRETTI, S., BIMBO, A. D., AND VICARIO, E. Efficient matching and indexing of graph models in content-based retrieval. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology* 11, 12 (Dec. 2001), 1089--1105.
- [84] HAARSLEV, V., MOLLER, R., AND YASMIN TURHAN, A. Exploiting pseudo models for tbox and abox reasoning in expressive description logics. In *In International Joint Conference on Automated Reasoning, IJCAR 2001* (2001), A. L. R. Gore and T. Nipkow, Eds., pp. 29--44.
- [85] BOYKOV, Y., VEKSLER, O., AND ZABIH, R. Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 23, 11 (2001), 1222--1239.

- [86] HORROCKS, I., AND PATEL-SCHNEIDER, P. F. The generation of DAML+OIL. In *DL-01 (2001)*, CEUR Electronic Workshop Proceedings, pp. 30--35.
- [87] HAARSLEV, V., AND MOLLER, R. High performance reasoning with very large knowledge bases: A practical case study. In *Proceedings of Seventeenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-01 (2001)*, B. Nebel, Ed., pp. 161--166.
- [88] LUO, J., AND SAVAKIS, A. Indoor vs outdoor classification of consumer photographs using low-level and semantic features. In *Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on (2001)*, vol. 2.
- [89] MEGHINI, C., SEBASTIANI, F., AND STRACCIA, U. A model of multimedia information retrieval. *Journal of the ACM* 48, 5 (2001), 909--970.
- [90] FENSEL, D., VAN HARMELEN, F., HORROCKS, I., MCGUINNESS, D., AND PATEL-SCHNEIDER, P. F. OIL: An ontology infrastructure for the semantic web. *IEEE Intelligent Systems* 16, 2 (2001), 38--45.
- [91] HAARSLEV, V., AND MOLLER, R. Optimizing reasoning in description logics with qualified number restriction. In *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL-2001) (2001)*, pp. 142--151.
- [92] NAPHADE, M., AND HUANG, T. S. A probabilistic framework for semantic video indexing, filtering and retrieval. *IEEE Trans. on Multimedia* 3, 1 (March 2001), 144--151.
- [93] HAARSLEV, V., AND MÖLLER, R. RACER System Description. In *IJCAR-01 (2001)*, vol. 2083.
- [94] STRACCIA, U. Reasoning within fuzzy description logics. *Journal of Artificial Intelligence Research* 14 (2001), 137--166.
- [95] BERNERS-LEE, T., HENDLER, J., AND LASSILA, O. The semantic web. *Scientific American* 284 (2001), 34--43.
- [96] ZHANG, L., LIN, F., AND ZHANG, B. Support vector machine learning for image retrieval. *Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on 2 (2001)*.
- [97] GARCEZ, A. S. A., BRODA, K., AND GABBAY, D. Symbolic knowledge extraction from trained neural networks: A sound approach. *Artificial Intelligence* 125 (2001), 155--207.
- [98] HÄHNLE, R. Tableaux and related methods. In *Handbook of Automated Reasoning*, A. Robinson and A. Voronkov, Eds. Elsevier Science Publishers, 2001, pp. 103--137.
- [99] LEE, S., AND CRAWFORD, M. Unsupervised classification using spatial region growing segmentation and fuzzy training. In *Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on (2001)*, vol. 1.

- [100] CARSON, C., BELONGIE, S., GREENSPAN, H., AND MALIK, J. Blobworld: Image segmentation using expectation-maximization and its application to image querying. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24, 8 (2002), 1026--1038.
- [101] STEVENS, R., GOBLE, C., HORROCKS, I., AND BECHHOFFER, S. Building a bioinformatics ontology using OIL. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 6, 2 (2002), 135--141.
- [102] BAADER, F., MCGUINNESS, D., NARDI, D., AND PATEL-SCHNEIDER, P. *The Description Logic Handbook: Theory, implementation and applications*. Cambridge University Press, 2002.
- [103] HÖLLDOBLER, S., KHANG, T. D., AND H.-P.STÖRR. A fuzzy description logic with hedges as concept modifiers. In *Proceedings InTech/VJFuzzy'2002* (2002), pp. 25--34.
- [104] COMANICIU, D., AND MEER, P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 24, 5 (2002), 603--619.
- [105] Y.SURE, S.STAAB, J. D. A. Ontoedit: Guiding ontology development by methodology and inferencing.
- [106] HORROCKS, I., AND SATTLER, U. Optimised reasoning for *SHIQ*. In *Proc. of the 15th Eur. Conf. on Artificial Intelligence (ECAI 2002)* (July 2002), pp. 277--281.
- [107] R.GIUGNO, AND T.LUKASIEWICZ. P-SHOQ(D): A probabilistic extension of SHOQ(D) for probabilistic ontologies in the semantic web. In *JELIA '02: Proceedings of the European Conference on Logics in Artificial Intelligence* (London, UK, 2002), Springer-Verlag, pp. 86--97.
- [108] MILLET, C., BLOCH, I., HEDE, P., AND MOELLIC, P. Using relative spatial relationships to improve individual region recognition. In *Proceedings of 2nd European Workshop on the Integration of Knowledge, Semantic and Digital Media Technologies* (2002), pp. 119--126.
- [109] BAADER, F., AND NUTT, W. Basic description logics. In *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*, F. Baader, D. Calvanese, D. McGuinness, D. Nardi, and P. F. Patel-Schneider, Eds. Cambridge University Press, 2003, pp. 43--95.
- [110] GOLBREICH, C., ZHANG, S., AND BODENREIDER, O. The foundational model of anatomy in owl: Experience and perspectives. *Journal of Web Semantics* 4 (2003).
- [111] HORROCKS, I., PATEL-SCHNEIDER, P. F., AND VAN HARMELEN, F. From *SHIQ* and RDF to OWL: The making of a web ontology language. *Journal of Web Semantics* 1 (2003).

- [112] HORROCKS, I. Implementation and optimisation techniques. In *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*, F. Baader, D. Calvanese, D. McGuinness, D. Nardi, and P. F. Patel-Schneider, Eds. Cambridge University Press, 2003, ch. 9, pp. 306–346.
- [113] FACT++. <http://owl.man.ac.uk/factplusplus/>, 2003.
- [114] A., H., J., R., G., S., AND J., S. Video content annotation using visual analysis and a large semantic knowledgebase. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (2003).
- [115] HORROCKS, I., AND PATEL-SCHNEIDER, P. F. A Proposal for an OWL Rules Language. In *Proc. of the Thirteenth International World Wide Web Conference (WWW 2004)* (2004), ACM, pp. 723–731.
- [116] EITER, T., LUKASIEWICZ, T., SCHINDLAUER, R., AND TOMPITS, H. Combining answer set programming with description logics for the semantic web. In *Proc. of the 19th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2004)* (2004).
- [117] BORENSTEIN, E., AND SHARON, E. Combining top-down and bottom-up segmentation. In *in 8th Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, CVPR 2004* (2004).
- [118] HAARSLEV, V., MOLLER, R., AND VESSEL, M. Description logic inference technology: Lessons learned in the trenches. In *9th International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR 2004* (2004), pp. 160–167.
- [119] CALVANESE, D., GIACOMO, G. D., LENZERINI, M., ROSATI, R., AND VETERE, G. DL-Lite: Practical Reasoning for Rich DLs. In *Proc. of the DL2004 Workshop* (2004).
- [120] FELZENSZWALB, P., AND HUTTENLOCHER, D. Efficient graph-based image segmentation. *International Journal of Computer Vision* 59, 2 (2004), 167–181.
- [121] SÁNCHEZ, D., AND TETTAMANZI, G. Generalizing quantification in fuzzy description logic. In *Proceedings 8th Fuzzy Days in Dortmund* (2004).
- [122] BLOEHDORN, S., SIMOU, N., TZOUVARAS, V., PETRIDIS, K., HANDSCHUH, S., AVRITHIS, Y., KOMPATSIARIS, I., STAAB, S., AND STRINTZIS, M. G. Knowledge representation for semantic multimedia content analysis and reasoning. Proc. of European Workshop on the Integration of Knowledge, Semantics and Digital Media Technology (EWIMT), London, U.K., November 25-26, 2004.
- [123] HITZLER, P., HOLDOBLER, S., AND SEDA, A. Logic programs and connectionist networks. *Journal of Applied Logic* (2004), 245–272.
- [124] HAARSLEV, V., AND MOLLER, R. Optimization techniques for retrieving resources described in owl/rdf documents: First results. In *9th International*

Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR 2004 (2004), pp. 163--173.

- [125] PATEL-SCHNEIDER, P. F., HAYES, P., AND HORROCKS, I. OWL Web Ontology Language Semantics and Abstract Syntax. Tech. rep., W3C, Feb. 2004. W3C Recommendation, URL <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-semantic-20040210/>.
- [126] KNUBLAUCH, H., FERGERSON, R. W., NOY, N. F., AND MUSEN, M. A. The protégé owl plugin: An open development environment for semantic web applications. In *Third International Semantic Web Conference - ISWC 2004* (Hiroshima, Japan, 2004).
- [127] HORROCKS, I., AND PATEL-SCHNEIDER, P. Reducing OWL entailment to description logic satisfiability. *J. of Web Semantics* 1, 4 (2004), 345--357.
- [128] SOERGEL, D., LAUSER, B., LIANG, A., FISSEHA, F., KEIZER, J., AND KATZ, S. Reengineering thesauri for new applications: The agrovoc example. *Journal of Digital Information* 4 (2004).
- [129] HORROCKS, I., PATEL-SCHNEIDER, P. F., BOLEY, H., TABET, S., GROSOFF, B., AND DEAN, M. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. W3C Member Submission, <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>, May 2004.
- [130] STRACCIA, U. Transforming fuzzy description logics into classical description logics. In *JELIA* (2004), pp. 385--399.
- [131] STRACCIA, U. Transforming fuzzy description logics into classical description logics. In *Proceedings of the 9th European Conference on Logics in Artificial Intelligence (JELIA-04)* (Lisbon, Portugal, 2004), no. 3229 in Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, pp. 385--399.
- [132] KLEMENT, E. P., MESIAR, R., AND PAP, E. Triangular norms. position paper I: basic analytical and algebraic properties. *Fuzzy Sets and Systems* 143 (2004), 5--26.
- [133] KLEMENT, E. P., MESIAR, R., AND PAP, E. Triangular norms. position paper II: general constructions and parameterized families. *Fuzzy Sets and Systems* 145 (2004), 411--438.
- [134] BECHHOFFER, S., VAN HARMELEN, F., HENDLER, J., HORROCKS, I., MCGUINNESS, D. L., PATEL-SCHNEIDER, P. F., AND EDS., L. A. S. OWL web ontology language reference. Tech. rep., Feb 2004.
- [135] WILKINSON, B., AND ALLEN, C. M. In *Parallel programming: techniques and applications using networked workstations and parallel computers*. Prentice Hall, 2005.
- [136] Z.PAN. Benchmarking dl reasoners using realistic ontologies. In *Proc. of the of the International workshop on OWL: Experience and Directions (OWL-ED2005)* (2005).

- [137] L., H., M., W., AND G., S. Building a visual ontology for video retrieval. In *Proceedings of the ACM Multimedia* (2005).
- [138] STRACCIA, U. Description logics with fuzzy concrete domains. In *21st Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-05)* (Edinburgh, 2005).
- [139] CALVANESE, D., GIACOMO, G. D., LEMBO, D., LENZERINI, M., AND ROSATI, R. DL-lite: Tractable description logics for ontologies. In *Proceedings of the 20th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2005)* (2005), pp. 602--607.
- [140] RUTTENBERG, A., REES, J., AND LUCIANO, J. Experience using owl dl for the exchange of biological pathway information. In *Proc. of the First OWL Experiences and Directions Workshop*, volume 188 of CEUR Workshop Proceedings.
- [141] GOODWIN, J. Experiences of using owl at the ordnance survey. In *Proc. of the First OWL Experiences and Directions Workshop*, volume 188 of CEUR Workshop Proceedings.
- [142] ZADROŽNY, S., AND KACPRZYK, J. An extended fuzzy boolean model of information retrieval revisited. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz-IEEE-05)* (2005), pp. 547--551.
- [143] LI, Y., XU, B., LU, J., KANG, D., AND WANG, P. Extended fuzzy description logic \mathcal{ALCN} . In *Proceedings of the 9th International Conference on Knowledge Based Intelligent Information and Engineering Systems (KES-05)* (2005), pp. 896--902.
- [144] HOŁLDOBLER, S., NGA, N. H., AND KHANG, T. D. The fuzzy description logic \mathcal{ALC}_{FLH} . In *International workshop on Description Logics* (2005), CEUR.
- [145] STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., PAN, J., AND HORROCKS, I. The fuzzy description logic f- \mathcal{SHIN} . In *Proc. of the International Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web* (2005), pp. 67--76.
- [146] STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., PAN, J., AND HORROCKS, I. A fuzzy description logic for multimedia knowledge representation. In *Proc. of the International Workshop on Multimedia and the Semantic Web* (2005).
- [147] STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., PAN, J., AND HORROCKS, I. Fuzzy OWL: Uncertainty and the semantic web. In *Proc. of the International Workshop on OWL: Experiences and Directions* (2005).
- [148] VANEKOVÁ, V., BELLA, J., GURSKÝ, P., AND HORVÁTH, T. Fuzzy RDF in the semantic web: Deduction and induction. In *Proceedings of Workshop on Data Analysis (WDA 2005)* (2005), pp. 16--29.
- [149] M.MAZZIERI, AND A.F.DRAGONI. A fuzzy semantics for semantic web languages. In *ISWC-URSW* (2005), pp. 12--22.

- [150] WOLSTENCROFT, K., BRASS, A., HORROCKS, I., LORD, P., SATTLER, U., STEVENS, R., AND TURI, D. A little semantic web goes a long way in biology. In *Proc. of the 4th International Semantic Web Conference (ISWC 2005)* (2005), vol. 3729 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, pp. 786–800.
- [151] WALICKI, M. Mathematical logic - an introduction. <http://www.ii.uib.no/~michal/und/i227/book/book.pdf>, 2005. Department of Informatics, University of Bergen.
- [152] HARTEL, F. W., DE CORONADO, S., DIONNE, R., FRAGOSO, G., AND GOLBECK, J. Modeling a description logic vocabulary for cancer research. *Journal of Biomedical Informatics* 38, 2 (2005), 114–129.
- [153] STAMOU, G., AND KOLLIAS, S. *Multimedia Content and the Semantic Web: Methods, Standards and Tools*. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [154] KUMAR, M. P., TORR, P. H. S., AND ZISSERMAN, A. OBJ CUT. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego* (2005).
- [155] CHEN, C., HAARSLEV, V., AND WANG, J. OIas: Extending racer by a large abox store. In *Proceedings of the 2005 International Workshop on Description Logics (DL-2005)* (2005), pp. 200–207.
- [156] N.SIMOU, C.SAATHOFF, S.DASIOPOULOU, E.SPYROU, N.VOISINE, V.TZOUVARAS, I.KOMPATSIARIS, Y.AVRITHIS, AND S.STAAB. An ontology infrastructure for multimedia reasoning. International Workshop VLBV05, Sardinia, Italy, 15-16 September 2005.
- [157] TSARKOV, D., AND HORROCKS, I. Optimised classification for taxonomic knowledge bases. In *Proc. of the 2005 Description Logic Workshop (DL 2005)* (2005), vol. 147 of *CEUR* (<http://ceur-ws.org/>).
- [158] SIDHU, A., DILLON, T., CHANG, E., AND SIDHU., B. S. Protein ontology development using owl. In *Proc. of the First OWL Experiences and Directions Workshop*, volume 188 of *CEUR Workshop Proceedings*.
- [159] ADAMEK, T., N.O'CONNOR, AND N.MURPHY. Region-based segmentation of images using syntactic visual features. In *Proc. Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, WIAMIS 2005* (Montreux, Switzerland, April 13-15 2005).
- [160] HIRTLE, D., BOLEY, H., GROSOFF, B., KIFER, M., SINTEK, M., TABEL, S., AND WAGNER, G. Schema Specification of RuleML 0.89. <http://www.ruleml.org/0.89/>, May 2005.
- [161] BLOEHDORN, S., PETRIDIS, K., SAATHOFF, C., SIMOU, N., V.TZOUVARAS, AVRITHIS, Y., HANDSCHUH, S., KOMPATSIARIS, Y., STAAB, S., AND STRINTZIS, M. G. Semantic annotation of images and videos for multimedia. in *Proc. of 2nd European Semantic Web Conference, (ESWC '05), Heraklion, Greece, May 29 - June 1, 2005*.

- [162] STRACCIA, U. Towards a fuzzy description logic for the semantic web. In *Proceedings of the 2nd European Semantic Web Conference* (2005).
- [163] STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., AND PAN, J. Uncertainty and RuleML rulebases: A preliminary report. In *Proceedings of the International Conference on Rules and Rule Markup Languages for the Semantic Web* (2005), A. Adi, Ed., vol. 3791 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, pp. 199--203.
- [164] CRISTEL, M. G., AND HAUPTMANN, A. G. The use and utility of high-level semantic features in video retrieval. In *In Proceedings of 4th International Conference on Image and Video Retrieval, CIVR 2005* (Singapore, July 2005).
- [165] ATHANASIADIS, T., TZOUVARAS, V., PETRIDIS, K., PRECIOSO, F., AVRITHIS, Y., AND KOMPATSIARIS, Y. Using a multimedia ontology infrastructure for semantic annotation of multimedia content. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Knowledge Markup and Semantic Annotation* (2005).
- [166] KERSHENBAUM, A., FOKOUE, A., PATEL, C., WELTY, C., SCHONBERG, E., CIMINO, J., MA, L., SRINIVAS, K., SCHLOSS, R., AND MURDOCK, J. W. A view of owl from the field: Use cases and experiences. In *Proc. of the First OWL Experiences and Directions Workshop*, volume 216 of *CEUR Workshop Proceedings*.
- [167] SIMOU, N., TZOUVARAS, V., AVRITHIS, Y., STAMOU, G., AND KOLLIAS, S. A visual descriptor ontology for multimedia reasoning. In *Proc. of Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS '05)*, Montreux, Switzerland, April 13-15, 2005.
- [168] CHORTARAS, A., STAMOU, G., AND STAFYLOPATIS, A. Adaptation of weighted fuzzy programs. In *Proc. of the International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2006)* (2006), Springer, pp. 45--54.
- [169] IOANNOU, S., KESSOUS, L., CARIDAKIS, G., KARPOUZIS, K., AHARONSON, V., AND KOLLIAS, S. Adaptive on-line neural network retraining for real life multimodal emotion recognition. *International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN) 2006*, Athens, Greece, September 2006.
- [170] STRACCIA, U. Answering vague queries in fuzzy DL-Lite. In *Proceedings of the 11th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, (IPMU-06)* (2006), pp. 2238--2245.
- [171] B.GLIMM, I.HORROCKS, C.LUTZ, AND U.SATTLER. Conjunctive query answering for *SHIQ*. Tech. rep., University of Manchester, 2006.
- [172] F. BOBILLO, M. DELGADO, J. G.-R. A crisp representation for fuzzy shoin with fuzzy nominals and general concept inclusions. In *In Proceedings of the 2nd Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web (URSW 2006)* (2006).

- [173] LI, Y., XU, B., LU, J., AND KANG, D. Discrete tableau algorithms for \mathcal{FSHI} . In *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL 2006)*, Lake District, UK (2006).
- [174] ROSATI, R. DL+Log: Tight integration of description logics and disjunctive datalog. In *Proceedings of the 10th International Conference of Knowledge Representation and Reasoning (KR 2006)* (2006), pp. 68--78.
- [175] SMEATON, A. F., OVER, P., AND KRAAIJ, W. Evaluation campaigns and trecvid. In *MIR '06: Proceedings of the 8th ACM International Workshop on Multimedia Information Retrieval* (New York, NY, USA, 2006), ACM Press, pp. 321--330.
- [176] PAN, J., STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., AND HORROCKS, I. f-SWRL: A fuzzy extension of SWRL. *Journal on Data Semantics, special issue on Emergent Semantics 4090* (2006), 28--46.
- [177] TSARKOV, D., AND HORROCKS, I. FaCT++ description logic reasoner: System description. In *Proc. of the Int. Joint Conf. on Automated Reasoning (IJCAR 2006)* (2006), vol. 4130 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer, pp. 292--297.
- [178] SIRIN, E. From wine to water: Optimizing description logic reasoning for nominals. In *In: Proceedings of KR-2006. (2006) 90-99* (2006), pp. 90--99.
- [179] STOILOS, G., STAMOU, G., AND PAN, J. Fuzzy OWL: A proposal for handling imprecise knowledge in the semantic web. submitted to the international journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems, 2006.
- [180] STOILOS, G., STRACCIA, U., STAMOU, G., AND PAN, J. Z. General concept inclusions in fuzzy description logics. 17th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 06), Riva del Garda, Italy, 2006.
- [181] STOILOS, G., STRACCIA, U., STAMOU, G., AND PAN, J. General concept inclusions in fuzzy description logics. In *Proceedings of the 17th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 06)* (2006), IOS Press, pp. 457-461.
- [182] LUKASIEWICZ, T. In proc. of ruleml 2006. In *Fuzzy Description Logic Programs under the Answer Set Semantics for the Semantic Web* (2006).
- [183] PETRIDIS, K., BLOEHDORN, S., SAATHOFF, C., SIMOU, N., DASIOPOULOU, S., TZOUVARAS, V., HANDSCHUH, S., AVRITHIS, Y., KOMPATSIARIS, I., AND STAAB, S. Knowledge representation and semantic annotation of multimedia content.
- [184] BRUIJN, J. D., EITER, T., POLLERES, A., AND TOMPITS, H. On representational issues about combinations of classical theories with nonmonotonic rules. In *Proceedings of the 1st International Conference on Knowledge Science, Engineering and Management* (2006).

- [185] NEUMANN, B., AND MÖLLER, R. On scene interpretation with description logics. In *Cognitive Vision Systems: Sampling the Spectrum of Approaches*, H. Christensen and H.-H. Nagel, Eds., no. 3948 in LNCS. Springer, 2006, pp. 247--278.
- [186] DERRIERE, S., RICHARD, A., AND PREITE-MARTINEZ, A. An ontology of astronomical object types for the virtual observatory. In *Proc. of Special Session 3 of the 26th meeting of the IAU: Virtual Observatory in Action: New Science, New Technology, and Next Generation Facilities* (2006).
- [187] GRAU, B. C., AND MOTIK, B. OWL 1.1 web ontology language: Model-theoretic semantics. <http://www.w3.org/Submission/owl11-semantics/>, 2006.
- [188] PATEL-SCHNEIDER, P. F., HORROCKS, I., AND MOTIK, B. OWL 1.1 web ontology language structural specification and functional-style syntax. http://www.w3.org/Submission/owl11-owl_specification/, 2006.
- [189] MOTIK, B., AND HORROCKS, I. Problems with OWL syntax. In *Proc. of the 2nd Int. Workshop on OWL Experiences and Directions (OWLED 06)* (2006).
- [190] LI, Y., XU, B., LU, J., AND KANG, D. Reasoning technique for extended fuzzy \mathcal{ALCQ} . In *ICCSA (2)* (2006), pp. 1179--1188.
- [191] LABORATORY, J. P. Semantic web for earth and environmental terminology (sweet).
- [192] PRUD'HOMMEAUX, E., AND SEABORNE, A. SPARQL query language for RDF, 2006. W3C Working Draft, <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>.
- [193] KALYANPUR, A., PARSIA, B., SIRIN, E., GRAU, B. C., AND HENDLER, J. A. Swoop: A web ontology editing browser. *Journal of Web Semantics* 4, 2 (2006), 144--153.
- [194] STOILOS, G., SIMOU, N., STAMOU, G., AND KOLLIAS, S. Uncertainty and the semantic web. *IEEE Intelligent Systems* 21, 5 (2006), 84--87.
- [195] SNOEK, C., HUURNINKM, B., HOLLINK, L., DE RIJKE, M., SCHREIBER, G., AND WORRING, M. Adding semantics to detectors for video retrieval. *IEEE Trans. on Multimedia* 9, 5 (August 2007), 144--151.
- [196] NEMRAVA, J., BUITELAAR, P., SIMOU, N., SADLIER, D., SVATEK, V., DECLERCK, T., COBET, A., SIKORA, T., O'CONNOR, N., TZOUVARAS, V., ZEINER, H., AND PETRAK, J. An architecture for mining resources complementary to audio-visual streams. Knowledge Acquisition from Multimedia Content Workshop, co-located with the 2nd International Conference on Semantics and Digital Media Technologies (SAMT 2007).
- [197] U.STRACCIA, AND G.VISCO. DLMedia: an ontology mediated multimedia information retrieval system. In *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL 07)* (Innsbruck, Austria, 2007), vol. 250, CEUR.

- [198] PAN, J., STAMOU, G., STOILOS, G., AND THOMAS, E. Expressive querying over fuzzy DL-Lite ontologies. In *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL 2007)* (2007).
- [199] KONSTANTOPOULOS, S., AND APOSTOLIKAS, G. Fuzzy-dl reasoning over unknown fuzzy degrees. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Semantic Web and Web Semantics (SWWS 07)*.
- [200] WANG, H., MA, Z. M., YAN, L., AND ZHANG, G. A fuzzy extension of alc with fuzzy modifiers. In *FSKD '07: Proceedings of the Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* (Washington, DC, USA, 2007), IEEE Computer Society, pp. 751--755.
- [201] HORRIDGE, M., BECHHOFFER, S., AND NOPPENS, O. Igniting the owl 1.1 touch paper: The owl api. In *Proc. of the 3rd Int. Workshop on OWL Experiences and Directions (OWLED 07)* (2007).
- [202] CUENCA GRAU, B., HORROCKS, I., KAZAKOV, Y., AND SATTLER, U. A logical framework for modularity of ontologies. In *IJCAI 2007, Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Hyderabad, India, January 6-12, 2007* (2007), pp. 298--303.
- [203] SIMOU, N., ATHANASIADIS, T., TZOUVARAS, V., AND KOLLIAS, S. Multimedia reasoning with f-shin. 2nd International Workshop on Semantic Media Adaptation and Personalization, London, December 17-18, 2007, London, United Kingdom (SMAP 2007).
- [204] HAARSLEV, V., PAI, H.-I., AND SHIRI, N. Optimizing tableau reasoning in alc extended with uncertainty. In *Proceedings of the 2007 International Workshop on Description Logics (DL-2007)* (2007), pp. 307--314.
- [205] TSARKOV, D., HORROCKS, I., AND PATEL-SCHNEIDER, P. F. Optimizing terminological reasoning for expressive description logics. *J. of Automated Reasoning* 39, 3 (2007), 277--316.
- [206] SIRIN, E., PARSIA, B., GRAU, B. C., KALYANPUR, A., AND KATZ, Y. Pellet: A practical OWL-DL reasoner. *Journal of Web Semantics* 5 (2007), 51--53.
- [207] HAMMER, B., AND HITZLER, P. *Perspectives of Neural-Symbolic Integration, Studies in Computational Intelligence*, vol. 77. Springer, 2007.
- [208] MAILIS, T., STOILOS, G., AND STAMOU, G. Proceedings of the first international conference on web reasoning and rule systems (RR-07), 2007. In *Expressive Reasoning with Horn Rules and Fuzzy Description Logics* (2007).
- [209] STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., PAN, J. Z., AND HORROCKS, I. Reasoning with very expressive fuzzy description logics. *Journal of Artificial Intelligence Research* 30, 5 (2007), 273--320.
- [210] STOILOS, G., STAMOU, G., TZOUVARAS, V., PAN, J. Z., AND HORROCKS, I. Reasoning with very expressive fuzzy description logics. *Journal of Artificial Intelligence Research* 30, 8 (2007), 273--320.

- [211] HABIBALLA, H. Resolution strategies for fuzzy description logic. vol. 2, In Proceedings of the 5th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT 2007), pp. 27--36.
- [212] ATHANASIADIS, T., MYLONAS, P., AVRITHIS, Y., AND KOLLIAS, S. Semantic image segmentation and object labeling. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology* 17, 3 (2007), 298--312.
- [213] BOBILLO, F., DELGADO, M., AND GÓMEZ-ROMERO, J. A crisp representation for fuzzy *SHOIN* with fuzzy nominals and general concept inclusions. 174-188.
- [214] F. BOBILLO, M. DELGADO, J. G.-R. A crisp representation for fuzzy shoin with fuzzy nominals and general concept inclusions. In *In Proceedings of the 2nd Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web (URSW 2006)* (2008), Lecture Notes in Computer Science 5327, pp. 174--188.
- [215] F. BOBILLO, M. DELGADO, J. G.-R. Delorean: A reasoner for fuzzy owl 1.1. In *In Proceedings of the 4th International Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web (URSW 2008)* (2008), pp. 923--930.
- [216] CUENCA GRAU, B., HORROCKS, I., KAZAKOV, Y., AND SATTTLER, U. Extracting Modules from Ontologies: A Logic-based Approach. In *Springer's LNCS Monograph on Ontology Modularization*, S. S. Heiner Stuckenschmidt, Ed. Springer, 2008. To Appear.
- [217] BOBILLO, F., AND STRACCIA, U. fuzzydl: An expressive fuzzy description logic reasoner. In *In Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2008)* (2008), pp. 923--930.
- [218] JOHNSON, C., HENDRIKS, E., BEREZHNOY, I., BREVDO, E., HUGHES, S., DAUBECHIES, I., LI, J., POSTMA, E., AND WANG, J. Image processing for artist identification. *IEEE Signal Processing Magazine* 25, 4 (2008), 37--48.
- [219] LEUNG, H., WONG, S., AND IP, H. In the name of art. *IEEE Signal Processing Magazine* 25, 4 (2008), 49--54.
- [220] PELAGOTTI, A., MASTIO, A., ROSA, A., AND PIVA, A. Multispectral imaging of paintings. *IEEE Signal Processing Magazine* 25, 4 (2008), 27--36.
- [221] BOBILLO, F., AND STRACCIA, U. On qualified cardinality restrictions in fuzzy description logics under lukasiewicz semantics. In *Proceedings of the 12th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, (IPMU-08)* (2008), L. Magdalena, M. Ojeda-Aciego, and J. L. Verdegay, Eds., pp. 1008--1015.
- [222] STOILOS, G., STAMOU, G., AND KOLLIAS, S. Reasoning with qualified cardinality restrictions in fuzzy description logics. Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz-IEEE 08).
- [223] SIMOU, N., ATHANASIADIS, T., KOLLIAS, S., STAMOU, G., AND STAFYLOPATIS, A. Semantic adaptation of neural network classifiers in image

- segmentation. 18th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2008), pp. 907-916, September 2008, Prague, Czech Republic.
- [224] FANIZZI, N., D' AMATO, C., AND ESPOSITO, F. Statistical learning for inductive query answering on owl ontologies. In *Proceedings of the 7th International Semantic Web Conference (ISWC)* (2008), pp. 195--212.
- [225] SIMOU, N., STOILOS, G., TZOUVARAS, V., STAMOU, G., AND KOLLIAS, S. Storing and querying fuzzy knowledge in the semantic web. 7th International Workshop on Uncertainty Reasoning For the Semantic Web, Karlsruhe, Germany, October 2008.
- [226] RIBES, A., PILLAY, R., SCHMITT, F., AND LAHANIER, C. Studying that smile. *IEEE Signal Processing Magazine* 25, 4 (2008), 14--26.
- [227] BOBILLO, F., DELGADO, M., GÓMEZ-ROMERO, J., AND STRACCIA, U. Fuzzy description logics under gödel semantics. *International Journal of Approximate Reasoning* 50, 3 (2009), 494--514.
- [228] ATHANASIADIS, T., SIMOU, N., PAPADOPOULOS, G., BENMOKHTAR, R., CHANDRAMOULI, K., TZOUVARAS, V., MEZARIS, V., PHINIKETOS, M., AVRITHIS, Y., KOMPATSIARIS, Y., HUET, B., AND IZQUIERDO, E. Integrating image segmentation and classification for fuzzy knowledge-based multimedia indexing. In *15th International MultiMedia Modeling Conference* (2009).
- [229] MOTIK, B., GRAU, B. C., HORROCKS, I., WU, Z., FOKOUE, A., AND LUTZ, C. OWL 2 web ontology language. Tech. rep., W3C, Oct. 2009. W3C Recommendation, URL <http://www.w3.org/TR/owl2-profiles/>.
- [230] SIMOU, N., ATHANASIADIS, T., KOLLIAS, S., AND STAMOU, G. Semantic adaptation of neural network classifiers in image segmentation. *Neural Network World, Institute of Computer Science ASCR 19* (2009), 561--579.
- [231] TZOUVELI, P., SIMOU, N., STAMOU, G., AND KOLLIAS, S. Semantic classification of byzantine icons. *IEEE Intelligent Systems* 24 (2009), 35-43.
- [232] STOILOS, G., STAMOU, G., AND PAN, J. Fuzzy extensions of OWL: Logical properties and reduction to fuzzy description logics. International journal of approximate reasoning, in press, 2010.
- [233] SIMOU, N., MAILIS, T., STOILOS, G., AND STAMOU, G. Optimization techniques for fuzzy description logics. (accepted for publication) 23rd International Workshop on Description Logics (DL 10), Waterloo, Canada, 2010.
- [234] SIMOU, N., MAILIS, T., STOILOS, G., AND STAMOU, G. Optimization techniques for fuzzy description logics. *to be submitted to International Journal of Approximate Reasoning* (2010).

Ευρετήριο

- ALC*, 12
- DAML, 2
- DAML+OIL, 2
- FiRE
 - έλεγχος ικανοποιησιμότητας, 77
 - ασαφή συζητητικά ερωτήματα, 75
 - ελάχιστο άνω, 75
 - λογική συνεπαγωγή, 75, 77
 - μέγιστο κάτω φράγμα, 75
 - υπαγωγή εννοιών, 75, 77
- fuzzy
 - CARIN, 151
 - RuleML, 151
 - SWRL, 151
- GCI, 16
- OIL, 2
- OWL, 2
- tableau
 - ασαφές, 30
- World Wide Web, 2
- ΕΑΦ, 62
- Λογική-Πρώτης Τάξης, 2
- Λογικός Προγραμματισμός, 2
- ΜΚΦ, 62
- Οντολογία Οπτικών Περιγραφών, 104
- Παγκόσμιου Ιστού, 2
- Περιγραφικές Λογικές, 2, 11
 - εκφραστικές, 13
 - πολύ εκφραστικές, 13
- Πλαίσια, 11
- Σημασιολογικά Δίκτυα, 11
- Σημασιολογικός Ιστός, 2
- άτομα, 12, 23
- έλεγχος ικανοποιησιμότητας, 77
- έννοια, 3, 11
- SHOIN*, 13
 - άρνηση, 12
 - ένωση, 12
 - ασαφής, 23
 - ατομική, 12
 - διάζευξη, 12
 - καθολική, 12
 - κενή, 12
 - μη πρωταρχική, 45
 - ονοματική, 13
 - περιορισμός
 - πληθικότητας, 13
 - τιμής, 12
 - το λιγότερο, 13
 - το πολύ, 13
 - υπαρξιακός, 12
 - πρωταρχική, 45
 - σύζευξη, 12
 - σύνθετη, 12
 - τομή, 12
- ακρίβεια, 2
- αλγόριθμος tableaux
 - f_{KD} -*SHIN*, 32
- αλγόριθμος συλλογιστικής, 18
- ανάκληση, 2
- αναγνώριση έννοιας σε εικόνα, 5
- αντίφαση, 27, 32
- αντικείμενα, 14
- αξίωμα
 - υπαγωγής ασαφών εννοιών, 24
 - γενικευμένο, 16
 - ισοδυναμίας ασαφών εννοιών, 24
 - ισοδυναμίας εννοιών, 15, 65
 - κυκλικό, 45, 65
 - μεταβατικών ασαφών ρόλων, 25
 - μεταβατικών ρόλων, 16
 - μη κυκλικό, 45
 - μη πρωταρχικού ορισμού, 45
 - ορισμού, 45
 - πρωταρχικού ορισμού, 45

- υπαγωγής ασαφών ρόλων, 25
- υπαγωγής γενικευμένων εννοιών, 65
- υπαγωγής εννοιών, 15, 65
- υπαγωγής ρόλων, 16
- απορρόφησης, 67
- αποτίμηση, 92
- ασαφές συμπλήρωμα, 20
 - ενελικτικό, 20
 - συνεχές, 20
- ασαφή συζευκτικά ερωτήματα, 75
- ασαφή χαρακτηρισμό περιοχής, 117
- ασαφής
 - RuleML, 151
 - SWRL, 151
 - άρνηση, 20
 - ένωση, 21
 - συνεπαγωγή, 21
 - συνολοθεωρία, 19
 - τετράδα, 22
 - τομή, 20
 - τριάδα, 22
 - δυσάδικη, 49
 - επιμεριστική, 49
- αυξανόμενη σημασιολογική περιοχή, 117
- βάση γνώσης, 3, 12, 15, 17
 - ικανοποιήσιμη, 17
- γείτονας, 32
- γειτονιά
 - άτομα, 43
- γλώσσες αναπαράστασης γνώσης, 1
 - Λογική-Πρώτης Τάξης, 2
 - Λογικός Προγραμματισμός, 2
 - Περιγραφικές Λογικές, 2, 11
 - Πλαίσια, 11
 - Σημασιολογικά Δίκτυα, 11
- δάσος
 - ελεύθερος αντιφάσεων, 33
 - ολοκλήρωσης, 31
 - πλήρες, 33
- δέντρο
 - ολοκλήρωσης, 31
- διάδοχος, 32
- διαδικασία ξεδίπλωσης, 45
- διαζευκτικό επερώτημα, 92
- διακλάδωσης, 56
- διαλειτουργικότητα, 2
- διανυσματικές μηχανές υποστήριξης, 117, 145
- διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών, 41
- εκφραστικότητα, 12
- ελάχιστο άνω, 75
- ελάχιστο άνω φράγμα, 27, 62
- εργαλεία οντολογιών, 4
 - Protégé, 4
 - SWOOP, 4
 - TopBraid Composer, 4
- ερμηνεία, 14
 - ασαφής, 23
- ερμηνεία σχημής, 5, 145
- εσωτερίκευσης, 66
- ετικέτα, 31
- εύρεσης, 91
- θεωρία δυνατοτήτων, 19
- θεωρία πιθανοτήτων, 19
- ιδιότητα, 91
- ιεραρχία ρόλων, 16, 25
- ικανοποιήσιμη, 17, 27
 - n-, 27
- ισοδυναμία εννοιών, 15, 65
- ισχυρισμός, 17
 - ασαφής, 25
 - αρνητικός, 25
 - θετικός, 25
 - αυστηρός, 66
 - εννοιών, 17
 - ρόλων, 17
- κανονικοποίηση βαθμών, 40
- κανόνες
 - επέκτασης, 28, 33
- κατάτμηση, 5, 107, 116
- κατασκευαστής, 12
- κατηγορήμα, 91
- κωδικοποίηση, 48
- κόμβος
 - μπλοκαρισμένος, 32
 - έμμεσα, 32
- λίστα εργασιών, 56
- λεκτική κανονικοποίηση, 48
- λογική
 - Gödel, 22
 - Lukasiewicz, 22
 - ασαφής, 19
 - γινομένου, 22
- λογική συνεπαγωγή, 17, 27, 75, 77
- μέγιστο κάτω φράγμα, 27, 62, 75

μεταβλητές
 διακεκριμένες, 92
 μη-διακεκριμένες, 92
 μη-ικανοποιήσιμη, 4
 μηχανική οντολογιών, 3
 μονοσύνολο, 15
 μοντέλο, 16, 24
 μορφή εικόνας, 5
 μπλοκάρισμα, 31
 νευρωνικά δίκτυα, 117, 145
 νόρμα, 20
 Αρχιμήδεια, 21
 πιθανοτικού αθροίσματος, 21
 σ-, 21
 τ-, 21
 ταυτοδύναμη, 21
 υπερ-ταυτοδύναμη, 21
 ξεδιπλώσιμο
 σώμα ορολογίας, 45
 οδηγούμενη οπισθοδρόμηση, 56
 οκνηρό ξεδίπλωμα, 46
 ορθότητα
 f_{KD} -*SHIN*, 34

 παρακολούθηση, 107
 περίγραμμα εικόνας, 5
 περιορισμός
 τιμής, 25
 το-λιγότερο, 25
 το-πολύ, 25
 υπαρξιακός, 25
 πληροφορία
 αβέβαιη, 5, 6, 19
 ανακριβής, 6, 19
 ασαφής, 5, 6, 19
 ασυνεπής, 19
 ατελής, 6
 λανθασμένη, 19
 πληρότητα
 f_{KD} -*SHIN*, 34
 πολυπλοκότητα
 f_{KD} -*SHIN*, 34
 πράκτορες λογισμικού, 2
 πραγματοποίησης, 91
 προκάτοχος, 32
 πρώτα αναζήτηση σε βάθος, 55
 ρόλος, 3, 11
 sup $-t$ μεταβατικός, 22

SHOIN, 13
 αντίστροφος, 13
 αντι-συμμετρικός, 22
 απλός, 13
 ασαφής, 23
 ατομικός, 12
 ε-ανακλαστικός, 23
 ιεραρχία, 13
 μεταβατικός, 13, 16
 μη-ανακλαστικός, 22
 συμμετρικός, 22
 σημασιολογία, 1, 12
 Ανοιχτού Κόσμου, 3
 Κλειστού Κόσμου, 3
 μοντελοθεωρητική, 14
 σημασιολογική ανάκτηση, 115, 116
 σημασιολογική δεικτοδότηση, 115, 116
 σημασιολογική διακλάδωση, 60
 σημασιολογικός ιστός, 89
 σημείο διακλάδωσης, 56
 στέρεος χώρος, 142
 συζευκτικά επερωτήματα
 γενικευμένα ασαφή, 93
 ασαφών κατωφλίων, 94
 ασαφών συναθροίσεων, 94
 σταθμισμένων ασαφών τ-νορμών,
 95
 κατωφλίων, 92
 συζευκτικό επερωτήματα, 92
 συμπεραίνουσα γνώση, 17
 συνάρτηση
 ερμηνείας, 14
 ασαφής, 23
 συμμετοχής, 20
 χαρακτηριστική, 20
 συνέπεια, 17, 27
 συνεπαγωγή
 R, 22
 S, 21
 συνολικό ΜΚΦ, 64
 συντακτικό, 12
 συστήμα αποθήκευσης οντολογιών, 89
 συστημάτων αποθήκευσης, 91
 σύγκρουση ακμών, 32
 σύνθεση
 sup $-t$, 23
 σύνταξη, 1
 σύστημα ανάκτησης δεδομένων, 1

- σύστημα συλλογιστικής, 4, 38
 - FaCT++, 4, 38, 72
 - Pellet, 4, 38, 72
 - Racer, 4, 38
 - ασαφές, 38
 - DeLorean, 38, 72
 - FiRE, xi, xiii, 7, 8, 38, 72
 - FuzzyDL, 38, 72
- σώμα
 - ισχυρισμών, 3, 12, 15, 17
 - ασαφές, 24, 25
 - ορολογίας, 3, 12, 15
 - απλό, 16
 - ασαφές, 24
 - κυκλικό, 16
 - μη κυκλικό, 45
 - ξεδιπλώσιμο, 45
 - ρόλων, 15, 16
 - ασαφές, 24, 25
- ταξινόμηση, 116
- τερματισμός, 34
 - $f_{KD-SHLN}$, 34
- τεχνικές βελτιστοποίησης, 6, 38
 - ικανοποιησιμότητας, 7, 39
 - βελτιστοποιήσεις για τα γενικευμένα κυκλικά αξιώματα, 8
 - βελτιστοποιήσεις για το μέγιστο κάτω φράγμα, 8
 - οδηγούμενη οπισθοδρόμηση, 8
 - πρώτα αναζήτηση σε βάθος, 8
 - σημασιολογική διακλάδωση, 8
 - τεχνική των ιχνών, 8
 - τοπική απλοποίηση, 8
 - μείωσης απαιτήσεων αποθήκευσης, 7, 38, 39
 - διχοτόμησης του σώματος ισχυρισμών, 7, 41
 - κανονικοποίησης βαθμών, 7, 40
 - οδηγούμενη οπισθοδρόμηση, 56
 - πρώτα αναζήτηση σε βάθος, 55
 - σημασιολογική διακλάδωση, 60
 - τεχνική των ιχνών, 52
 - τοπική απλοποίηση, 59
 - μερικής διάταξης, 39
 - προεπεξεργασίας, 7, 39, 45
 - κωδικοποίησης, 48
 - λεκτικής κανονικοποίησης, 48
 - λεκτικής κανονικοποίησης και κωδικοποίησης, 8, 48
 - οκνηρό ξεδίπλωμα, 7, 46
 - υπαγωγής, 39
 - τεχνική των ιχνών, 52
 - τμήμα εικόνας, 5
 - τοπική απλοποίηση, 59
 - τριάδα συμμετοχής, 31
 - τριάδα έννοιας, 31
 - τριάδα ρόλου, 31
 - τροποποιητής εννοιών, 141
 - τυπική λογική, 1
 - υπαγωγή
 - γενικευμένων εννοιών, 16
 - εννοιών, 15, 65
 - ασαφής, 25
 - ρόλων, 16
 - υπαγωγή εννοιών, 75, 77
 - υπηρεσίες εξαγωγής συμπερασμάτων, 26
 - υπηρεσίες συλλογιστικής, 4, 17, 26
 - έλεγχος ικανοποιησιμότητας, 77
 - έλεγχος της συνέπειας, 4
 - ελάχιστο άνω φράγμα, 27, 75
 - ικανοποιησιμότητα μιας ΒΓ, 17
 - ικανοποιησιμότητα μιας έννοιας, 17
 - ικανοποιησιμότητα μιας ασαφούς ΒΓ, 27
 - ικανοποιησιμότητα μιας ασαφούς έννοιας, 27
 - λογική συνεπαγωγή, 17, 27, 75, 77
 - μέγιστο κάτω φράγμα, 27, 75
 - συνέπεια ενός ασαφούς σώματος ισχυρισμών, 27
 - συνέπεια ενός σώματος ισχυρισμών, 17
 - υπαγωγή εννοιών, 17, 27, 75, 77
 - υποενοτήτα οντολογίας, 4
 - χώρος ερμηνείας, 14

Κατάλογος δημοσιεύσεων του συγγραφέα

Περιοδικά

- N. Simou, T. Mailis, G. Stoilos and G. Stamou, Optimization techniques for fuzzy description logics. under submission.
- N. Simou, T. Athanasiadis, S. Kollias, G. Stamou, "Semantic Adaptation of Neural Network Classifiers in Image Segmentation", Neural Network World, Institute of Computer Science ASCR, Volume 19, No 5, pp 561-579, 2009.
- P. Tzouveli, N. Simou, G. Stamou, S. Kollias, "Semantic Classification of Byzantine Icons", IEEE Intelligent Systems, vol. 24, no. 2, pp. 35-43, Mar./Apr. 2009.
- N. Simou, Th. Athanasiadis, G. Stoilos, S. Kollias, "Image Indexing and Retrieval using Expressive Fuzzy Description Logics", Signal, Image and Video Processing, Springer, Volume 2, Number 4, pp. 321-335, December 2008.
- K. Petridis, S. Bloehdorn, C. Saathoff, N. Simou, S. Dasiopoulou, V. Tzouvaras, S. Handschuh, Y. Avrithis, I. Kompatsiaris and S. Staab, "Knowledge Representation and Semantic Annotation of Multimedia Content", IEE Proceedings on Vision Image and Signal Processing, Special issue on Knowledge-Based Digital Media Processing, Vol. 153, No. 3, pp. 255-262, June 2006.
- G. Stoilos, N. Simou, G. Stamou and S. Kollias, "Uncertainty and the Semantic Web", IEEE Intelligent Systems, 21(5), p. 84-87, 2006.

Βιβλία

- G. Stoilos, G Stamou, J.Z. Pan, N. Simou and V. Tzouvaras, "Reasoning with the Fuzzy Description Logic f-SHIN: Theory, Practice and Applications", In Paulo CG Costa, Claudia d'Amato et al. (eds) Uncertainty Reasoning for the Semantic Web I (Book).
- S. Bloehdorn, K. Petridis, C. Saathoff, N. Simou, V. Tzouvaras, Y. Avrithis, S. Handschuh, Y. Kompatsiaris, S. Staab and M. G. Strintzis, "Semantic Annotation of Images and Videos for Multimedia Analysis", Lecture Notes in

Συνέδρια

- N. Simou, T. Mailis, G. Stoilos and G. Stamou, "Optimization techniques for fuzzy description logics", (accepted for publication) 23rd International Workshop on Description Logics (DL 10), Waterloo, Canada, 2010.
- I. Kollia, N. Simou, G. Stamou and A. Stafylopatis, "Connectionist Models For Formal Knowledge Adaptation", 19th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2009), September 2009, Limassol, Cyprus.
- Th. Athanasiadis, N. Simou, G. Papadopoulos, R. Benmokhtar, K. Chandramouli, V. Tzouvaras, V. Mezaris, M. Phiniketos, Y. Avrithis, Y. Kompatsiaris, B. Huet, E. Izquierdo, "Integrating Image Segmentation and Classification for Fuzzy Knowledge-based Multimedia Indexing", 15th International Multimedia Modeling Conference (MMM2009), Sophia Antipolis, France, 2009.
- I. Kollia, N. Simou, G. Stamou and A. Stafylopatis, "Interweaving Knowledge Representation and Adaptive Neural Networks", Workshop on Inductive Reasoning and Machine Learning on the Semantic Web, Crete, Greece, June 2009.
- G. Papadopoulos, Th. Athanasiadis, N. Simou, R. Benmokhtar, K. Chrandramouli, V. Tzouvaras, V. Mezaris, M. Phiniketos, Y. Avrithis, I. Kompatsiaris, B. Huet, E. Izquierdo, "Combining Segmentation and Classification Techniques for Fuzzy Knowledge-based Semantic Image Annotation", 3rd international conference on Semantics And digital Media Technologies (SAMT), Koblenz, December 2008.
- P. Tzouveli, N. Simou, G. Stamou, S. Kollias, D. Kalomoirakis, G. Foukaneli, N. Fyssas, "Sacred Figure Recognition based on Byzantine Iconography Knowledge", Digital Heritage in New Knowledge Environment: shared spaces & open paths to cultural content, Hellenic Ministry of Culture, Athens 2008.
- N. Simou, Th. Athanasiadis, S. Kollias, G. Stamou, A. Stafylopatis, "Semantic Adaptation of Neural Network Classifiers in Image Segmentation", 18th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2008), pp. 907-916, September 2008, Prague, Czech Republic.
- N. Simou, G. Stoilos, V. Tzouvaras, G. Stamou, S. Kollias, "Storing and Querying Fuzzy Knowledge in the Semantic Web", 7th International Workshop on Uncertainty Reasoning For the Semantic Web, Karlsruhe, Germany, October 2008.
- T. Mailis, G. Stoilos, N. Simou, G. Stamou, "Tractable Reasoning Based on the Fuzzy EL++ Algorithm", 7th International Workshop on Uncertainty Reasoning For the Semantic Web, Karlsruhe, Germany, October 2008.

- J. Nemrava, P. Buitelaar, N. Simou, D. Sadlier, V. Svátek, T. Declerck, A. Cobet, T. Sikora, N. O'Connor, V. Tzouvaras, H. Zeiner, J. Petrak, "An Architecture for Mining Resources Complementary to Audio-Visual Streams", Knowledge Acquisition from Multimedia Content Workshop, co-located with the 2nd International Conference on Semantics and Digital Media Technologies (SAMT 2007).
- Miroslav Vacura, Vojtěch Svátek, Pavel Smrž, and Nick Simou, "A Pattern-based Framework for Representation of Uncertainty in Ontologies", 6th International Workshop on Uncertainty Reasoning For the Semantic Web, Busan, Korea, 2007.
- N. Simou, Th. Athanasiadis, V. Tzouvaras, S. Kollias, "Multimedia Reasoning with f-SHIN", 2nd International Workshop on Semantic Media Adaptation and Personalization, London, December 17-18, 2007, London, United Kingdom (SMAP 2007).
- Ph. Mylonas, N. Simou, V. Tzouvaras and Y. Avrithis, "Towards Semantic Multimedia Indexing by Classification & Reasoning on Textual Metadata", Knowledge Acquisition from Multimedia Content Workshop, co-located with the 2nd International Conference on Semantics and Digital Media Technologies (SAMT 2007).
- N. Simou, C. Saathoff, S. Dasiopoulou, E. Spyrou, N. Voisine, V. Tzouvaras, I. Kompatsiaris, Y. Avrithis, S. Staab, "An Ontology Infrastructure for Multimedia Reasoning", International Workshop VLBV05, Sardinia, Italy, 15-16 September 2005.
- N. Simou, V. Tzouvaras, Y. Avrithis, G. Stamou and S. Kollias, "A Visual Descriptor Ontology for Multimedia Reasoning", In Proc. of Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS '05), Montreux, Switzerland, April 13-15, 2005.
- S. Bloehdorn, K. Petridis, C. Saathoff, N. Simou, V. Tzouvaras, Y. Avrithis, S. Handschuh, Y. Kompatsiaris, S. Staab and M. G. Strintzis, "Semantic Annotation of Images and Videos for Multimedia", in Proc. of 2nd European Semantic Web Conference, (ESWC '05), Heraklion, Greece, May 29 - June 1, 2005.
- S. Bloehdorn, N. Simou, V. Tzouvaras, K. Petridis, S. Handschuh, Y. Avrithis, I. Kompatsiaris, S. Staab and M. G. Strintzis, "Knowledge Representation for Semantic Multimedia Content Analysis and Reasoning", Proc. of European Workshop on the Integration of Knowledge, Semantics and Digital Media Technology (EWIMT), London, U.K., November 25-26, 2004.

Βιογραφικό Σημείωμα

Προσωπικά Στοιχεία

Όνομα	:	Νικόλαος Σίμου
Ημερομηνία Γέννησης	:	26 Ιανουαρίου 1981
Οικογενειακή Κατάσταση	:	Άγαμος
Υπηκοότητα	:	Ελληνική

Σπουδές

Οκτώβριος 2004 - Μάρτιος 2010	:	Υποψήφιος Διδάκτωρ της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο
Οκτώβριος 2002 - Σεπτέμβριος 2003	:	Μεταπτυχιακό σε Εξελίξιμα και Προσαρμόσιμα Συστήματα της Σχολής Πληροφορικής, University of Sussex
Σεπτέμβριος 1998 - Ιούνιος 2002	:	Πτυχίο Μηχανικού Η/Υ της Σχολής Μηχανικών, University of Sussex

Συμμετοχή σε Ερευνητικά Προγράμματα

2007 - Σήμερα	:	X-Media (FP6-IP)
2006 - 2009	:	K-Space (FP6-NOE)
2006 - 2008	:	Δελτίο (ΓΓΕΤ)
2004 - 2005	:	Knowledge Web (FP6-NOE)
2004 - 2005	:	Acemedia (FP6-IP)
2003	:	Faethon (IST-1999-20502)

Συμμετοχή σε Διεθνείς Ερευνητικές Ομάδες

2007 - Σήμερα	:	W3C Uncertainty Reasoning for the Semantic Web XG
---------------	---	---

Διδακτική Δραστηριότητα

- 2007 - 2009 : Βοηθός εργαστηρίου στο μάθημα Έμπειρα Συστήματα και Εφαρμογές στη Πληροφορική
- 2004 - 2009 : Βοηθός εργαστηρίου στο μάθημα Νευρωνικά Δίκτυα
- 2005 - 2006 : Βοηθός εργαστηρίου στο μάθημα Γραφική με Υπολογιστές
- 2004 - 2005 : Βοηθός εργαστηρίου στο μάθημα Προγραμματισμός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Περίληψη Δημοσιεύσεων

Ο Νικόλαος Σίμου έχει δημοσιεύσει μέχρι τον Μάρτιο του 2010 πέντε άρθρα σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά, δύο από τα οποία στο IEEE Intelligent Systems και ένα στο Neural Network World τα οποία αναφέρονται στο Expanded Citation Index με impact factors 2.278 και 0.395 αντίστοιχα (στοιχεία 2009). Έχει συμμετάσχει στη συγγραφή δυο κεφαλαίων βιβλίων, ενώ εργασίες του έχουν δημοσιευτεί στο συνέδριο κλάσης A European Semantic Web Conference και στο συνέδριο κλάσης B International Conference on Artificial Neural Networks. Συνολικά τα άρθρα έχουν λάβει περισσότερες από 140 αναφορές.

□