



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΟΥ INTERNET ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ:
ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΕ ΟΜΟΣΠΟΝΔΙΕΣ ΑΠΟ
ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ**

**MANAGEMENT OF FUTURE INTERNET NETWORKS:
POLICY-BASED MANAGEMENT IN FEDERATED
NETWORKING INFRASTRUCTURES**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΙΑΝΝΟΣ Γ. ΚΡΥΦΤΗΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΟΥ INTERNET ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΕ ΟΜΟΣΠΟΝΔΙΕΣ ΑΠΟ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΙΑΝΝΟΣ Γ. ΚΡΥΦΤΗΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Βασίλειος Μάγκλαρης, Καθηγητής ΕΜΠ
Συμεών Παπαβασιλείου, Καθηγητής ΕΜΠ
Ευστάθιος Συκάς, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την:

.....

Βασίλειος Μάγκλαρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....

Δημήτριος Καλογεράς
Ερευνητής Β' ΕΠΙΣΕΥ

.....

Νεκτάριος Κοζύρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Κωνσταντίνος Μαυρομουστάκης
Καθηγητής Παν. Λευκωσίας

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....
Γιάννος Γ. Κρύφτης

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

Copyright © Γιάννος Γ. Κρύφτης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται με το πρόβλημα της ομοσπονδιοποίησης υποδομών που παρέχουν εικονικοποιημένους πόρους και υπηρεσίες στο πλαίσιο της διαχείρισης δικτύων Internet του μέλλοντος. Παρουσιάζεται η θεωρία και η τωρινή ερευνητική κατάσταση σχετικά με τα Πληροφοριακά Μοντέλα (Information Models), τις Εικονικοποιημένες Υποδομές (Virtualized Infrastructures) και τη διαχείριση δικτύων και συστημάτων με βάση πολιτικές (Policy-based Management). Στη συνέχεια παρουσιάζεται το προτεινόμενο Πληροφοριακό Μοντέλο για την επίτευξη της ομοσπονδιοποίησης, με έμφαση στην υλοποίηση της Οντολογίας Πολιτικών που περιγράφει τις διαδικασίες που εφαρμόζονται για τη διαχείριση ετερογενών υποδομών των επιμέρους διασυνδεδεμένων περιοχών.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική Policy-based Federation (PBF) για τη διαχείριση Ομοσπονδίας Εικονικοποιημένων Υποδομών με τη χρήση συνεργατικών πολιτικών. Κάθε υποδομή είναι μια διαχειριστικά Αυτόνομη Περιοχή (domain). Οι χρήστες μπορούν να ζητούν εικονικά τμήματα από υπολογιστικούς και δικτυακούς πόρους διαμέσου της ομοσπονδίας, κάτι το οποίο ελέγχεται και εκτελείται με χρήση πολιτικών οι οποίες συμμορφώνονται με τις Συμφωνίες Επιπέδου Παροχής Υπηρεσιών (Service Level Agreements - SLAs) μεταξύ των διασυνδεδεμένων περιοχών. Το βασικό συστατικό της αρχιτεκτονικής PBF είναι η Υπηρεσία Πολιτικών η οποία προσφέρει υποστήριξη για πολιτικές intra-domain εντός μιας περιοχής (πολιτικές Υποχρέωσης - Obligation, Εξουσιοδότησης – Authorization, Προσβασιμότητας – Access Control) και inter-domain μεταξύ περιοχών (πολιτικές Αντιπροσώπευσης - Delegation). Οι τελευταίες δεσμεύουν πόρους σε απομακρυσμένες περιοχές, ανανεώνουν τον αριθμό των πόρων που ανταλλάσσονται, καθορίζουν τις δεσμεύσεις για παροχές πόρων σε απομακρυσμένες περιοχές και τέλος καθορίζουν τις εσωτερικές πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ περιοχών μέσω εκτέλεσης απομακρυσμένων σημασιολογικών ερωτημάτων. Η Οντολογία Πολιτικών αποτελεί το κλειδί για την αρχιτεκτονική PBF αφού ορίζει τα κοινά σενάρια ομοσπονδοποίησης στο πλαίσιο των δεσμευμένων πόρων του

χρήστη (user slice) καθώς και τις υπηρεσίες που εκτελούν διαχειριστικές ενέργειες. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υλοποιήθηκε σε πρωτότυπη έκδοση με χρήση της γλώσσας προδιαγραφής πολιτικών Ponder2 και εφαρμόστηκε πιλοτικά σε Ευρωπαϊκή πλατφόρμα για το Internet του μέλλοντος στο Κοινοτικό Ερευνητικό έργο NOVI.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εξειδικεύτηκε περαιτέρω για πολιτικές διαχείρισης πόρων σε Δίκτυα Οριζόμενα από Λογισμικό (Software Defined Networks - SDN). Για το σκοπό αυτό το Πληροφοριακό Μοντέλο επεκτάθηκε ώστε να παρέχει τη δυνατότητα περιγραφής πόρων τύπου OpenFlow μέσω ορισμών VNF (Virtual Network Functions). Οι πολιτικές αξιοποιήθηκαν στα τρία επίπεδα της τυποποίησης κατά ETSI της αρχιτεκτονικής NFV (Network Function Virtualization): Τη διαχείριση των δικτυακών λειτουργιών, τον έλεγχο του κύκλου ζωής των VNFs και την ενορχήστρωση των υπηρεσιών.

Στη συνέχεια η προτεινόμενη αρχιτεκτονική γενικεύτηκε προς την ομοσπονδιοποίηση εικονικών υποδομών υπολογιστικού νέφους. Προτάθηκαν συγκεκριμένες πολιτικές Αντιπροσώπευσης καθώς και μια συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) για τον καθορισμό των σχέσεων μεταξύ τους. Η επίδραση των πολιτικών και το σημαντικό όφελος από τη χρήση τους καταδείχθηκαν με την εκτέλεση σεναρίων προσομοίωσης.

Λέξεις Κλειδιά: Πολιτικές Διαχείρισης Δικτύων, Ponder2, Πληροφοριακά Μοντέλα, Ομόσπονδες Εικονικές Υποδομές, SDN, NFV, SLA, Πολιτικές Αντιπροσώπευσης, Internet του Μέλλοντος

Abstract

Management of Future Internet Networks – Policy-Based Management in Federated Networking Infrastructures

In this thesis we analyze the issues related to the federation of Virtualized Infrastructures (VIs) towards the Future Internet. We present the theory and current research on Information Models, Virtualized Infrastructures and Policy Based network management. We present the proposed Information Model for the federation of VIs, with emphasis on the Policy Ontology that includes the definition and relations of the policies used for the management of the heterogeneous infrastructures and for the federation.

We present the Policy-based Federation (PBF) architecture for interworked Future Internet Virtualized Infrastructures (VIs). Each VI is an individually managed autonomous domain. Users may request slices of virtual resources across the federation, managed and controlled via inter-domain policies that abide by agreed upon federated SLAs. The key component of our PBF architecture is a Policy Service, which provides support for intra-domain policies (Obligation, Authorization, Role-Based Access Control) and for inter-domain Delegation policies. Delegation policies reserve resources in remote domains, update the number of resources exchanged, set alien domain obligations for cross-domain resource provisioning and define the exchange of internal domain information through the execution of remote semantic queries. Key to the architecture is the PBF Policy Ontology that specifies common federation concepts within the context of a user slice and the PBF services that trigger management actions. A prototype of the proposed architecture was developed using the Ponder2 policy specification language and deployed in the NOVI European Future Internet federated testbed.

As a next step of this research work, we studied the usage of policies for the management of resources in Software Defined Networks (SDN). For that purpose the Information Model was extended in order to provide descriptions for the OpenFlow resources, the Virtual Network Functions (VNFs) and Network Function Virtualization (NFV), while the

policies were applied in three levels for the management of the network resources, of the lifecycle of the VNFs and for the NFV orchestration.

An extended version of the proposed PBF architecture was utilized for the federation of cloud computing domains. Specific Delegation policies and a utility function were presented for the reservation of resources among federation. Simulation results depict the effect of the policies and the advantages of using the policy based federation.

Keywords: Policy-based Network Management, Ponder2, Information Models, Virtualization, Federated Infrastructures, SDN, NFV, Delegation Policies, Federated SLA, Future Internet

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη Διδακτορική μου Διατριβή νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τα άτομα που βοήθησαν στο να μετατραπεί αυτός ο κοπιαστικός προσωπικός αγώνας σε ένα ευχάριστο και δημιουργικό ταξίδι αναζητήσεων και επιτυχιών.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή της Διδακτορικής μου Διατριβής Βασίλειο Μάγκλαρη. Με ενέπνευσε από την πρώτη στιγμή, με καθοδήγησε σε όλα τα στάδια της έρευνας μου και με δίδαξε με το παράδειγμα του ότι οι επιτυχίες έρχονται με αφοσίωση και σκληρή δουλειά. Τον ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου για όλο το χρόνο που μου διέθεσε και για την ανθρώπινή του προσέγγιση.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής. Τον Καθηγητή Συμεών Παπαβασιλείου και τον Καθηγητή Ευστάθιο Συκά για το ενδιαφέρον που επέδειξαν κατά τη διάρκεια της Διατριβής και τις πολύτιμες συμβουλές τους. Ευχαριστώ επίσης την Καθηγήτρια Θεοδώρα Βαρβαρίγου και τον Καθηγητή Νεκτάριο Κοζύρη για τα εποικοδομητικά τους σχόλια. Τέλος καθοριστική ήταν η συνεισφορά του Δρ. Δημήτριου Καλογερά που με βοήθησε στην κατανόηση του γενικού πλαισίου της έρευνας, ενώ οι συζητήσεις μας και οι ιδέες του εμπλούτισαν το περιεχόμενο της Διατριβής.

Ευχαριστώ το Δρ. Λεωνίδα Λυμπερόπουλο και τη Δρ. Χρύσα Παπαγιάννη που με καθοδήγησαν στα πρώτα στάδια της Διατριβής μου. Οι κατευθύνσεις που μου έδωσαν καθόρισαν την ερευνητική μου πορεία και η συμβολή τους ήταν ουσιαστική. Ιδιαίτερα οφείλω να ευχαριστήσω τη Δρ. Μαίρη Γραμματικού η οποία πίστεψε σε εμένα και στην ερευνητική μου εργασία. Στις κρίσιμες στιγμές που χρειάστηκα τη βοήθεια της αφιέρωσε τον απαιτούμενο χρόνο και ενέργεια καθοδηγώντας με στο να μετατρέψω τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας σε τεκμηριωμένη ακαδημαϊκή συνεισφορά.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέρφους μου, τα μέλη του Εργαστηρίου Διαχείρισης και Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων Τηλεματικής (NETMODE): Γιώργο Ανδρουλιδάκη, Βασίλη Καρυώτη, Τιμόθεο Καστρινογιάννη, Κώστα Τρούλο, Γιώργο Αριστομενόπουλο, Στέλλα Καφετζόγλου, Κώστα Μαρίνο, Βασίλη Μερεκούλια, Βασιλική Πουλή, Χρήστο Αργυρόπουλο, Αλέξανδρο Σιούγγαρη, Ειρήνη Ελένη Τσιροπούλου, Έλενα

Στάη, Βαγγέλη Ανυφαντή, Άρη Λειβαδέα, Γιώργο Κατσίνη, Άγγελο Καπουκάκη, Μαίρη Γιατίλη, Κώστα Γιώτη και Αδάμ Παυλίδη. Στον κοινό αγώνα που δίναμε καθημερινά τους ένοιωθα συμπαρασάτες και μερικούς έχω την τιμή να τους θεωρώ παντοτινούς φίλους.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω κάποιους από τους βασικούς συνεργάτες μου από το Ερευνητικό έργο στο οποίο συμμετείχα. Αυτοί είναι από το University of Amsterdam (UvA) η Dr. Paola Grosso, ο Dr. Jeroen van der Ham, ο Χαρικλής Πιτταράς, ο Abianto Wibisono και ο Καθηγητής Cees de Laat, από το Poznan Supercomputing and Networking Center (PSNC) ο Bartosz Belter, ο Piotrzak Błazej και ο Piotr Pikusa, από το Eotvos Lorand University (ELTE Budapest) ο Dr. Jozsef Steger και ο Laki Sandor και από την Cisco Systems ο Dr. Klaas Wierenga.

Θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Λευκωσίας Κωνσταντίνο Μαυρομουστάκη που πριν ακόμα ολοκληρώσω τη Διατριβή, μου πρόσφερε θέση Ερευνητικού Συνεργάτη, διατηρώντας με κοντά στην έρευνα, συμβάλλοντας έτσι στην επιτυχημένη ολοκλήρωση της Διατριβής. Επίσης τον ευχαριστώ για την προθυμία με την οποία αποδέχθηκε να συμμετάσχει στην Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή της Διατριβής.

Απευθύνω τις ευχαριστίες μου προς την κα. Κατερίνα Περικλέους, Διευθύντρια του Τμήματος Υπηρεσιών Πληροφορικής (ΤΥΠ) του Υπουργείου Οικονομικών της Κυπριακής Δημοκρατίας και προς τους συναδέρφους μου στην Ομάδα Ασφάλειας Πληροφοριακών Συστημάτων, όπου εργάζομαι τους τελευταίους μήνες, για την κατανόηση και τις διευκολύνσεις που μου παρείχαν για να μπορέσω να ολοκληρώσω ανεμπόδιστα τη Διδακτορική μου Διατριβή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γεώργιο και Θεανώ για την συνεχή στήριξη τους σε όλα τα επίπεδα, την αδερφή μου Μαρία για την ηθική στήριξη και τον αδερφό μου Αχιλλέα που ήταν πάντα πρόθυμος να προσφέρει μαθηματική υποστήριξη όποτε του το ζήτησα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τη σύζυγό μου Μαρία για τη διαρκή έμπρακτη στήριξη της σε όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα από την έναρξη μέχρι την ολοκλήρωση της Διατριβής. Επίσης ευχαριστώ την κόρη μου Παντελίνα για την κατανόηση που έδειξε κατά το χρόνο που αφιέρωσα για την ολοκλήρωση της Διατριβής.

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Συντημήσεων	11
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	15
1 Εισαγωγή.....	16
2 Διαχείριση Δικτύων Νέας Γενιάς (Future Internet).....	20
2.1 Εικονικοποιημένες Υποδομές (Virtualized Infrastructures).....	22
2.2 Ομοσπονδιοποίηση Εικονικοποιημένων Υποδομών	25
2.3 Ομοσπονδιοποίηση σε Υποδομές Υπολογιστικού Νέφους	30
2.4 Δίκτυα Οριζόμενα από Λογισμικό (SDN) και Υποδομές NFV	33
2.5 Διαχείριση Συστημάτων με Βάση Πολιτικές	36
2.6 Πληροφοριακά Μοντέλα (IM) και Οντολογίες.....	42
2.7 Στόχος της Διατριβής	51
3 Μοντέλο Πολιτικών Διαχείρισης Ομοσπονδιών	53
3.1 Αξιολόγηση Υφιστάμενων Μοντέλων	54
3.2 Προτεινόμενο Μοντέλο.....	56
3.3 Συμβολή του Προτεινόμενου Μοντέλου	72
3.4 Συμπεράσματα	75
4 Χρήση Πολιτικών για Ομοσπονδιοποίηση Εικονικοποιημένων Υποδομών.....	76
4.1 Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική.....	77
4.2 Υπηρεσία Πολιτικών (Policy Service - PS).....	82
4.2.1 Πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation Policies).....	82
4.2.2 Πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization Policies)	85
4.2.3 Πολιτικές Προσβασιμότητας με Βάση Ρόλους (RBAC Policies)	86
4.2.4 Πολιτικές Αντιπροσώπευσης (Delegation Policies)	87
4.3 Υπηρεσία Αντιπροσώπευσης.....	92
4.4 Σχέσεις Υπηρεσιών στην Οντολογία Πολιτικών	96
4.5 Υλοποίηση Προτεινόμενης Αρχιτεκτονικής.....	99
4.5.1 Μηχανισμός Ορισμού και Εφαρμογής Πολιτικών	100
4.5.2 Υπηρεσία Πολιτικών	104
4.5.3 Επαλήθευση της Ορθότητας (Proof of Concept)	106

4.6	Συμπεράσματα	108
5	Πλαίσιο NFV Πολιτικών Διαχείρισης Πόρων OpenFlow	110
5.1	Σχετικές Εργασίες	111
5.2	Κίνητρο και Αρχές Σχεδίασης	112
5.3	NFV Orchestrator: Πολιτικές για Διαχείριση Ελεγκτή OpenFlow	114
5.4	Μελέτη Περίπτωσης.....	119
5.5	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων - Εξέταση Περίπτωσης CDN.....	122
5.6	Συμπεράσματα	125
6	Χρήση Πολιτικών σε Ομόσπονδες Υποδομές Νέφους	126
6.1	Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική.....	128
6.2	Πολιτικές Ομοσπονδιοποίησης Υπολογιστικού Νέφους	132
6.2.1	Σημασιολογική Αναζήτηση Πόρων	132
6.2.2	Τιμολόγηση Πόρων	133
6.3	Δέσμευση Πόρων σε Ομόσπονδο Περιβάλλον	135
6.3.1	Κριτήρια Επιλογής.....	135
6.3.2	Επέκταση της Ομοσπονδιοποίησης	138
6.4	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	140
6.4.1	Ανεξάρτητες Αυτόνομες Περιοχές	141
6.4.2	Πλήρης Ομοσπονδιοποίηση	141
6.4.3	Μερική Ομοσπονδιοποίηση με Βάση Πολιτικές	142
6.5	Συμπεράσματα	148
7	Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία.....	149
8	Κατάλογος Δημοσιεύσεων Συγγραφέα	153
8.1	Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με Κρίση.....	153
8.2	Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια με Κρίση	153
8.3	Κεφάλαιο Βιβλίου.....	154
9	Βιβλιογραφία	155

Κατάλογος Συντμήσεων

AS	Authentication Service
BGP	Border Gateway Protocol
CDN	Content Delivery Network
CIM	Common Information Model
DEN-ng	Directory Enabled Network - new generation
DS	Delegation Service
ESB	Enterprise Service Bus
GUI	Graphical User Interface
IM	Information Model
IRM	Intelligent Resource Mapper
MS	Monitoring Service
NFV	Network Function Virtualization
MO	Managed Object
OF	OpenFlow
OWL	Web Ontology Language
PBF	Policy-based Federation
PDP	Policy Decision Point
PEP	Policy Enforcement Point
PS	Policy Service
QoS	Quality of Service
RBAC	Role Based Access Control
RH	Request Handler
RIS	Resource Information Service
RPC	Remote Procedure Call

SDN	Software Defined Networks
SFA	Slice-based Federation Architecture
SLA	Service Level Agreement
SID	Shared Information and -Data model
UML	Unified Modeling Language
VI	Virtualized Infrastructure
VM	Virtual Machine
VNE	Virtual Network Embedding
VNF	Virtual Network Function

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 : Slice-based Federation Architecture (SFA).....	26
Σχήμα 2.2 : Η Αρχιτεκτονική του Πλαισίου NFV [ETSI13a]	35
Σχήμα 2.3 : Διαχείριση Δρομολόγησης με Πολιτικές [Ding09].....	37
Σχήμα 2.4 : Ανατροφοδότηση Πολιτικών στο Ponder2 [Lupu08].....	39
Σχήμα 2.5 : Το Μοντέλο Πολιτικών του CIM [DMTF16a].....	43
Σχήμα 2.6 : Διάγραμμα UML για Context Awareness στο DEN-ng [Strassner09b]	45
Σχήμα 2.7 : Αναπαράσταση Πολιτικών στο DEN-ng [Strassner09b].....	46
Σχήμα 2.8 : Σχέσεις Κλάσεων στο SID [TMFb].....	48
Σχήμα 3.1 : Διάγραμμα Κλάσεων της Οντολογίας Πόρων	56
Σχήμα 3.2 : Υπηρεσίες και Συστατικά Κόμβων σε Federated Slice.....	57
Σχήμα 3.3 : Οντολογία Παρακολούθησης (Monitoring Ontology)	58
Σχήμα 3.4 : Σχέσεις και Ιδιότητες της Monitoring Ontology.....	59
Σχήμα 3.5 : Διάγραμμα Κλάσεων του Πληροφοριακού Μοντέλου	61
Σχήμα 3.6 : Σχέσεις μεταξύ Κλάσεων για τον Ορισμό Authorization Policies	68
Σχήμα 3.7 : Σχέσεις μεταξύ Κλάσεων για τον Ορισμό Obligation policies	68
Σχήμα 3.8 : Σχέσεις μεταξύ Κλάσεων για τον ορισμό Delegation Policies	69
Σχήμα 3.9 : Δημιουργία Obligation Policy με Γραφικό Περιβάλλον	70
Σχήμα 3.10 : Δημιουργία Authorization Policy με Γραφικό Περιβάλλον	71
Σχήμα 4.1 : Policy-based Federation Cell	77
Σχήμα 4.2: Αλληλεπιδράσεις Υπηρεσιών μεταξύ Περιοχών (inter-domain).....	81
Σχήμα 4.3 : Διάγραμμα Ροής για το <i>resource-failure</i> Obligation Policy	84
Σχήμα 4.4 : Υψηλού επιπέδου περιγραφή των πολιτικών αντιπροσώπευσης	88
Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα ακολουθίας για την πολιτική <i>provideRemoteResources</i>	91
Σχήμα 4.6 : Αριθμός δεσμευμένων VMs ανά Εικονικοποιημένη Υποδομή.....	95
Σχήμα 4.7 : Οι βασικές κλάσεις της Οντολογίας Πολιτικών	96
Σχήμα 4.8 : Δεντρική Δομή του Μηχανισμού Πολιτικών.....	102
Σχήμα 4.9 : Εσωτερική Αρχιτεκτονική της Υπηρεσίας Πολιτικών	105
Σχήμα 4.10 : Απαιτούμενος χρόνος για ανανέωση των Πόρων	107
Σχήμα 5.1 : Η αρχιτεκτονική της προτεινόμενης λύσης με χρήση πολιτικών	114
Σχήμα 5.2 : Οντολογία Πολιτικών για διαχείριση OpenFlow πόρων.	115
Σχήμα 5.3 : Σχέσεις μεταξύ κλάσεων	115
Σχήμα 5.4 : Πειραματική Διάταξη	122
Σχήμα 5.5 : Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε κάθε σύνδεση	123
Σχήμα 5.6 : Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για κάθε χρήστη.....	124
Σχήμα 6.1 : Ομοσπονδιοποίηση μεταξύ Περιοχών	129
Σχήμα 6.2 : Βήματα Δέσμευσης Πόρων	131
Σχήμα 6.3 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain – Ανεξάρτητα Domains.....	141
Σχήμα 6.4 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Πλήρης Ομοσπονδιοποίηση	142

Σχήμα 6.5 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 1	144
Σχήμα 6.6: Συνολικές οφειλές ανά Domain - Σενάριο 1	144
Σχήμα 6.7 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 2	145
Σχήμα 6.8 : Συνολικές οφειλές ανά Domain - Σενάριο 2	145
Σχήμα 6.9 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 1	146
Σχήμα 6.10 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 2	147

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Καταγραφή_Κώδικα 4.1.....	83
Πίνακας 2 : Καταγραφή_Κώδικα 4.2.....	85
Πίνακας 3 : Καταγραφή_Κώδικα 4.3.....	87
Πίνακας 4 : Καταγραφή_Κώδικα 4.4.....	90
Πίνακας 5 : Καταγραφή_Κώδικα 4.5.....	92
Πίνακας 6 : Καταγραφή_Κώδικα 4.6.....	98
Πίνακας 7 : Καταγραφή_Κώδικα 6.1.....	133
Πίνακας 8 : Καταγραφή_Κώδικα 6.2.....	134
Πίνακας 9: Δυνατότητες Παροχής Υπηρεσιών ανά Περιοχή	140
Πίνακας 10 : Σενάρια Ομοσπονδιοποίησης.....	143

1 Εισαγωγή

Οι Εικονικοποιημένες Υποδομές (Virtualized Infrastructures) παρέχουν δυνατότητες πειραματισμού για σκοπούς έρευνας στη δημιουργία νέων πρωτοκόλλων, αρχιτεκτονικών και εφαρμογών για το Internet του μέλλοντος. Οι ερευνητές επιθυμούν να λαμβάνουν από τους παρόχους Εικονικοποιημένων Υποδομών, ένα σύνολο από ετερογενείς πόρους, οι οποίοι μπορεί να είναι υπολογιστικοί πόροι, μονάδες αποθήκευσης, ασύρματοι και ενσύρματοι κόμβοι, δρομολογητές ή άλλοι δικτυακοί πόροι ανάλογα με τις ανάγκες τους για πειραματισμό σε κάθε περίπτωση. Η ομοσπονδιοποίηση των Εικονικοποιημένων Υποδομών προέκυψε σαν ανάγκη για επέκταση του πειραματικού περιβάλλοντος γεωγραφικά, ως προς τον αριθμό των διαθέσιμων πόρων και ως προς τον τύπο των προσφερόμενων πόρων και υπηρεσιών. Πέρα από αυτό η ομοσπονδιοποίηση, δημιουργεί ένα νέο πλαίσιο δικτύωσης και παροχής υπηρεσιών οδηγώντας σε αυτό που ονομάζεται το Internet του μέλλοντος. Υπό αυτή την έννοια δεν απευθύνεται πλέον μόνο σε ερευνητές που επιθυμούν να πειραματιστούν με νέα πρωτόκολλα σε μεγάλη κλίμακα αλλά απευθύνεται σε όσους επιθυμούν να αξιοποιήσουν με ενιαίο τρόπο τους πόρους και τις υπηρεσίες από πολλαπλούς παρόχους. Οι υπάρχουσες Εικονικοποιημένες Υποδομές έχουν αναπτυχθεί με ανεξάρτητες πρωτοβουλίες ενώ η κάθε μια ασχολείται με συγκεκριμένους τύπους φυσικών και εικονικοποιημένων πόρων κάτι που καθιστά την ομοσπονδοποίησή τους μια σημαντική πρόκληση.

Είναι σημαντική η ύπαρξη ξεκάθαρων πολιτικών ομοσπονδιοποίησης, καθώς η κάθε υποδομή έχει τις δικές της πολιτικές διαχείρισης και ενδιαφέρεται για την ικανοποίηση των δικών της στόχων. Είναι επίσης σημαντικό κάθε πάροχος υποδομών να γνωρίζει και να ελέγχει το τι ανταλλάσσεται μεταξύ των υποδομών, καθώς και ποιοι πόροι παρέχονται σε χρήστες άλλων υποδομών. Οι Συμφωνίες Επιπέδου Παροχής Υπηρεσιών (Service Level Agreement - SLA) μεταξύ των παρόχων (περιοχών/domains) πρέπει να είναι δίκαιες και ξεκάθαρες.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής προτείνεται ένα Πληροφοριακό Μοντέλο (Information Model - IM) το οποίο περιγράφει σε υψηλό επίπεδο τους παρεχόμενους από τις διάφορες υποδομές πόρους και υπηρεσίες όπως και τις πολιτικές για τη διαχείριση τους. Το Μοντέλο περιλαμβάνει τις σχέσεις που συνδέουν τους πόρους και τις υπηρεσίες με τις πολιτικές. Μέσω του Μοντέλου και με τη χρήση των πολιτικών παρέχεται η δυνατότητα ομογενοποιημένης διαχείρισης των ετερογενών υποδομών αλλά και η ομοσπονδοποίησή τους.

Προτείνεται επίσης μια αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί πολιτικές για τη διαχείριση Εικονικοποιημένων Υποδομών αλλά και για την εφαρμογή και διαχείριση ομοσπονδίας ετερογενών υποδομών. Οι προτεινόμενες πολιτικές βασίζονται σε πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization Policies) και σε πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation Policies) που αποτελούν τους δύο βασικούς τύπους πολιτικών. Επίσης προτείνονται πολιτικές Προσβασιμότητας με ανάθεση ρόλων (Role-based Access Control policies) που αποτελούν ειδικό τύπο πολιτικών Υποχρέωσης καθώς και πολιτικές Αντιπροσώπευσης (Delegation policies) οι οποίες συνδυάζουν τους δύο βασικούς τύπους πολιτικών και αποτελούν μέρος της συνεισφοράς της παρούσας διατριβής.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής γίνεται επίσης μια επέκταση της προτεινόμενης λύσης και εφαρμογής της σε δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό (Software-Defined Networks) για διαχείριση πόρων OpenFlow και υπηρεσιών Network Function Virtualization (NFV), με χρήση πολιτικών. Οι πολιτικές αξιοποιούνται επίσης για τον έλεγχο του κύκλου ζωής των VNFs καθώς και για την ενορχήστρωση των υπηρεσιών.

Η γενικότητα της προτεινόμενης λύσης ομοσπονδιοποίησης με χρήση πολιτικών καταδεικνύεται με την εφαρμογή της σε υποδομές υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Οι πάροχοι αυτού του τύπου υπηρεσιών μπορούν να έχουν πολλαπλά οφέλη από την ομοσπονδιοποίηση μεταξύ τους, ενώ η χρήση πολιτικών για την επίτευξή της δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα. Γίνεται προσομοίωση σεναρίων ομοσπονδίας στη βάση συγκεκριμένων πολιτικών που εφαρμόζονται καταδεικνύοντας έτσι την επίδραση και τη σημασία τους.

Η διατριβή διαρθρώνεται σε επιμέρους ενότητες ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 επιχειρείται μια ανασκόπηση της παρούσας κατάστασης σε σχέση με τη διαχείριση δικτύων νέας γενιάς. Παρουσιάζεται η έννοια της εικονικοποίησης και της εικονικοποιημένης υποδομής, των δικτύων που ορίζονται με λογισμικό, των υποδομών υπολογιστικού νέφους καθώς και οι υφιστάμενες προσπάθειες για την ομοσπονδιοποίηση. Επίσης γίνεται παρουσίαση της διαχείρισης συστημάτων με βάση πολιτικές καθώς και περιγραφή της έννοιας του Πληροφοριακού Μοντέλου με συγκεκριμένα παραδείγματα. Τέλος γίνεται ανάλυση του ερευνητικού στόχου της παρούσας διατριβής.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το Πληροφοριακό Μοντέλο που αναπτύχθηκε για την περιγραφή των πολιτικών. Αναλύονται οι βασικές κλάσεις του Μοντέλου καθώς και οι βασικές σχέσεις/ιδιότητες που τις συνδέουν. Επίσης, γίνεται παρουσίαση του τρόπου αξιοποίησης του Μοντέλου για τη δημιουργία πολιτικών διαχείρισης. Τέλος, γίνεται παρουσίαση της συμβολής του Μοντέλου σε σύγκριση με άλλα υφιστάμενα μοντέλα.
- Στο Κεφάλαιο 4 προτείνεται μια αρχιτεκτονική για την ομοσπονδιοποίηση των Εικονικοποιημένων Υποδομών. Η αρχιτεκτονική αυτή δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης πολιτικών διαχείρισης για την διασύνδεση τους. Παρέχονται συγκεκριμένα παραδείγματα για όλους τους προτεινόμενους τύπους πολιτικών ενώ γίνεται αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης που εφαρμόστηκε πιλοτικά σε Ευρωπαϊκή πλατφόρμα για το Internet του μέλλοντος.
- Στο Κεφάλαιο 5 χρησιμοποιούνται πολιτικές για τη διαχείριση Δικτύων που Ορίζονται με Λογισμικό (Software Defined Networks - SDN). Συγκεκριμένα η προτεινόμενη λύση αξιοποιεί πολιτικές για τον έλεγχο δικτύων αυτού του τύπου σε πολλαπλά επίπεδα. Επιτυγχάνεται η διαχείριση υπηρεσιών τύπου Network Functions Virtualization (NFV) σε Software Defined Networks (SDN).
- Στο Κεφάλαιο 6 προτείνεται η χρήση πολιτικών για την επίτευξη ομοσπονδίας μεταξύ υποδομών υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Παρουσιάζονται πολιτικές που μπορούν να αξιοποιηθούν για την ομοσπονδιοποίηση καθώς και

αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοιώσεων που καταδεικνύουν την χρησιμότητα της ομοσπονδιοποίησης καθώς και τα οφέλη από τους διαφορετικούς τρόπους που μπορεί να επιτευχθεί αυτό στη βάση πολιτικών.

- Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Διατριβής και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα ως συνέχεια της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

2 Διαχείριση Δικτύων Νέας Γενιάς (Future Internet)

Το υφιστάμενο Internet, που σχεδιάστηκε πριν περισσότερο από 40 χρόνια, παρουσιάζει σήμερα σημαντικές προκλήσεις σε πολλαπλούς τομείς. Οι νέες απαιτήσεις που προκύπτουν αναφορικά με την ασφάλεια, την κινητικότητα των κόμβων καθώς και τις υπηρεσίες που προσφέρονται μέσω του Internet είναι πλέον δύσκολο να καλυφθούν με στοχευμένες διορθώσεις επί των υφιστάμενων πρωτοκόλλων [Pan11]. Υπάρχει η ανάγκη για μια νέα αρχιτεκτονική σχεδίαση που θα αλλάξει ριζικά το Internet ικανοποιώντας τις νέες απαιτήσεις της σύγχρονης δικτύωσης [Turner05]. Η επανασχεδίαση όμως του Internet ή έστω ενδεχόμενες αλλαγές/βελτιώσεις στα βασικά πρωτόκολλα του εμπεριέχει σημαντικό ρίσκο καθώς αυτά πριν εφαρμοστούν θα πρέπει να δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες σε πειραματικές υποδομές που να προσομοιάζουν, σε μέγεθος και έκταση, το υφιστάμενο Internet. Τα προηγούμενα χρόνια η απουσία τέτοιων υποδομών είχε σαν αποτέλεσμα, υπό το φόβο δημιουργίας προβλημάτων στο υφιστάμενο Internet, να μην εφαρμόζονται στην πράξη οι προτεινόμενες νέες αρχιτεκτονικές για το Internet παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσίαζαν [Roberts09].

Έχουν γίνει παγκόσμιες προσπάθειες στην Αμερική από το Global Environment for Network Innovations (GENI)¹ [Berman14], [McGeer16] και στην Ευρώπη από το Future Internet Research and Experimentation (FIRE)² [Gavras07] για τη διερεύνηση και πειραματική επιβεβαίωση νεοφυών και επαναστατικών ιδεών για νέα δικτυακά πρότυπα μέσω της δημιουργίας πειραματικών υποδομών. Αυτού του τύπου οι υποδομές αξιοποιούν τεχνικές εικονικοποίησης [Anderson05], [Chowdhury10] για την παροχή εικονικοποιημένων τμημάτων του φυσικού εξοπλισμού σε πολλαπλούς χρήστες για την ταυτόχρονη χρήση τους από πολλαπλούς χρήστες. Με αυτό τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα στους ερευνητές να εκτελούν τα πειράματά τους σε συνθήκες που προσομοιάζουν σε μεγάλο βαθμό το πραγματικό Internet.

Η διαχείριση αυτού του είδους υποδομών απαιτεί εξειδικευμένα πλαίσια διαχείρισης που προσφέρουν δυνατότητα ελέγχου στους παρεχόμενους πόρους και υπηρεσίες,

¹ <http://www.geni.net>

² <http://wiki.ict-fire.eu>

δυνατότητες παρακολούθησης ορθής λειτουργίας και ποιότητας υπηρεσίας, καθώς και δυνατότητες εφαρμογής πολιτικών διαχείρισης [Magedanz09]. Όσον αφορά τις πειραματικές υποδομές υπάρχει η τάση ομοσπονδιοποίησης τους για τη δημιουργία δυναμικών πειραματικών υποδομών μεγαλύτερης έκτασης [Auge14]. Οι ομόσπονδες πειραματικές υποδομές που προκύπτουν παρέχουν διευρυμένες δυνατότητες ως προς το φάσμα των διαθέσιμων πόρων, αλλά και ως προς την κλίμακα στην οποία εκτείνονται χαράζοντας τη διαδρομή προς το Internet του μέλλοντος.

2.1 Εικονικοποιημένες Υποδομές (Virtualized Infrastructures)

Η εικονικοποίηση ξεκίνησε από τα υπολογιστικά συστήματα της δεκαετίας του 1960 σαν μέθοδος για διαμοιρασμό της μνήμης και των υπολογιστικών πόρων ανάμεσα σε πολλαπλές εφαρμογές που εκτελούνταν σε έναν κεντρικό υπολογιστή [Corbató62], [Creasy81]. Ο όρος επεκτάθηκε στη συνέχεια με την έννοια της εικονικοποίησης υλικού (hardware virtualization) να αναφέρεται στη δημιουργία εικονικών υπολογιστών που λειτουργούν σαν ανεξάρτητοι υπολογιστές πάνω σε ένα φυσικό μηχάνημα και έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν ακόμα και ξεχωριστά λειτουργικά συστήματα. Το φυσικό μηχάνημα είναι ο οικοδεσπότης (host machine) και τα εικονικά μηχανήματα είναι τα φιλοξενούμενα (guest machines). Στα δίκτυα νέας γενιάς η εικονικοποίηση πλέον εφαρμόζεται σε πολύ περισσότερους τύπους υπολογιστικών και δικτυακών συσκευών πέρα από τους υπολογιστές. Ουσιαστικά η τεχνική αυτή εισάγει ένα επιπλέον επίπεδο αφαιρετικότητας στους πόρους, ξεφεύγοντας από συγκεκριμένους κατασκευαστές και λογισμικά. Επίσης η δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών λογικών στιγμιότυπων της κάθε φυσικής συσκευής δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας δεξαμενών από πόρους οι οποίοι πλέον μπορούν να διατίθενται στους πελάτες με βάση τις ανάγκες τους. Υπό αυτή την έννοια η εικονικοποίηση των πόρων συμβάλλει στον καλύτερο διαμοιρασμό τους και στην καλύτερη αξιοποίησή τους [Wang13].

Το PlanetLab³ [Chun03] είναι μια πλατφόρμα εξομοίωσης που παρέχει δυνατότητες για ανάπτυξη και πειραματισμό σε νεοφυή πρωτόκολλα και εφαρμογές. Χρησιμοποιεί εργαλεία εικονικοποίησης (Hardware Virtualization) για τη δημιουργία πολλαπλών εικονικοποιημένων υπολογιστών - κόμβων (Virtual Nodes) σε κάθε φυσικό κόμβο, τα οποία παραχωρούνται σε διαφορετικούς χρήστες υπό τη μορφή ενός καλάθιού από πόρους (basket of resources - slice) [Peterson06a]. Το PlanetLab αποτελείται από περισσότερους από χίλιους κόμβους κατανομημένους ανά το παγκόσμιο σε περισσότερα από 500 σημεία. Οι χρήστες του μπορούν να επιλέγουν κόμβους σε όποια γεωγραφικά σημεία επιθυμούν και να εκτελούν τα πειράματά τους [Peterson06b]. Οι επικοινωνίες μεταξύ των απομακρυσμένων σημείων γίνονται μέσω Internet καθώς το PlanetLab δεν

³ <http://www.planet-lab.org/>

υλοποιεί διασυνδέσεις σε φυσικό επίπεδο. Το PlanetLab αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκαν αρκετές μεταγενέστερες υποδομές ενώ αξιοποιήθηκε από μια πληθώρα ερευνητικών έργων. Το Protogeni⁴ αναπτύσσει και διανέμει προγραμματιζόμενα δίκτυα και υποδομές για ανάπτυξη πρωτοτύπων, καθώς και εργαλεία για ανάπτυξη πλαισίων ελέγχου. Παρέχει τη δυνατότητα σε ερευνητές να χρησιμοποιούν τα εργαλεία αυτά για να αναπτύσσουν δικές τους εγκαταστάσεις με εικονικοποιημένες υποδομές τύπου PlanetLab που μπορούν να εκτελούνται σε δικές τους ανεξάρτητες φυσικές υποδομές [Li13]. Η Open Resource Control Architecture (ORCA) [Chase07] είναι μια επεκτάσιμη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και διαχείριση υποδομών δικτύων υπολογιστών. Εφαρμόστηκε στη διαχείριση της υποδομής με πολύ-επίπεδη δικτυακή αρχιτεκτονική Breakable Experimental Network (BEN) [Chase16] που αναπτύχθηκε από το RENCi⁵. Το έργο GEYSERS⁶, παρέχει μία δικτυακή αρχιτεκτονική ικανή να παρέχει εικονικοποιημένες υποδομές που αποτελούνται από οπτικά δίκτυα και υπολογιστικούς κόμβους [Garcia-Espin12], [Belter14]. Το PL-VINI⁷ [Bavier06] είναι μια ανεξάρτητη υποδομή τύπου PlanetLab που επιτρέπει τον πλήρη διαχωρισμό σε δικτυακό επίπεδο ανάμεσα στους εικονικοποιημένους κόμβους που παρέχονται από κάθε φυσικό κόμβο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω παροχής πρόσβασης σε κάθε εικονικοποιημένο κόμβο προς τη στοίβα πρωτοκόλλων του πυρήνα του λειτουργικού. Έτσι η υποδομή PL-VINI προσφέρεται για πειραματισμό σε πρωτόκολλα δρομολόγησης καθώς ο κάθε χρήστης της υποδομής μπορεί να ρυθμίσει πίνακες δρομολόγησης και να ορίζει τούνελ μεταξύ κόμβων.

Το ερευνητικό έργο FEDERICA⁸ υλοποίησε μια πειραματική δικτυακή υποδομή για πειραματισμό σε νέες δικτυακές τεχνολογίες [Campanella14]. Λόγω του ότι περιλαμβάνει και φυσικές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων και εικονικοποίηση σε δρομολογητές και μεταγωγείς, παρέχει δυνατότητες πειραματισμού σε όλα τα δικτυακά επίπεδα επιτρέποντας την εκτέλεση πειραμάτων και σε πρωτόκολλα δρομολόγησης.

⁴ <http://www.protogeni.net/>

⁵ <http://renci.org/>

⁶ <http://www.geysers.eu/>

⁷ <http://vini-veritas.net/>

⁸ <http://www.fp7-federica.eu/>

Σε αντίστοιχες δράσεις που προέρχονται από τον Καναδά το δίκτυο του Smart Applications on Virtual Infrastructure (SAVI⁹) ασχολείται με τη μελέτη της σχεδίαση υποδομών που διευκολύνουν την ανάπτυξη εφαρμογών που αξιοποιούν εικονικοποιημένους πόρους [Kang13]. Η μεγαλύτερη έμφαση γίνεται σε διαχείριση δικτύων που ορίζονται από λογισμικό [Leon-Garcia16].

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής μελετήθηκαν οι υφιστάμενες εικονικοποιημένες υποδομές και προτάθηκε η αξιοποίηση ενός μηχανισμού πολιτικών για τη διαχείρισή τους. Η προτεινόμενη λύση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς η χρήση πολιτικών διευκολύνει και απλοποιεί τη διαχείριση ως προς τον έλεγχο πρόσβασης προς τους διαθέσιμους πόρους εισάγοντας την έννοια των διαφορετικών κλάσεων χρηστών με ξεχωριστές προτεραιότητες. Επίσης, η χρησιμοποίηση πολιτικών Υποχρέωσης (Obligation policies) παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης ανταπόκρισης στις μεταβολές του δυναμικού συστήματος των εικονικοποιημένων υποδομών. Το γεγονός ότι η περιγραφή των πολιτικών γίνεται με ενιαίο τρόπο, ανεξάρτητα από την υποδομή στην οποία εφαρμόζονται, επιτρέπει την αξιοποίησή τους και στην ομοσπονδιοποίηση των υποδομών.

⁹ <http://www.savinetwork.ca/>

2.2 Ομοσπονδιοποίηση Εικονικοποιημένων Υποδομών

Στα αρχικά τους στάδια οι εικονικοποιημένες/πειραματικές υποδομές δημιουργήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους με σκοπό η κάθε υποδομή να είναι αυτάρκης και αυτόνομη ικανοποιώντας τις ανάγκες των ερευνητών που τις αξιοποιούσαν. Στην πορεία διαφάνηκε ότι αυτό το μοντέλο ανάπτυξης δεν ικανοποιούσε τους ερευνητές που παρουσίαζαν ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες για εκτέλεση πειραμάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα ως προς τον αριθμό των κόμβων που συμμετέχουν αλλά και σε ότι αφορά τη γεωγραφική τους κατανομή [Ricci12].

Στο πλαίσιο της διεύρυνσης της έκτασης των υποδομών γεωγραφικά, σε αριθμό αλλά και σε ποικιλία τύπων παρεχόμενων πόρων και υπηρεσιών, έγιναν διάφορα εγχειρήματα για ομοσπονδιοποίηση υποδομών. Μια σημαντική προσπάθεια έγινε κάτω από την ερευνητική ομπρέλα του GENI στην Αμερική και είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής Slice-based Federation Architecture (SFA) [Peterson10] που υιοθετήθηκε και από το OneLab¹⁰ στην Ευρώπη. Το SFA χρησιμοποιεί το Resource Specification (RSpec¹¹) για να μοντελοποιήσει τους πόρους ενώ, η ομοσπονδιοποίηση των υποδομών γίνεται εφικτή μέσω του συγχρονισμού των μητρώων (Registries). Κατάλληλες ανταλλαγές δεδομένων γίνονται μεταξύ των Slice Managers (SMs) και Aggregate Managers (AMs) που επικοινωνούν με τους Component Managers (CMs) των υπό ομοσπονδιοποίηση υποδομών. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.1 για την περίπτωση του PlanetLab Central (PLC) με το PlanetLab Europe (PLE). Η φύση του RSpec το οποίο είναι ένα XML¹² αρχείο [Bray98] δίνει τη δυνατότητα εύκολης επέκτασης με νέους τύπους πόρων που μπορούν να περιγραφούν με ένα νέο εκτεταμένο αρχείο.

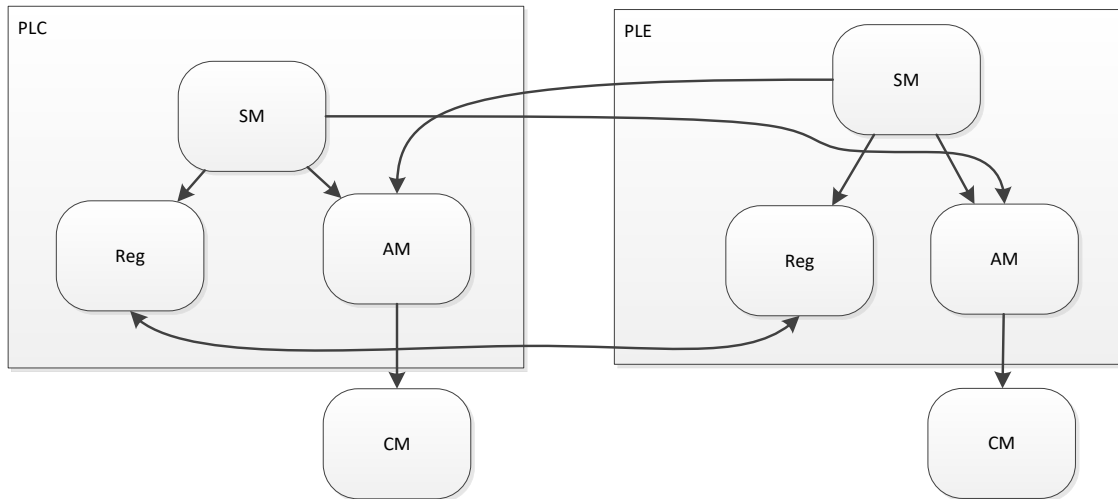
Κατά την ομοσπονδιοποίηση πρέπει να γίνεται χρήση ενός κοινού RSpec ούτως ώστε να υπάρχει σωστή ανταλλαγή πληροφοριών σε σχέση με τους διαθέσιμους και δεσμευμένους πόρους. Η χρήση Πληροφοριακού Μοντέλου αντί του XML, θα μπορούσε να δώσει ένα πολύ πιο φιλικό και ευέλικτο περιβάλλον ομοσπονδιοποίησης για ετερογενείς υποδομές. Τα πληροφορικά μοντέλα περιγράφονται στην επόμενη ενότητα,

¹⁰ <https://onelab.eu/>

¹¹ <http://groups.geni.net/geni/wiki/GENIExperimenter/RSpecs>

¹² <https://www.w3.org/XML/>

ενώ στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί ένα Πληροφοριακό Μοντέλο, το οποίο αξιοποιείται στο πλαίσιο της ομοσπονδιοποίησης.



Σχήμα 2.1 : Slice-based Federation Architecture (SFA)

Όπως αναλύθηκε πιο πάνω η ανταλλαγή των μητρώων μεταξύ ομόσπονδων υποδομών μέσω SFA παρέχει πλήρη συνένωση μεταξύ τους με αποτέλεσμα οι χρήστες των υποδομών να μπορούν να λαμβάνουν πόρους από ολόκληρη την ομοσπονδία. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, υπάρχει η ανάγκη εφαρμογής πολιτικών για τις μεταξύ τους σχέσεις. Τα sfatables [Bhatia11] είναι ένας μηχανισμός πολιτικών που μοιάζει με τείχος προστασίας (firewall) τύπου iptables και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό και την εκτέλεση πολιτικών μεταξύ υποδομών που είναι ομοσπονδιοποιημένες μέσω SFA. Χρησιμοποιεί τις περιγραφές του RSpec και τα ονόματα σε μορφή ανάγνωσης (Human Readable Names-HRNs) των πόρων όπως αυτά περιγράφονται στο SFA και είναι υλοποιημένα στις υποδομές για να καθορίσει πολιτικές ελέγχου πρόσβασης. Οι πολιτικές είναι ορισμένες σε μορφή κανόνων που περιλαμβάνουν τις εντολές (π.χ. προσθήκη-add), την αλυσίδα στην οποία εφαρμόζονται (π.χ. εισερχόμενη-incoming chain), την μέθοδο ταιριάσματος (π.χ. HRN) και το στόχο (π.χ. αποδοχή - accept). Οι δυνατότητές τους είναι περιορισμένες και μπορούν κυρίως να χρησιμεύσουν για την εφαρμογή κάποιων γενικών κανόνων επίτρεψης και απαγόρευσης.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται αναλυτική παρουσίαση της υφιστάμενης κατάστασης σε σχέση με τη διαχείριση συστημάτων με χρήση πολιτικών. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε μια υπηρεσία πολιτικών η οποία, πέραν των άλλων χρήσεων, αξιοποιεί Πολιτικές Εξουσιοδότησης και Πολιτικές Υποχρέωσης, για τον καθορισμό των σχέσεων μεταξύ των υποδομών. Η Υπηρεσία Πολιτικών παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Σε άλλες προσπάθειες που έγιναν για ομοσπονδιοποίηση, η υποδομή ORCA-BEN¹³ αξιοποιεί το SFA προσφέροντας μια στοιχειώδη μορφή ομοσπονδιοποίησης μεταξύ υποδομών που είναι συμβατές με το SFA. Αυτό επιτυγχάνεται (1) αξιοποιώντας τα ενοποιημένα μητρώα που παρέχονται μέσω του SFA και (2) χρησιμοποιώντας κάποιες μορφές ενδιάμεσους (brokers) οι οποίοι αναλαμβάνουν την δέσμευση πόρων στις απομακρυσμένες υποδομές [Chase16].

Το πλαίσιο SeRViTR [Ata14], [Xing12] υλοποιεί μια αρχιτεκτονική που επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών εικονικοποιημένων περιοχών οι οποίες μπορούν να γίνουν μέλη ομοσπονδιών με βάση πολιτικές εξουσιοδότησης καθώς και ένα σύστημα δημιουργίας εμπιστοσύνης μεταξύ τους. Η εφαρμογή των πολιτικών γίνεται μέσω κανόνων OpenFlow[McKeown08] που ελέγχουν τη δρομολόγηση μεταξύ των ομόσπονδων domains.

Το Federation Scenario Toolkit (FSToolkit¹⁴) [Tranoris12], παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας, πλούσιων σε πόρους τοπολογιών, με τη χρήση σεναρίων ομοσπονδιοποίησης, όπου ορίζονται υπηρεσίες και πόροι μαζί με τις ρυθμίσεις τους και προσφέρονται από ένα σύνολο οργανισμών. Ο χρήστης καλείται να περιγράψει το πείραμά του με τη γλώσσα FSDL¹⁵ η οποία τον βοηθά να καθορίσει τους απαιτούμενους πόρους με τρόπο ανεξάρτητο από συγκεκριμένους παρόχους. Επίσης, το FSToolkit παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές ταυτότητες εκ μέρους του χρήστη ανάλογα με το από που θα ζητηθούν οι πόροι. Τέλος, αναλαμβάνει την επικοινωνία με τις διεπαφές των διαφόρων υποδομών.

¹³ <http://groups.geni.net/geni/wiki/ORCABEN>

¹⁴ <http://nam.ece.upatras.gr/fstoolkit/trac/>

¹⁵ <http://nam.ece.upatras.gr/fstoolkit/trac/wiki/FSDL>

Το ερευνητικό έργο Fed4FIRE¹⁶ [Vandenberghe13], [Van Ooteghem14] επιχειρεί να συνάψει ομοσπονδία μεταξύ πειραματικών υποδομών που λειτουργούν υπό την ομπρέλα του FIRE στην Ευρώπη. Αυτές καλύπτουν ασύρματα δίκτυα, δίκτυα αισθητήρων, δίκτυα καθορισμένα από λογισμικό (Software Defined Networks - SDN) και υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Αρχιτεκτονικά, έγινε ένας διαχωρισμός των δραστηριοτήτων που εκτελούνται κατά τον κύκλο ζωής των πειραμάτων και έγινε μια προσπάθεια να δημιουργηθούν κάποιες διεπαφές που να επιτρέπουν κοινή συμπεριφορά στις διάφορες υποδομές κατά τα διάφορα στάδια της διαδικασίας. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα δημιουργίας εργαλείων τα οποία μπορούν να λειτουργούν με ενιαίο τρόπο σε διαφορετικές υποδομές.

Στην Ιαπωνία, στα πλαίσια του έργου AKARI¹⁷ που στηρίζεται σε κρατικές χορηγίες του National Institute of Information and Communications Technology (NICT¹⁸), για την ανάπτυξη αρχιτεκτονικών δικτύων νέας γενιάς, αναπτύχθηκε μια αρχιτεκτονική για ομοσπονδιοποίηση υπό διαφορετική προσέγγιση. Υπό τον τίτλο Federation-Less Federation [Kanada13], έγινε μια προσπάθεια ομοσπονδιοποίησης ετερογενών υποδομών που δεν υποστηρίζουν ομοσπονδιοποίηση, χωρίς μάλιστα να γίνεται καμιά παρέμβαση στην εσωτερική δομή της κάθε υποδομής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός κόμβου που δρα ως πληρεξούσιος (proxy server) για την κάθε υποδομή, αναλαμβάνοντας τις επικοινωνίες με την υποδομή καθώς και τους κατάλληλους μετασχηματισμούς των περιγραφών των πόρων, όπως επίσης και την παροχή λειτουργικότητας ομοσπονδιοποίησης. Με τον τρόπο αυτό η ομοσπονδιοποίηση επιτυγχάνεται ουσιαστικά σε ένα υψηλότερο επίπεδο χωρίς να γίνεται επέμβαση στις υποδομές που συμμετέχουν. Σαν μελέτη περίπτωσης έγινε ομοσπονδιοποίηση μεταξύ της υποδομής “VNode” [Nakao12] και του ProtoGENI [Kanada15].

Η ομοσπονδιοποίηση που προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής διαφοροποιείται αρκετά, σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις, καθώς αξιοποιεί τα πρότυπα της διαχείρισης με βάση πολιτικές, επιτυγχάνοντας μια πολύ πιο ξεκάθαρη συμφωνία και εφαρμογή της ομοσπονδίας. Ορίζονται και χρησιμοποιούνται πολιτικές οι

¹⁶ <http://www.fed4fire.eu/>

¹⁷ <http://akariproject.nict.go.jp/eng/overview.htm>

¹⁸ <https://www.nict.go.jp/en/>

οποίες καθορίζουν τις σχέσεις μεταξύ των περιοχών Επίπεδο Συμφωνίας Παροχής Υπηρεσιών (Service Level Agreements - SLAs). Η χρήση πολιτικών για την ομοσπονδιοποίηση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4.

2.3 Ομοσπονδιοποίηση σε Υποδομές Υπολογιστικού Νέφους

Το μοντέλο υπολογιστικού νέφους (cloud computing) επιτρέπει την κατά απαίτηση (on-demand) πρόσβαση σε μια κοινή δεξαμενή από πόρους (δικτυακούς, αποθηκευτικούς, επεξεργασίας) όπως υπηρεσίες και εφαρμογές. Αυτά πρέπει να μπορούν να παρέχονται άμεσα κατά την αίτησή τους και με ελάχιστο διαχειριστικό κόστος και αλληλεπιδράσεις με τον πάροχό τους [Mell11]. Οι υποδομές υπολογιστικού νέφους παρέχουν μεγάλη ευελιξία όσον αφορά την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών τους σε πόρους, αφού είναι πολύ εύκολη η προσθήκη επιπλέον δυναμικής όταν αυξάνεται η χρήση κάποιας υπηρεσίας [Armburst10]. Αυτό μπορεί να γίνει με ανάθεση περισσότερων πόρων σε μια υπηρεσία χωρίς την εγκατάσταση νέων μηχανημάτων κάτι που ήταν αναγκαίο σε περίπτωση ύπαρξης ανεξάρτητου κέντρου δεδομένων.

Σε τέτοια περιβάλλοντα υπάρχει η ανάγκη για ομοσπονδιοποίηση μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών στο υπολογιστικό νέφος [Villegas12]. Ένα σημαντικό όφελος που προκύπτει είναι η αύξηση του συνολικού αριθμού των διαθέσιμων πόρων που βοηθά στην αντιμετώπιση περιόδων με αυξημένη ζήτηση. Επίσης η ομοσπονδιοποίηση μεταξύ ετερογενών υποδομών δίνει τη δυνατότητα παροχής μεγαλύτερου εύρους υπηρεσιών που μπορεί να προσφέρονται σε συνδυασμό από διάφορους παρόχους. Για παράδειγμα μπορεί να γίνεται σε κάποιο πάροχο υπηρεσιών νέφους η αποθήκευση των δεδομένων και σε διαφορετικό πάροχο η επεξεργασία των δεδομένων με βάση τις ανάγκες που θέλει να καλύψει [Buyya10].

Η ομοσπονδιοποίηση απαιτεί τη χρήση ενός πληροφοριακού μοντέλου το οποίο να μπορεί να προσφέρει δυνατότητες αλληλεπίδρασης σε επίπεδο σημασιολογίας -μεταξύ των διαφορετικών υποδομών [Brennan14]. Πρέπει δηλαδή να μπορούν να υποβάλλονται σημασιολογικά ερωτήματα σε πολλαπλές υποδομές και να αξιολογούνται τα αποτελέσματα των ερωτημάτων με έναν ενιαίο τρόπο. Το Ευρωπαϊκό έργο Mosaic¹⁹ επιχείρησε την επίτευξη ομοσπονδιοποίησης μεταξύ υπολογιστικών περιβαλλόντων νέφους [Rak11], [Petcu13]. Δημιουργήθηκε μια οντολογία που περιγράφει με ενοποιημένο τρόπο τους προσφερόμενους πόρους και υπηρεσίες που μπορεί να

¹⁹ <http://www.mosaic-cloud.eu/>

προσφέρει το κάθε περιβάλλον [Moscato11]. Λήφθηκαν υπόψη περισσότερα από δέκα διαφορετικά περιβάλλοντα και έγινε προσπάθεια να παρέχονται οι υπηρεσίες με ενοποιημένο τρόπο.

Στο πλαίσιο των ερευνητικών πρωτοβουλιών του FIRE, και πιο συγκεκριμένα σαν μέρος του έργου Building Service Testbeds on FIRE (BonFIRE) [Hume12] υλοποιήθηκε ένα ομοσπονδιοποιημένο περιβάλλον με ενοποίηση πολλαπλών υπολογιστικών υποδομών που επιτρέπει τη διενέργεια πειραμάτων παρέχοντας στους ερευνητές πόρους από πολλαπλές υποδομές. Για την περιγραφή των πειραμάτων το BonFIRE χρησιμοποιεί και επεκτείνει το Open Virtualization Format (OVF)²⁰. Το OVF είναι ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε από το Distributed Management Task Force (DMTF²¹) για την περιγραφή εικονικοποιημένων πόρων. Η αρχιτεκτονική του συστήματος είναι κεντρικοποιημένη με την κατανομή των πόρων να γίνεται με τη χρήση κάποιου Μεσάζοντα (Broker) και το χρονοπρογραμματισμό για τη διάθεση των πόρων, να γίνεται μέσω ενός Διαχειριστή Πειραμάτων (Experiment Manager).

Έχουν προταθεί συνολικά αρκετές λύσεις για ομοσπονδοποιήσεις μεταξύ υπολογιστικών υποδομών νέφους [Grozev14]. Οι περισσότερες το επιτυγχάνουν με χρήση κάποιου Μεσάζοντα (Broker) που αναλαμβάνει τον κεντρικοποιημένο έλεγχο της ομοσπονδίας. Ο έλεγχος συνήθως περιλαμβάνει τη συγκέντρωση των διαθέσιμων πόρων από τους παρόχους και την κατανομή των αιτημάτων των χρηστών στη βάση κριτηρίων. Αυτού του είδους μηχανισμοί υλοποιήθηκαν στα έργα InterCloud [Buyga10] και Contrail[Carlini11]. Μια πιο ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι η δημιουργία ομοσπονδιών χωρίς ενδιάμεσους όπου η διασύνδεση των παρόχων γίνεται ανά ζεύγη με τη μορφή αρχιτεκτονικής ομότιμων μερών (Peer to Peer - P2P). Μία τέτοιου τύπου λύση προτάθηκε στα πλαίσια των έργων RESERVOIR [Rochwerger11] και OPTIMIS [Ferrer12] όπου δημιουργήθηκε μια εργαλειοθήκη (toolkit²²) που δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους υποδομών νέφους να διασυνδέονται στη βάση συμφωνιών SLAs. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας για τη δημιουργία των αιτούμενων υπηρεσιών και με αξιοποίηση στη συνέχεια μηχανισμού που αναλαμβάνει την αυτόματη ανάπτυξη (deployment) και

²⁰ <http://www.dmtf.org/standards/ovf>

²¹ <https://www.dmtf.org/>

²² <http://optimistoolkit.com/>

εκτέλεσή (execution) της. Λαμβάνει υπόψη κριτήρια που αφορούν πέρα από το οικονομικό κόστος, την εμπιστοσύνη που χτίζεται μεταξύ υποδομών, το ρίσκο που εμπεριέχεται αλλά και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους.

Σε μια πρόσφατη ερευνητική εργασία [Esposito13] παρουσιάζεται η αξιοποίηση ενός Μεσάζοντα (Broker) ο οποίος λαμβάνει από πολλαπλούς παρόχους τα αιτήματα με τις ανάγκες τους για δέσμευση πόρων σε απομακρυσμένους παρόχους καθώς και τις ανακοινώσεις τους σχετικά με τις δικές τους δυνατότητες για παροχή πόρων. Για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ τους ο Μεσάζοντας αξιοποιεί υπηρεσίες τύπου publish/subscribe όπου ο κάθε πάροχος μέσω του Μεσάζοντα μπορεί να ανακοινώνει και να ενημερώνεται για την κατάσταση των υπόλοιπων παρόχων. Στην εργασία [Petri14] γίνεται μια μελέτη μοντέλων και μηχανισμών για την ανταλλαγή πόρων στο πλαίσιο ενός ομόσπονδου υπολογιστικού νέφους. Η εφαρμογή των μοντέλων και μηχανισμών γίνεται στο CometCloud²³ το οποίο υποστηρίζει ομοσπονδιοποίηση υποδομών υπολογιστικού νέφους για επεξεργασία υψηλών επιδόσεων (High Performance Computing) [Parashar13].

²³ <http://nscac.rutgers.edu/CometCloud/>

2.4 Δίκτυα Οριζόμενα από Λογισμικό (SDN) και Υποδομές NFV

Τα Δίκτυα Οριζόμενα από Λογισμικό (Software-Defined Networks - SDN), όπως και οι Εικονικοποιημένες Υποδομές, ξεκίνησαν ως νέες αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις που είχαν σκοπό να προσφέρουν τη δυνατότητα στους ερευνητές να πειραματίζονται σε νεοφυή πρωτόκολλα OpenFlow και εφαρμογές σε μεγάλη κλίμακα [McKeown08]. Στα δίκτυα SDN υπάρχει ένας ξεκάθαρος διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο προώθησης [Hakiri14]. Ο έλεγχος των δικτυακών πόρων γίνεται προγραμματιστικά προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα να γίνονται παραμετροποιήσεις και διαχείριση των δικτύων με εφαρμογές λογισμικού [Farhady15]. Με την προσέγγιση αυτή οι δικτυακές συσκευές απλά εφαρμόζουν την προώθηση των πακέτων ενώ όλες οι αποφάσεις για τις προωθήσεις λαμβάνονται από κάποιον κεντρικοποιημένο ελεγκτή [Kreutz15]. Σε αντίθεση με την κλασική δρομολόγηση που βασίζεται στον προορισμό του κάθε πακέτου, οι αποφάσεις του ελεγκτή βασίζονται σε ροές (flows). Η κάθε ροή ορίζεται με ένα σύνολο από τιμές πεδίων που πρέπει να ταιριάσουν με συγκεκριμένα κριτήρια, καθώς και με τις ενέργειες που εκτελούνται για το χειρισμό της κάθε ροής. Έτσι τα πακέτα που αντιστοιχούν σε κάθε ροή αντιμετωπίζονται με ενιαίο τρόπο. Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα ενιαίου καθορισμού της συμπεριφοράς διαφορετικών τύπων δικτυακών συσκευών. Όλη η λογική του ελέγχου μεταφέρεται σε μία εξωτερική οντότητα, τον SDN ελεγκτή. Με αυτό τον τρόπο το δίκτυο γίνεται προγραμματίσιμο, βάση των εφαρμογών που μπορούν να εκτελούνται στον ελεγκτή.

Όπως εμφανίζεται στο [Haleplidis15], υπάρχουν δύο επίπεδα αφαίρεσης στα δίκτυα SDN. Έχουμε το επίπεδο ελέγχου μέσω του οποίου επιτυγχάνεται ο έλεγχος της υποδομής και ο τρόπος με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα και το επίπεδο διαχείρισης μέσω του οποίου γίνεται η παραμετροποίηση των δικτυακών συσκευών. Τα δύο επίπεδα προσφέρουν κατάλληλες διεπαφές (interfaces) προς τις συσκευές για την επίτευξη της επικοινωνίας. Υπό αυτές τις βασικές αρχιτεκτονικές αρχές των δικτύων SDN προέκυψαν αρκετά πρωτόκολλα για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ελεγκτών και των δικτυακών συσκευών. Ένα από τα βασικότερα πρωτόκολλα, που απασχόλησε την παρούσα διατριβή είναι το πρωτόκολλο OpenFlow (OF) [Pfaff12].

Το πρωτόκολλο OpenFlow προτάθηκε από το Πανεπιστήμιο Stanford στην Αμερική, ενώ στη συνέχεια εξελίχθηκε από τον Οργανισμό Open Networking Foundation (ONF²⁴). Το OpenFlow επιτρέπει την ύπαρξη πολλαπλών μεταγωγέων οι οποίοι ελέγχονται από έναν κεντροκοιμημένο Ελεγκτή (OpenFlow Controller). Ο κάθε μεταγωγέας διατηρεί έναν ή περισσότερους πίνακες ροών οι οποίοι καθορίζουν προς τα που πρέπει να γίνεται η προώθηση του κάθε πακέτου. Η προώθηση γίνεται με ταίριασμα του κάθε πακέτου σε κάποια από τις εγγραφές του πίνακα ροών η οποία καθορίζει και το χειρισμό του [Vaughan-Nichols11].

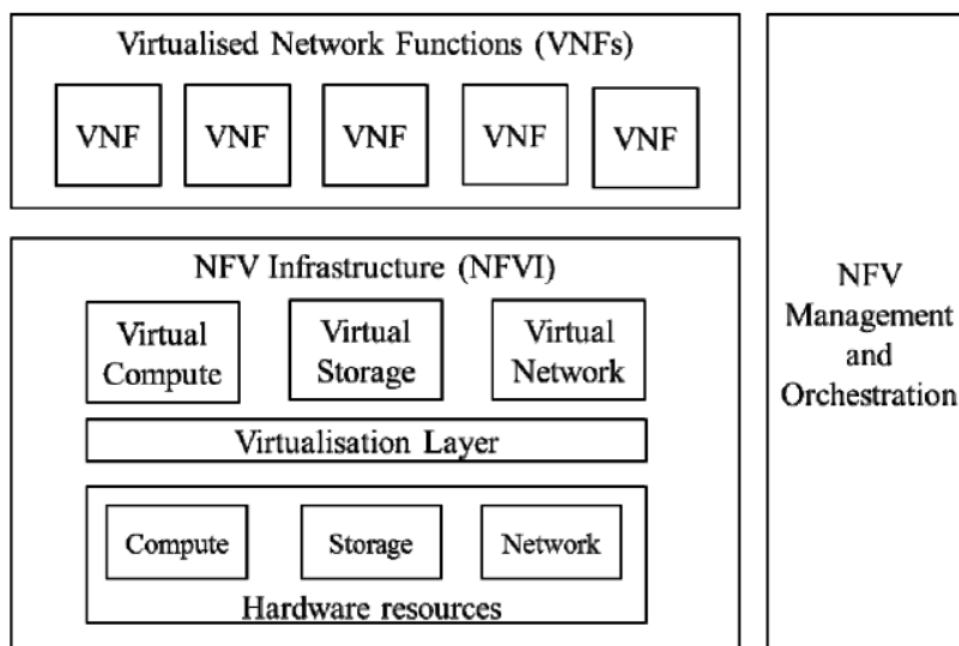
Οι νέες τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα δίκτυα υπολογιστών ανοίγουν το δρόμο για νέου τύπου υπηρεσίες μέσω Internet. Η εικονικοποίηση των δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization - NFV [Joshi16], [Mijumbi16a]) προσφέρει τη δυνατότητα διαχωρισμού των δικτυακών λειτουργιών από το φυσικό εξοπλισμό στον οποίο εκτελούνται. Παραδοσιακά οι δικτυακές λειτουργίες υλοποιούνταν συνδυάζοντας το υλικό και το λογισμικό. Με την εικονικοποίηση των δικτυακών λειτουργιών γίνεται δυνατός ο διαχωρισμός τους, αφού ουσιαστικά γίνεται η υλοποίησή τους με λογισμικό που μπορεί να εκτελείται σε εξυπηρετητές σε διαφορετικές τοποθεσίες, επιτυγχάνοντας καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών ETSI²⁵ εντοπίζει τους ακόλουθους τρεις τομείς στις υποδομές για NFV:

- Εικονικοποιημένες Δικτυακές Συναρτήσεις (Virtualized Network Functions – VNFs) [Riera14], [Addis15]. Αυτές αποτελούν τις τελικές υπηρεσίες που παρέχονται στους πελάτες. Πολλές φορές αποτελούν συνδυασμό από διάφορα NFV και έχουν τη δυνατότητα να εκτελούνται πάνω από την υποδομή NFVI.
- Υποδομή NFV (NFV Infrastructure NFVI) η οποία περιλαμβάνει μια ποικιλία από φυσικούς και εικονικοποιημένους πόρους.
- Διαχειριστής και ενορχηστρωτής για το NFV. Ο τομέας αυτός ασχολείται με τη διαχείριση του κύκλου ζωής των φυσικών και εικονικοποιημένων πόρων καθώς και των VNFs [Mijumbi16b].

²⁴ <https://www.opennetworking.org/>

²⁵ <http://www.etsi.org/>



Σχήμα 2.2 : Η Αρχιτεκτονική του Πλαισίου NFV [ETSI13a]

Το πλαίσιο NFV επιτρέπει δυναμική κατασκευή και διαχείριση των στιγμιότυπων VNF καθώς και των σχέσεων μεταξύ τους, σε σχέση με τους πόρους που αξιοποιούν. Ένα από τα χαρακτηριστικά που εφαρμόζονται στα VNFs είναι η χρήση γράφων προώθησης VNF Forwarding Graph (VNF-FG) μέσω των οποίων σχηματίζονται αλυσίδες από VNFs όπως περιγράφεται στο [ETSI13b]. Οι αλυσίδες αυτές συνδέουν μεταξύ τους τις διάφορες υπηρεσίες που προσφέρονται από το κάθε VNF ξεχωριστά με σκοπό τη δημιουργία και παροχή μιας πιο ολοκληρωμένης υπηρεσίας.

Οι τεχνολογίες των NFV και SDN παρόλο που είναι διαφορετικές και ανεξάρτητες μεταξύ τους, μπορούν να συνδυαστούν αρκετά καλά καθώς έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής γίνεται μια προσπάθεια συνδυασμού τους για την παροχή δικτυακών υπηρεσιών. Το κομμάτι της διαχείρισης και ενορχήστρωσης γίνεται με αξιοποίηση ενός μηχανισμού πολιτικών ο οποίος αναλαμβάνει την εκτέλεση των κατάλληλων ενεργειών με βάση τη δυναμική κατάσταση των πόρων.

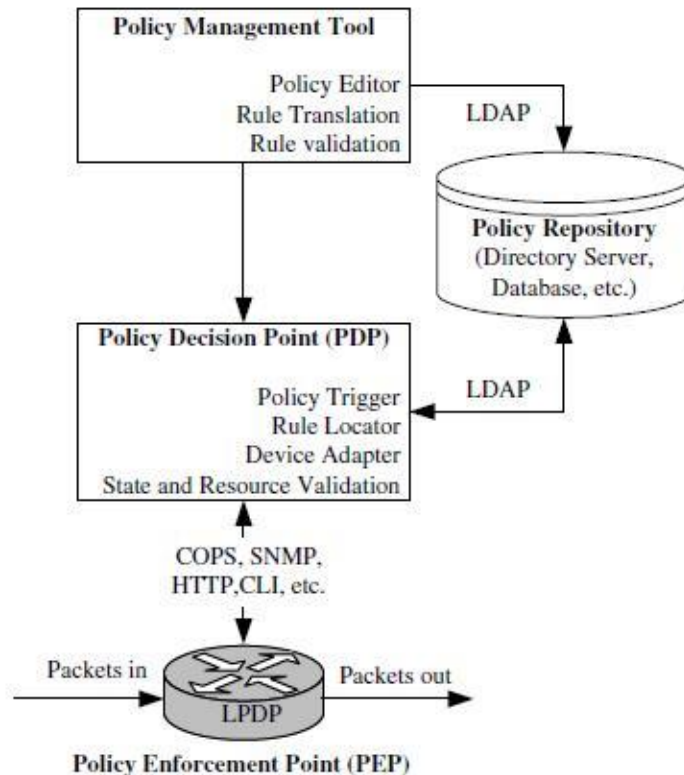
2.5 Διαχείριση Συστημάτων με Βάση Πολιτικές

Στα συστήματα όπου εφαρμόζεται διαχείριση με βάση πολιτικές (Policy based Management Systems - PBMS) οι πολιτικές χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις συμπεριφορές των υπό διαχείριση αντικειμένων μέσα στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον διαχείρισης [Strassner03]. Η χρήση πολιτικών απλοποιεί και αυτοματοποιεί τη διαχείριση των συστημάτων [Verma02], [Boutaba07]. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή πολιτικών που καθορίζουν τα δικαιώματα των χρηστών ενός συστήματος, αλλά και πολιτικών που εκτελούν διαχειριστικές ενέργειες βασισμένες στις μεταβολές του περιβάλλοντός τους [Agrawal08]. Μπορεί να ασκηθεί δυναμικός έλεγχος πάνω στις πολιτικές κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης λειτουργιών, ανακλώντας νέες διαχειριστικές αποφάσεις χωρίς την απαίτηση να γίνει επαναμεταγλώττιση των διαχειριστικών οντοτήτων [Han12].

Η ανάγκη για ύπαρξη διαχειριστικών συστημάτων με βάση πολιτικές ξεκίνησε με την ανάπτυξη της γλώσσας για περιγραφή πολιτικών δρομολόγησης RPSL [Alaettinoglu99] που έγινε το 1999 και επιτρέπει στους διαχειριστές των δικτύων να καθορίζουν πολιτικές δρομολόγησης σε πολλαπλά επίπεδα της ιεραρχίας του Internet. Το επόμενο βήμα είχε γίνει από την IETF²⁶ στο πλαίσιο των πολιτικών για δέσμευση δικτυακών πόρων με τη δημιουργία του πρωτοκόλλου Common Open Policy Service (COPS) [Boyle00]. Καθορίζει ένα απλό πρωτόκολλο για ερωτήματα και απαντήσεις για ανταλλαγή πληροφοριών για πολιτικές μεταξύ ενός εξυπηρετητή πολιτικών με το όνομα Σημείο Λήψης Πολιτικών Αποφάσεων (Policy Decision Point - PDP) και τους πελάτες του που ονομάζονταν σημεία εφαρμογής πολιτικών (Policy Enforcement Points - PEPs). Έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται και σαν πρωτόκολλο πολιτικών γενικού σκοπού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η δικτυακή συσκευή (π.χ. δρομολογητής) αποτελεί το σημείο εφαρμογής της πολιτικής (PEP), ενώ το υπολογιστικό σύστημα δρα σαν σημείο λήψεως πολιτικών αποφάσεων (PDP) με βάση τις πολιτικές και τη συνολική κατάσταση του υπό διαχείριση συστήματος. Το Εργαλείο Διαχείρισης Πολιτικών (Policy Management Tool - PMT) δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας των πολιτικών. Το PDP και το PMT επικοινωνούν μέσω LDAP

²⁶ <https://www.ietf.org>

[Zeilenga06] με το Αποθετήριο Πολιτικών (Policy Repository), το οποίο αποθηκεύει επικαιροποιημένους κανόνες πολιτικών. Η επεξεργασία πέρα από την εισαγωγή και διαγραφή πολιτικών περιλαμβάνει και την ανάλυση για εύρεση συγκρουόμενων πολιτικών ή ακόμα και μεταγλώττισή τους από διαφορετικές γλώσσες έκφρασής τους. Οι ορολογίες αυτές περιγράφονται με λεπτομέρεια στο RFC 3198 [Westerinen01] και αποτελούν τη βάση για τα συστήματα διαχείρισης με βάση τις πολιτικές [Verma00].



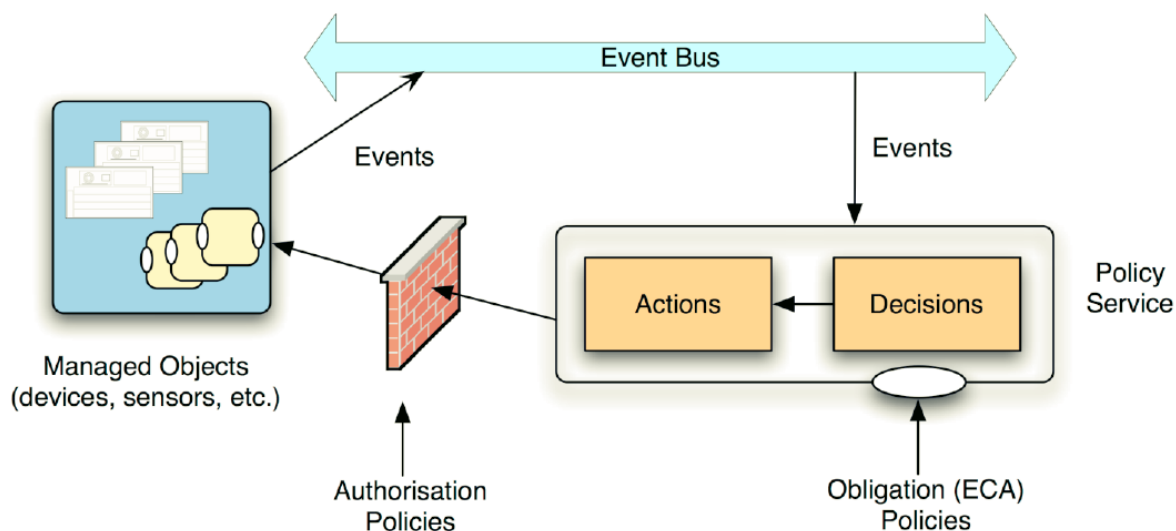
Σχήμα 2.3 : Διαχείριση Δρομολόγησης με Πολιτικές [Ding09]

Το Ponder2²⁷ [Twidle09] αποτελεί έναν αυτοτελή και αυτάρκη γενικού σκοπού μηχανισμό πολιτικών που επιτρέπει τη διαχείριση αντικειμένων μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ τους. Εξασφαλίζει την ενημέρωση όλων των αντικειμένων μέσω της δημιουργίας και κατανομής συμβάντων (events) και υλοποιεί ένα πλαίσιο για την εκτέλεση των πολιτικών. Παρέχει δυνατότητα διαμόρφωσης και ελέγχου σε υψηλό επίπεδο ενώ τα διαχειριστικά αντικείμενα μπορούν να επεκταθούν εύκολα αφού είναι γραμμένα στη γλώσσα Java. Το πλαίσιο Ponder2 αποτελεί επανασχεδίαση και επανυλοποίηση του προϋπάρχοντος Ponder [Damianou01] με τη διαφορά ότι προσφέρει

²⁷ <http://ponder2.net/>

αντικειμενοστρέφεια και είναι υπολογιστικά πιο αποδοτικό, παρέχοντας έτσι δυνατότητα εκτέλεσής του και σε φορητές συσκευές. Επιπλέον προσφέρει μηχανισμούς για αποφυγή συγκρούσεων σε επίπεδο πολιτικών (Policy conflicts) [Davy08].

Επειδή το σύστημα είναι δυναμικό πρέπει να μπορεί να γίνεται ανάλυση με βάση δυναμικές καταστάσεις, για να δίνεται η δυνατότητα έκφρασης προσωρινών περιορισμών και εξαρτήσεων μεταξύ των πολιτικών. Έτσι απαιτείται η ύπαρξη ενός μοντέλου του συστήματος, το οποίο να εκτελεί ανάλυση των πολιτικών και να εντοπίζει συγκρουόμενες πολιτικές, και να αναλύει τις ιδιότητες του συστήματος με την εφαρμογή των πολιτικών. Στην περίπτωση του Ponder2 χρησιμοποιείται λογισμός συμβάντων (Event Calculus) [Shanahan99] για την αναπαράσταση και την εξαγωγή συμπερασμάτων για μεταβαλλόμενες ιδιότητες του συστήματος. Η αναπαράσταση αυτή γίνεται με τρόπο ανεξάρτητο των συγκεκριμένων υλοποιήσεων και έτσι είναι εφικτή η ανάλυση της συμπεριφοράς ανεξάρτητα από συγκεκριμένα συστήματα. Οι αποφάσεις λαμβάνονται με βάση την παρούσα αλλά και παρελθοντική κατάσταση των μεταβλητών του συστήματος. Υπάρχει μια απόλυτη αναπαράσταση του χρόνου με προσωρινές μεταβλητές που επιτρέπουν στις πολιτικές να είναι πολύ ευαίσθητες στις αλλαγές της κατάστασης του συστήματος. Επίσης υπάρχουν πολιτικές Υποχρέωσης που παρακολουθούν πως και πότε γίνονται οι ενεργοποιήσεις των πολιτικών από τους χρήστες. Η ύπαρξη των προσωρινών περιορισμών και η απόλυτη αναπαράσταση του χρόνου δίνει τη δυνατότητα έκφρασης σύνθετων πολιτικών για αποφάσεις ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος.



Σχήμα 2.4 : Ανατροφοδότηση Πολιτικών στο Ponder2 [Lupu08]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 για την εφαρμογή των πολιτικών υπάρχει ένας διάυλος (event bus) για τη λήψη και παράδοση των συμβάντων τα οποία πυροδοτούν τις πολιτικές. Οι πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation policies) αναλαμβάνουν με βάση τα συμβάντα και την παρούσα κατάσταση του συστήματος να εφαρμόζουν ενέργειες ενώ οι πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization policies) ελέγχουν τα δικαιώματα πρόσβασης στα διάφορα διαχειριστικά αντικείμενα.

Άλλες γλώσσες πολιτικών όπως η Rei [Kagal03] και η KAoS [Uszok04] χρησιμοποιούν οντολογίες για την αναπαράσταση των πολιτικών, και κώδικα βασισμένο σε Prolog για την εφαρμογή τους. Και στις δύο περιπτώσεις οι οντολογίες είναι γραμμένες σε γλώσσα αναπαράστασης γνώσης OWL [Antoniou04]. Η Web Ontology Language (OWL²⁸) είναι η σημασιολογική γλώσσα του παγκόσμιου ιστού και έχει σχεδιαστεί με σκοπό να μπορεί να αναπαριστά τη γνώση. Στην περίπτωση της Rei η OWL χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των πολιτικών με τις κλάσεις και τις σχέσεις μεταξύ των κλάσεων, ενώ αξιοποιείται και για τη δημιουργία ενός συνόλου από αντικείμενα που περιγράφουν την παρούσα κατάσταση του συστήματος. Κατά το χρόνο εκτέλεσης σε περίπτωση που συντρέχουν κάποιες συνθήκες ενεργοποιούνται οι κατάλληλες πολιτικές και εφαρμόζουν τις μεταβολές στο διαχειριστικό περιβάλλον. Η μέθοδος αυτή λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας του δέντρου αναζήτησης που προκύπτει κατά το χρόνο εκτέλεσης παρουσιάζει περιορισμούς ως προς την κλίμακα στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί.

²⁸ https://www.w3.org/standards/techs/owl#w3c_all

Επίσης ο τρόπος με τον οποίο είναι γραμμένες και υλοποιημένες οι οντολογίες, δε δίνει τη δυνατότητα για εύκολη επέκταση για την περιγραφή της διαχείρισης σε άλλα αντικείμενα από εκείνα για τα οποία σχεδιάστηκαν αρχικά.

Η γλώσσα eXtensible Access Control Markup Language (XACML)²⁹ έχει τυποποιηθεί από το OASIS³⁰ και είναι ιδιαίτερα δημοφιλής για την περιγραφή και υλοποίηση πολιτικών εξουσιοδότησης καθώς και πολιτικών ελέγχου πρόσβασης με ανάθεση ρόλων [Χυ11]. Ακολουθεί την ορολογία που περιγράφεται στο RFC 2904 [Vollbrecht00]. Η υποστήριξη που προσφέρει για Πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation policies) περιορίζεται στην παροχή δυνατότητας εκτέλεσης κάποιων εντολών μετά τη διαδικασία της ταυτοποίησης ενός χρήστη.

Σε πρόσφατες εργασίες, οι πολιτικές αξιοποιούνται για ένα πολύ ευρύ διαχειριστικό φάσμα. Για παράδειγμα στην εργασία [Costa12] αναλύεται ένα σύστημα στο οποίο η διαχείριση με βάση πολιτικές παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού ενεργειακά φιλικών πολιτικών σε υψηλό επίπεδο λαμβάνοντας όμως υπόψη τον αντίκτυπο που προκαλείται στη διαθεσιμότητα και απόδοση των δικτύων. Τελικά η χρήση των κατάλληλων πολιτικών επιτρέπει τη διατήρηση της ισορροπίας ανάμεσα στην κατανάλωση και την απόδοση [Januário13].

Υπάρχουν και εμπορικά συστήματα, προερχόμενα από τις μεγάλες εταιρείες στο χώρο της πληροφορικής που αξιοποιούν τη διαχείριση με βάση πολιτικές. Η IBM³¹ έχει περιλάβει στο λογισμικό της τέτοια λειτουργικότητα μέσω του Tivoli Security Policy Manager [Coyne14], [Buecker09]. Το λογισμικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα στους διαχειριστές να καθορίζουν πολιτικές σε μορφή γλώσσας XACML ή WS-SecurityPolicy³².

Αξίζει να αναφερθεί ότι και η Cisco³³ πρόσθεσε πρόσφατα στα συστήματά της λειτουργικότητα που επιτρέπει διαχείριση με βάση πολιτικές [Cisco14]. Η νέα λειτουργικότητα φέρει το όνομα Cisco Application Policy Infrastructure Controller

²⁹ https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=xacml

³⁰ <https://www.oasis-open.org/>

³¹ <https://www.ibm.com/software/tivoli>

³² <http://docs.oasis-open.org/ws-sx/ws-securitypolicy/v1.2/errata01/os/ws-securitypolicy-1.2-errata01-os-complete.pdf>

³³ <http://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/application-policy-infrastructure-controller-enterprise-module/index.html>

Enterprise Module (APIC-EM) και επιδιώκει ευκολότερη και ταχύτερη διαχείριση των δικτυακών συσκευών.

Στην παρούσα διατριβή αξιοποιείται ο μηχανισμός ορισμού και εφαρμογής πολιτικών του Ponder2 για την συμπερίληψη λειτουργικότητας διαχείρισης με βάση πολιτικές στο σύστημα που προτείνεται στο Κεφάλαιο 4. Ο μηχανισμός αυτός επεκτάθηκε κατάλληλα για να μπορεί να εκφράσει τους πόρους και τις υπηρεσίες που προσφέρουν οι Εικονικοποιημένες Υποδομές. Επίσης, έγινε περαιτέρω επέκταση του μηχανισμού για την υποστήριξη πολιτικών που ελέγχουν τις σχέσεις μεταξύ των ανεξάρτητων διαχειριστικά περιοχών.

2.6 Πληροφοριακά Μοντέλα (IM) και Οντολογίες

Η έννοια του πληροφοριακού μοντέλου (Information Model - IM) είναι στενά συνδεδεμένη με την έννοια της διαχείρισης με βάση πολιτικές. Η χρήση πολιτικών για τη διαχείριση ενός περιβάλλοντος απαιτεί την ομογενοποίηση όλων των διαχειριστικών οντοτήτων, αλλά και την εισαγωγή ενός επιπλέον αφαιρετικού επιπέδου πάνω από το μοντέλο δεδομένων (data model), ούτως ώστε οι πολιτικές να εφαρμόζονται με ενιαίο τρόπο σε αντικείμενα ανεξάρτητα από κατασκευαστές και τύπους συσκευών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των πληροφοριακών μοντέλων.

Ένα από τα πρώτα και πιο διαδεδομένα πληροφοριακά μοντέλα είναι το Common Information Model (CIM)³⁴. Έχει δημιουργηθεί από τον Οργανισμό Τυποποίησης Distributed Management Task Force (DMTF)³⁵. Το DMTF είναι ένας οργανισμός τυποποίησης στον οποίο συμμετέχουν περισσότερες από 150 εταιρείες και Ακαδημαϊκοί φορείς σε 43 χώρες. Μέλη του είναι οι μεγαλύτεροι και σημαντικότεροι οργανισμοί που ασχολούνται με πληροφορική και δίκτυα υπολογιστών (π.χ. Cisco, IBM, HP, Dell, Intel, Microsoft, Oracle, κ.α). Έχει σαν στόχο τη δημιουργία προτύπων που να επιτρέπουν διαχείριση υπολογιστικών συστημάτων ανεξάρτητα από κατασκευαστές.

Το CIM³⁶ είναι ένα Πληροφοριακό Μοντέλο που δημιουργήθηκε για την περιγραφή των εννοιών της διαχείρισης συστημάτων ανεξάρτητα από τους κατασκευαστές του υλικού και του λογισμικού. Βοηθά έτσι στην τυποποίηση της ανταλλαγής πληροφοριών και την αλληλεπίδραση μεταξύ συστημάτων και εφαρμογών. Το CIM αποτελείται από δύο κύρια συστατικά: (1) Το Infrastructure Specification (Προδιαγραφές Υποδομής) [DMTF15] που περιγράφει την αρχιτεκτονική, τις βασικές έννοιες, καθώς και τη γλώσσα έκφρασης του μοντέλου και (2) το CIM Schema (Σχήμα) [DMTF16b] που περιέχει τις βασικές περιγραφές του Μοντέλου και παρέχει ένα σύνολο από κλάσεις, τις ιδιότητές τους καθώς και τις σχέσεις μεταξύ τους [Uslar12]. Η γλώσσα Unified Modeling Language (UML)³⁷ [Rumbaugh04] χρησιμοποιείται για την εικονικοποίηση της δομής του σχήματος το

³⁴ <http://www.dmtf.org/standards/cim>

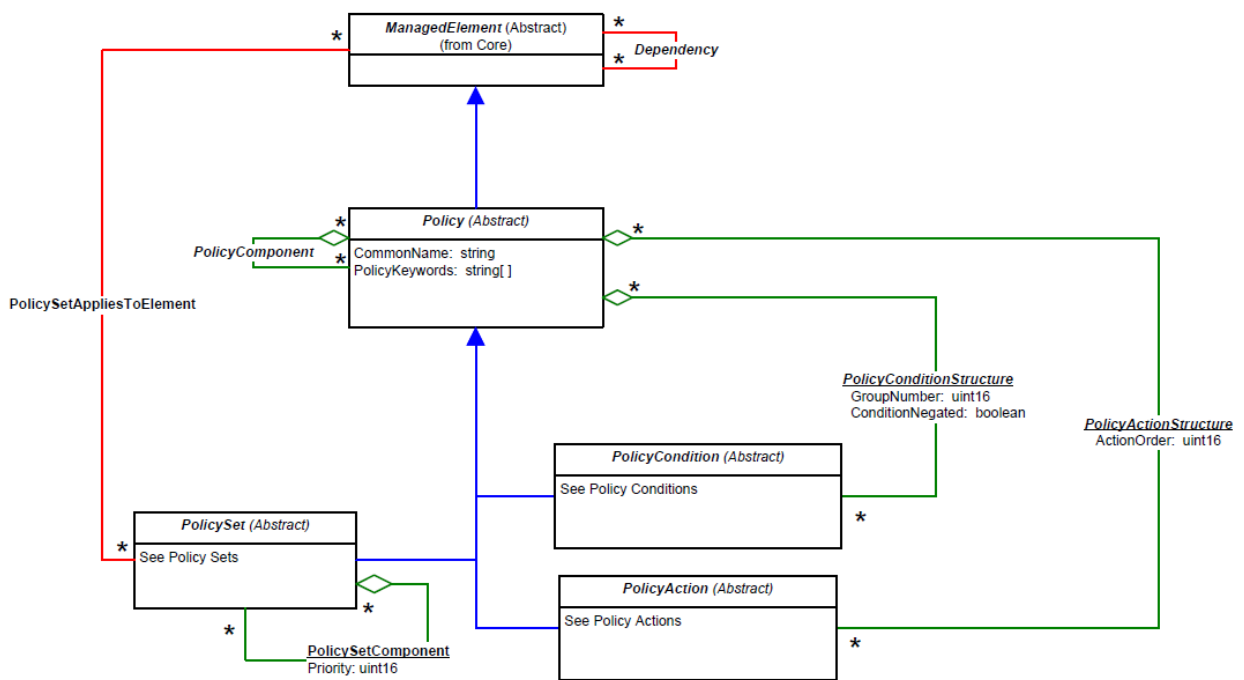
³⁵ <http://www.dmtf.org>

³⁶ <http://www.dmtf.org/standards/wbem>

³⁷ <http://www.uml.org>

οποίο αποτελείται από ένα μοντέλο κορμού που καλύπτει τις έννοιες που είναι κοινές για όλες τις περιοχές της διαχείρισης συστημάτων και συνδυάζεται με διάφορα άλλα μοντέλα που μπορούν να εφαρμοστούν επιλεκτικά και αφορούν πιο εξειδικευμένες περιοχές διαχείρισης.

Το CIM περιλαμβάνει ξεχωριστό μοντέλο για τις πολιτικές [DMTF16a]. Η βασική κλάση που προσφέρεται είναι το *ManagedElement* που προέρχεται από το μοντέλο κορμού και αντιπροσωπεύει κάθε αντικείμενο που μπορεί να τύχει διαχείρισης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 με το μπλε βέλος η κλάση *policy* κληρονομεί τα χαρακτηριστικά του *ManagedElement* καθώς οι πολιτικές αποτελούν και αυτές διαχειριστικά αντικείμενα. Με τις πράσινες γραμμές βλέπουμε πως μια πολιτική αποτελείται από ένα σύνολο από συνθήκες (*policyCondition*) και ενέργειες (*policyAction*). Τέλος η κόκκινη γραμμή καταδεικνύει πως οι πολιτικές με τη μορφή συνόλου (*policySet*) εφαρμόζονται στα διαχειριστικά αντικείμενα καθορίζοντας με αυτό τον τρόπο τη συμπεριφορά τους.



Σχήμα 2.5 : Το Μοντέλο Πολιτικών του CIM [DMTF16a]

Το Directory Enabled Network - new generation (DEN-ng) [Strassner02] είναι ένα αντικειμενοστραφές πληροφοριακό μοντέλο που περιγράφει τις εμπορικές πτυχές, την υλοποίηση των διαχειριστικών οντοτήτων, όπως και τις σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων. Αρχικά είχε σχεδιαστεί για να ικανοποιήσει τις ανάγκες της αρχιτεκτονικής του

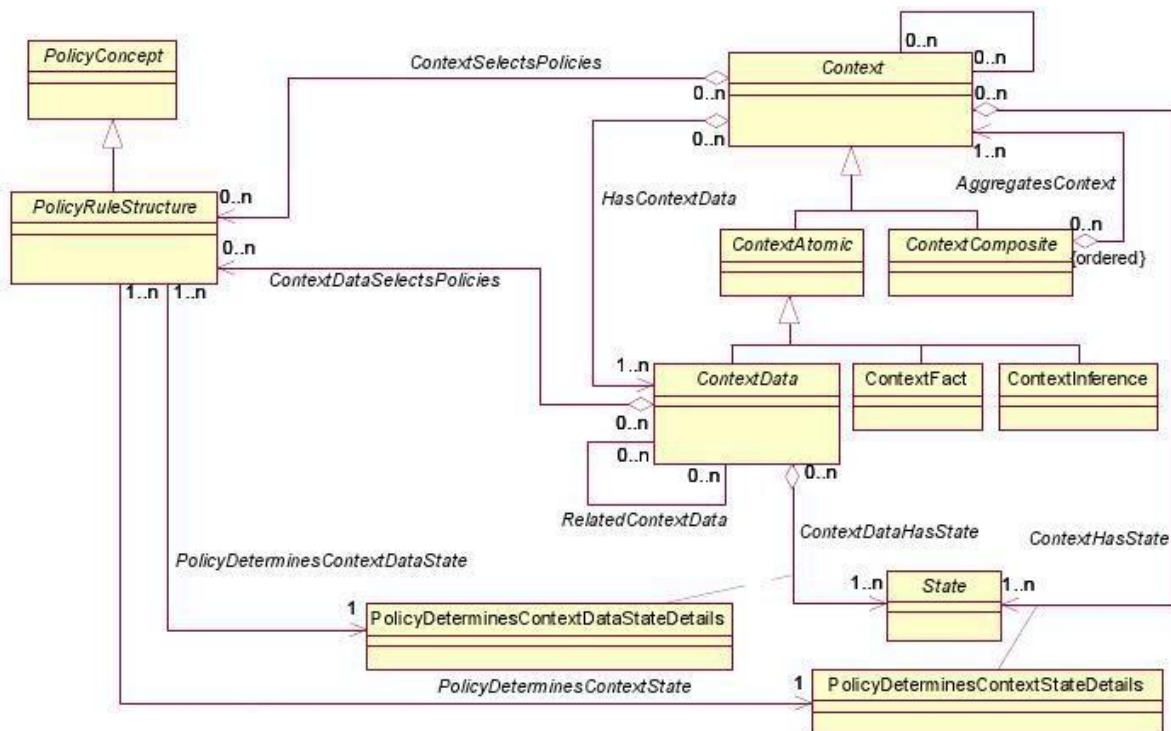
TeleManagement Forum New Generation Operations Systems and Software (TMF³⁸ NGOSS) [Strassner04]. Το DEN-ng σχεδιάστηκε ακολουθώντας τις αρχές της διαχείρισης συστημάτων με βάση πολιτικές [Strassner03], χρησιμοποιώντας τις πολιτικές για τον έλεγχο και τη διαχείριση του περιβάλλοντος διαχείρισης με ένα κοινό τρόπο σε ανεξάρτητες διοικητικά περιοχές. Έχει σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη επιχειρηματικά σενάρια τα οποία εφαρμόζονται μέσα στο περιβάλλον διαχείρισης. Οι επιχειρηματικοί στόχοι αξιοποιούνται για τον έλεγχο κάθε ανεξάρτητης διαχειριστικής οντότητας αλλά και διαχειριστικών περιοχών. Οι πολιτικές αξιοποιούνται για την αντανάκλαση των αναγκών και απαιτήσεων των πελατών/χρηστών του συστήματος και τον καθορισμό και την εφαρμογή των κατάλληλων ρυθμίσεων στο δίκτυο και τις συσκευές. Επίσης το DEN-ng περιλαμβάνει οντολογίες για να αυξήσει τις δυνατότητές του στη μοντελοποίηση, βλέποντας τα μοντέλα δεδομένων σαν στοιχεία από τα οποία μπορεί να εξάγει δεδομένα [Strassner09c].

Το DEN-ng εφαρμόστηκε στην περιοχή των αυτόνομων υπολογιστικών συστημάτων (autonomic computing) με αποτέλεσμα την αυτόνομη δικτυακή αρχιτεκτονική του FOCALE [Strassner06]. Αυτή η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει υποστήριξη για πολλαπλούς βρόγχους ελέγχου, οι οποίοι αναλύουν τα δεδομένα, καθορίζουν την τρέχουσα κατάσταση των διαχειριστικών οντοτήτων, συγκρίνουν την κατάστασή τους με την επιθυμητή και με τις κατάλληλες ενέργειες επιχειρούν να τη διατηρήσουν. Εκτός από την υποστήριξη για πολιτικές, το DEN-ng παρέχει ένα πλούσιο σύνολο από λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα υποστηρίζει πολλαπλούς τύπους αφαιρετικότητας [Strassner09a] όπως μοτίβα (patterns) τα οποία διευκολύνουν τη διαχείριση. Αυτά μπορεί να είναι δυνατότητες (κανονικοποιημένες λειτουργικότητες ανεξάρτητες κατασκευαστή, πλατφόρμας, συσκευής) και ρόλοι (λειτουργικότητα την οποία μια διαχειριστική οντότητα μπορεί να αναλάβει). Το DEN-ng υποστηρίζει την ενορχήστρωση των υπηρεσιών σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους με χρήση αυτομάτων πεπερασμένων καταστάσεων για την μοντελοποίηση ολόκληρου του κύκλου ζωής για κάθε διαχειριστική οντότητα. Η συμπεριφορά της κάθε διαχειριστικής οντότητας μπορεί να ενορχηστρωθεί με χρήση πολιτικών οι οποίες ανακλούν επιχειρηματικούς στόχους με

³⁸ <https://www.tmforum.org/>

σκοπό να προσδιορίζουν την επόμενη κατάσταση της διαχειριστικής οντότητας στην οποία επιτρέπεται η μετάβαση.

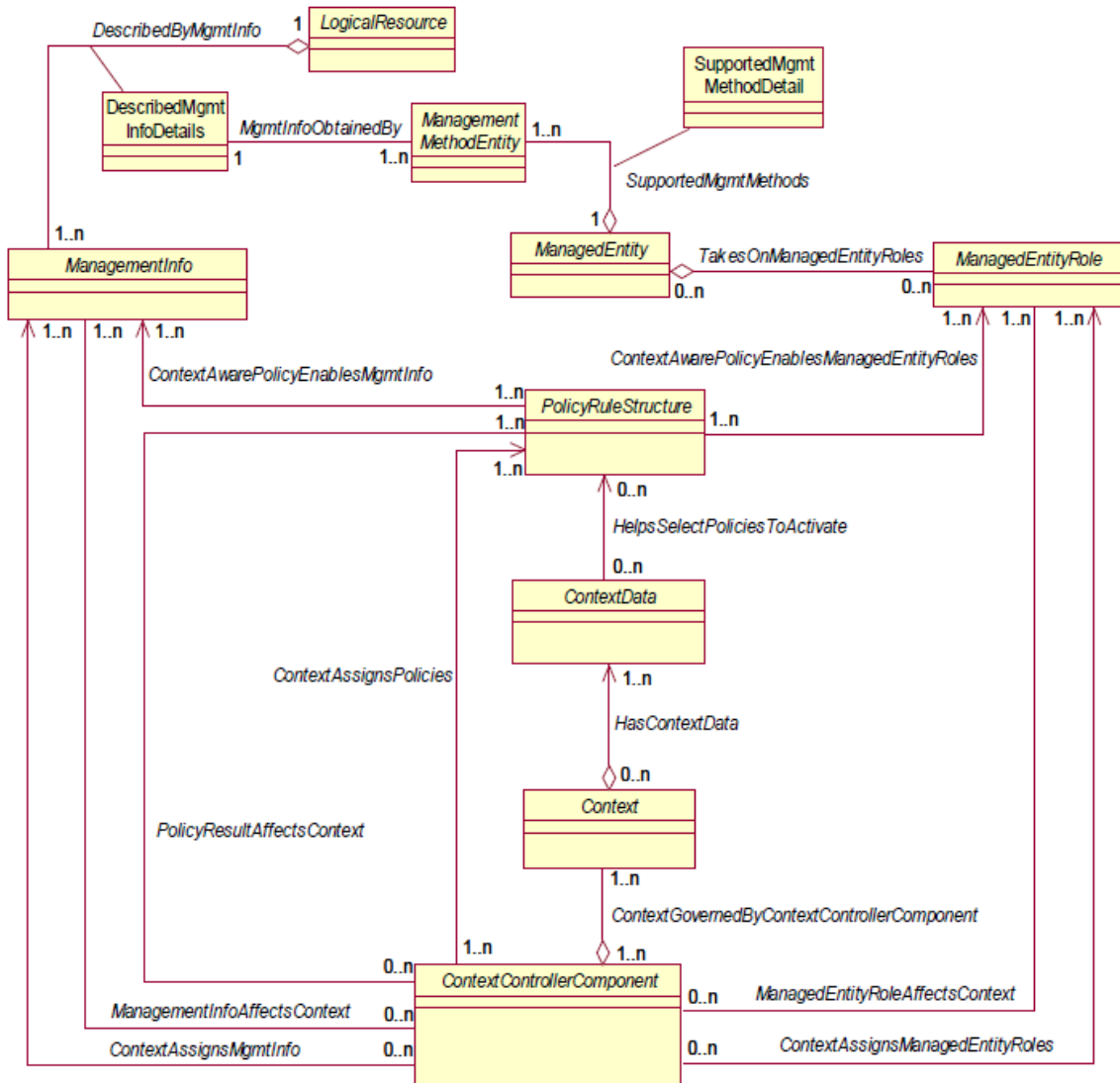
Το DEN-ng ορίζει το πλαίσιο (context) μιας οντότητας σαν μια συλλογή από μετρήσιμες και εκ συμπεράσματος ληφθέντες γνώσεις οι οποίες περιγράφουν την κατάσταση και το περιβάλλον στα οποία η οντότητα υπάρχει, ή υπήρξε στο παρελθόν. Στο Σχήμα 2.6 βλέπουμε γραφικά την έννοια του πλαισίου με χρήση του διαγράμματος UML όπως χρησιμοποιείται από το DEN-ng [Strassner09c], [Strassner09b]. Βλέπουμε ότι το πλαίσιο (context) μπορεί να είναι ατομικό ή συνθετικό. Κάθε ατομικό πλαίσιο μπορεί να είναι contextData, contextFact ή contextInference. Το ContextData αποτελείται από PolicyRuleStructure και State. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η διατήρηση στοιχείων για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η κάθε οντότητα όπως επίσης και για την επιθυμητή κατάσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί.



Σχήμα 2.6 : Διάγραμμα UML για Context Awareness στο DEN-ng [Strassner09b]

Στο Σχήμα 2.7 βλέπουμε το UML διάγραμμα για τις πολιτικές. Ορίζονται κανόνες για τις πολιτικές οι οποίοι καθορίζουν τη σχέση τους με τους λογικούς πόρους (logical resources)

στους οποίους εφαρμόζονται μέσω της επίδρασής τους με το πλαίσιο (context). Συνοπτικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι αλλαγές στο πλαίσιο γίνονται μέσω ενός ελεγκτή (ContextControllerComponent), ο οποίος αφενός ενεργοποιεί τις πολιτικές μέσω ενδεχόμενων αλλαγών τις οποίες ανακοινώνει και αφετέρου δέχεται ενημερώσεις από τους κανόνες πολιτικών σαν αποτέλεσμα των ενεργειών που εκτελούνται.



Σχήμα 2.7 : Αναπαράσταση Πολιτικών στο DEN-ng [Strassner09b]

Το Shared Information and Data Model (SID) [TMFc] τυποποιήθηκε από το TMF. Αποτελεί ένα σύνολο από διαφορετικά εμπορικά μοντέλα ενώ εμπεριέχει και ένα σημαντικό κομμάτι του DEN-ng. Παρέχει μια κοινή γλώσσα από εμπορική σκοπιά και από σκοπιά υλοποίησης, παρέχοντας μια κοινή όψη στο σχεδιασμό και τη διαχείριση των

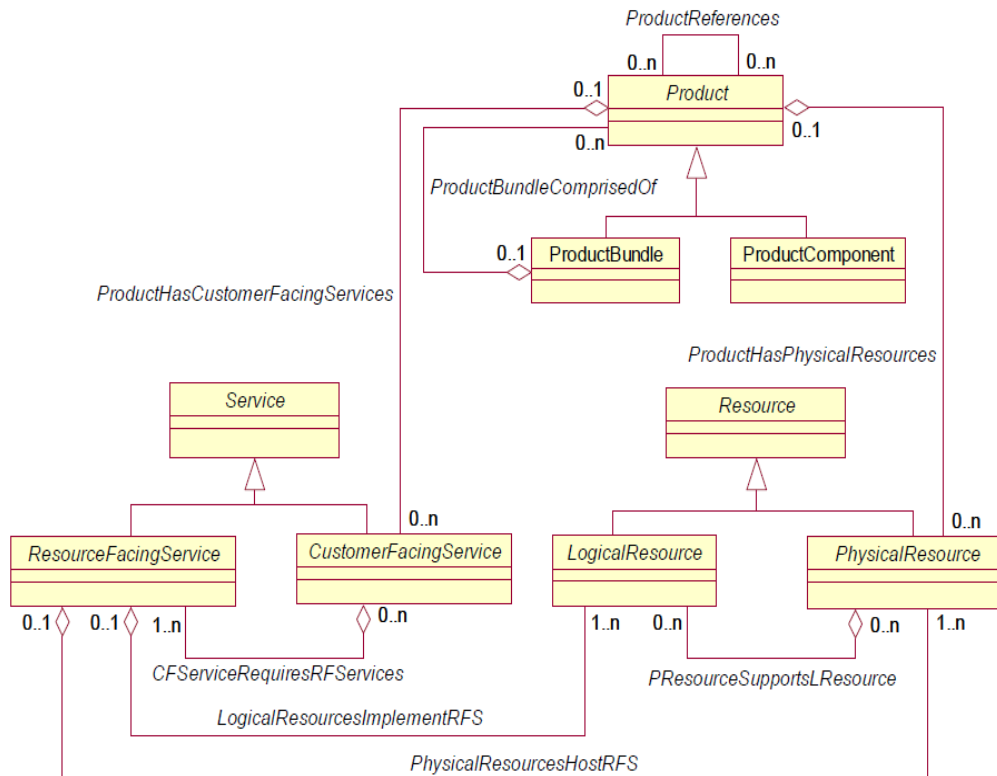
τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Το SID δεν παρέχει δυνατότητες για χρήση σημασιολογίας, ούτε και μηχανισμούς για οργάνωση συμπεριφοράς όπως συμβαίνει με τις μηχανές καταστάσεων. Το SID ορίζει ιεραρχική δομή με παράλληλα υπο-δέντρα από οντότητες (entities) σε πολλαπλά επίπεδα λεπτομέρειας³⁹. Στο υψηλότερο επίπεδο τα υπο-δέντρα αντιστοιχούν σε οντότητες και ενέργειες του eTOM⁴⁰ επιπέδου 0 (Αγορά/Πωλήσεις, Προϊόν, Πελάτης, Υπηρεσία, Πόρος, Προμηθευτής/Συνεργάτης, Επιχείρηση). Κάθε υπο-δέντρο είναι σχεδιασμένο για να μπορεί να είναι αυτόνομο με μικρές αλληλεπιδράσεις με τα υπόλοιπα. Αυτό επιτρέπει τη σχεδίαση και υλοποίηση με αρθρωτό τρόπο, κάτι το οποίο βοηθά την επεκτασιμότητα του μοντέλου ακόμα και από άλλους κατασκευαστές.

Τα βασικά υπο-δέντρα είναι: Πελάτης, Προϊόν, Πόρος (Φυσικός και Λογικός), Υπηρεσία και Κοινή Διαχείριση. Το υπό-δέντρο «Κοινή Διαχείριση» αποτελείται από οντότητες, π.χ. Οντότητα Πολιτικών, που είναι κοινές για όλο το δέντρο. Οι Πολιτικές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση και τον ορισμό διαχειριστικών οντοτήτων όλων των τύπων. Οι Πολιτικές αυτές περιλαμβάνονται σε έναν ξεχωριστό υπο-δέντρο υπό τη μορφή προσθήκης (addendum⁴¹) που αποτελεί το Πληροφοριακό Μοντέλο Πολιτικών [TMFa].

³⁹ Τα υποσύνολα της ιεραρχικής δομής αναφέρονται στο SID [Reilly11] σαν domains (περιοχές). Επιλέξαμε τον όρο υπο-δέντρα για να μην υπάρχει σύγχυση με τις Αυτόνομες Περιοχές (domains κατά την ορολογία του Internet) που πραγματεύεται η Διατριβή

⁴⁰ <https://www.tmforum.org/tm-forum-framework/browse-clickable-model/>

⁴¹ Είναι γενική πρακτική του SID να χρησιμοποιεί addenda για συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές



Σχήμα 2.8 : Σχέσεις Κλάσεων στο SID [TMFb]

Το SID επιτρέπει τη σχεδίαση υπηρεσιών και δικτυακών πόρων σε σύζευξη με τα προϊόντα και τους καταναλωτές, ενώ παρέχει και τις απαιτούμενες σχέσεις για τη σύνδεση όλων των πόρων στις επιχειρηματικές δραστηριότητες. Στο Σχήμα 2.8 βλέπουμε πως σχετίζονται μεταξύ τους οι έννοιες του Προϊόντος, Υπηρεσίας και Πόρου (Product, Service, Resource). Τα PhysicalResources και CustomerFacingServices είναι άμεσα ορατά από το Product. Επίσης ένα σύνολο από PhysicalResources υποστηρίζει ένα σύνολο από LogicalResources. Αυτό επιτρέπει στα Products να καθορίσουν έμμεσα τα LogicalResources. Με παρόμοιο τρόπο το ResourceFacingService μπορεί να ορίσει το σύνολο των LogicalResources και PhysicalResources που απαιτούνται. Αυτό επιτρέπει στα Services τα οποία είναι ορατά στους Customers να καθορίζουν τα Resources που χρειάζονται.

Το SID μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο για τη μοντελοποίηση εφαρμογών με βάση τις ανάγκες τους. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δεν παρέχει μετάφραση της μοντελοποίησης από επιχειρηματική σε δικτυακή, ούτε και το αντίστροφο, ενώ γενικότερα είναι πιο στενά συνυφασμένο με την περιγραφή της επιχειρηματικής

σκοπιάς. Επίσης δεν παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης της συμπεριφοράς με μηχανή καταστάσεων.

Η χρήση οντολογιών στα πληροφοριακά μοντέλα βοηθά στην πιο αποτελεσματική αξιοποίηση των αποθηκευμένων πληροφοριών. Σε πρώτο βαθμό παρέχεται η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ ετερογενών συστημάτων αφού η οντολογία χρησιμοποιεί ορισμούς των διαφόρων εννοιών σε υψηλότερο αφαιρετικά επίπεδο. Επίσης παρέχονται δυνατότητες σημασιολογικής διαλειτουργικότητας (semantic interoperability [Doerr03]) όπου καθορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των εννοιών και αξιοποιούνται ως εργαλεία αυτόματης συσχέτισης μεταξύ τους για παραγωγή νέας γνώσης.

Η επίγνωση γενικού πλαισίου, Context Awareness [Baldauf07], αναφέρεται στη δυνατότητα που έχει ένα σύστημα να αντιλαμβάνεται τις μεταβολές του περιβάλλοντός του και να αντιδρά ανάλογα. Υπό αυτό το πρίσμα είναι άμεσα συνυφασμένο με την έννοια των πολιτικών διαχείρισης. Το πλαίσιο (context) στο οποίο αναφερόμαστε σε αυτή την περίπτωση είναι το περιβάλλον του κάθε διαχειριστικού αντικειμένου το οποίο αποτελείται από στατικές και μεταβαλλόμενες μεταβλητές. Αυτό καθορίζει και την γενικότερη έννοια της κατάστασης στην οποία βρίσκεται ένα αντικείμενο. Με βάση την κατάσταση του κάθε αντικειμένου λαμβάνονται και οι αποφάσεις για τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν ούτως ώστε να βελτιστοποιείται η θέση του. Στην παρούσα διατριβή ασχολούμαστε κυρίως με εικονικοποιημένους πόρους, και ως εκ τούτου η επίγνωση πλαισίου που προσφέρεται από την προτεινόμενη οντολογία έχει να κάνει με την κατάσταση λειτουργίας: (1) του κάθε διαθέσιμου ή δεσμευμένου πόρου (2) του συνόλου των δεσμευμένων πόρων για κάθε καλάθι από πόρους που ανήκουν σε κάποιο χρήστη και προέρχονται από μία ή περισσότερες ομοσπονδιοποιημένες υποδομές.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής δημιουργήθηκε ένα νέο πληροφοριακό μοντέλο για την περιγραφή των πολιτικών. Λήφθηκαν υπόψη τα υφιστάμενα μοντέλα, όμως η λύση επικεντρώθηκε στις ιδιαίτερες ανάγκες των εικονικοποιημένων υποδομών και της ομοσπονδιοποίησης. Το προτεινόμενο μοντέλο διαφοροποιείται από αυτά που παρουσιάστηκαν ως προς τη γλώσσα στην οποία εκφράζεται καθώς υλοποιήθηκε στη

γλώσσα OWL. Έτσι παρέχεται έμφυτη υποστήριξη σημασιολογίας διευκολύνοντας τις λειτουργίες που απαιτούνται για την ομοσπονδιοποίηση.

2.7 Στόχος της Διατριβής

Παρόλο που το ερευνητικό ενδιαφέρον στην ομοσπονδιοποίηση εικονικοποιημένων υποδομών όσο και στη διαχείριση συστημάτων με χρήση πολιτικών είναι ενεργό, δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο και μια αρχιτεκτονική που να μπορεί να εκμεταλλευτεί τις καινοτομίες στον τομέα της διαχείρισης με βάση πολιτικές για την ομοσπονδιοποίηση των υποδομών. Κάτι τέτοιο έχει να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς η διαχείριση τέτοιων ομοσπονδιών είναι πολύπλοκη ενώ η διαχείρισή τους με χρήση πολιτικών μπορεί να την απλοποιήσει και να την κάνει πιο ξεκάθαρη και πιο αυτοματοποιημένη. Τέλος, η χρήση πολιτικών παρέχει επιπλέον αυξημένο έλεγχο σε θέματα δικαιωμάτων πρόσβασης και ελεγχόμενης ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των υποδομών. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής δημιουργήθηκε η Οντολογία Πολιτικών σαν μέρος ενός Πληροφοριακού Μοντέλου που περιγράφει τις πολιτικές και το πως αυτές εφαρμόζονται για την επίτευξη της ομοσπονδιοποίησης Εικονικοποιημένων Υποδομών.

Μεγάλο κομμάτι της παρούσας διατριβής σχετίζεται με τη συνεισφορά στο ερευνητικό έργο «Networking Innovations over Virtualized Infrastructures» - NOVI⁴² [Van der Ham15], [Lymberopoulos11] της Ευρωπαϊκής πρωτοβουλίας FIRE για την έρευνα και τον πειραματισμό σε θέματα μελλοντικού Internet. Το έργο NOVI έχει ορίσει και υλοποιήσει μια αρχιτεκτονική η οποία υποστηρίζει την ομοσπονδιοποίηση ετερογενών Εικονικοποιημένων Υποδομών ανοίγοντας δρόμους για το επόμενο βήμα στη δικτύωση και στο Internet του μέλλοντος. Τα τμήματα λογισμικού στο επίπεδο υπηρεσιών επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν μια ξεχωριστή διεπαφή για πρόσβαση στους πόρους τους, στις διαφορετικές υποδομές στις οποίες ανήκουν. Η πρόσβαση στους πόρους των υποδομών, στις πολιτικές και σε πληροφορίες παρακολούθησης λειτουργίας, παρέχονται σαν υπηρεσίες του NOVI. Η συνεισφορά της διατριβής ξεκίνησε με την υλοποίηση της Οντολογίας Πολιτικών σαν μέρος του Πληροφοριακού Μοντέλου του NOVI και την υλοποίηση της Υπηρεσίας Πολιτικών. Η Αρχιτεκτονική που προτάθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αποτελεί μια επέκταση της αρχιτεκτονικής του NOVI με ανάθεση

⁴² <http://www.fp7-novi.eu/>

διαχειριστικών αρμοδιοτήτων στην Υπηρεσία Πολιτικών, προς ένα αυτό-διαχειριζόμενο σύστημα το οποίο ελέγχει μια ομοσπονδία Εικονικοποιημένων Υποδομών.

Η ομοσπονδιοποίηση προσφέρει σημαντικά οφέλη στους χρήστες των υποδομών. Τους δίνει τη δυνατότητα να λαμβάνουν με ενιαίο τρόπο ετερογενείς πόρους και υπηρεσίες με ελάχιστες ενέργειες. Η επιλογή των πόρων που πρέπει να δεσμευτούν γίνεται με αυτόματο τρόπο με βάση τις απαιτήσεις που δίνονται, χωρίς να είναι αναγκαίο να καθοριστεί από το χρήστη η υποδομή που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης η χρήση του συστήματος διαχείρισης με βάση πολιτικές βοηθά στην αυτοματοποίηση των ενεργειών που εκτελούνται για την διατήρηση της ποιότητας υπηρεσίας προς το χρήστη. Έτσι σε περίπτωση που υπάρξει δυσλειτουργία κάποιου πόρου, εφαρμόζονται κατάλληλες πολιτικές που εξασφαλίζουν την άμεση αντικατάσταση του πόρου με κάποιον άλλο με αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Όσον αφορά τους διαχειριστές των υποδομών η προτεινόμενη λύση διευκολύνει σημαντικά το έργο τους. Η χρήση πολιτικών για τη διαχείριση μειώνει το φόρτο τους, και διευκολύνει την μετατροπή των εμπορικών απαιτήσεων σε τεχνική υλοποίηση. Όσον αφορά την ομοσπονδιοποίηση επιλύεται με ένα τρόπο που είναι ξεκάθαρος και χωρίς την απαίτηση μεσαζόντων. Τέλος η προτεινόμενη λύση μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα πολύ ευρύ φάσμα από δικτυακές πλατφόρμες όπως περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους και δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό.

3 Μοντέλο Πολιτικών Διαχείρισης Ομοσπονδιών

Η ομοσπονδιοποίηση υποδομών απαιτεί την ύπαρξη ενός πληροφοριακού μοντέλου με ικανότητα να περιγράφει τους ετερογενείς πόρους και τις υπηρεσίες [Van der Ham11]. Το Πληροφοριακό Μοντέλο πρέπει να υποστηρίζει: (1) την περιγραφή εικονικοποιημένων πόρων, (2) τη σημασιολογία για να επιτρέπει εκτέλεση σημασιολογικών ερωτημάτων και απαντήσεις με βάση τις πραγματικές έννοιες των μεταβλητών, να είναι ανεξάρτητο από κατασκευαστές και παρόχους υπηρεσιών και να υποστηρίζει τις απαιτούμενες έννοιες για τις υπηρεσίες μετρήσεων παρακολούθησης. Επίσης, πρέπει να μπορεί να υποστηρίζει την έκφραση πολιτικών διαχείρισης. Έτσι θα μπορεί ένα ενιαίο μοντέλο να εκφράζει τους πόρους που ανήκουν σε όλες τις υποδομές και θα μπορούν τα αιτήματα των χρηστών για πόρους και υπηρεσίες να απευθύνονται σε όλη την ομοσπονδία των υποδομών. Όσον αφορά τις πολιτικές, η αναπαράστασή τους με ενιαίο τρόπο μέσω της Οντολογίας Πολιτικών συμβάλει στην ομοσπονδιοποίηση των υποδομών μέσω των πολιτικών Αντιπροσώπευσης που μπορούν να εκτελούν ενέργειες σε απομακρυσμένες υποδομές.

3.1 Αξιολόγηση Υφιστάμενων Μοντέλων

Τα πληροφοριακά μοντέλα για πολιτικές που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 καλύπτουν τις περισσότερες ανάγκες για το πληροφοριακό μοντέλο σε σχέση με τις πολιτικές αλλά παρουσιάζουν κάποια κενά ως προς την υποστήριξη των συνολικών αναγκών που απαιτούνται για την υποστήριξη των υπόλοιπων απαιτήσεων. Πιο συγκεκριμένα όλα τα μοντέλα υπολείπονται της εγγενούς ικανότητας έκφρασης των εννοιών των μετρήσεων και παρακολούθησης λειτουργίας, το CIM δεν υποστηρίζει τη σημασιολογία, ενώ το SID στερείται και της υποστήριξης των εννοιών της εικονικοποίησης. Αυτές οι ελλείψεις δεν επιτρέπουν την άμεση αξιοποίησή τους για ικανοποίηση των αναγκών της ομοσπονδιοποίησης εικονικοποιημένων υποδομών. Επίσης κρίθηκε ότι πιθανές επεκτάσεις κάποιου μοντέλου δε θα οδηγούσαν στη βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Το CIM είναι ένα πολύ διαδεδομένο πληροφοριακό μοντέλο και υποστηρίζει τις έννοιες εικονικοποίησης. Θα μπορούσε να επεκταθεί για να καλύψει το κομμάτι των εννοιών μετρήσεων και παρακολούθησης που απαιτούνται για τις εικονικοποιημένες υποδομές. Το κύριό του μειονέκτημα είναι ότι δεν υποστηρίζει σημασιολογία κάτι που είναι απαραίτητο για τη λειτουργία της ομοσπονδίας. Υπάρχει η απαίτηση από το μοντέλο να μπορεί να ανταποκρίνεται σε σημασιολογικά ερωτήματα όπου ως παράμετροι να θέτονται οι έννοιες/σημασιολογία και όχι συγκεκριμένες τιμές των μεταβλητών. Θεωρήθηκε ότι μια τέτοια επέκταση του CIM θα ήταν πολύ χρονοβόρα και δε θα οδηγούσε στο βέλτιστο αποτέλεσμα.

Το DEN-ng [Strassner02] καλύπτει τις περισσότερες ανάγκες με εξαίρεση την περιγραφή των εννοιών των μετρήσεων και την παρακολούθηση της λειτουργίας των πόρων. Θα μπορούσε μια επέκταση του μοντέλου να οδηγήσει σε ένα αποδεκτό μοντέλο. Ο κύριος λόγος που δεν εφαρμόστηκε αυτή η λύση ήταν το γεγονός ότι το DEN-ng χρησιμοποιεί τη γλώσσα UML [Rumbaugh04] αντί της OWL για την περιγραφή των οντοτήτων. Αν και οι δύο γλώσσες έχουν παρόμοιες δυνατότητες στην περιγραφή πληροφοριακών μοντέλων επιλέγηκε η OWL λόγω της εγγενούς σημασιολογικής υποστήριξης που προσφέρει για εξαγωγή συμπερασμάτων και παραγωγή γνώσης, σε αντίθεση με τη UML που απαιτεί εξωτερικές προσθήκες λογισμικού για να το επιτύχει [Pătrașcu15], [Atkinson08],

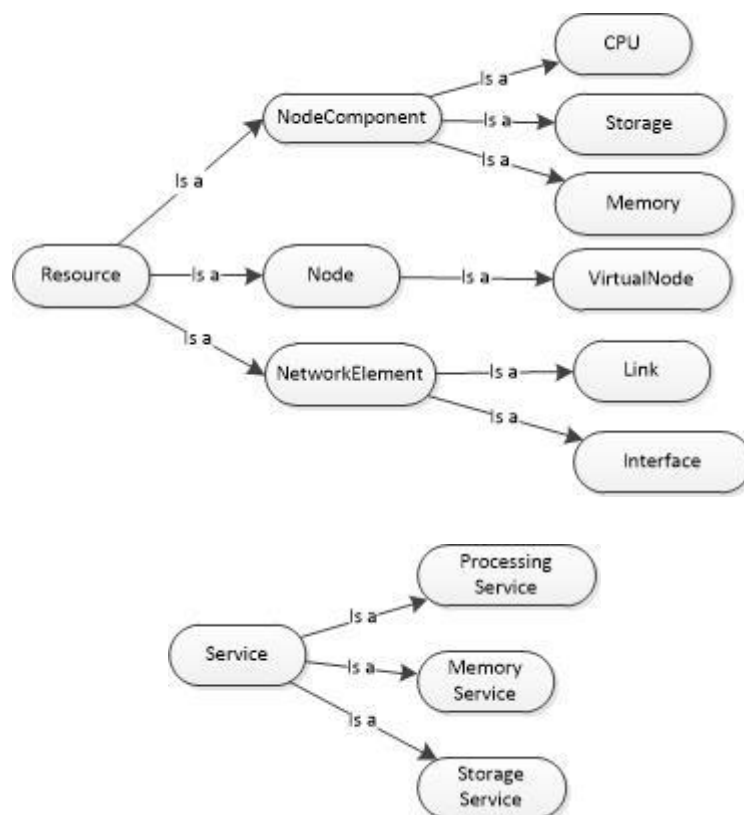
[El Hajjamy16]. Στο DEN-ng η UML επιλέχθηκε για διευκόλυνση ή ακόμα και αυτοματοποίηση της μετατροπής του μοντέλου σε κώδικα σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού. Για το προτεινόμενο μοντέλο θεωρήθηκε ότι η OWL είναι πιο εκφραστική γλώσσα για την περιγραφή των οντολογιών και ως εκ τούτου καταλληλότερη για τις ανάγκες του προβλήματος ομοσπονδιοποίησης [Thomas16].

Ο λόγος που απορρίφθηκε το SID πέραν του ότι χρησιμοποιεί και αυτό τη UML που κρίθηκε ως μη βέλτιστη επιλογή, είναι το γεγονός ότι θα απαιτούσε σημαντικές τροποποιήσεις σε πολλές διαφορετικές οντολογίες για να μπορέσουν να εκφραστούν οι εικονικοποιημένες υποδομές, οι έννοιες των μετρήσεων και η ομοσπονδιοποίηση. Το SID ασχολείται περισσότερο με την εμπορική σκοπιά των εννοιών και δε βοηθά στην έκφραση των πολιτικών επί των συγκεκριμένων εικονικοποιημένων πόρων όπως απαιτούν οι ανάγκες της συγκεκριμένης υλοποίησης.

Δεδομένης της μη καταλληλότητας κάποιου από τα μοντέλα στην περιγραφή των απαιτούμενων εννοιών που θα οδηγούσε στην ομοσπονδιοποίηση των Εικονικοποιημένων Υποδομών, προέκυψε η ανάγκη για επέκταση κάποιου πληροφοριακού μοντέλου ή δημιουργία κάποιου νέου. Με βάση την πολυπλοκότητα των υφιστάμενων πληροφοριακών μοντέλων που καλύπτουν ένα μεγάλο πλήθος πολύ γενικών εννοιών εκ των οποίων οι περισσότερες δεν αφορούσαν τις ανάγκες της ομοσπονδίας, θεωρήθηκε ότι η καλύτερη λύση ήταν η δημιουργία ενός νέου Πληροφοριακού Μοντέλου το οποίο να ενσωματώνει στοιχεία από τα υφιστάμενα, χωρίς περιττές οντότητες, με δυνατότητα όμως εύκολης επέκτασης όταν αυτό απαιτείται.

3.2 Προτεινόμενο Μοντέλο

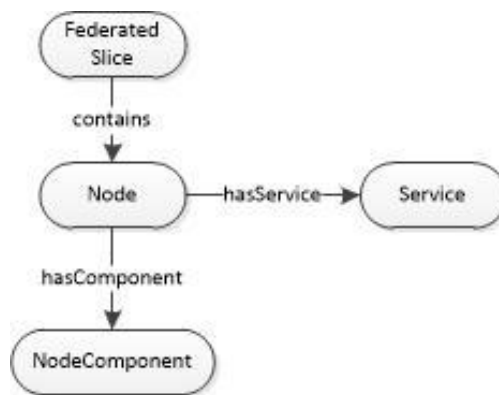
Στο πλαίσιο της συνεισφοράς της Διατριβής στο ερευνητικό έργο NOVI αναπτύχθηκε η Οντολογία Πολιτικών σαν μέρος ενός συνολικού Πληροφοριακού Μοντέλου που ικανοποιεί τις ανάγκες για ομοσπονδιοποίηση [Maglaris15]. Το μοντέλο αποτελείται από τρεις οντολογίες (Πόρων, Παρακολούθησης, Πολιτικών) που αλληλοσυμπληρώνονται στον καθορισμό του συνολικού μοντέλου. Η Οντολογία Πόρων (Resource Ontology) περιγράφει τους βασικούς πόρους και υπηρεσίες που προσφέρονται. Η βασική οντότητα *Resource* (Πόρος) αναπαριστά κάθε πιθανό φυσικό ή εικονικό υπολογιστικό ή δικτυακό πόρο ενώ η οντότητα *Service* (Υπηρεσία) αναπαριστά τις υπηρεσίες που παρέχονται προς τους χρήστες, επιτυγχάνοντας έτσι το διαχωρισμό της επιθυμητής υπηρεσίας από τη φυσική υλοποίηση που την παρέχει. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται οι βασικές κλάσεις της Οντολογίας Πόρων.



Σχήμα 3.1 : Διάγραμμα Κλάσεων της Οντολογίας Πόρων

Η κλάση *Resource* (Πόρος) αναπαριστά τους πόρους που μπορούν να διατεθούν από την κάθε υποδομή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 αυτή έχει τρεις υποκλάσεις. Το *Node* (Κόμβος) που αντιπροσωπεύει φυσικούς κόμβους και έχει σαν υποκλάση το *VirtualNode* (Εικονικός Κόμβος) που αντιπροσωπεύει εικονικοποιημένους κόμβους. Η κλάση *NetworkElement* (Δικτυακό Στοιχείο) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συνδεσιμότητα των πόρων. Το *Interface* (Διεπαφή) είναι το σημείο στο οποίο γίνεται η σύνδεση ενώ το *Link* (Σύνδεσμος) περιγράφει τις συνδέσεις μεταξύ των διεπαφών. Η κλάση *NodeComponent* (Συστατικό Κόμβου) περιγράφει τις δυνατότητες των κόμβων οι οποίες έχουν να κάνουν κυρίως με τον επεξεργαστή, τη μνήμη και τον αποθηκευτικό χώρο.

Η κλάση *Service* (Υπηρεσία) παρέχει τη δυνατότητα να εκφράζονται οι απαιτήσεις των χρηστών με τρόπο που τις διαχωρίζει από τους πόρους που θα χρησιμοποιηθούν για την ικανοποίησή τους. Έχει σαν υποκλάσεις το *ProcessingService* (Υπηρεσία Επεξεργασίας), *MemoryService* (Υπηρεσία Μνήμης) και *StorageService* (Υπηρεσία Αποθήκευσης) που αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά των πόρων (*NodeComponents*).

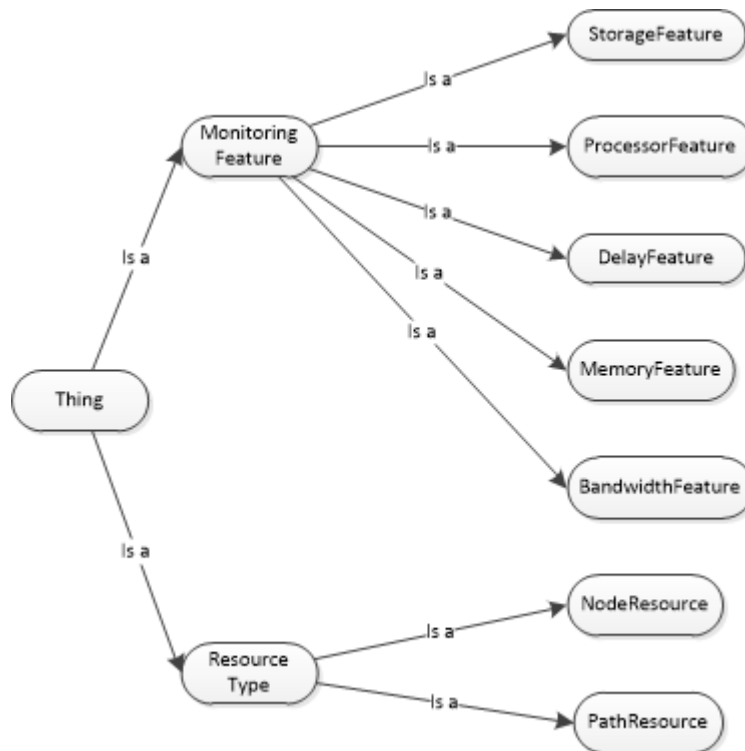


Σχήμα 3.2 : Υπηρεσίες και Συστατικά Κόμβων σε Federated Slice

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται πως το ομοσπονδιοποιημένο καλάθι από πόρους (*FederatedSlice*) περιλαμβάνει (*contains*) κόμβους (*Nodes*) οι οποίοι έχουν σαν συστατικά (*hasComponent*), τα *NodeComponents* και παρέχουν (*hasService*) Υπηρεσίες (*Services*) με βάση τις απαιτήσεις που θέτουν οι χρήστες.

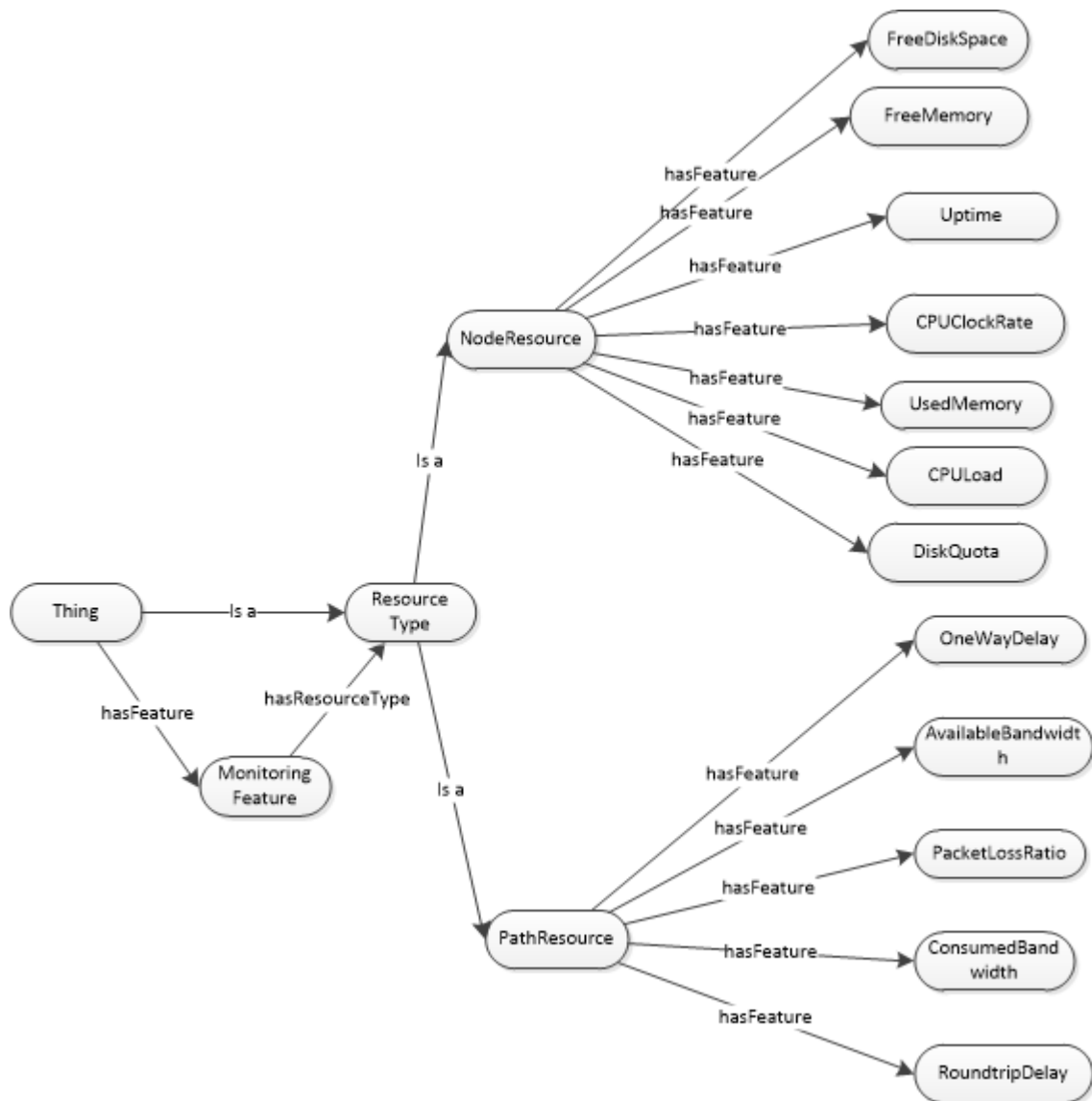
Η Οντολογία Παρακολούθησης (Monitoring Ontology) εμπεριέχει την περιγραφή για τα δεδομένα παρακολούθησης λειτουργίας των υπό διαχείριση πόρων. Αυτό περιλαμβάνει τις μετρικές για την κατάσταση λειτουργίας και τη χρησιμοποίηση των πόρων, τα

εργαλεία και τις ρυθμίσεις τους, όπως επίσης και το χειρισμό των ιδιοτήτων και των δεδομένων παρακολούθησης.



Σχήμα 3.3 : Οντολογία Παρακολούθησης (Monitoring Ontology)

Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει τις βασικές κλάσεις της Οντολογίας Παρακολούθησης. Η κλάση *ResourceType* (Τύπος Πόρου) και οι υποκλάσεις της *NodeResource* (Κόμβος) και *PathResource* (Διαδρομή) αναπαριστούν τις οντότητες πάνω στις οποίες μπορεί να εφαρμοστούν μετρήσεις. Η υποκλάση *NodeResource* περιλαμβάνει όλα τα είδη κόμβων ενώ η *PathResource* όλα τα είδη συνδέσμων στα οποία εφαρμόζονται οι μετρήσεις. Η κλάση *MonitoringFeature* (Μετρήσιμο Χαρακτηριστικό) αντιπροσωπεύει όλα τα υπό παρακολούθηση χαρακτηριστικά των κόμβων και συνδέσεων. Έχει σαν υποκλάσεις τα *StorageFeature* (Χαρακτηριστικό Αποθήκευσης), *ProcessingFeature* (Χαρακτηριστικό Επεξεργασίας), *DelayFeature* (Χαρακτηριστικό Καθυστέρησης), *MemoryFeature* (Χαρακτηριστικό Μνήμης) και *BandwidthFeature* (Χαρακτηριστικό Εύρους Ζώνης). Αυτά αφορούν τα διάφορα επιμέρους μετρήσιμα χαρακτηριστικά των κόμβων και των συνδέσεων.



Σχήμα 3.4 : Σχέσεις και Ιδιότητες της Monitoring Ontology

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 όλες οι οντότητες μπορούν να έχουν μετρήσιμα χαρακτηριστικά, αφού η σχέση *hasFeature* συνδέει την κλάση *Thing* με το *MonitoringFeature*. Επίσης βλέπουμε τα διάφορα επιμέρους μετρήσιμα χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα για τους κόμβους και τους συνδέσμους. Η Οντολογία Πολιτικών που παρουσιάζεται στη συνέχεια αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά αυτά για την εφαρμογή πολιτικών που ασκούν διαχειριστικό έλεγχο με βάση την κατάσταση λειτουργίας των διαφόρων αντικειμένων.

Η Οντολογία Πολιτικών (Policy Ontology) περιγράφει τις πολιτικές που εφαρμόζονται στους πόρους και τις υπηρεσίες όπως αυτές περιγράφονται στην Οντολογία Πόρων, αξιοποιώντας στοιχεία και από την Οντολογία Παρακολούθησης. Το υπόλοιπο Κεφάλαιο

επικεντρώνεται στην Οντολογία Πολιτικών όπως ορίστηκε και υλοποιήθηκε. Ολόκληρη η Οντολογία Πολιτικών είναι διαθέσιμη σε δικτυακό αποθετήριο⁴³. Η υλοποίηση έγινε στη γλώσσα OWL που υποστηρίζει σημασιολογία και λογική εξαγωγή συμπερασμάτων, όπως συμβαίνει στις γλώσσες του σημασιολογικού ιστού. Η αποθήκευση των κανόνων γίνεται σε μορφή τριπλέτων RDF [W3C14]. Τα στιγμιότυπα των οντοτήτων μπορούν να αποθηκεύονται και σαν αντικείμενα της γλώσσας Java [Wibisono13].

Η Οντολογία Πολιτικών παρέχει υποστήριξη για τη λειτουργικότητα ενός συστήματος βασισμένου σε πολιτικές, όπου οι πολιτικές αξιοποιούνται για τον καθορισμό της συμπεριφοράς του υπό διαχείριση περιβάλλοντος. Οι δύο βασικοί τύποι πολιτικών εκφράζονται μέσα από την οντολογία και είναι οι ακόλουθοι:

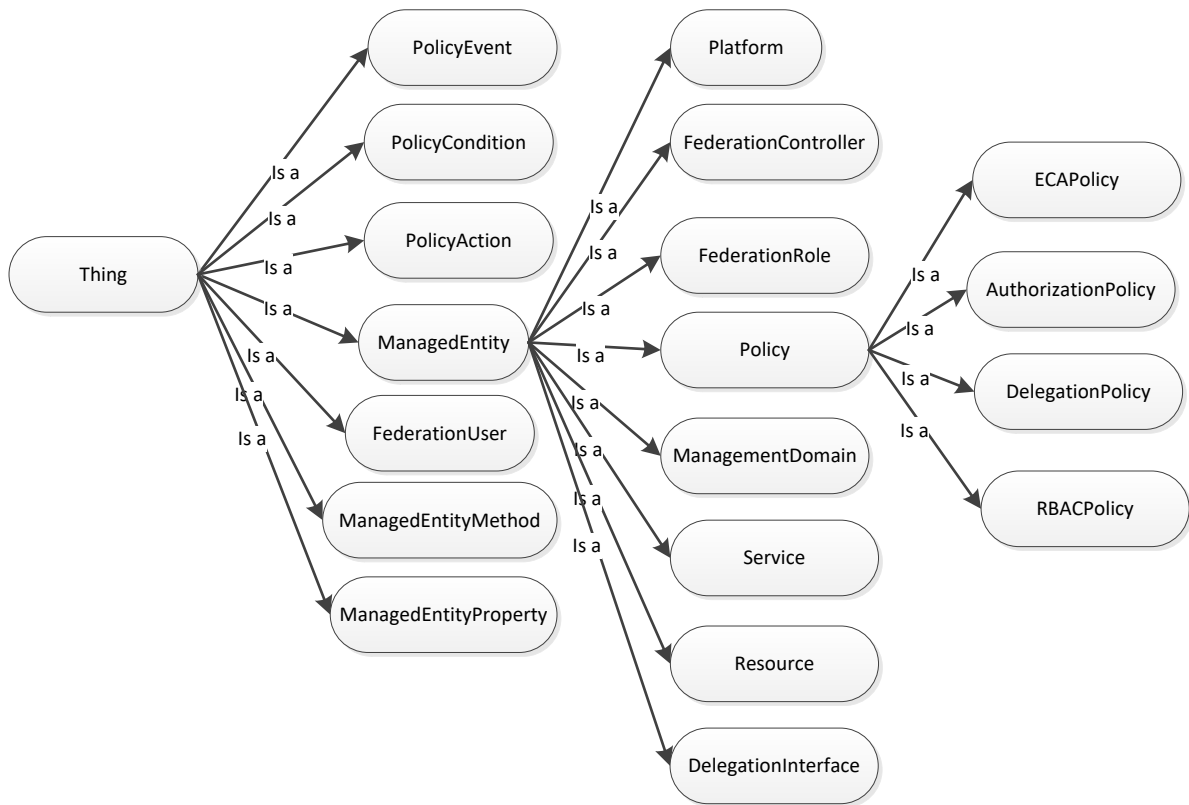
- Πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization Policies)
Οι πολιτικές αυτές καθορίζουν ποιες ενέργειες επιτρέπεται να εκτελεστούν από ένα υποκείμενο σε κάποιο άλλο διαχειριστικό αντικείμενο.
- Πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation or Event Condition Action (ECA) Policies)
Οι πολιτικές αυτές εφαρμόζουν ενέργειες ελέγχου και διαχείρισης με βάση συγκεκριμένα συμβάντα που εκτυλίσσονται στο περιβάλλον διαχείρισης.

Επίσης μπορούν να εκφραστούν και οι ακόλουθες πολιτικές που βασίζονται στους δύο βασικούς τύπους πολιτικών:

- Πολιτικές Ελέγχου Πρόσβασης (Role-based Access Control RBAC)
Οι πολιτικές αυτές αποτελούν ειδική περίπτωση πολιτικών Υποχρέωσης και χρησιμοποιούνται για την ανάθεση ρόλων στους χρήστες, παρέχοντάς τους διαφορετικές προτεραιότητες στους διάφορους διαθέσιμους πόρους και υπηρεσίες.
- Πολιτικές Αντιπροσώπευσης (Delegation Policies)
Οι πολιτικές αυτές καθορίζουν τις υποχρεώσεις που έχει κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή προς τις υπόλοιπες Υποδομές εκφρασμένες σαν ένα σύνολο από πολιτικές Εξουσιοδότησης και πολιτικές Υποχρέωσης.

⁴³ http://wiki.fp7-novi.eu/pub/WP2/Documents/policy_imV4.owl

Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει σε ιεραρχική μορφή τις κλάσεις που αποτελούν το Πληροφοριακό Μοντέλο.



Σχήμα 3.5 : Διάγραμμα Κλάσεων του Πληροφοριακού Μοντέλου

Οι βασικές κλάσεις που ορίζονται είναι οι ακόλουθες:

- **ManagedEntity (Διαχειριστική Οντότητα):** είναι κάθε οντότητα που μπορεί να τύχει διαχείρισης. Περιλαμβάνει τις κλάσεις των Πόρων και Υπηρεσιών, όπως και τις Πολιτικές καθώς μπορούν και αυτές να τύχουν διαχείρισης.
- **FederationUser (Χρήστης Ομοσπονδίας):** είναι ο χρήστης της ομοσπονδιοποιημένης Υποδομής. Στην πραγματικότητα όλοι οι χρήστες ανήκουν αποκλειστικά στην Εικονικοποιημένη Υποδομή από την οποία προέρχονται. Μετά την ταυτοποίησή τους όμως αποκτούν τα χαρακτηριστικά του *FederationUser*. Η κλάση αυτή περιέχει τις απαιτούμενες ιδιότητες για τους χρήστες αυτούς.
- **PolicyAction (Ενέργεια Πολιτικής):** είναι η ενέργεια που μπορεί να εκτελεστεί για την εφαρμογή μιας πολιτικής.

- **PolicyEvent (Συμβάν Πολιτικής):** είναι το συμβάν που μπορεί να ληφθεί για να εκκινήσει η εφαρμογή μιας πολιτικής.
- **PolicyCondition (Συνθήκη Πολιτικής):** είναι η συνθήκη που πρέπει να ισχύει για να εφαρμοστεί η πολιτική και να εκτελεστούν οι ενέργειες.
- **ManagedEntityMethod (Μέθοδος Διαχειριστικής Οντότητας):** είναι η μέθοδος/συνάρτηση της διαχειριστικής οντότητας μέσω της οποίας μπορεί μια πολιτική να αλληλεπιδράσει μαζί της.
- **ManagedEntityProperty (Ιδιότητα Διαχειριστικής Οντότητας):** είναι η ιδιότητα της διαχειριστικής οντότητας. Οι ιδιότητες είναι δυναμικές και μπορούν να αλλάζουν τιμές κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να αξιοποιηθούν σαν συνθήκες για τις πολιτικές που εφαρμόζονται. Για παράδειγμα μπορεί μια ιδιότητα της οντότητας «Εικονικός Κόμβος» να καθορίζει το μέγιστο επιτρεπτό χρονικό διάστημα για το οποίο μπορεί να γίνει μια δέσμευση. Η πολιτική για δέσμευση κόμβων θα έχει σαν συνθήκη ότι ο χρόνος δέσμευσης πρέπει να είναι μικρότερος της τιμής αυτής. Έτσι η συνθήκη αυτή θα απαγορεύει τη δέσμευση του κόμβου αν το χρονικό διάστημα της δέσμευσης υπερβαίνει την τιμή που τέθηκε σαν όριο.

Η Διαχειριστική Οντότητα (*ManagedEntity*) έχει αρκετές υποκλάσεις. Οι υποκλάσεις αυτές διατηρούν όλα τα χαρακτηριστικά της Διαχειριστικής Οντότητας και ορίζουν επιπλέον νέα που τις χαρακτηρίζουν. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5 υπάρχουν οι ακόλουθες υποκλάσεις:

- **Management Domain (Διαχειριστικό Υπο-δέντρο):** είναι το σύνολο των αντικειμένων στα οποία μπορούν να εφαρμόζονται πολιτικές με έναν ενιαίο τρόπο. Η εφαρμογή μιας πολιτικής σε ένα διαχειριστικό υπο-δέντρο υπονοεί την εφαρμογή της σε όλα τα περιεχόμενά του. Κάθε υπο-δέντρο μπορεί να περιέχει Διαχειριστικές Οντότητες όπως και υπο-δέντρο για καλύτερη οργάνωση και διαχείριση.
- **Policy (Πολιτική):** είναι η αφηρημένη κλάση που ορίζει τις βασικές συναρτήσεις και ιδιότητες στις πολιτικές που μπορεί να εφαρμοστούν. Η κλάση αυτή έχει, σαν

υποκλάσεις της, τους διάφορους συγκεκριμένους τύπους πολιτικών. Η ύπαρξη της κλάσης αυτής διευκολύνει τον ορισμό των υπόλοιπων κλάσεων πολιτικών καθώς συγκεντρώνει τα κοινά τους στοιχεία.

- **Resource (Πόρος):** είναι κάθε φυσικός ή εικονικός πόρος πάνω στον οποίο μπορεί να εφαρμοστεί μια πολιτική. Η κλάση αυτή με τις ιδιότητες και τις σχέσεις της ορίζεται στην Οντολογία Πόρων. Με τη συμπερίληψή της στην ιεραρχία κλάσεων κάτω από τη Διαχειριστική Οντότητα αποκτά επιπλέον ιδιότητες και επιτρέπει την εφαρμογή σε αυτήν πολιτικών για τη διαχείρισή της.
- **Service (Υπηρεσία):** εκφράζει τις παρεχόμενες Υπηρεσίες προς τους χρήστες. Η κλάση αυτή ορίζεται στην Οντολογία Πόρων.
- **Platform (Πλατφόρμα - Εικονικοποιημένη Υποδομή):** είναι κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή που συμμετέχει στην ομοσπονδία. Η κλάση αυτή με τις ιδιότητες και τις σχέσεις της ορίζεται στην Οντολογία Πόρων.
- **FederationRole:** είναι η κλάση που περιέχει τους ρόλους που μπορεί να κατέχει κάποιος χρήστης της ομοσπονδίας.
- **DelegationController** είναι η κλάση που φορτώνει και διαχειρίζεται τις Πολιτικές Αντιπροσώπευσης στις απομακρυσμένες Εικονικοποιημένες Υποδομές.
- **DelegationInterface** είναι η κλάση που προσφέρει τις απαιτούμενες διεπαφές για την έκφραση των πολιτικών αντιπροσώπευσης. Οι διεπαφές αυτές είναι εκφρασμένες με γενικό τρόπο ούτως ώστε να μπορούν να εφαρμόζονται κατάλληλα στην Εικονικοποιημένη Υποδομή στην οποία εφαρμόζονται.

Η κλάση Πολιτικών περιέχει ένα σύνολο από υποκλάσεις ανάλογα με τον τύπο πολιτικών που εκφράζει.

- **ECAPolicy Event-Condition-Action ή Obligation policy (Πολιτική τύπου Συμβάν-Συνθήκες-Ενέργειες ή Πολιτική Υποχρέωσης):** είναι η πολιτική Υποχρέωσης. Όταν υπάρξει κάποιο συμβάν στο διαχειριστικό περιβάλλον και ικανοποιούνται οι συνθήκες που έχουν τεθεί, τότε εκτελούνται οι ενέργειες που ορίζονται.

- **DelegationPolicy (Πολιτική Αντιπροσώπησης):** είναι ένα σύνολο από Πολιτικές που καθορίζουν τις δεσμεύσεις που αναλαμβάνει κάποια Εικονικοποιημένη Υποδομή σε σχέση με κάποια άλλη για τη δημιουργία της Ομοσπονδίας.
- **Role-based-access Control Policy (Πολιτική Ανάθεσης Ρόλων):** είναι η πολιτική που καθορίζει τους ρόλους που πρέπει να ανατίθενται στους χρήστες. Με βάση τους ρόλους αυτούς αποκτούν τα ανάλογα δικαιώματα και προτεραιότητες στην Ομοσπονδία.
- **Authorization Policy (Πολιτική Εξουσιοδότησης):** είναι η Πολιτική που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των δικαιωμάτων πρόσβασης και χρήσης σε Πόρους και Υπηρεσίες. Αυτές καθορίζονται με βάση το Ρόλο του κάθε χρήστη.

Η οντολογία εκτός από τις κλάσεις ορίζει και τις σχέσεις μεταξύ των διαφόρων κλάσεων καθώς και τις ιδιότητές τους. Με τον όρο Ιδιότητες Αντικειμένων (Object Properties) σε μια οντολογία εννοούμε όλες τις σχέσεις που συνδέουν δύο κλάσεις μεταξύ τους. Οι σχέσεις αυτές είναι σημαντικό τμήμα της οντολογίας καθώς ορίζουν και οργανώνουν τη γνώση. Επίσης είναι απαραίτητο τμήμα της οντολογίας στην αναπαράσταση της γνώσης και μετέπειτα στην εξαγωγή συμπερασμάτων ή και παραγωγή νέας γνώσης. Επίσης ορίζονται οι Ιδιότητες Δεδομένων οι οποίες ορίζουν κάποιες μεταβλητές με τύπους δεδομένων κάποια δομή δεδομένων.

Η οντολογία Πολιτικών ορίζει έναν αριθμό από Ιδιότητες Αντικειμένων. Παρακάτω εναποθέτουμε τις πιο σημαντικές.

- **hasMethod** εισάγει τη σχέση μεταξύ **ManagedEntity** και **ManagedEntityMethod**. Κάθε Διαχειριστική Οντότητα έχει ένα σύνολο από τέτοιες μεθόδους οι οποίες της δίνουν τη δυνατότητα να γίνεται διαχειρίσιμη με τη χρήση των Πολιτικών.
- **hasProperty** εισάγει τη σχέση μεταξύ **ManagedEntity** και **ManagedEntityProperty**. Κάθε Διαχειριστική οντότητα έχει ένα σύνολο από τέτοιες Ιδιότητες, οι τιμές των οποίων μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης, καθορίζοντας τη συμπεριφορά της με την ανάλογη ενεργοποίηση ή όχι των πολιτικών.

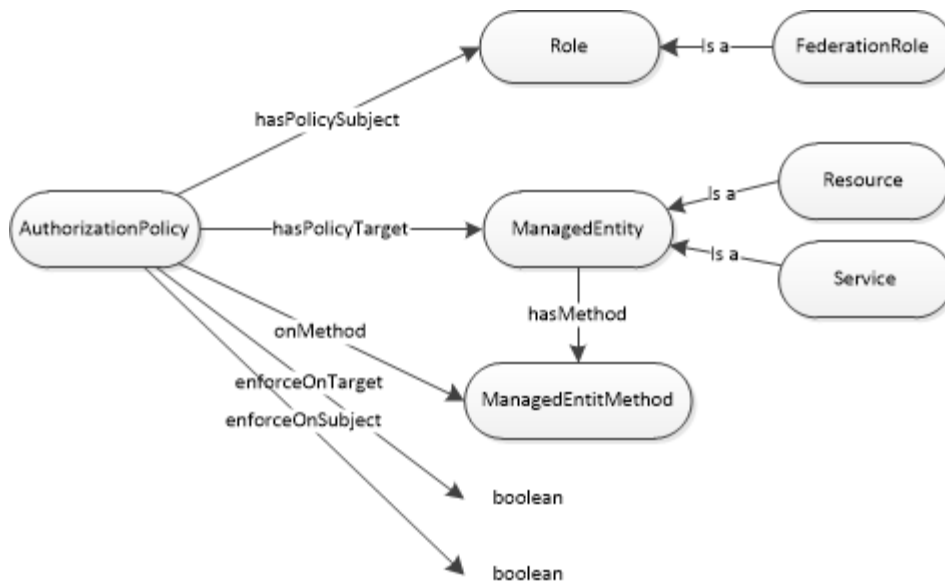
- **hasAttached** εισάγει τη σχέση μεταξύ **Policy** και **ManagedEntity**. Κάθε Πολιτική επισυνάπτεται σε μία ή περισσότερες Διαχειριστικές Οντότητες, με αποτέλεσμα να μπορεί να τη διαχειρίζεται.
- **Includes** εισάγει τη σχέση μεταξύ **ManagementDomain** και **ManagedEntities**. Κάθε Διαχειριστικός υπο-δέντρο περιέχει ένα σύνολο Διαχειριστικών Οντοτήτων. Λόγω του ότι το Διαχειριστικό υπο-δέντρο είναι και αυτό Διαχειριστική Οντότητα, μπορεί να υπάρξει και ενθυλάκωση υπο-δέντρων μέσα σε άλλα.
- **hasFederationRole** εισάγει τη σχέση μεταξύ **FederationUser** και **FederationRole**. Κάθε χρήστης της ομοσπονδίας έχει κάποιο συγκεκριμένο ρόλο στην ομοσπονδία. Αυτός προκύπτει από τις Πολιτικές ανάθεσης Ρόλων (RBAC Policies). Με βάση το ρόλο αυτό καθορίζονται και τα δικαιώματα πρόσβασης.
- **hasUserPlatform** εισάγει τη σχέση μεταξύ **FederationUser** και **Platform**, ούτως ώστε ο κάθε χρήστης να είναι συνδεδεμένος με την Εικονικοποιημένη Υποδομή στην οποία ανήκει. Αυτό καθορίζει το ρόλο και τα δικαιώματα που θα λάβει.
- **hasAction** εισάγει τη σχέση μεταξύ **PolicyAction** και **ManagedEntityMethod**. Αυτός είναι ο τρόπος για να συνδεθούν οι ενέργειες των Πολιτικών τύπου ECA με τις μεθόδους στις οποίες εφαρμόζονται. Η πολιτική **ECAPolicy** έχει τα **PolicyActions**, που είναι συνδεδεμένα με τις μεθόδους **ManagedEntityMethods** της Οντότητας **ManagedEntity** που θα ενεργοποιείται κάθε φορά.
- **hasCondition** εισάγει τη σχέση μεταξύ **PolicyCondition** και **ManagedEntityProperty**. Έτσι δίνεται η δυνατότητα σε αυτές τις ιδιότητες να μπαίνουν σαν περιορισμοί στις Πολιτικές τύπου ECA.
- **hasPolicyAction** εισάγει τη σχέση μεταξύ **ECAPolicy** και **PolicyAction**. Κάθε Πολιτική τύπου ECA, συνδέεται με ένα σύνολο από τέτοιες ενέργειες οι οποίες εκτελούνται όταν η πολιτική εφαρμόζεται. Η μη άμεση σύνδεση της πολιτικής με τη μέθοδο που θα εκτελεστεί παρέχει ευχέρεια στην παραμετροποίηση της εκτέλεσης και καλύτερο έλεγχο.
- **hasPolicyEvent** εισάγει τη σχέση μεταξύ **ECAPolicy** και **PolicyEvent**. Κάθε Πολιτική τύπου ECA έχει ένα σύνολο από Συμβάντα τα οποία μπορούν να ληφθούν σαν

ειδοποιήσεις κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης και να προκαλέσουν την εκτέλεση των ενεργειών.

- **hasPolicyCondition** εισάγει τη σχέση μεταξύ **ECAPolicy** και **PolicyCondition**. Κάθε Πολιτική τύπου ECA έχει ένα σύνολο από Συνθήκες οι οποίες μπορούν να εξεταστούν και πρέπει να ισχύουν για να ενεργοποιηθεί μια Πολιτική.
- **hasPolicySubject** εισάγει τη σχέση μεταξύ **AuthorizationPolicy** και **ManagedEntity**. Χρησιμοποιείται για εφαρμογή της Πολιτικής σε κάποια Διαχειριστική οντότητα εισάγοντάς την ως υποκείμενο της Πολιτικής. Η Διαχειριστική αυτή Οντότητα σαν αποτέλεσμα της εφαρμογής κάθε Πολιτικής θα αποκτήσει ή θα απολέσει δικαιώματα στην οντότητα που λαμβάνει το ρόλο του στόχου της πολιτικής. Συνήθως χρησιμοποιείται σαν υποκείμενο κάποιος Ρόλος ή ένας Διαχειριστικό υπο-δέντρο που περιέχει ένα σύνολο από Ρόλους.
- **hasPolicyTarget** εισάγει τη σχέση μεταξύ **AuthorizationPolicy** και **ManagedEntity**. Χρησιμοποιείται για εφαρμογή της Πολιτικής σε κάποια Διαχειριστική οντότητα εισάγοντάς την ως στόχο της Πολιτικής. Με την Πολιτική αυτή θα παραχωρηθούν ή θα στερηθούν τα δικαιώματα που εφαρμόζονται σε αυτή την Οντότητα. Συνήθως σαν στόχος χρησιμοποιείται κάποιος Πόρος ή Υπηρεσία ή ένα Διαχειριστικό υπο-δέντρο που περιέχει τέτοια σύνολα.
- **onMethod** εισάγει τη σχέση μεταξύ **AuthorizationPolicy** και **ManagedEntityMethod**. Ορίζει τη μέθοδο της οντότητας την οποία αφορά η Πολιτική Εξουσιοδότησης.
- **onStart** και **onStop** εισάγει τη σχέση μεταξύ **DelegationPolicy** και **PolicyAction**. Ορίζει τις ενέργειες που πρέπει να εκτελούνται κατά την έναρξη και τον τερματισμό μιας πολιτικής Αντιπροσώπευσης.
- **hasPolicy** εισάγει τη σχέση μεταξύ **DelegationPolicy** και **ECAPolicy**. Παρέχει τη δυνατότητα να ορίσουμε τις Πολιτικές που περιέχει μια Πολιτική Αντιπροσώπευσης.

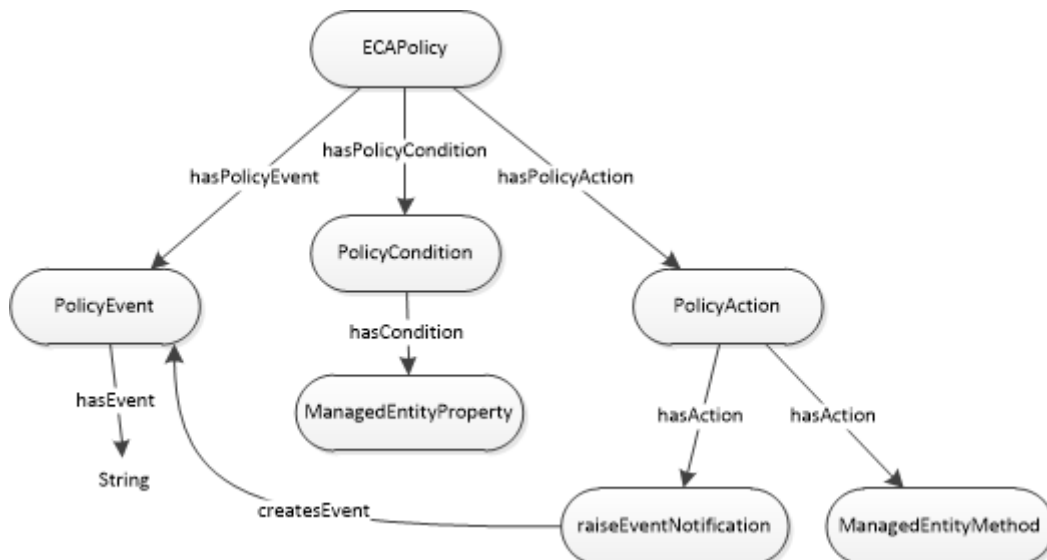
- **hasInterface** εισάγει τη σχέση μεταξύ **DelegationPolicy** και **DelegationInterface**. Κάθε Πολιτική Αντιπροσώπευσης έχει ένα σύνολο από διεπαφές πάνω στις οποίες εφαρμόζονται οι Πολιτικές.
- **acceptsEvent**, **providesEvent** και **raiseEvent** εισάγει τις σχέσεις μεταξύ **DelegationInterface** και **PolicyEvent**. Κάθε διεπαφή μπορεί να δέχεται, παρέχει και να δημιουργεί Συμβάντα με σκοπό να μπορεί να αλληλεπιδρά με άλλες Διαχειριστικές Οντότητες.
- **hasLoaded** εισάγει τη σχέση μεταξύ **DelegationController** και **DelegationPolicy**. Κάθε ελεγκτής αντιπροσώπευσης μπορεί να φορτώσει τις Πολιτικές αντιπροσώπευσης σε μια απομακρυσμένη Εικονικοποιημένη Υποδομή.

Στα τρία σχήματα (Σχήμα 3.6, Σχήμα 3.7 και Σχήμα 3.8) βλέπουμε γραφικές αναπαραστάσεις των προαναφερθέντων κλάσεων με τις ιδιότητες αντικειμένων που τις συνδέουν όπως προαναφέρθηκαν καθώς και ορισμένες ιδιότητες δεδομένων που περιέχουν σαν μεταβλητές. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 3.6 βλέπουμε πως μια πολιτική εξουσιοδότησης (*AuthorizationPolicy*) δέχεται σαν αντικείμενο (*hasPolicyTarget*) κάποιο ρόλο και έχει σαν στόχο (*hasPolicyTarget*) μια διαχειριστική οντότητα (*ManagedEntity*), ενώ απευθύνεται και σε συγκεκριμένη μέθοδο (*onMethod*) της οντότητας αυτής. Τέλος, βλέπουμε ότι η εφαρμογή της πολιτικής μπορεί να γίνεται στο αντικείμενο (subject) ή/και στο στόχο (target).



Σχήμα 3.6 : Σχέσεις μεταξύ Κλάσεων για τον Ορισμό Authorization Policies

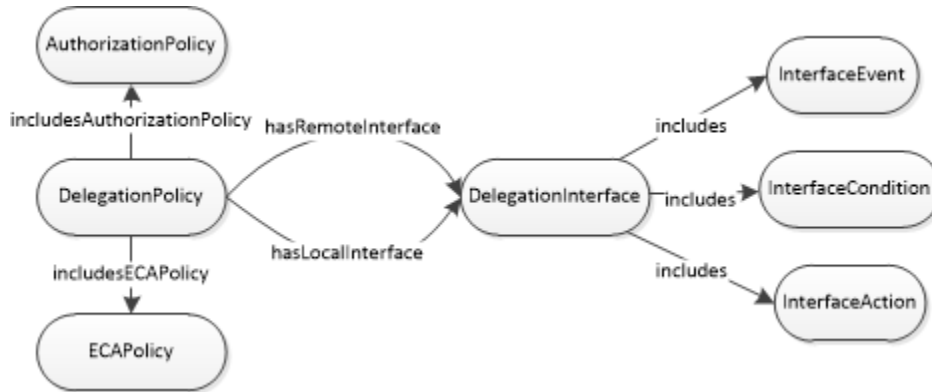
Στο Σχήμα 3.7 βλέπουμε τα τρία βασικά συστατικά μιας πολιτικής Υποχρέωσης (Obligation Policy). Το συμβάν (event) μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μια ακολουθία συμβόλων (string). Οι συνθήκες (conditions) είναι ιδιότητες/μεταβλητές κάποιου διαχειριστικού αντικειμένου και οι ενέργειες (actions) μπορεί να είναι δημιουργία νέων συμβάντων (*raiseEventNotification*), ή εκτέλεση μεθόδων κάποιου διαχειριστικού αντικειμένου (*ManagedEntityMethod*).



Σχήμα 3.7 : Σχέσεις μεταξύ Κλάσεων για τον Ορισμό Obligation policies

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η βασική λειτουργικότητα των πολιτικών αντιπροσώπευσης. Η κάθε πολιτική περιλαμβάνει τοπικές (*hasLocalInterface*) και

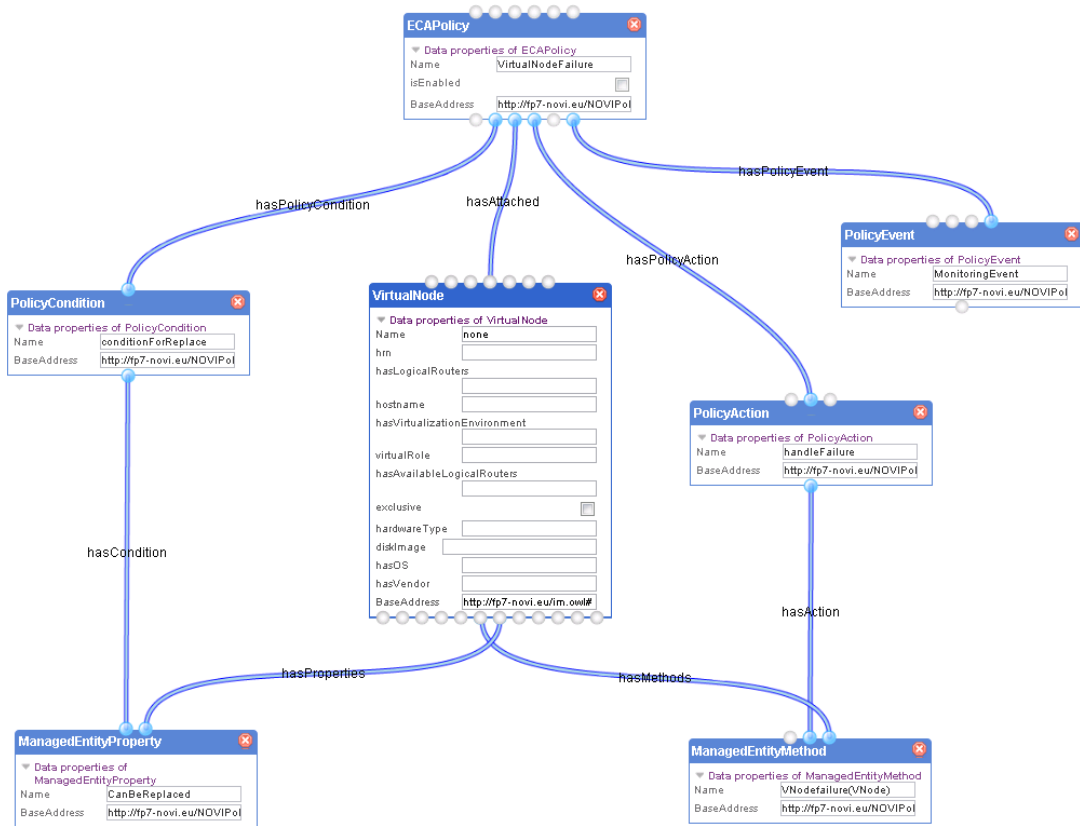
απομακρυσμένες (*hasRemoteInterface*) διεπαφές (*DelegationInterfaces*), οι οποίες αξιοποιούνται για την ενεργοποίηση και εφαρμογή των πολιτικών μέσω των συμβάντων (*InterfaceAction*), συνθηκών (*InterfaceCondition*) και ενεργειών (*InterfaceAction*) που εφαρμόζονται.



Σχήμα 3.8 : Σχέσεις μεταξύ Κλάσεων για τον ορισμό Delegation Policies

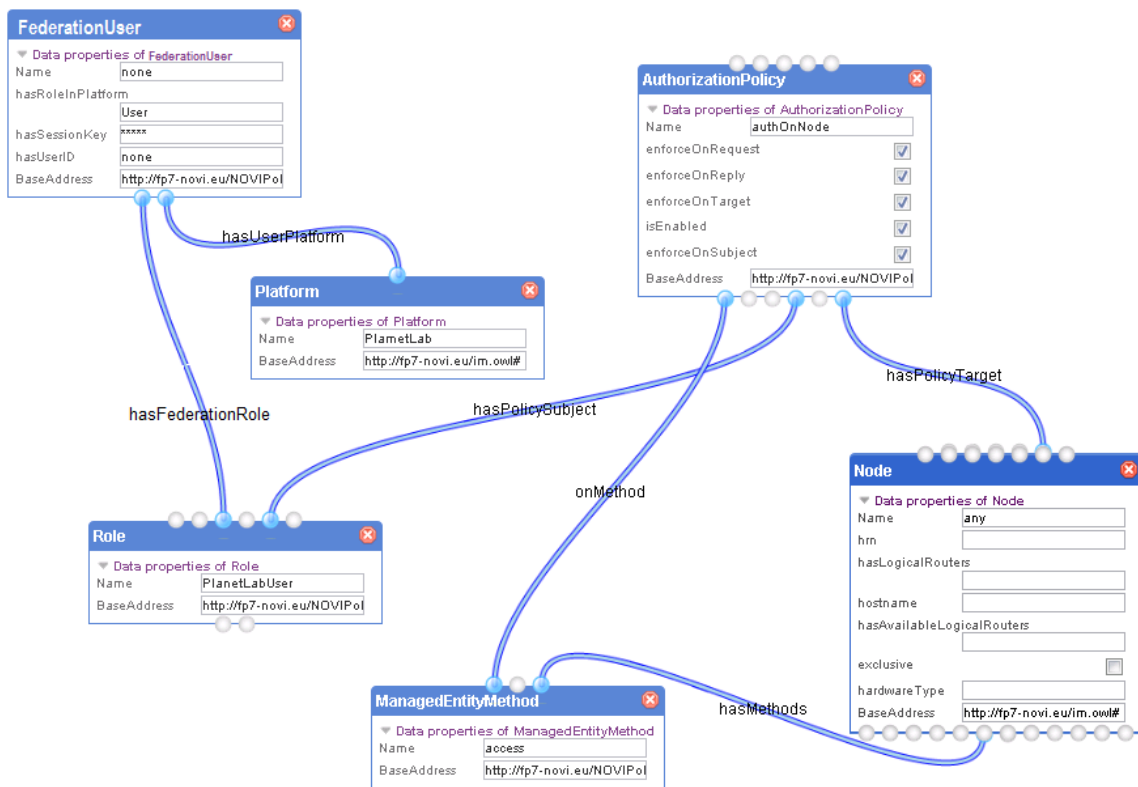
Μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος GUI είναι δυνατή η δημιουργία πολιτικών οι οποίες στη συνέχεια μπορούν να αποθηκεύονται σε μορφή OWL. Για τα παραδείγματα που ακολουθούν χρησιμοποιήσαμε το γραφικό περιβάλλον⁴⁴ του έργου NOVI, το οποίο περιλαμβάνει την Οντολογία Πολιτικών που υλοποιήθηκε. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται ο τρόπος καθορισμού μιας πολιτικής τύπου Υποχρέωσης (*Obligation Policy*). Το αντικείμενο *VirtualNodeFailure* της κλάσης *ECAPolicy* είναι συνδεδεμένο με το αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζεται η πολιτική με τη σχέση *hasAttached*. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η εφαρμογή της πολιτικής γίνεται στην κλάση *VirtualNode* υπονοώντας όλα τα αντικείμενα αυτής της κλάσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα η πολιτική περιέχει και τα τρία βασικά μέρη που απαιτούνται για μια πολιτική Υποχρέωσης. Αυτά είναι το *PolicyEvent* που αποτελεί το συμβάν που ενεργοποιεί την πολιτική, τα *PolicyConditions* που είναι οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται για την ενεργοποίηση της πολιτικής, όπου στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι η ιδιότητα *CanBeReplaced* του αντικειμένου στο οποίο εφαρμόζεται η πολιτική. Τέλος, έχουμε την ενέργεια *PolicyAction* η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι η πρόκληση ενός νέου συμβάντος (event) που εκτελεί συγκεκριμένες ενέργειες ανάλογα με το τι θέλει να πετύχει η κάθε πολιτική. Με αντίστοιχο γραφικό τρόπο μπορούν να δημιουργηθούν πολιτικές όλων των τύπων.

⁴⁴ <http://novi-im.appspot.com/>



Σχήμα 3.9 : Δημιουργία Obligation Policy με Γραφικό Περιβάλλον

Στο Σχήμα 3.10 βλέπουμε τη γραφική αναπαράσταση μιας πολιτικής εξουσιοδότησης. Η πολιτική έχει το όνομα *authOnNode* και παρέχει στους χρήστες με ρόλο *PlanetLabUser* δικαίωμα δέσμευσης σε όλους τους κόμβους της υποδομής στην οποία εφαρμόζεται η πολιτική. Βλέπουμε ότι ο ρόλος εφαρμόζεται σαν *policySubject* και ο Node σαν *policyTarget*. Συγκεκριμένα η πολιτική εφαρμόζεται στη μέθοδο *Access* που αξιοποιείται στη συνέχεια κατά τη δέσμευση των πόρων. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η σύνδεση του *FederationUser* με το *FederationRole* βάσει της πλατφόρμας στην οποία ανήκει και του ρόλου που κατέχει σε αυτή.



Σχήμα 3.10 : Δημιουργία Authorization Policy με Γραφικό Περιβάλλον

Μέσω των παραδειγμάτων αυτών γίνεται κατανοητή η ευκολία με την οποία μπορούν να εκφραστούν οι πολιτικές, διατηρώντας αφενός υψηλό επίπεδο κοντά στην εμπορική σκοπιά των εννοιών αλλά έχοντας ταυτόχρονα και άμεση συσχέτιση με την φυσική υπόσταση των πόρων και υπηρεσιών που προσφέρονται.

3.3 Συμβολή του Προτεινόμενου Μοντέλου

Το προτεινόμενο μοντέλο προσφέρει την απαιτούμενη λειτουργικότητα για την ομοσπονδιοποίηση των υποδομών. Παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε πολλαπλά επίπεδα σε σχέση με προϋπάρχοντα μοντέλα.

1. Έχει την ικανότητα να περιγράφει τους πόρους και τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφερθούν σε χρήστες εικονικοποιημένων υποδομών διαχωρίζοντας τις ζητούμενες υπηρεσίες, από τους πόρους που αξιοποιούνται για την ικανοποίησή τους. Οι πολιτικές μπορούν να εφαρμόζονται και στα δύο επίπεδα, καθορίζοντας τις υπηρεσίες με τα χαρακτηριστικά τους, στις οποίες μπορεί να έχει πρόσβαση κάποιος χρήστης με βάση το ρόλο του, αλλά ενδεχομένως και τους πόρους που μπορεί να δεσμεύσει.
2. Οι πολιτικές περιγράφονται σε υψηλό επίπεδο ανεξάρτητα από κατασκευαστές, συγκεκριμένες υλοποιήσεις και πλατφόρμες. Ταυτόχρονα όμως οι περιγραφές είναι πολύ κοντά στην πραγματική υλοποίησή τους σε γλώσσες έκφρασης πολιτικών. Έτσι μπορεί να γίνει άμεση μετατροπή τους από την Οντολογία Πολιτικών σε κάποια γλώσσα έκφρασης και εφαρμογής πολιτικών.
3. Η Οντολογία Πολιτικών περιγράφει με ενιαίο τρόπο τις πολιτικές ομοσπονδιοποίησης παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα επίτευξης ομοσπονδίας με βάση πολιτικές. Κάτι τέτοιο γίνεται κατορθωτό με σημαντικά πλεονεκτήματα όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 4.
4. Η οντολογία μπορεί να αξιοποιηθεί και για ομοσπονδιοποίηση σε διαφορετικούς τομείς. Το γεγονός ότι η υλοποίηση του Μοντέλου είναι με ξεχωριστές οντολογίες, δίνει τη δυνατότητα με μικρές αλλαγές να γίνει αξιοποίηση του Μοντέλου για ομοσπονδοποιήσεις σε άλλες περιοχές όπως για παράδειγμα σε υποδομές υπολογιστικού νέφους (cloud computing) και δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό. Σε τέτοια περίπτωση η Οντολογία Πολιτικών θα παρέμενε σχεδόν αναλλοίωτη. Μια τέτοια επέκταση της οντολογίας σε δίκτυα οριζόμενα από λογισμικό παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

Έχει αρκετές ομοιότητες αλλά και σημαντικές διαφορές με το DEN-ng [Strassner09b]. Καταρχάς χρησιμοποιεί τη γλώσσα OWL αντί της UML, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερη εκφραστικότητα στις σχέσεις μεταξύ οντοτήτων και μεγαλύτερη ευκολία στην παραγωγή γνώσης διαμέσου των αποθηκευμένων δεδομένων και των σημασιολογικών ερωτημάτων. Ο σαφής διαχωρισμός που γίνεται μεταξύ των οντολογιών στο προτεινόμενο μοντέλο παρέχει την ευχέρεια να υλοποιούνται οι πολλαπλοί βρόγχοι ελέγχου με πολύ πιο ξεκάθαρο τρόπο. Το ακόλουθο παράδειγμα βοηθά στην κατανόηση της λειτουργίας των βρόγχων ελέγχου στο προτεινόμενο μοντέλο. Έχουμε ένα σύνολο από πόρους που παρέχονται σε κάποιο χρήστη της ομοσπονδίας με βάση τις προδιαγραφές που έχει δώσει. Ανάμεσα στις υπηρεσίες που προσφέρονται προς το χρήστη υπάρχει και η υπηρεσία πολιτικών που διασφαλίζει τη διατήρηση των προδιαγραφών που θέτει ο χρήστης σε όλη τη διάρκεια δέσμευσης των πόρων. Σε αυτήν την περίπτωση ο πρώτος βρόγχος ελέγχου μπορεί να διενεργείται μέσω μιας υπηρεσίας παρακολούθησης όπου ελέγχεται η κατάσταση λειτουργίας του κάθε πόρου αλλά και της διασύνδεσης μεταξύ των πόρων. Σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποιο πρόβλημα τότε δημιουργείται ένα συμβάν (event) το οποίο λαμβάνεται από την υπηρεσία πολιτικών η οποία αναλαμβάνει το χειρισμό του με βάση τις ενεργές πολιτικές. Πιθανή ενέργεια στο παράδειγμα που αναφέρθηκε θα ήταν η αντικατάσταση των πόρων που παρουσίασαν πρόβλημα λειτουργίας με άλλους καταλληλότερους πόρους [Ghijssen13].

Στην εργασία [Riekstin16b] γίνεται παρουσίαση του Πληροφοριακού Μοντέλου Sustainability Information Model (SLIM) που επεκτείνει το Policy Core Information Model (PCIM) [Moore01]. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε για να καλύψει την ανάγκη περιγραφής πολιτικών οι οποίες να λαμβάνουν υπόψη την ενεργειακή απόδοση. Τα περισσότερα συστήματα διαχείρισης αγνοούν κατά τη λήψη αποφάσεων τα θέματα ενεργειακής απόδοσης και ως εκ τούτου το μοντέλο SLIM αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση [Riekstin16a]. Το μοντέλο περιέχει μεταβλητές σχετικές με την ενεργειακή απόδοση των συσκευών. Επίσης ορίζει συνθήκες σχετικές με την κατανάλωση (EnergySourceCondition, EnvironmentCondition κ.α). Τέλος, εκτός από τις βασικές ενέργειες που ορίζει, ορίζει «Πράσινες» ενέργειες που βοηθούν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το Μοντέλο που προτείνουμε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με αντίστοιχο τρόπο και ελάχιστες τροποποιήσεις. Ο

τρόπος που υλοποιήθηκε το Μοντέλο επιτρέπει την εύκολη επέκτασή του για την προσθήκη μεταβλητών, συνθηκών, ενεργειών και πολιτικών σχετικών με την ενεργειακή απόδοση. Τέλος, η υποστήριξη σημασιολογίας θα μπορούσε να διευκολύνει την εφαρμογή των πολιτικών.

3.4 Συμπεράσματα

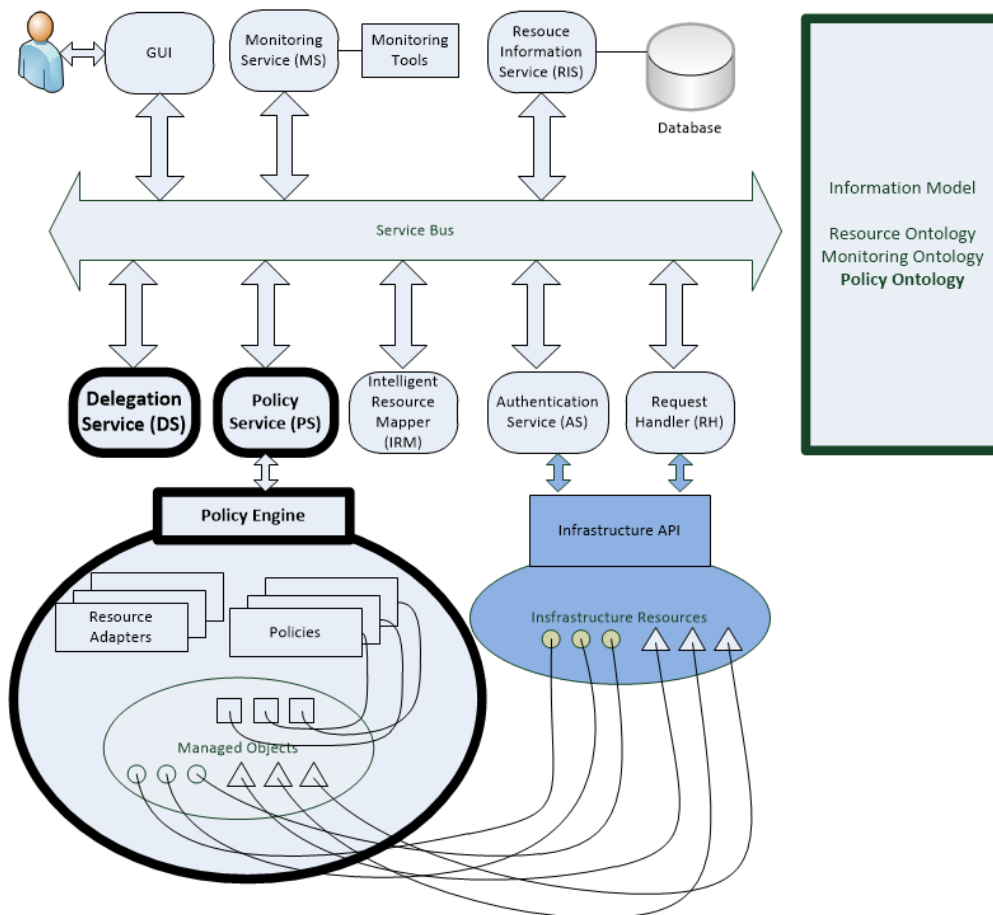
Η οντολογία Πολιτικών που αναπτύχθηκε παρέχει τη δυνατότητα Ομογενοποιημένης περιγραφής των πολιτικών για τη διαχείριση των εικονικοποιημένων υποδομών αλλά και τον τρόπο αναπαράστασης πολιτικών για τη διαχείριση της μεταξύ τους ομοσπονδίας. Αναφορικά με το Πληροφοριακό Μοντέλο γενικότερα, η αναπαράσταση όλων των πόρων και των υπηρεσιών δίνει την ευχέρεια να μπορούν οι πολιτικές να εκφράζονται με ενιαίο τρόπο ανεξάρτητα από το μοντέλο δεδομένων που χρησιμοποιείται σε κάθε υποδομή. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων και παραγωγής νέας γνώσης μέσω σημασιολογικών ερωτημάτων όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4.

4 Χρήση Πολιτικών για Ομοσπονδιοποίηση Εικονικοποιημένων Υποδομών

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια αρχιτεκτονική για την ομοσπονδιοποίηση Εικονικοποιημένων Υποδομών με χρήση πολιτικών [Kryftis17]. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική έχει την ονομασία Policy-Based Federation (PBF) Architecture και εμφανίζεται στο Σχήμα 4.1. Βασίζεται στο κομμάτι της συνεισφοράς της Διατριβής στην αρχιτεκτονική του έργου NOVI, με τις κατάλληλες επεκτάσεις, με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε η Υπηρεσία Πολιτικών (Policy Service) να αποτελεί το κύριο διαχειριστικό εργαλείο, οδηγώντας σε αυτόνομη διαχείριση κάθε Εικονικοποιημένης Υποδομής και της ομοσπονδιοποίησης των Υποδομών.

4.1 Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική επεκτείνει την αρχιτεκτονική του Self-Managed Cell (SMC) όπως περιγράφεται στα [Sloman10] και [Lupu08], για χρήση σε δίκτυα για τον έλεγχο των σωματικών λειτουργιών των ασθενών. Στην αρχιτεκτονική αυτή προστέθηκε το Πληροφοριακό Μοντέλο που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 και έτσι δίνεται η δυνατότητα μέσω της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής να γίνεται η διαχείριση κάθε Εικονικοποιημένης Υποδομής (αυτόνομης περιοχής/domain), αλλά και η εγκαθίδρυση και διαχείριση ομοσπονδίας μεταξύ των υποδομών, με τη χρήση πολιτικών.



Σχήμα 4.1 : Policy-based Federation Cell

Το κάθε κελί της αρχιτεκτονικής, αποτελείται ένα σύνολο υπηρεσιών με τη μορφή τμημάτων λογισμικού. Η Υπηρεσία Πολιτικών (Policy Service) είναι η βασική υπηρεσία για τη διαχείριση του κελιού και στηρίζει τη λειτουργία της σε ένα μηχανισμό πολιτικών (Policy Engine) που παρέχει την απαιτούμενη λειτουργικότητα για διαχείριση με βάση πολιτικές (Policy-based Management). Η διαχείριση των Εικονικοποιημένων Υποδομών και η ομοσπονδιοποίηση μεταξύ τους είναι μια δυναμική διαδικασία και έτσι ο μηχανισμός πολιτικών αναλαμβάνει τη συνεχή προσαρμογή στις νέες συνθήκες του περιβάλλοντος, μέσω συγκεκριμένων μεταβλητών που διαφοροποιούνται κατάλληλα. Οι διαχειριστικές αποφάσεις που λαμβάνονται στηρίζονται στις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών, και κατ' επέκταση βασίζονται σε παρελθοντικές αποφάσεις και εφαρμογές των πολιτικών καθώς και σε αλλαγές που προέκυψαν στο υπό διαχείριση περιβάλλον.

Τα απαιτούμενα συστατικά για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική εμφανίζονται στο Σχήμα 4.1. Όλα τα τμήματα λογισμικού βασίζονται στο Πληροφοριακό Μοντέλο (Information Model – IM) όπως αυτό περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Το μοντέλο αυτό έχει την ικανότητα να περιγράφει με ενιαίο τρόπο όλους τους πόρους και υπηρεσίες που παρέχονται από τις Εικονικοποιημένες Υποδομές. Επίσης είναι επεκτάσιμο ούτως ώστε να μπορεί εύκολα να περιγράψει πιθανούς νέους τύπους πόρων και υπηρεσιών.

Οι επικοινωνίες μεταξύ των υπηρεσιών εντός μιας περιοχής (intra-domain) επιτυγχάνονται μέσω του δίαυλου επικοινωνιών (Communication Bus) ο οποίος είναι της μορφής publish/subscribe Enterprise Service Bus (ESB) [Chappell04]. Επιτρέπει στις υπηρεσίες της αρχιτεκτονικής να ανταποκρίνονται σε ειδοποιήσεις υπό τη μορφή συμβάντων (events), που προέρχονται από άλλες υπηρεσίες. Με αυτό τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα παρακολούθησης της δυναμικής κατάστασης του περιβάλλοντος. Οι επικοινωνίες μεταξύ διαφορετικών περιοχών (inter-domain) επιτυγχάνονται με απομακρυσμένες κλήσεις (Remote Procedure Calls - RPCs) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Τα συστατικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής PBF όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 4.1 είναι τα εξής:

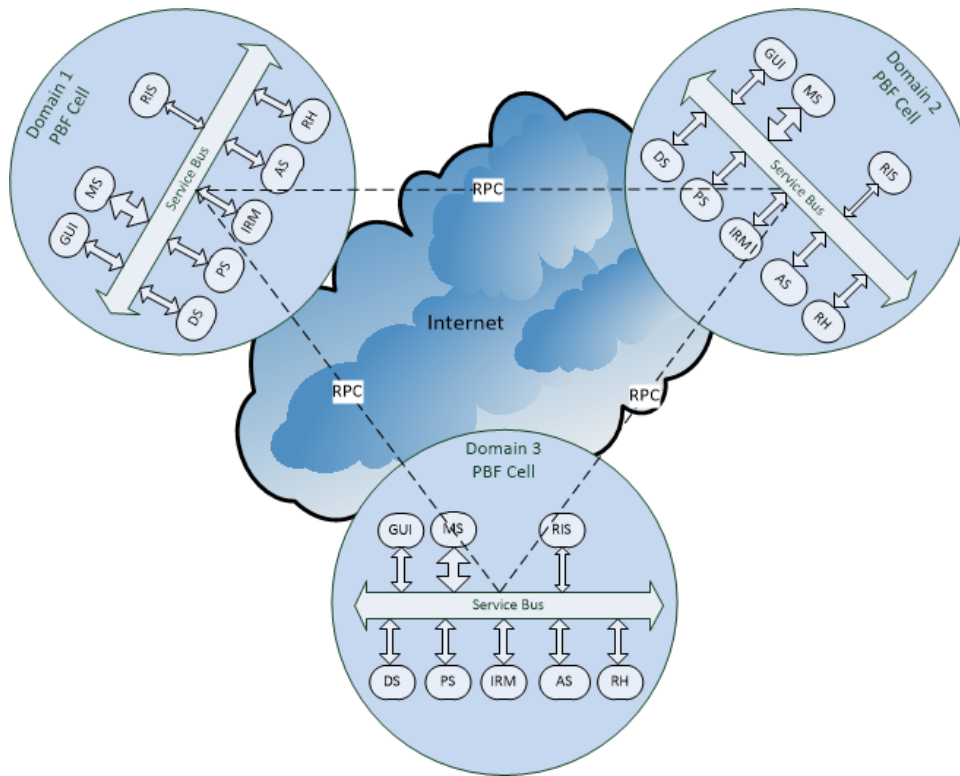
- **Η Υπηρεσία Ταυτοποίησης (Authentication Service - AS)** είναι υπεύθυνη για την ταυτοποίηση των χρηστών μέσω μηχανισμού ταυτοποίησης ενός σημείου πρόσβασης (Single Sign-On) [Pashalidis03]. Κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή έχει

το δικό της σύνολο από χρήστες και τους δικούς της μηχανισμούς ταυτοποίησης. Η AS χρησιμοποιεί τη Security Assertion Markup Language (SAML) [Lewis09] για την παροχή πρόσβασης μέσω ενός κοινού σημείου πρόσβασης για τους χρήστες όλων των υποδομών [De Clercq02]. Αυτή η διαδικασία περιέχει λειτουργίες που είναι ξεχωριστές για κάθε υποδομή βάσει του παρόχου υπηρεσιών ταυτοποίησής της (Identity Provider - IdP). Κάθε χρήστης μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση στο σύστημα μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) που υπάρχει σε κάθε κελί PBF και να αξιοποιεί την υπηρεσία ταυτοποίησης. Για την πρόσβαση σε τοπικούς ή απομακρυσμένους πόρους και υπηρεσίες γίνεται χρήση δακτυλίου αδειοδότησης (SAML token).

- **Η Υπηρεσία Έξυπνης Αντιστοίχισης Πόρων (Intelligent Resource Mapper - IRM)** είναι υπεύθυνη για την αντιστοίχιση των αιτήσεων των χρηστών με τους πόρους που ικανοποιούν τις απαιτήσεις τους. Δέχεται σαν είσοδο τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη εκφρασμένες με βάση το Πληροφοριακό Μοντέλο και αξιοποιεί εξειδικευμένους αλγορίθμους για την επιλογή των καταλληλότερων πόρων [Paragianni13]. Στο ομοσπονδιοποιημένο περιβάλλον ένας απομακρυσμένος χρήστης μπορεί να ζητήσει συγκεκριμένους πόρους σε κάποια περιοχή (bound request) ή να επιτρέψει στο IRM να επιλέξει μια κατάλληλη τοπολογία σε όλες τις περιοχές (unbound request) χρησιμοποιώντας τον multi-domain Virtual Network Embedding (VNE) αλγόριθμο [Chowdhury12], [Paragianni13].
- **Η Υπηρεσία Πληροφοριών για Πόρους (Resource Information Service - RIS)** είναι υπεύθυνη: (1) για την αποθήκευση των αναφορών σε όλους τους διαθέσιμους πόρους και στους κατειλημμένους πόρους από κάθε χρήστη, (2) για τη διατήρηση της σημασιολογικής πληροφορίας που σχετίζεται με κάθε αντικείμενο και (3) για την εκτέλεση σημασιολογικών ερωτημάτων, παρέχοντας απαντήσεις σχετικά με τη διαθεσιμότητα των πόρων που πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Είναι το μόνο τμήμα λογισμικού που έχει άμεση πρόσβαση στη βάση δεδομένων και έχει άμεση λογική σύνδεση με το Πληροφοριακό Μοντέλο [Pittaras15].
- **Η Υπηρεσία Παρακολούθησης (Monitoring Service – MS)** είναι υπεύθυνη για τη συλλογή δεδομένων ελέγχου, σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας κάθε φυσικού πόρου, καθώς και για την παρακολούθηση της λειτουργίας των ενεργών δεσμεύσεων πόρων. Η υπηρεσία αυτή αξιοποιεί τα εργαλεία που παρέχονται από

κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή, και επιτυγχάνει τη συγκέντρωση και ενοποιημένη παρουσίαση [Stéger13].

- **Η Υπηρεσία Χειρισμού Αιτήσεων (Request Handler - RH)** είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση των εντολών διαχείρισης στην κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή. Αυτό γίνεται με κατάλληλες κλήσεις προς το περιβάλλον διαχείρισης της κάθε υποδομής (π.χ. API, Web Services). Η συγκεκριμένη υπηρεσία πρέπει να περιέχει κάποιο εξατομικευμένο κώδικα για κάθε υποδομή που χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική PBF, ούτως ώστε να μπορεί να επικοινωνεί με βάση τις συγκεκριμένες διεπαφές που προσφέρει η κάθε υποδομή. Έτσι το συγκεκριμένο τμήμα λογισμικού είναι άμεσα συνδεδεμένο με την κάθε υποδομή στην οποία εφαρμόζεται το PBF.
- **Η Υπηρεσία Πολιτικών (Policy Service - PS)** παρέχει τη λειτουργικότητα ενός συστήματος διαχείρισης με βάση πολιτικές. Αυτές οι πολιτικές εξυπηρετούν τη διαχείριση της κάθε υποδομής ξεχωριστά αλλά και της ομοσπονδιοποίησης των υποδομών μεταξύ τους. Η υπηρεσία αυτή αναλύεται λεπτομερώς στη συνέχεια του Κεφαλαίου.
- **Η Υπηρεσία Αντιπροσώπευσης (Delegation Service - DS)** είναι υπεύθυνη για την πραγματοποίηση της συμφωνίας ομοσπονδιοποίησης μεταξύ Εικονικοποιημένων Υποδομών, μέσω της ανταλλαγής πολιτικών Αντιπροσώπευσης. Αυτές αποτελούν ειδικό τύπο πολιτικών και αναλύονται εκτενώς στη συνέχεια του Κεφαλαίου.



Σχήμα 4.2: Αλληλεπιδράσεις Υπηρεσιών μεταξύ Περιοχών (inter-domain)

Τα τμήματα της αρχιτεκτονικής που εμφανίζονται με έντονο περίβλημα στο Σχήμα 4.1 αποτελούν την κύρια συνεισφορά της Διατριβής. Πιο συγκεκριμένα αυτά είναι η Υπηρεσία Πολιτικών και η Υπηρεσία Αντιπροσώπευση που θα παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στη συνέχεια του Κεφαλαίου καθώς και η Οντολογία Πολιτικών σαν τμήμα του Πληροφοριακού Μοντέλου που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.

4.2 Υπηρεσία Πολιτικών (Policy Service - PS)

Το προτεινόμενο σύστημα είναι βασισμένο στις πολιτικές και όλοι οι πόροι αναπαριστούνται σαν Αντικείμενα Διαχείρισης (Managed Objects - MOs) με μεθόδους και ιδιότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν από τις πολιτικές για τη διαχείριση του περιβάλλοντος. Η Υπηρεσία Πολιτικών παρέχει υποστήριξη για την περιγραφή των πολιτικών που απαιτούνται για την ομοσπονδιοποίηση των υποδομών. Αυτές είναι οι πολιτικές Αντιπροσώπευσης (Delegation policies) και οι πολιτικές Προσβασιμότητας με βάση ρόλους (Role-Based Access Control policies). Αυτές οι πολιτικές βασίζονται στους δύο τύπους πολιτικών που επίσης υποστηρίζονται και είναι: πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation policies) και πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization policies).

4.2.1 Πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation Policies)

Οι πολιτικές αυτού του τύπου εφαρμόζουν ενέργειες ελέγχου και διαχείρισης με βάση συγκεκριμένα συμβάντα που εκτυλίσσονται στο περιβάλλον διαχείρισης λαμβάνοντας υπόψη τη δεδομένη κατάσταση των μεταβλητών του συστήματος. Οι ενέργειες μπορεί να αφορούν κλήσεις σε άλλες υπηρεσίες διαχείρισης με συγκεκριμένες παραμέτρους. Κάθε πολιτική Υποχρέωσης αποτελείται από τρία μέρη. Το συμβάν (event) έχει τη μορφή μηνύματος που λαμβάνεται από το δίαυλο επικοινωνιών προερχόμενο από οποιοδήποτε τμήμα λογισμικού της αρχιτεκτονικής, με σκοπό να περιγράψει ένα γεγονός που συνέβη. Μπορεί να περιέχει και ορίσματα παρέχοντας τη δυνατότητα στο κάθε συμβάν να απευθύνεται σε μεταβολές σε συγκεκριμένους πόρους ή υπηρεσίες. Οι συνθήκες αναφέρονται σε όρους που πρέπει να ικανοποιούνται για την εκτέλεση των ενεργειών. Ενέργειες είναι οι μέθοδοι των αντικειμένων διαχείρισης. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που εντοπιστεί και ενεργοποιηθεί το συμβάν αποτυχίας κόμβου (resource failure) για κάποιο κόμβο, μια πολιτική Υποχρέωσης μπορεί να εφαρμοστεί. Σε περίπτωση που ο κόμβος ορίζεται σαν απαραίτητος για τη λειτουργία του slice (με βάση τις ιδιότητές του σαν διαχειριστικό αντικείμενο - MO properties), τότε θα εφαρμοστεί η ενέργεια που θα προκαλέσει ένα συμβάν αποτυχίας (failure event) ολόκληρου του slice. Το νέο συμβάν που προκύπτει έχει σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση μιας νέας πολιτικής, η οποία εκτελεί κλήσεις προς τις άλλες υπηρεσίες για την ανανέωση των πόρων που παρέχονται στο χρήστη. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει το παράδειγμα αυτό σε μορφή κώδικα Ponder2:

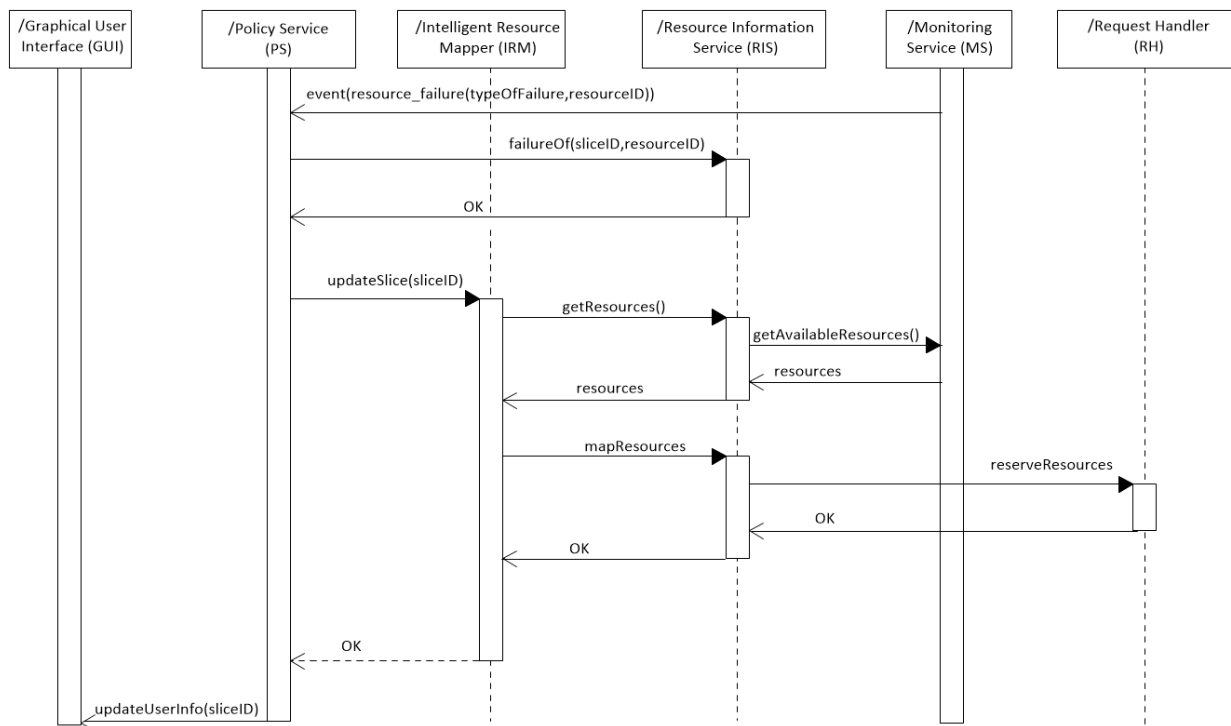
Πίνακας 1 : Καταγραφή_Κώδικα 4.1

event	<code>resource_failure (typeofFailure, resourceID)</code>
condition	<code>(resourceID.critical=TRUE)</code>
action	<code>{slice_failure (typeofFailure, resourceID, resourceID.isContainedIn() RIS.failureOf (resourceID);}</code>
event	<code>slice_failure (topologyID)</code>
condition	<code>(sliceID.allowsupdate=TRUE)</code>
action	<code>{RIS.failureOf (sliceID); IRM.updateSlice (sliceID);}</code>

Όταν η Υπηρεσία Παρακολούθησης (Monitoring Service - MS) εντοπίσει μια αποτυχία σε έναν κόμβο δημιουργεί και τροφοδοτεί το δίαυλο επικοινωνιών με το συμβάν *resource_failure*. Θέτει επίσης ως παραμέτρους τον τύπο της αποτυχίας (π.χ. *VirtualNodeDown*) και το αναγνωριστικό (ID) του προβληματικού πόρου. Το συμβάν αυτό λαμβάνεται από την Υπηρεσία Πολιτικών η οποία έχοντας ενεργοποιημένη την πολιτική που προαναφέρθηκε, δεδομένου και του γεγονότος ότι ικανοποιείται η συνθήκη (*condition resourceID.critical=TRUE*), εκτελεί τις καθορισμένες ενέργειες. Στην προκειμένη περίπτωση αυτές είναι: (1) η έγερση ενός νέου συμβάντος *slice_failure* με παραμέτρους τον τύπο της αποτυχίας, το αναγνωριστικό (ID) του πόρου και το slice στο οποίο ανήκει (αυτό λαμβάνεται μέσω της μεθόδου *resourceID.isContainedIn()* του πόρου που παρουσίασε το πρόβλημα) και (2) η διενέργεια κλήσης προς το Resource Information Service (RIS) για να το ενημερώσει για τον πόρο που απέτυχε *RIS.failureOf(resourceID)*. Το νέο συμβάν θα τύχει χειρισμού από μια δεύτερη πολιτική Υποχρέωσης η οποία χειρίζεται το συμβάν *slice_failure*. Αν το συγκεκριμένο slice έχει την ιδιότητα (property) *allowupdate=true*, τότε θα συμβούν οι ακόλουθες ενέργειες: (1) διενέργεια κλήσης στο RIS για να το ενημερώσει σχετικά με το slice που απέτυχε (*RIS.failureOf(sliceID)*), και (2) διενέργεια κλήσης στο IRM για να ζητηθεί ανανέωση (update) του slice (*IRM.updateSlice(sliceID)*).

Το διάγραμμα ροής τύπου UML [Bell03] που εμφανίζεται στο Σχήμα 4.3 βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της συγκεκριμένης πολιτικής. Τα κουτιά στην κορυφή αντιστοιχούν

με τα τμήματα λογισμικού της αρχιτεκτονικής όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Τα βέλη καταδεικνύουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τμημάτων λογισμικού διαμέσου του δίαυλου επικοινωνιών. Οι κλειστές και γεμάτες κεφαλές βέλους αναφέρονται σε σύγχρονες επικοινωνίες (ο αποστολέας αναμένει την απάντηση του παραλήπτη για να συνεχίσει). Οι κλήσεις που γίνονται εμφανίζονται δίπλα από το κάθε βέλος. Οι ανοικτές κεφαλές βέλους χρησιμοποιούνται για να δείξουν ασύγχρονες ειδοποιήσεις ή απαντήσεις σε κλήσεις.



Σχήμα 4.3 : Διάγραμμα Ροής για το *resource-failure* Obligation Policy

Τα βήματα που εμφανίζονται στο Σχήμα 4.3 είναι: (1) Η υπηρεσία MS ειδοποιεί την PS για την αποτυχία ενός πόρου, (2) η PS ενεργοποιεί τις πολιτικές Υποχρέωσης που εφαρμόζονται και αν ο πόρος που απέτυχε είναι απαραίτητος για το slice, ενεργοποιεί την κατάλληλη κλήση προς το RIS, (3) η PS εκτελεί τις κατάλληλες κλήσεις προς το IRM, (4) το IRM καλεί το RIS σχετικά με τους διαθέσιμους πόρους, (5) το RIS λαμβάνει τη διαθεσιμότητα των πόρων από το MS και ενημερώνει ανάλογα το IRM, (6) το IRM σχηματίζει ένα νέο χάρτη αντιστοίχισης για τους εικονικοποιημένους πόρους και ενημερώνει το RH για να εκτελέσει τις κατάλληλες δεσμεύσεις πόρων, (7) η PS ενημερώνεται από το IRM σχετικά με τους κανόνες οι οποίοι ενεργοποιούνται και τέλος

(8) η PS ενημερώνει μέσω του GUI το χρήστη για την ανανέωση των δεσμευμένων πόρων.

4.2.2 Πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization Policies)

Οι πολιτικές αυτές καθορίζουν ποιες ενέργειες επιτρέπεται να εκτελεστούν από ένα υποκείμενο σε κάποιο άλλο διαχειριστικό αντικείμενο. Χρησιμοποιώντας όρους του Πληροφοριακού Μοντέλου που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3, σαν υποκείμενο (subject) κατά τον καθορισμό των πολιτικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος συγκεκριμένος Ρόλος που μπορεί να κατέχει κάποιος χρήστης, ενώ σαν στόχος (target) μπορεί να οριστεί κάποιο διαχειριστικό υπο-δέντρο που περιέχει πόρους. Κάθε πολιτική εξουσιοδότησης αποτελείται από πέντε μέρη:

1. Η τιμή που κατέχει και μπορεί να είναι θετική (+) ή αρνητική (-), για να επιτρέψει ή να απαγορεύει την πρόσβαση
2. Το αντικείμενο στο οποίο παρέχεται ή στερείται το δικαίωμα πρόσβασης
3. Ο στόχος που είναι το αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζεται η πολιτική
4. Η συγκεκριμένη μέθοδος για την οποία παρέχονται τα δικαιώματα,
5. Το σημείο εφαρμογής της πολιτικής (Policy Enforcement Point-PEP) το οποίο μπορεί να βρίσκεται στο υποκείμενο ή στο στόχο

Ένα παράδειγμα πολιτικής εξουσιοδότησης εμφανίζεται στην Καταγραφή_Κώδικα 4.2 και αφορά μια πολιτική για απαγόρευση πρόσβασης σε χρήστες με το ρόλο Blacklisted.

Πίνακας 2 : Καταγραφή_Κώδικα 4.2

```
auth - blacklist
subject /Roles/BlackListed
target /Resources
action Access
pep subject, target
```

Σαν υποκείμενο χρησιμοποιείται ο ρόλος *Roles/Blacklisted* που εφαρμόζεται σε όλους τους χρήστες υποπέσουν σε συγκεκριμένα παραπτώματα με βάση τις πολιτικές της υποδομής στην οποία ανήκουν. Στόχος είναι το υπο-δέντρο/*Resources* που περιέχει όλους τους πόρους και συγκεκριμένα εφαρμόζεται στη συνάρτηση 'Access' που παρέχει πρόσβαση

σε κάθε πόρο. Σαν σημείο εφαρμογής ορίζεται το υποκείμενο (*subject*) και ο στόχος (*target*). Αυτό σημαίνει ότι η πολιτική θα απαγορεύει στους χρήστες με το συγκεκριμένο ρόλο να αιτούνται πόρους, ενώ ταυτόχρονα θα απαγορεύει και στους πόρους να παρέχουν πρόσβαση σε χρήστες με αυτό το ρόλο.

4.2.3 Πολιτικές Προσβασιμότητας με Βάση Ρόλους (RBAC Policies)

Οι πολιτικές αυτές χρησιμοποιούνται για την ανάθεση ρόλων στους χρήστες, παρέχοντας τους διαφορετικές προτεραιότητες στους διάφορους διαθέσιμους πόρους και υπηρεσίες. Μετά τη διαδικασία ταυτοποίησης, κάθε χρήστης λαμβάνει από το σύστημα κάποιο ρόλο, και με βάση αυτό το ρόλο ορίζονται και τα δικαιώματά του μέσω των πολιτικών εξουσιοδότησης, που χρησιμοποιούν σαν υποκείμενο (*subject*) τους ρόλους των χρηστών. Οι πολιτικές αυτές από την οπτική γωνία της υλοποίησης, αποτελούν ένα ειδικό τύπο πολιτικών Υποχρέωσης. Όταν κάποιος χρήστης ταυτοποιείται σε κάποια Εικονικοποιημένη Υποδομή, δημιουργείται ένα διαχειριστικό αντικείμενο, που αναπαριστά το συγκεκριμένο χρήστη. Την ίδια στιγμή δημιουργείται το συμβάν `newuser (User1)` το οποίο προκαλεί την ανάθεση συγκεκριμένου ρόλου στο χρήστη με βάση τις προκαθορισμένες πολιτικές που εφαρμόζονται. Μπορεί η ανάθεση να γίνεται με βάση την υποδομή στην οποία ανήκει ο κάθε χρήστης και το ρόλο που κατέχει σε αυτήν. Για παράδειγμα ένας απλός χρήστης (`user`) μιας πλατφόρμας με ονομασία `PlanetLab` λαμβάνει το ρόλο `PlanetLabUser`. Παρομοίως, σε περίπτωση που κάποιος χρήστης παρουσιάζει ανάρμοστη συμπεριφορά με βάση τις πολιτικές της υποδομής στην οποία ανήκει, μπορεί να του ανατεθεί κάποιος διαφορετικός ρόλος και να επηρεαστούν τα δικαιώματα εξουσιοδότησης που μπορεί να έχει σε όλες τις υποδομές που βρίσκονται σε ομοσπονδία. Στην Καταγραφή_Κώδικα 4.3 εμφανίζονται οι δύο πολιτικές ανάθεσης ρόλων που προαναφέρθηκαν σε μορφή πολιτικών `Ponder2`:

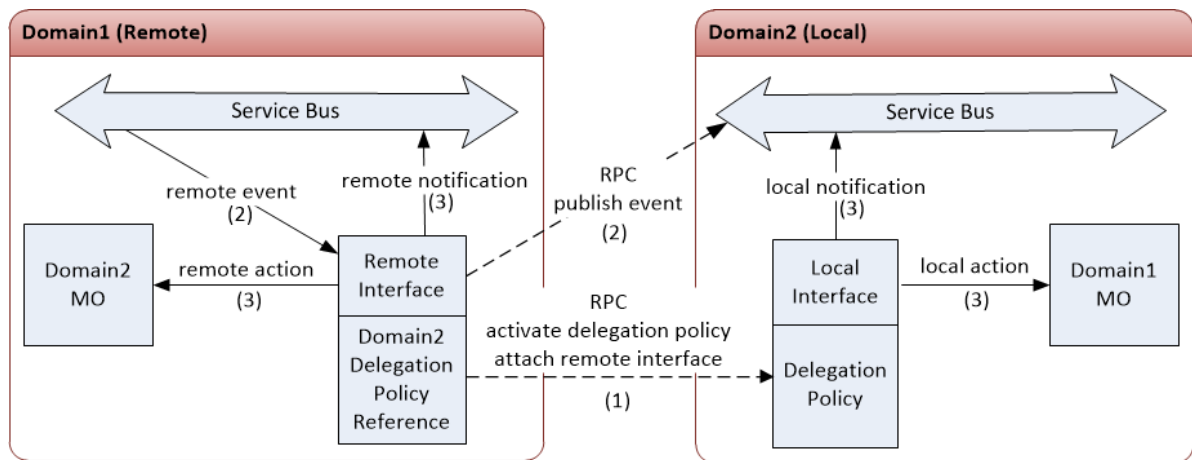
Πίνακας 3 : Καταγραφή_Κώδικα 4.3

event	<code>userAuth (UserID, AuthenticationStatus)</code>
condition	<code>userID.isAuthenticated=TRUE</code>
action	<code>userID.setRole (domain+Role)</code>
event	<code>missbehavior (UserID)</code>
condition	<code>TRUE</code>
action	<code>userID.setRole (domain+"BlackListed")</code>

4.2.4 Πολιτικές Αντιπροσώπευσης (Delegation Policies)

Η έννοια των πολιτικών Αντιπροσώπευσης που είναι ουσιαστική στον καθορισμό του ομοσπονδιοποιημένου περιβάλλοντος, βασίζεται στα mission policies που εισάχθηκαν στο Ponder2 για την κατανομημένη διαχείριση με πολιτικές [Lury08], [Sloman10]. Οι πολιτικές αυτές καθορίζουν τις υποχρεώσεις που έχει κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή (περιοχή/domain) προς τις υπόλοιπες σε σχέση με την ομοσπονδιοποίησή τους. Ορίζονται σαν ένα σύνολο από πολιτικές Εξουσιοδότησης και πολιτικές Υποχρέωσης. Ο διαχειριστής της κάθε Εικονικοποιημένης Υποδομής είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό των κατάλληλων πολιτικών Αντιπροσώπευσης, που αντανακλούν μια μορφή διμερούς συμφωνίας σε επίπεδο Συμφωνίας Επιπέδου Παροχής Υπηρεσιών (Service Level Agreement - SLA) μεταξύ δύο μελών της ομοσπονδίας. Οι πολιτικές αυτές μπορεί να θεωρηθούν επίσης σαν πολιτικές μεταξύ περιοχών (inter-domain) αφού αφορούν διαχείριση πόρων που ανήκουν σε διαφορετικές διαχειριστικές περιοχές. Επίσης μπορεί να θεωρηθούν σαν πολιτικές ομοσπονδιοποίησης καθώς συμβάλουν στη δημιουργία της ομοσπονδίας μεταξύ των Εικονικοποιημένων Υποδομών. Ο όρος πολιτικές Αντιπροσώπευσης παραπέμπει στη διπλωματική ιδιότητα μιας "Μόνιμης Αντιπροσωπίας" όπως αυτή εφαρμόζεται μεταξύ των κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στην οποία αντιπροσωπία παρέχονται κάποιες δικαιοδοσίες για να εφαρμόζει δικές της πολιτικές σε κάποιο άλλο κράτος μέλος. Οι πολιτικές αυτές περιγράφουν ουσιαστικά τις απαιτήσεις που έχει κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή από μια άλλη με όρους πολιτικών Υποχρέωσης και Εξουσιοδότησης. Αυτές οι πολιτικές είναι γραμμένες με βάση κάποιες διεπαφές αντιπροσώπευσης. Οι διεπαφές αυτές ορίζουν τοπικά και απομακρυσμένα συμβάντα, όπως και τοπικές και απομακρυσμένες ενέργειες. Τα συμβάντα μπορούν να

τύχουν χειρισμού στην αντιπροσωπία όταν αυτή ενεργοποιηθεί και μπορούν να θέσουν σε ενέργεια τις πολιτικές που αντιστοιχούν σε αυτά. Επίσης ως ενέργειες σε μια πολιτική αντιπροσώπευσης μπορούν να οριστούν τοπικά και απομακρυσμένα συμβάντα υπό τη μορφή ειδοποιήσεων. Η δημιουργία τέτοιων συμβάντων στο τοπικό ή απομακρυσμένο περιβάλλον προκαλεί τον ανάλογο χειρισμό από το διαχειριστικό περιβάλλον στο οποίο εφαρμόζεται. Οι πολιτικές Αντιπροσώπευσης παρέχουν και τη δυνατότητα άμεσης εκτέλεσης ενεργειών και στα δύο περιβάλλοντα, μέσω κλήσεων συγκεκριμένων συναρτήσεων, συγκεκριμένων διαχειριστικών αντικειμένων.



Σχήμα 4.4 : Υψηλού επιπέδου περιγραφή των πολιτικών αντιπροσώπευσης

Η λειτουργικότητα των πολιτικών Αντιπροσώπευσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4. Το Domain1 είναι το απομακρυσμένο domain το οποίο επιθυμεί να ομοσπονδοποιηθεί με το Domain2 (τοπικό domain) για τη διαχείριση των πόρων και υπηρεσιών του (αντικείμενα στο Domain2). Οι πολιτικές Αντιπροσώπευσης πρέπει να ενεργοποιηθούν με αίτημα από το Domain1. Κάθε πολιτική αντιπροσώπευσης εμπλέκει την τοπική διεπαφή στο Domain2 και την απομακρυσμένη διεπαφή στο Domain1. Η αντιπροσώπευση επιτυγχάνεται σε τρία βήματα:

Στο βήμα (1) ο διαχειριστής του Domain1 ενεργοποιεί την πολιτική στο Domain2 και δημιουργεί τα απαραίτητα αντικείμενα αναφοράς συμπεριλαμβανομένων των αναφορών στην απομακρυσμένη διεπαφή (Remote Interface).

Στο βήμα (2), κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης, τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στο απομακρυσμένο Domain1 (π.χ. αίτημα για δέσμευση κόμβου στο Domain2)

μεταφέρονται με κλήσεις RPC στο Domain2 σαν απομακρυσμένα συμβάντα ενεργοποιώντας πολιτικές Υποχρέωσης στο Domain2.

Στο βήμα (3) εκτελούνται οι ενέργειες. Ως τοπικές ενέργειες εκτελούνται μέθοδοι του αντικειμένου Domain1 MO και αναπαριστά το domain αυτό εντός του Domain2. Αντίστοιχα απομακρυσμένες ενέργειες εφαρμόζονται στο αντικείμενο Domain2 MO που βρίσκεται στο Domain1.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πολιτική Αντιπροσώπευσης *provideRemoteResources* η οποία δεσμεύει ή αποδεσμεύει κάποιο πόρο (π.χ. ένα Εικονικό Κόμβο) και διατηρεί ενημερωμένο τον αριθμό των πόρων που έχουν παραχωρηθεί μεταξύ των Υποδομών. Υποθέτουμε ότι υπάρχουν δύο Υποδομές με τα ονόματα Domain1 και Domain2. Το τοπικό Domain2 ορίζει μια πολιτική Αντιπροσώπευσης η οποία αποτελείται από τις ακόλουθες πολιτικές:

- Η πρώτη πολιτική Υποχρέωσης, αποτελείται από το απομακρυσμένο Συμβάν *reserveRemoteResource("Domain2",userID,ResourceID)* το οποίο ενεργοποιεί την ειδοποίηση *reserveResource(userID,resourceID)* στο Domain2 ούτως ώστε να παραχωρηθεί ο συγκεκριμένος πόρος του Domain2 στο συγκεκριμένο χρήστη του Domain1. Επίσης εκτελεί την τοπική ενέργεια *addToNumberOfResourcesIprovide()* η οποία αυξάνει τον αριθμό των πόρων που η υποδομή Domain2 παρέχει στους χρήστες της υποδομής του Domain1.
- Η δεύτερη πολιτική Υποχρέωσης χειρίζεται το συμβάν της αποδέσμευσης ενός πόρου με αντίστοιχο τρόπο.
- Τέλος, υπάρχει η ανάγκη ορισμού της πολιτικής Εξουσιοδότησης *activateDelegation* στην τοπική υποδομή για να παρέχει τη δυνατότητα στην απομακρυσμένη υποδομή να ενεργοποιεί την πολιτική Αντιπροσώπευσης. Κατά τη διάρκεια της συμφωνίας μεταξύ domains, το Domain1 ενεργοποιεί την προαναφερθείσα πολιτική αντιπροσώπευσης στο Domain2 συνοδευόμενο με τη δική του διεπαφή. Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης όταν οι χρήστες του Domain1 δεσμεύουν πόρους στο Domain2, η πολιτική αυτή φροντίζει για τη διαχείριση του περιβάλλοντος της ομοσπονδίας. Ο Πίνακας 4 εμφανίζει την προαναφερθείσα πολιτική εκφρασμένη σε μορφή βασισμένη στο Ponder2 και στον τρόπο που

εκφράζονται οι πολιτικές τύπου mission [Lury08] με τις κατάλληλες τροποποιήσεις που έγιναν για να καλύπτονται οι απαιτήσεις των πολιτικών αντιπροσώπευσης.

Πίνακας 4 : Καταγραφή_Κώδικα 4.4

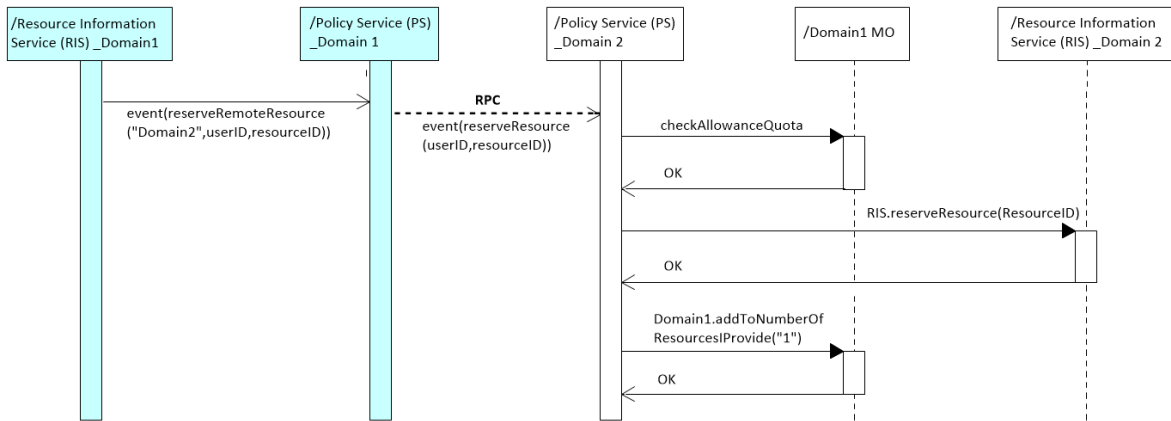
```
delegation provideRemoteResources
interface "local"
interface "remote"

1. event remote.reserveRemoteResource ("Domain2",userID,resourceID)
   condition local.checkQuota=TRUE
   action {local.raise_event(reserveResource (userID,resourceID)),
   local.addToNumberOfResourcesIProvide("1")}

2. event remote.releaseRemoteResource ("Domain2",resourceID)
   condition local.resourceReserved(resourceID)
   action {local.raise_event(releaseResource(resourceID)),
   local.reduceNumberOfResourcesIProvide("1")}

local + auth activateDelegation1
subject /platform/Domain1
target /DelegationPolicies/provideRemoteResources
action activate
pep target
```

Το UML διάγραμμα στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζει τα βασικά βήματα του παραδείγματος. Τα δύο αριστερότερα κουτιά στην κορυφή αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα της Υπηρεσίας Πληροφοριών για Πόρους (RIS) και της Υπηρεσίας Πολιτικών στο Domain1. Δεξιότερα υπάρχουν τα αντίστοιχα στιγμιότυπα για τις υπηρεσίες στο Domain2. Επιπλέον εντός του Domain2 υπάρχει το διαχειριστικό αντικείμενο με όνομα Domain1_MO που διατηρεί πληροφορίες σχετικά με το απομακρυσμένο domain.



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα ακολουθίας για την πολιτική *provideRemoteResources*

Εκτελούνται τα βήματα: (1) Το RIS στο Domain1 ειδοποιεί το τοπικό PS για το αίτημα για τον απομακρυσμένο πόρο, (2) Το PS στο Domain1 ειδοποιεί το PS στο Domain2 με την απομακρυσμένη ειδοποίηση (μέσω RPC), (3) Το PS στο Domain2 με βάση την πολιτική Αντιπροσώπευσης που εφαρμόζει, ελέγχει τα όρια των παρεχόμενων πόρων (*checkAllowanceQuota*) και αν βρίσκονται στα επιτρεπτά όρια καλεί το RIS, ζητώντας δέσμευση του πόρου για παραχώρηση στο χρήστη του απομακρυσμένου domain, (4) Το PS στο Domain2 καλεί το αντικείμενο Domain1 που βρίσκεται στο τοπικό του domain για να αυξήσει τον αριθμό των παρεχόμενων πόρων.

4.3 Υπηρεσία Αντιπροσώπευσης

Κάθε κελί PBF είναι αυτό-διαχειριζόμενο με βάση τις πολιτικές που εφαρμόζει. Για την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών Εικονικοποιημένων Υποδομών οι δυνατές ενέργειες καθορίζονται μέσω των πολιτικών Αντιπροσώπευσης. Προηγουμένως παρουσιάστηκε ένα παράδειγμα χρήσης πολιτικών αντιπροσώπευσης για διατήρηση ενημέρωσης σχετικά με τον αριθμό των πόρων που ανταλλάσσονται μεταξύ χρηστών των Εικονικοποιημένων Υποδομών.

Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα εξετάζεται η περίπτωση όπου δύο Υποδομές είναι ομοσπονδιοποιημένες και επιθυμούν να έχουν μια προκαθορισμένη πολιτική για ανταλλαγή πόρων. Οι πολιτικές αντιπροσώπευσης αντιστοιχούν σε Συμφωνίες Επιπέδου Παροχής Υπηρεσιών (SLA) μεταξύ των παρόχων και μπορεί να θέτουν όρια στο πόσο πόροι μπορούν να παρέχονται σε χρήστες άλλων υποδομών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση της πολιτικής Αντιπροσώπευσης που παρουσιάζει ο Πίνακας 5. Επεκτείνοντας το προηγούμενο παράδειγμα μπορεί να προστεθεί στο Domain1 μια πολιτική με όνομα allowanceQuota η οποία αποτελείται από ένα τοπικό συμβάν getQuota(Domain2), το οποίο ενεργοποιεί την απομακρυσμένη ειδοποίηση calculateQuota(Domain1) στην Υποδομή Domain2, η οποία επιστρέφει τον αριθμό των Πόρων του Domain2 που παρέχονται σε χρήστες του Domain1.

Πίνακας 5 : Καταγραφή_Κώδικα 4.5

```
delegation allowanceQuota
interface "local"
interface "remote"

1. event      local.getAvailableQuota("Domain1")
   condition  request.type=bound or
              (request.type=unbound and
               remote.ResourceAvailability=Critical)
   action     local.calculateQuota(remote.
              getNumberOfResourcesProvided())
```

2. event	<code>local.getAvailableQuota("Domain1")</code>
condition	<code>request.type=unbound and remote.ResourceAvailability=Critical</code>
action	<code>local.calculateQuota(remote. getNumberOfResourcesProvided())</code>
local + auth	<code>activateDelegation2</code>
subject	<code>/platform/Domain1</code>
target	<code>/DelegationPolicies/allowanceQuota</code>
action	<code>activate</code>
pep	<code>target</code>
remote + auth	<code>getNumberOfResources</code>
subject	<code>/platform/Domain2</code>
target	<code>/platform/Domain1</code>
action	<code>getNumberOfResourcesProvided</code>
pep	<code>target</code>

Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να οριστούν και άλλες πολιτικές που ορίζουν τις σχέσεις μεταξύ των υποδομών. Η προτεινόμενη υλοποίηση προσφέρει την απαιτούμενη εκφραστικότητα σε επίπεδο πολιτικών.

Η πολιτική Αντιπροσώπευσης `allowanceQuota` επηρεάζει τη δέσμευση πόρων σε απομακρυσμένες περιοχές. Παρακάτω παρουσιάζουμε την επίδρασή της με τη χρήση ενός απλού παραδείγματος στο οποίο χρήστες ζητούν 20 ομοσπονδιοποιημένα `slices` με 3 Εικονικά Μηχανήματα (Virtual Machines - VMs). Και τα 60 VMs πρέπει να δεσμευτούν σε ένα περιβάλλον από τρεις διασυνδεδεμένες περιοχές (Virtualized Infrastructures VI(1), VI(2) και VI(3)). Θεωρούμε ότι όλα τα αιτήματα εγείρονται από χρήστες του VI(1). Τα αιτήματα μπορεί να είναι δεσμευμένα (`bound`) καθορίζοντας την αντιστοίχιση του φυσικού πόρου με τον εικονικό ή αδέσμευτα (`unbound`) αφήνοντας το σύστημα να αποφασίσει για την κατάλληλη αντιστοίχιση μέσω της υπηρεσίας IRM. Στην τελευταία περίπτωση λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις του χρήστη [Paragianni13].

Οι 20 αιτήσεις του χρήστη αποτελούνται από 10 `unbound requests` για `slices` (συνολικά 30 VMs) και 10 `bound requests` (30 VMs). Υποθέτουμε ότι κάθε `bound request`

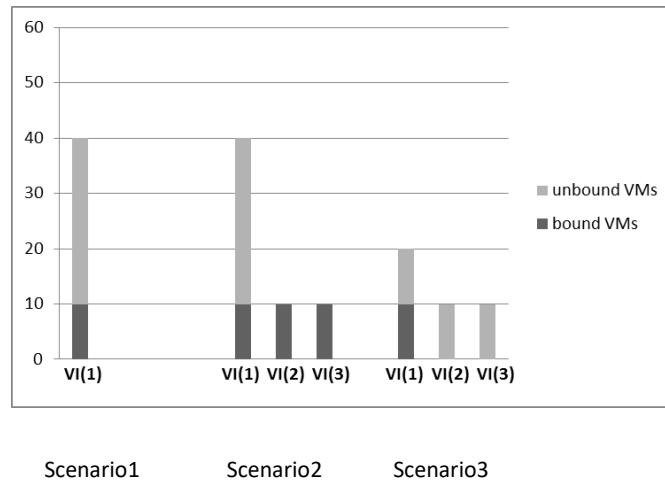
κατανέμεται εξίσου με VMs στα τρία VIs. Στο διάγραμμα, στο Σχήμα 4.6, βλέπουμε το συνολικό αριθμό των VMs που δεσμεύονται σε κάθε σενάριο. Κάθε ράβδος αντιστοιχεί στους πόρους που δεσμεύτηκαν σε κάθε VI και αποτελείται από δύο τμήματα. Το μαύρο αναπαριστά τις bound και το γκρίζο τις unbound αντιστοιχίσεις.

Στο πρώτο σενάριο η πολιτική Αντιπροσώπευσης *allowanceQuota* δεν είναι ενεργοποιημένη, και ως εκ τούτου όλα τα αιτήματα για bound slices, που ζητήθηκε να ανατεθούν σε φυσικά μηχανήματα στα VI(2) και VI(3), δεν εξυπηρετούνται. Τα 30 unbound VMs και τα 10 VMs bound στο VI(1) εξυπηρετούνται τοπικά.

Στο δεύτερο και τρίτο σενάριο η πολιτική Αντιπροσώπευσης (Πίνακας 5) είναι ενεργοποιημένη και στις δύο υποδομές VI(2) και VI(3), όπου το καθένα θεωρείται τοπικό domain ως προς το απομακρυσμένο domain VI(1). Η κατάσταση του VI(1) θεωρείται μη κρίσιμη (noncritical) στο δεύτερο και κρίσιμη (critical) στο τρίτο σενάριο. Έτσι στο δεύτερο σενάριο το VI(1) ικανοποιεί τα unbound αιτήματα με δικούς του πόρους, ενώ στο τρίτο χρησιμοποιεί πόρους από τα απομακρυσμένα VI(2) και VI(3). Ως αποτέλεσμα τα bound αιτήματα για πόρους σε VI(2) και VI(3) δε μπορούν να εξυπηρετηθούν αφού έχουν εξαντληθεί τα όριά τους. Οι αριθμοί στο Σχήμα 4.6 λήφθηκαν θεωρώντας ότι η συνάρτηση που ορίζει το federation SLA υπολογίζοντας τις δεσμεύσεις παροχής πόρων μεταξύ περιοχών, είναι η εξής:

$$availableQuota = a_constant + offeredVMs,$$

όπου *offeredVMs* είναι ο αριθμός των πόρων που το τοπικό VI παρέχει στους χρήστες του απομακρυσμένου VI, ενώ η τιμή της μεταβλητής *constant*=10.



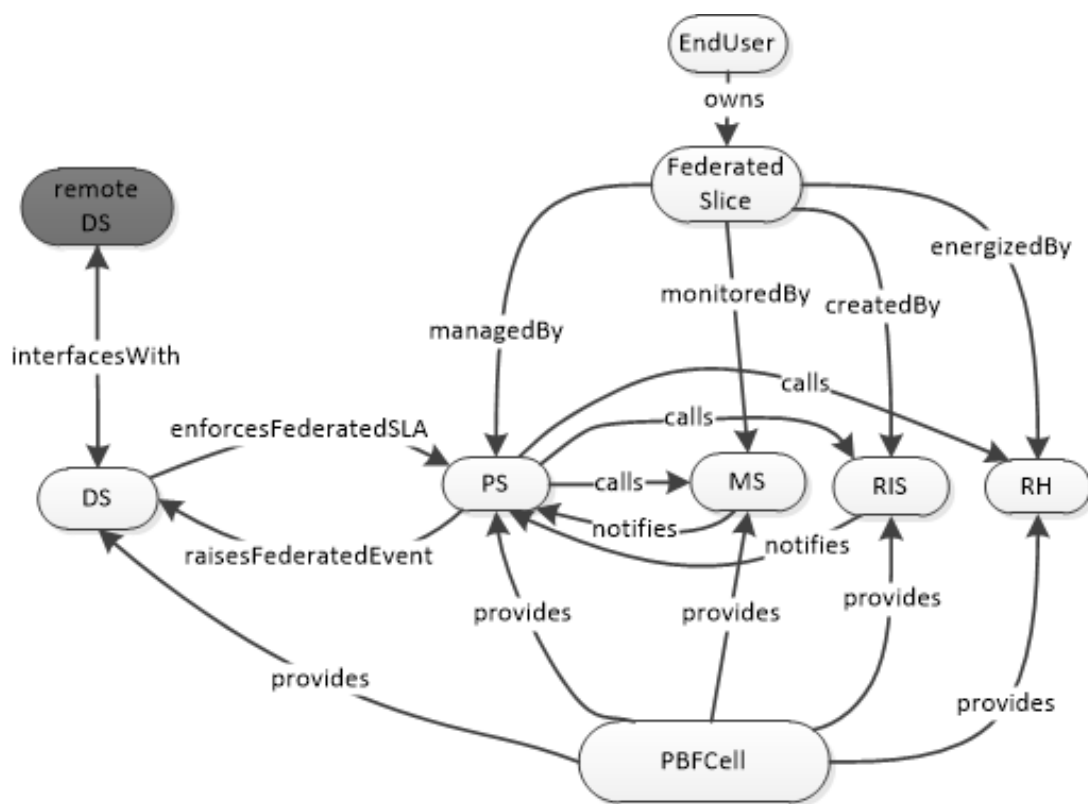
Σχήμα 4.6 : Αριθμός δεσμευμένων VMs ανά Εικονικοποιημένη Υποδομή

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 το σενάριο 1 ικανοποιεί τοπικά 40 εκ των 60 αιτημάτων για VMs. Το σενάριο 2 επιτυγχάνει πλήρη ικανοποίηση των αιτημάτων με τα bound requests να εξυπηρετούνται από ομόσπονδα VIs και τα unbound requests να εξυπηρετούνται τοπικά. Τέλος, στο σενάριο 3 που δίνεται προτεραιότητα στα unbound requests τελικά μπλοκάρονται 20 bound requests στα απομακρυσμένα VIs, και ως εκ τούτου ικανοποιούνται μόνο 40 από τα 60 αιτήματα χάνοντας το όφελος από την ομοσπονδιοποίηση.

Συμπερασματικά, η πολιτική Αντιπροσώπευσης allowanceQuota (Πίνακας 5) μπορεί να καθορίσει τις δεσμεύσεις πόρων μεταξύ περιοχών μέσω καθορισμού παραμέτρων διαμοιρασμού στον αλγόριθμο VNE. Συγκεκριμένα, ο καθορισμός της κατάστασης της υποδομής σε critical ή noncritical, εξαρτάται από τα όρια που θέτει η υποδομή. Αυτές οι παράμετροι της συνάρτησης calculateQuota μπορούν να οριστούν με τρόπο που να ανακλά τη συμφωνία μεταξύ υποδομών (SLA agreement).

4.4 Σχέσεις Υπηρεσιών στην Οντολογία Πολιτικών

Το Πληροφοριακό Μοντέλο και η Οντολογία Πολιτικών όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 αξιοποιείται από την Υπηρεσία Πολιτικών καθώς οι έννοιες με τις οποίες ασχολείται είναι συνδεδεμένες με τις πολιτικές, τους πόρους και υπηρεσίες όπως περιγράφονται από το μοντέλο. Στο Σχήμα 4.7 εμφανίζεται η βασική έννοια της ομοσπονδιοποίησης που καλύπτει η οντολογία σε επίπεδο υπηρεσιών. Τα βέλη καταδεικνύουν τις σχέσεις μεταξύ των κλάσεων.



Σχήμα 4.7 : Οι βασικές κλάσεις της Οντολογίας Πολιτικών

Η κλάση FederatedSlice ενεργοποιείται (is energizedBy) από την υπηρεσία RH (Request Handler Service) η οποία αλληλεπιδρά με τους εικονικοποιημένους πόρους (Virtual Infrastructure resources) για την εφαρμογή των απαιτούμενων ενεργειών. Δημιουργείται από (is createdBy) την υπηρεσία RIS (Resource Information Service) η οποία αποθηκεύει τις αναφορές στα ομόσπονδα slices (FederatedSlices). Για την αποθήκευση επαναχρησιμοποιείται η κλάση Resource από την Οντολογία Πόρων [Van der Ham15]. Το

FederatedSlice παρακολουθείται από (is monitoredBy) την MS (Monitoring Service) και τυγχάνει διαχείρισης από (is managedBy) την PS (Policy Service). Το PBFCell παρέχει (provides) τις υπηρεσίες RH, RIS, MS, PS και DS (Delegation Service). Για την επίτευξη των αιτημάτων μεταξύ περιοχών η PS εγείρει συμβάντα (raisesFederatedEvent) στην τοπική DS. Η DS έχει διεπαφή (interfacesWith) με το remoteDS στην ομόσπονδη υποδομή και θέτει σε ενέργεια (enforcesFederationSLA) τις πολιτικές του μηχανισμού πολιτικών της PS. Η PS αλληλεπιδρά επίσης με τις άλλες τοπικές υπηρεσίες μέσω κλήσεων και ειδοποιήσεων.

Συνολικά βλέπουμε πως θέτοντας σαν πλαίσιο (context) το FederatedSlice προσφέρεται η δυνατότητα με τη χρήση ενός συνόλου από υπηρεσίες που εκτελούνται σε πολλαπλές ανεξάρτητα διαχειριζόμενες περιοχές, να υπάρχει μια αυτόματη αντίδραση στις αλλαγές της κατάστασης του FederatedSlice. Κάποιες από αυτές τις ενέργειες μπορεί να ενεργοποιούνται από απομακρυσμένες υποδομές ή να ενεργοποιούνται τοπικά και να δρουν απομακρυσμένα. Για παράδειγμα, όσον αφορά το FederatedSlice, η MS μπορεί να εντοπίσει μείωση της παρεχόμενης υπηρεσίας σε τμήμα του Slice σε μια υποδομή που τελικά να οδηγήσει σε δέσμευση πόρων σε άλλη υποδομή για την αποκατάσταση της συνολικής ποιότητας.

Ο χρήστης της κάθε Εικονικοποιημένης Υποδομής (περιοχής - domain) μπορεί να ζητήσει να του παραχωρηθούν πόροι από διάφορες ομόσπονδες περιοχές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με εκτέλεση σημασιολογικών ερωτημάτων μεταξύ περιοχών τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα την ικανοποίηση των αιτημάτων του χρήστη με πόρους από πολλαπλές περιοχές. Αυτές μπορούν να ανταλλάζουν εσωτερικές πληροφορίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα, τις ιδιότητες και χαρακτηριστικά των πόρων και υπηρεσιών τους τα οποία επιθυμούν να μοιραστούν. Οι Υπηρεσίες Πληροφοριών για Πόρους (Resource Information Service - RIS) που εμπλέκονται σε αιτήματα μεταξύ περιοχών δημιουργούν δυναμικά τα αιτήματα τύπου SPARQL [Pérez06] που βασίζονται σε σημασιολογική πληροφορία που αποθηκεύεται σε μορφή τριπλέτων. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα εντοπισμού των πιθανών αντιστοιχίσεων των απαιτήσεων σε σχέση με τους φυσικούς πόρους (Virtual Network Embedding - VNE) σε πολλαπλές περιοχές [Pittaras15]. Ο έλεγχος της εκτέλεσης των ερωτημάτων μεταξύ ομοσπονδοποιημένων υποδομών μπορεί να αποτελεί τμήμα της συμφωνίας μεταξύ υποδομών (SLA). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί

μέσω των πολιτικών Αντιπροσώπευσης οι οποίες μπορεί να επιτρέπει και να επιβάλλουν εκτέλεση σημασιολογικών ερωτημάτων μεταξύ περιοχών. Στην Καταγραφή_Κώδικα 4.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πολιτική που επιτρέπει την εκτέλεση όταν προέρχεται από απομακρυσμένες περιοχές.

Πίνακας 6 : Καταγραφή_Κώδικα 4.6

```
delegation executeRemoteSemanticQuery
interface "local"
interface "remote"

1. event remote.executeSemanticQuery("Domain1", query)
   condition local.allowSemanticQueries=TRUE
   action local.executeSemanticQuery(query)

local + auth activateDelegation3
subject /platform/Domain1
target /DelegationPolicies/executeRemoteSemanticQuery
action activate
pep target
```

Το *executeSemanticQuery* Delegation policy του Domain2 περιέχει πολιτική Υποχρέωσης βασισμένο στο απομακρυσμένο συμβάν *executeSemanticQueryOn("Domain1", query)* με παραμέτρους "Domain1" στο οποίο εφαρμόζεται η πολιτική και το συγκεκριμένο *query*. Το συμβάν, υπό τη συνθήκη *local.allowSemanticQueries=TRUE* ενεργοποιεί τοπικά την ενέργεια που εκτελεί το ερώτημα *query* και επιστρέφει το αποτέλεσμα. Αυτό επιτρέπει στο απομακρυσμένη περιοχή να συλλέξει σημασιολογικά δεδομένα semantic data από την τοπική περιοχή.

4.5 Υλοποίηση Προτεινόμενης Αρχιτεκτονικής

Η Αρχιτεκτονική PBF υλοποιήθηκε σαν επέκταση της συνεισφοράς της Διατριβής στο πλαίσιο του έργου NOVI⁴⁵. Η συνεισφορά στο NOVI αφορούσε κυρίως την Υπηρεσία Πολιτικών και την Οντολογία Πολιτικών του Πληροφοριακού Μοντέλου του NOVI. Η υλοποίηση που περιγράφεται στη συνέχεια αποτελεί τη συνεισφορά στο έργο αλλά και επιπλέον δουλειά που έγινε στη συνέχεια για την καλύτερη αξιοποίηση των πολιτικών στη διαχείριση της ομοσπονδίας όπως αυτό περιγράφηκε. Ο κώδικας συμπεριλαμβανομένης της Οντολογίας πολιτικών είναι διαθέσιμος σε αποθετήριο τύπου GIT⁴⁶.

Η υλοποίηση βασίζεται στο ευρέως διαδεδομένο πλαίσιο OSGi⁴⁷. Κάθε συστατικό τμήμα της αρχιτεκτονικής είναι υλοποιημένο με τη μορφή δέσμης (OSGi bundle) όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ τους επιτυγχάνεται μέσω των διεπαφών που προσφέρουν. Το πλαίσιο αυτό επιλέγηκε λόγω του ότι επιτρέπει την καθ' εξακολουθήση ολοκλήρωση (continuous integration⁴⁸) λαμβάνοντας υπόψη τις ποικίλες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διαφόρων συστατικών που βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Επίσης, κατά τη διαδικασία της ανάπτυξης του λογισμικού υπάρχει η δυνατότητα να υπάρχουν ταυτόχρονα περισσότερες από μια εκδόσεις του ίδιου τμήματος λογισμικού που να εξυπηρετούν διαφορετικές εξαρτήσεις. Κάθε τμήμα λογισμικού μπορεί να είναι υλοποιημένο με ξεχωριστή γλώσσα προγραμματισμού. Για την Υπηρεσία Πολιτικών χρησιμοποιήσαμε τη γλώσσα προγραμματισμού Java [Deitel11]. Ως σύστημα ολοκλήρωσης (integration container) χρησιμοποιήσαμε τον Apache Service Mix⁴⁹ ο οποίος παρέχει επίσης και δίαυλο επικοινωνιών αφού υλοποιεί Enterprise Service Bus (ESB) που αξιοποιείται σαν Service Bus της αρχιτεκτονικής PBF. Για τις ασύγχρονες επικοινωνίες, συμπεριλαμβανομένων των μεταξύ περιοχών ανταλλαγών συμβάντων (events) σχετικά με την Υπηρεσία Πολιτικών, χρησιμοποιήσαμε τον εξυπηρετητή μηνυμάτων Apache

⁴⁵ <http://www.fp7-novi.eu/>

⁴⁶ <https://www.assembla.com/spaces/pbf-cell/git/source>

⁴⁷ <http://www.osgi.org/Technology/WhatIsOSGi>

⁴⁸ <http://www.martinfowler.com/articles/continuousIntegration.html>

⁴⁹ <http://servicemix.apache.org/>

Active MQ⁵⁰, ο οποίος ενσωματώνεται στο επιλεγμένο πλαίσιο ESB. Για εξασφάλιση της συνέπειας των αλληλεπιδράσεων και για την αποφυγή κυκλικών εξαρτήσεων μεταξύ των τμημάτων λογισμικού χρησιμοποιήσαμε Blueprint⁵¹. Αυτό παρέχει XML αρχεία ρυθμίσεων για τον ορισμό των σχέσεων μεταξύ κλάσεων και των διεπαφών τους εξασφαλίζοντας την αποφυγή ασυνέπειας και εξαρτήσεων που δε μπορούν να ικανοποιηθούν κατά το χρόνο εκτέλεσης.

4.5.1 Μηχανισμός Ορισμού και Εφαρμογής Πολιτικών

Ένα σημαντικό θέμα σχετικά με την υλοποίηση ήταν η επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού πολιτικών που να υποστηρίζει τους προτεινόμενους τύπους πολιτικών για την επίτευξη της ομοσπονδιοποίησης των Υποδομών. Το Ponder2⁵² [Twidle09] επιλέγηκε ως ο καταλληλότερος μηχανισμός ορισμού και εφαρμογής πολιτικών αφού καλύπτει όλες τις ζητούμενες προδιαγραφές. Αποτελεί ένα αυτοτελή και αυτάρκη γενικού σκοπού μηχανισμό πολιτικών που επιτρέπει τη διαχείριση αντικειμένων μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων. Εξασφαλίζει την ενημέρωση όλων των αντικειμένων μέσω των συμβάντων και υλοποιεί ένα πλαίσιο για την εκτέλεση των πολιτικών. Παρέχει δυνατότητα διαμόρφωσης και ελέγχου σε υψηλό επίπεδο ενώ τα διαχειριστικά αντικείμενα μπορούν να επεκταθούν εύκολα αφού είναι γραμμένα στη γλώσσα Java. Αναλυτικότερη περιγραφή του Ponder2 έγινε στο Κεφάλαιο 2.

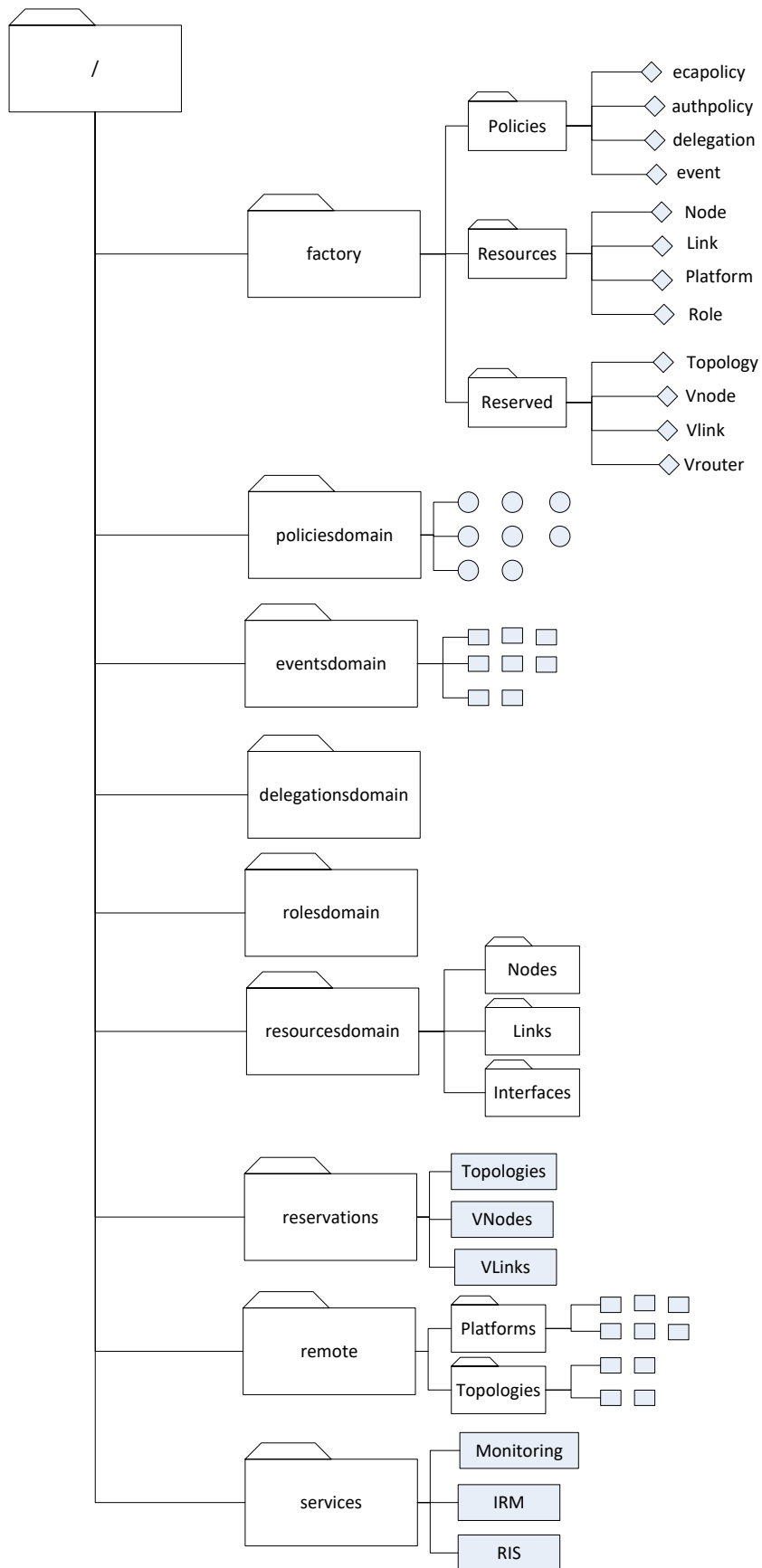
Το Ponder2 επεκτάθηκε κατάλληλα ούτως ώστε να αναπαριστά τις απαραίτητες οντότητες όπως περιγράφονται στο Πληροφοριακό Μοντέλο. Η βασική κλάση για αντικείμενα διαχείρισης (Managed Objects) που περιέχεται στο Ponder2 επεκτάθηκε με περισσότερες συναρτήσεις και ιδιότητες για να καλύψει την αναγκαία λειτουργικότητα. Το διαχειριστικό περιβάλλον περιέχει μια συλλογή από διαχειριστικά αντικείμενα που αναπαριστούν τους φυσικούς πόρους που παρέχονται από κάθε Εικονικοποιημένη Υποδομή (περιοχή/domain), με βάση τα χαρακτηριστικά των πραγματικών φυσικών υποδομών τις οποίες εικονικοποιούν. Όλοι αυτοί οι πόροι απεικονίζονται σαν αντικείμενα μέσα στο μηχανισμό πολιτικών κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης του περιβάλλοντος διαχείρισης, με σκοπό να επιτρέπουν την εκτέλεση διαχειριστικών

⁵⁰ <http://activemq.apache.org/>

⁵¹ <http://aries.apache.org/modules/blueprint.html>

⁵² <http://ponder2.net/>

ενεργειών σε αυτά. Η αρχικοποίηση γίνεται με χρήση αντικειμένων που έχουν δημιουργηθεί για αυτό το σκοπό με βάση τις οντότητες που περιγράφονται στο Πληροφοριακό Μοντέλο. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται μια συνοπτική εικόνα της δομής των διαχειριστικών αντικειμένων που υλοποιούνται.



Σχήμα 4.8 : Δεντρική Δομή του Μηχανισμού Πολιτικών

Κάτω από τη ρίζα του δέντρου ορίζονται υπο-δέντρα σαν φάκελοι (folders) που αναφέρονται σε οικογένειες ομοειδών αντικειμένων:

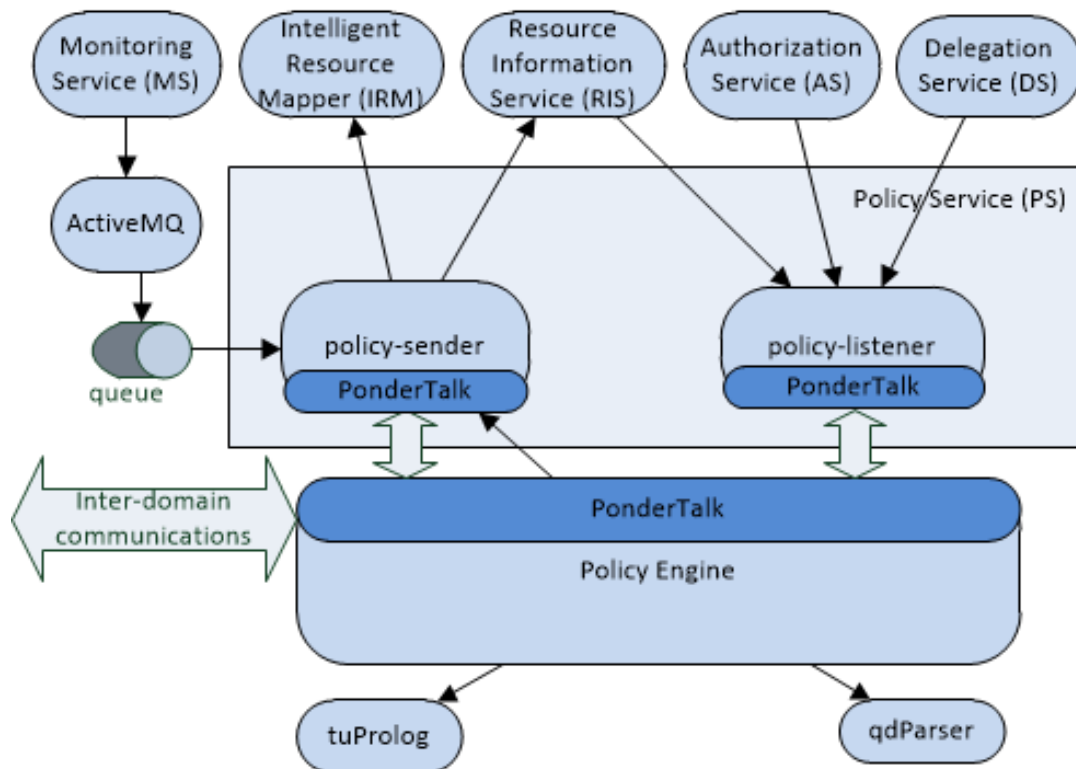
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο (folder) factory περιέχει τους επιμέρους φακέλους Policies, Resources και Reserved και καταλήγει σε είδη αντικειμένων που εν δυνάμει δημιουργούν συγκεκριμένα αντικείμενα. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης δημιουργούνται τα αντικείμενα προς διαχείριση με κατάλληλες κλήσεις προς τις κλάσεις της δομής factory.
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο policiesdomain καταλήγει στις υφιστάμενες τοπικές πολιτικές του συστήματος.
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο eventsdomain καταλήγει στα συμβάντα που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του συστήματος (π.χ. sliceFailure στο 4.2.1).
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο delegationsdomain καταλήγει στις Πολιτικές Αντιπροσώπευσης (Delegation Policies) για συμφωνίες SLA μεταξύ domains.
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο rolesdomain καταλήγει στους ρόλους δικαιωμάτων πρόσβασης (RBAC).
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο resourcesdomain περιέχει τους επιμέρους φακέλους Nodes, Links και Interfaces και καταλήγει στα αντικείμενα που αναπαριστούν τους διαθέσιμους φυσικούς πόρους. Πάνω σε αυτούς τους πόρους εφαρμόζονται Πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization Policies) ανάλογα με τους ρόλους των χρηστών.
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο reservations καταλήγει στα διαχειριστικά αντικείμενα που αναπαριστούν τους εικονικοποιημένους πόρους που έχει δεσμευμένους ο κάθε χρήστης.
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο remote περιέχει τον επιμέρους φάκελο Platforms με αναφορές στα απομακρυσμένα domains με τα οποία υπάρχουν SLA και τον επιμέρους φάκελο Topologies με αναφορές σε δεσμευμένες Εικονικές τοπολογίες σε απομακρυσμένα domains.
- Το υπο-δέντρο με ρίζα το φάκελο services περιέχει αντικείμενα που αντιπροσωπεύουν τις υπηρεσίες της αρχιτεκτονικής PBF. Οι ενέργειες των πολιτικών μπορούν να οριστούν σαν μέθοδοι των αντικειμένων αυτών.

Η Υπηρεσία Πολιτικών (Policy Service) μιας αυτόνομης περιοχής διατηρεί ενημερωμένη την ανωτέρω δεντρική δομή και χρησιμοποιεί τις περιγραφές των δεσμευμένων πόρων για τη δημιουργία των αντίστοιχων διαχειριστικών αντικειμένων. Τα αντικείμενα αυτά περιλαμβάνουν τις μεθόδους και τις ιδιότητές τους, επιτρέποντας την εκτέλεση καθορισμένων διαχειριστικών ενεργειών.

Το αντικείμενο που αντιπροσωπεύει ένα πόρο δημιουργείται μόνο στην περιοχή (υποδομή) στην οποία ανήκει. Σε περίπτωση που κάποιο Slice περιέχει δεσμευμένους πόρους σε πολλαπλές περιοχές, εμφανίζεται σαν Slice του χρήστη σε όλες τις περιοχές.

4.5.2 Υπηρεσία Πολιτικών

Η Υπηρεσία Πολιτικών της κάθε Εικονικοποιημένης Υποδομής αξιοποιεί πολιτικές για την αυτοδιαχείρισή της με βάση την κατάσταση του περιβάλλοντος, ενώ αξιοποιεί τις πολιτικές Αντιπροσώπευσης για τις αλληλεπιδράσεις με άλλες απομακρυσμένες υποδομές. Όλες οι προς εκτέλεση ενέργειες εφαρμόζονται με κατάλληλες κλήσεις στα υπόλοιπα τμήματα λογισμικού της αρχιτεκτονικής. Η εσωτερική αρχιτεκτονική της Υπηρεσίας Πολιτικών εμφανίζεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 : Εσωτερική Αρχιτεκτονική της Υπηρεσίας Πολιτικών

Ενώ τα περισσότερα τμήματα λογισμικού της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής PBF υλοποιούνται σαν μια μοναδική δέσμη (OSGi bundle), η Υπηρεσία Πολιτικών αποτελείται από δύο ανεξάρτητες δέσμες λογισμικού, το policy-sender και το policy-listener. Τα λεπτά βέλη αναπαριστούν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τμημάτων λογισμικού μέσω των διεπαφών του τμήματος στο οποίο κατευθύνεται το βέλος. Τα παχύτερα βέλη καταδεικνύουν αλληλεπιδράσεις με χρήση της γλώσσας PonderTalk μέσω του κελύφους (shell). Το policy-sender λαμβάνει μηνύματα διαμέσου της ουράς ActiveMQ σχετικά με τα συμβάντα παρακολούθησης της Υπηρεσίας Παρακολούθησης (MS) και τα προωθεί στο Μηχανισμό Πολιτικών. Επίσης εφαρμόζει ενέργειες διαχείρισης με κλήσεις προς την Υπηρεσία Έξυπνης Αντιστοίχισης Πόρων (IRM) και την Υπηρεσία Πληροφοριών για Πόρους (RIS).

Το policy-listener λαμβάνει κλήσεις : (1) από την υπηρεσία RIS σχετικά με διαθέσιμους και δεσμευμένους πόρους; (2) από την υπηρεσία ταυτοποίησης (AS) σχετικά με την κατάσταση ταυτοποίησης των χρηστών; (3) από την υπηρεσία DS σχετικά με πολιτικές αντιπροσώπευσης τις οποίες επεξεργάζεται και προωθεί στο μηχανισμό πολιτικών.

Ο Μηχανισμός Πολιτικών `ponder2` εξαρτάται από το `QDparser`⁵³ ο οποίος επιτρέπει τη μετατροπή των αντικειμένων τύπου `Java` σε μια καθορισμένη μορφή `XML` για τις εξωτερικές επικοινωνίες. Επίσης βασίζεται στη `Tuprolog`⁵⁴ που παρέχει μια μηχανή `Prolog` για αναζήτηση στις πολιτικές και για ανάλυση προς αποφυγή συγκρουόμενων πολιτικών (`Policy conflict analysis`).

Το παχύ οριζόντιο βέλος αναπαριστά τις επικοινωνίες μεταξύ περιοχών που σχετίζονται με τις πολιτικές Αντιπροσώπευσης. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις εκτελούνται μέσω ενός `Java RMI`⁵⁵ συστήματος, το οποίο δίνει τη δυνατότητα κλήσης μεθόδων σε απομακρυσμένα αντικείμενα που ανήκουν σε διαφορετικές εικονικές μηχανές `Java`. Αυτές οι επικοινωνίες ορίζονται δυναμικά μέσω των πολιτικών Αντιπροσώπευσης.

4.5.3 Επαλήθευση της Ορθότητας (**Proof of Concept**)

Η υλοποίηση της `PBF` αρχιτεκτονικής σαν πρωτότυπο εφαρμόστηκε στο πλαίσιο του έργου `NOVI` κατά την ομοσπονδιοποίηση μιας ιδιωτικής υποδομής τύπου `PlanetLab` με την υποδομή του Ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου `FEDERICA`. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται μετρήσεις του χρόνου που απαιτήθηκε για την αποκατάσταση του `slice` ενός χρήστη σε περίπτωση εντοπισμού αποτυχίας κάποιου δεσμευμένου πόρου που ανήκει στο `slice`. Η αποκατάσταση απαιτεί πολλαπλές ενεργοποιήσεις των πολιτικών Υποχρέωσης `resource_failure` και `slice_failure` (δείτε Πίνακας 1 στο Κεφάλαιο 4.2.1).

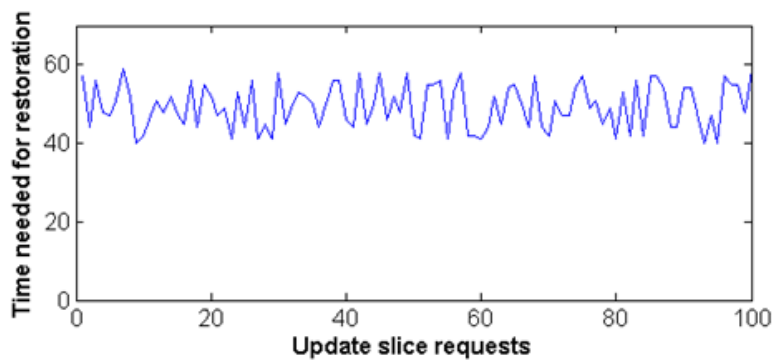
Δημιουργήθηκαν 100 ομόσπονδα `slices` στις δύο περιοχές, τα οποία αποτελούνταν από δύο έως πέντε Εικονικούς Κόμβους (`VNodes`). Μετά την επιτυχημένη δημιουργία πολλαπλών ομόσπονδων `slices`, προκλήθηκαν τυχαία συμβάντα αποτυχιών που αφορούσαν πόρους για απομακρυσμένους χρήστες. Μετρήθηκε ο χρόνος που απαιτήθηκε για την αυτόματη δέσμευση ενός νέου πόρου για το χρήστη μέσω της εκτέλεσης της συνάρτησης `updateSlice` του `IRM` η οποία αξιοποιεί `inter-domain` αλγόριθμο για Εικονική Ενσωμάτωση Δικτύων (`Virtual Network Embedding - VNE`) [Paragianni13]. Αυτό εμπλέκει τις πολιτικές αντιπροσώπευσης `executeRemoteSemanticQuery` (δείτε Πίνακας 5 στο Κεφάλαιο 4.3) και `provideRemoteResources` (δείτε Πίνακας 6 στο Κεφάλαιο 4.4) `Delegation policies`.

⁵³ <http://twicom.com/doc/com/twicom/qdparser/QDParser.html>

⁵⁴ <http://apice.unibo.it/xwiki/bin/view/Tuprolog/>

⁵⁵ <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/rmi/>

Το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει το χρόνο που απαιτήθηκε για την αντικατάσταση (update) ενός κόμβου μετά την πρόκληση των συμβάντων αποτυχίας (100 διαφορετικές εκτελέσεις). Ο μέσος χρόνος αποκατάστασης ήταν 50 δευτερόλεπτα με μικρή απόκλιση (+/- 10%), καταδεικνύοντας ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική και το σύστημα παρουσιάζουν προβλέψιμη συμπεριφορά στο χειρισμό των αποτυχιών ακόμα και στην περίπτωση που γίνονται ταυτόχρονες λειτουργίες. Οι περισσότεροι χρήστες των Εικονικοποιημένων Υποδομών των οποίων οι πόροι είναι διασυνδεδεμένοι μέσω του δημόσιου Internet είναι προετοιμασμένοι για το χειρισμό κάποιων διαστημάτων κατά τα οποία μέρος της δεσμευμένης τους υποδομής δε λειτουργεί. Αναμένουν όμως κάποια σταθερότητα στους χρόνους αποκατάστασης.



Σχήμα 4.10 : Απαιτούμενος χρόνος για ανανέωση των Πόρων

4.6 Συμπεράσματα

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική Policy-based Federation (PBF) περιγράφει και υλοποιεί με ένα ανεξάρτητο τρόπο τους διάφορους τύπους πολιτικών για ομοσπονδιοποίηση. Το βασικό πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής είναι η Υπηρεσία Πολιτικών η οποία παρέχει υποστήριξη για πολιτικές εντός μιας διαχειριστικής περιοχής (Εξουσιοδότησης, Υποχρέωσης και Προσβασιμότητας) καθώς και υποστηρίζει πολιτικές μεταξύ περιοχών (Αντιπροσώπευσης). Η ενεργοποίηση των τελευταίων γίνεται μέσω της Υπηρεσίας Αντιπροσώπευσης η οποία ορίζει και εφαρμόζει Συμφωνίες σε Επίπεδο Παροχής Υπηρεσιών (SLAs) μεταξύ περιοχών. Κλειδί για την αρχιτεκτονική αποτελεί το Πληροφοριακό Μοντέλο που ορίζει τα σενάρια ομοσπονδιοποίησης στο πλαίσιο των δεσμευμένων πόρων (slice) του χρήστη και των υπηρεσιών του PBF οι οποίες εκτελούν τις διαχειριστικές ενέργειες. Έτσι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική δίνει τη δυνατότητα διασύνδεσης περιοχών με χρήση πολιτικών χωρίς να απαιτείται η χρήση τμημάτων κώδικα στις απομακρυσμένες υποδομές.

Παρουσιάστηκαν παραδείγματα πολιτικών με έμφαση στις πολιτικές Αντιπροσώπευσης σχετικά με: (1) δέσμευση πόρων σε απομακρυσμένες υποδομές, (2) ανανέωση του αριθμού των πόρων που ανταλλάσσονται, (3) καθορισμό υποχρεώσεων ως προς τον αριθμό των πόρων που ανταλλάσσονται κατά τις παροχές πόρων μεταξύ περιοχών και (4) καθορισμό των υποχρεώσεων ως προς την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ περιοχών μέσω ελέγχου της εκτέλεσης σημασιολογικών ερωτημάτων.

Υλοποιήθηκε ένα πρωτότυπο της αρχιτεκτονικής το οποίο εφαρμόστηκε και ένα μέρος του δοκιμάστηκε στο περιβάλλον του NOVI. Η υλοποίηση είναι βασισμένη στο OSGi Framework και χρησιμοποιεί το μηχανισμό πολιτικών του Ponder2. Οι πολιτικές εκφράζονται στη μορφή που παρουσιάστηκε στις Καταγραφές_Κώδικα 4.1-4.6. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την έκφραση συμφωνιών SLAs για ομοσπονδία μεταξύ περιοχών, μέσω πολιτικών Αντιπροσώπευσης.

Θεωρούμε ότι η εργασία αυτή ανοίγει το δρόμο για την υλοποίηση πολλαπλών επεκτάσεων στα θέματα Πολιτικών που αφορούν ομοσπονδιοποιημένες περιοχές. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με τη χρήση πιο σύνθετων πολιτικών για την εισαγωγή μοντέλων

κοστολόγησης και δυνατότητες αξιοποίησης πιο σύνθετων σημασιολογικών ερωτημάτων μεταξύ περιοχών. Τέλος, θα μπορούσε η προτεινόμενη λύση να εφαρμοστεί και σε περιβάλλοντα μεγαλύτερης κλίμακας.

5 Πλαίσιο NFV Πολιτικών Διαχείρισης Πόρων OpenFlow

Ακολουθώντας τις νέες τάσεις της έρευνας που είναι στενά συνδεδεμένες με την ερευνητική εργασία που παρουσιάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής μελετήθηκαν τα Δίκτυα Οριζόμενα από Λογισμικό (Software-Defined Networks - SDN) και πιο συγκεκριμένα η διαχείριση υπηρεσιών τύπου Network Functions Virtualization (NFV) σε SDN με τη χρήση πολιτικών. Για το σκοπό αυτό το Πληροφοριακό Μοντέλο και η Οντολογία Πολιτικών η οποία αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 επεκτάθηκε κατάλληλα ούτως ώστε να μπορεί να περιγράψει δεδομένα που σχετίζονται με ροές OpenFlow [Giotis15], ενώ υλοποιήθηκαν κατάλληλες πολιτικές για τη διαχείριση των πόρων OpenFlow και της ενορχήστρωσης των Virtual Network Functions (VNFs) σε πολλαπλά επίπεδα.

5.1 Σχετικές Εργασίες

Τα δίκτυα SDN μπορούν να διευκολύνουν τη συνολική διαχείριση των δικτύων αφού προσφέρουν επιπλέον εργαλεία για το σκοπό αυτό. Στην εργασία [Kim13] γίνεται αξιοποίηση του συστήματος με πολιτικές *procedures* [Voellmy12] για τη διαχείριση του δικτύου. Οι NFV αρχιτεκτονικές [Hawilo14] αυξάνουν την ευελιξία στην παράδοση δικτυακών υπηρεσιών και μειώνουν το λειτουργικό κόστος, παρέχοντας κάποιες μορφές επαναχρησιμοποίηση στην ανάπτυξη Virtualized Network Functions (VNFs) [Bari15] ανάμεσα στη φυσική τοπολογία και τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Εντούτοις δεν υπάρχουν στη βιβλιογραφία αρκετές εργασίες σχετικά με συνδυασμό των NFV με SDN. Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της διαχείρισης δικτύων κινητής τηλεφωνίας, οι συγγραφείς του [Basta14] πρότειναν ένα μοντέλο επίλυσης της τοποθέτησης των NFV, που προκαλεί ελαχιστοποίηση του πρόσθετου φόρτου που προκύπτει από τις αλληλεπιδράσεις με το πλαίσιο διαχείρισης του SDN.

Αναφορικά με τη διαχείριση με βάση πολιτικές σε περιβάλλοντα SDN, ο Foster κ.α. [Foster10] σχεδίασαν και υλοποίησαν το Frenetic, που αποτελεί μια υψηλού επιπέδου γλώσσα για προγραμματισμό OpenFlow δικτύων. Η γλώσσα περιέχει μια υψηλού επιπέδου άλγεβρα προτύπων για την ταξινόμηση των πακέτων, καθώς και σημασιολογία συνάθροισης η οποία απλοποιεί τον προγραμματισμό. Είναι υλοποιημένη σαν ένα σύνολο από βιβλιοθήκες Python [Sanner99] οι οποίες εισάγουν ένα σύστημα το οποίο παράγει χαμηλού επιπέδου κανόνες επεξεργασίας πακέτων (*packet-processing rules*) οι οποίοι προωθούνται στον OF Controller. Οι συγγραφείς του [Batista14] παρουσίασαν το PonderFlow που είναι μια γλώσσα περιγραφής πολιτικών για OF δίκτυα. Αποτελεί επέκταση της γλώσσας Ponder [Damianou01] με καθορισμό των απαιτούμενων σημασιολογιών για την περιγραφή κανόνων OF με γενικό τρόπο χωρίς εξάρτηση από συγκεκριμένους OF ελεγκτές (*controllers*). Η προτεινόμενη λύση της παρούσας Διατριβής επεκτείνει και αξιοποιεί το Ponder2 [Twidle09], που αποτελεί νεότερη επανασχεδίαση του Ponder, για την αναπαράσταση των πόρων και των υπηρεσιών NFV σαν διαχειριστικά αντικείμενα.

5.2 Κίνητρο και Αρχές Σχεδίασης

Στη μεγάλη τους πλειοψηφία, οι δικτυακές υπηρεσίες διανέμονται μέσω ειδικού σκοπού συσκευές εμπορικής χρήσης (Commercial Off The Shelf - COTS) ή/και μέσω στατικού συνδυασμού με Δικτυακές Συναρτήσεις (Network Functions - NF) παρουσιάζοντας περιορισμούς ως προς την ευελιξία και επαναχρησιμοποίησή τους. Η παρούσα εργασία εστιάζει στο συνδυασμό του SDN με τις αρχές του NFV, σε μια προσπάθεια δημιουργίας αρχιτεκτονικής η οποία αξιοποιεί δυναμικές πολιτικές: (1) για τη διαχείριση των SDN πόρων, (2) για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs και των σχετικών δεδομένων και (3) για την ενορχήστρωση πολλαπλών αποκεντρωμένων VNFs για την παράδοση εμπορικών εφαρμογών με τη μορφή NFV Υπηρεσιών.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, αξιοποιήθηκε ο προγραμματισμός μέσω λογισμικού όπως προσφέρεται από τη φύση του OpenFlow SDN, για τη δημιουργία και παράδοση συμβάντων καθώς και σχετικών δεδομένων σε γενικής χρήσης VNFs τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν σαν δομικά στοιχεία για τη δημιουργία υπηρεσιών. Τα βασικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι τα ακόλουθα:

- 1. Αρθρωτή σχεδίαση που επιτρέπει στα τμήματα υλικού (hardware), στα VNFs, στις υπηρεσίες και στην ενορχήστρωση να είναι υλοποιημένα ξεχωριστά.**

Βασικό χαρακτηριστικό της σχεδίασης για τη διαχείριση των NFV με χρήση πολιτικών είναι η παροχή της δυνατότητας ανεξάρτητης υλοποίησης για τα διάφορα τμήματα της αρχιτεκτονικής. Ακολουθώντας στο αρχιτεκτονικό πλαίσιο για τα NFV όπως περιγράφεται στα [ETSI13a] και [Han15], υλοποιήθηκαν τρία διακριτά συστατικά. Συγκεκριμένα: (1) μηχανισμός πολιτικών για την επίτευξη ενορχήστρωσης με βάση πολιτικές για τις υπηρεσίες NFV, (2) δεξαμενή που περιέχει τα VNFs και (3) επίπεδο για τις εμπορικές εφαρμογές όπου υλοποιούνται τα Operational Support Systems ή Business Support Systems (OSS/BSS) σαν μια αλυσίδα από πολλαπλά συνεργαζόμενα VNFs.

2. Πληροφοριακό μοντέλο που περιγράφει σε υψηλό αφαιρετικά επίπεδο τα δικτυακά δεδομένα και τις δικτυακές συναρτήσεις

Το Πληροφοριακό Μοντέλο (Information Model - IM) αποτελείται από οντολογίες και παρέχει τη δυνατότητα περιγραφής των δικτυακών πόρων και των συναρτήσεων ελέγχου τους με ενιαίο τρόπο. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα έκφρασης πολιτικών για τον έλεγχο και τη διαχείριση των πόρων. Τα VNFs καθώς και οι υπηρεσίες NFV περιγράφονται επίσης από το Πληροφοριακό Μοντέλο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο μηχανισμό πολιτικών να ελέγχει τον κύκλο ζωής τους.

3. Διαχείριση με βάση πολιτικές στα VNFs και ενορχήστρωση της δημιουργίας NFV

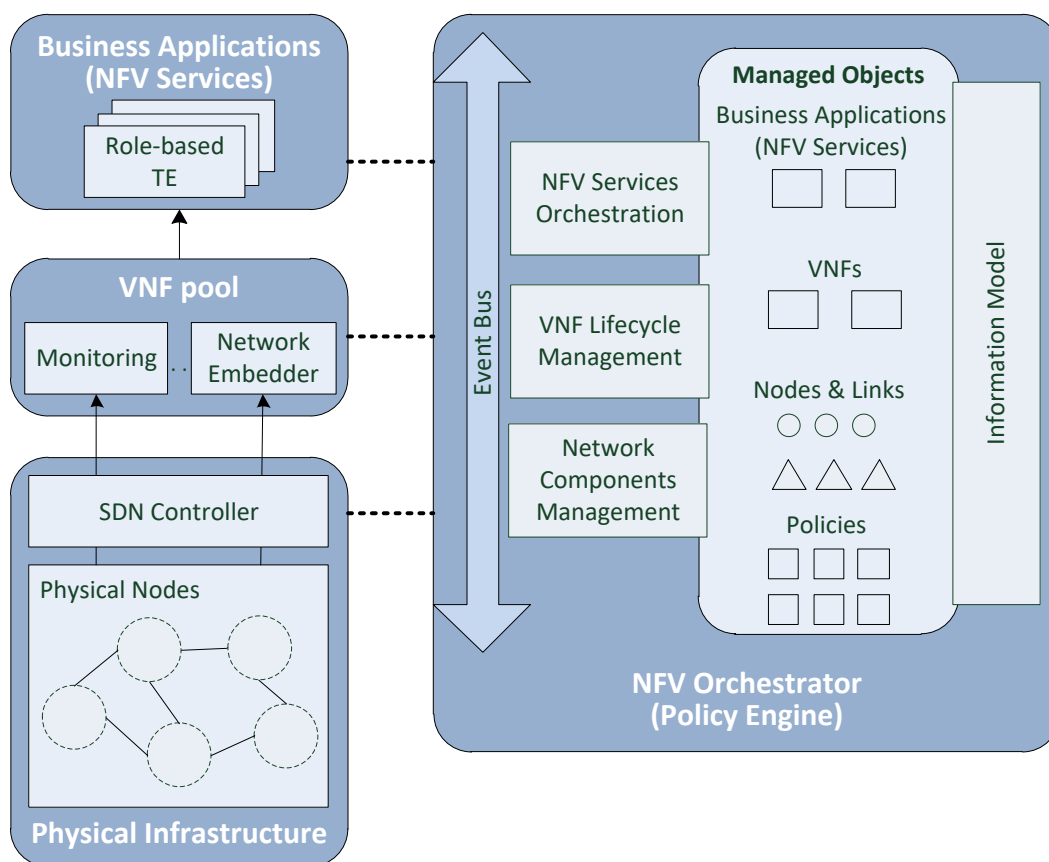
Ο ενορχηστρωτής του NFV είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική οδηγεί σε ένα περιβάλλον όπου γίνεται χρήση πολιτικών για την ενορχήστρωση και εκτέλεση μέσω πολιτικών Υποχρέωσης (Obligation policies), πολιτικών Εξουσιοδότησης (Authorization policies) και πολιτικών Προσβασιμότητας (Access Control policies).

4. Η υπόσταση των NFV υπηρεσιών ελέγχεται από κανόνες πολιτικών

Κάθε υπηρεσία NFV μπορεί να υλοποιηθεί σαν επέκταση της βασικής κλάσης του μηχανισμού ορισμού πολιτικών για τα διαχειριζόμενα αντικείμενα (Managed Object – MO). Αυτή παρέχει τη βασική λειτουργικότητα ενός αντικειμένου διαχείρισης, ενώ μπορεί να επεκταθεί εύκολα για να ανταποκριθεί στα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την αξιοποίηση των πολιτικών μέσω αλληλεπίδρασης με τα VNFs.

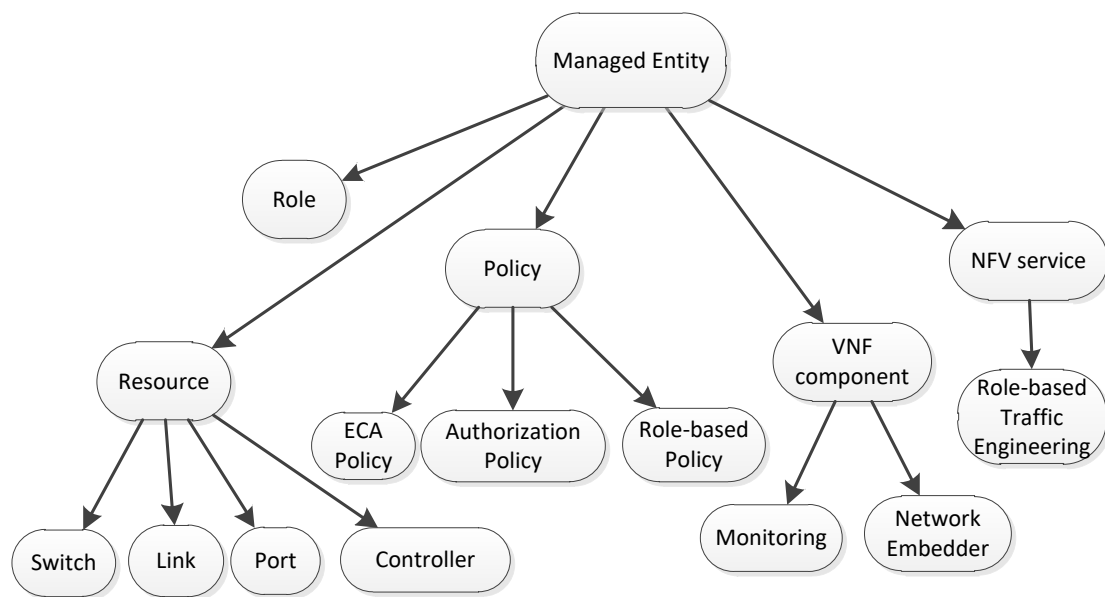
5.3 NFV Orchestrator: Πολιτικές για Διαχείριση Ελεγκτή OpenFlow

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί το Μηχανισμό ορισμού Πολιτικών (Policy Engine) για την επιλογή VNFs μέσα από μία δεξαμενή με VNFs για τη δημιουργία Εφαρμογών OSS/BSS. Το Σχήμα 5.1 παρουσιάζει σχηματικά τα προαναφερθέντα συστατικά.



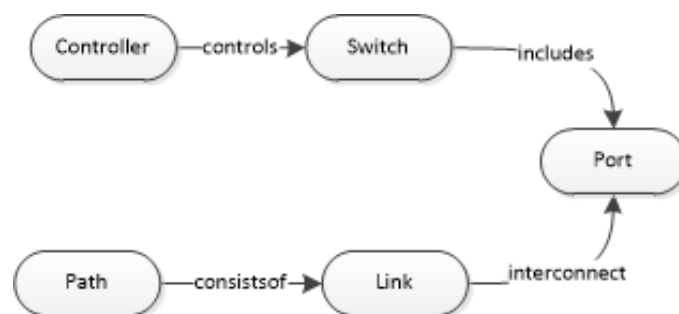
Σχήμα 5.1 : Η αρχιτεκτονική της προτεινόμενης λύσης με χρήση πολιτικών

Ο μηχανισμός πολιτικών βρίσκεται στο NFVO. Αποτελείται από ένα διαχειριστικό περιβάλλον με ιεραρχία Διαχειριστικών Αντικειμένων (Managed Objects - MO). Έχει γίνει επέκταση της Οντολογίας Πολιτικών για να μπορεί να περιγράψει τους πόρους και υπηρεσίες που αντιστοιχούν σε ροές OpenFlow όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 : Οντολογία Πολιτικών για διαχείριση OpenFlow πόρων.

Το διαχειριστικό περιβάλλον είναι χωρισμένο σε τρία επίπεδα. Στο χαμηλότερο επίπεδο γίνεται διαχείριση με τη χρήση πολιτικών των OpenFlow πόρων, ενώ στα ψηλότερα επίπεδα γίνεται η διαχείριση με χρήση πολιτικών των VNFs και NFV Services. Το Πληροφοριακό Μοντέλο (Information Model - IM) σαν μέρος του NFVO περιέχει την οντολογία με τους ορισμούς των κλάσεων καθώς και τις σχέσεις μεταξύ κλάσεων.



Σχήμα 5.3 : Σχέσεις μεταξύ κλάσεων

Το χαμηλότερο επίπεδο ελέγχου αφορά χρήση πολιτικών για τη διαχείριση πόρων OpenFlow εφαρμόζοντας ενέργειες πάνω σε αντικείμενα που αντιπροσωπεύουν αυτούς τους πόρους. Το Πληροφοριακό Μοντέλο σαν μέρος του NFVO παρέχει κλάσεις και σχέσεις μεταξύ τους για τους πόρους αυτούς. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται γραφικά μερικές από τις σχέσεις μεταξύ των κλάσεων. Ο Controller ελέγχει (controls) κάποιο

Switch το οποίο περιλαμβάνει (includes) διάφορα Ports. Έτσι ο ορισμός αυτών των δύο σχέσεων οδηγεί στη δημιουργία λογικής σύνδεσης του Controller με τα Ports στα οποία μπορεί να εκτελεί ενέργειες. Το κάθε Path αποτελείται από (constitsof) Links τα οποία διασυνδέουν (interconnect) τα Ports. Μια ενέργεια που μπορεί να εκτελεστεί σε ένα διαχειριστικό αντικείμενο (Path MO) μπορεί να είναι η προσθήκη ενός νέου Link. Το αντικείμενο Link περιέχει με τη σειρά του αναφορές στα δύο Ports τα οποία συνδέει. Έτσι υπάρχει μια συνολική σύνδεση μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων συστατικών.

Όλα τα συστατικά μέρη αρχικοποιούνται ως διαχειριστικά αντικείμενα μέσα στο μηχανισμό ορισμού πολιτικών κατά την αρχικοποίηση του συστήματος. Αυτό δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης πράξεων διαχείρισης πάνω σε αυτά. Σε όλα θεωρείται ότι το σημείο εφαρμογής της πολιτικής (Policy Enforcement Point - PEP) βρίσκεται στον Ελεγκτή (Controller) αφού όλες οι ενέργειες εκτελούνται μέσω της διεπαφής του. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις, θεωρείται ότι το σημείο λήψεων αποφάσεων για τις πολιτικές (Policy Enforcement Point), βρίσκεται εντός του μηχανισμού πολιτικών, ο οποίος είναι υπεύθυνος και για την αποφυγή αντικρουόμενων αποφάσεων.

Το ενδιάμεσο επίπεδο ασχολείται με τον κύκλο ζωής του VNF. Όλα τα VNFs αναπαριστούνται σαν Διαχειριστικά Αντικείμενα (MOs) και οι μέθοδοί τους ενδέχεται να προκαλούν εκτέλεση ενεργειών πάνω σε MOs χαμηλότερου επιπέδου. Επιπλέον οι μέθοδοι των VNFs μπορούν να εκτελεστούν από το μηχανισμό πολιτικών δίνοντας τους τη δυνατότητα να ελέγχουν τον κύκλο ζωής τους.

Το υψηλότερο επίπεδο προσφέρει ενορχήστρωση των NFV υπηρεσιών με χρήση πολιτικών. Οι υπηρεσίες NFV αναπαριστούνται και αυτές σαν Διαχειριστικά Αντικείμενα, επεκτείνοντας κατάλληλα τη βασική κλάση MO και αξιοποιούν υψηλότερου επιπέδου πολιτικές για την εκτέλεση ενεργειών που αφορούν VNFs.

Η υπηρεσία πολιτικών του NFVO βασίζεται στη γλώσσα Ponder2 [Twidle09], και παρέχει τους δύο βασικούς τύπους πολιτικών:

1. Πολιτικές Υποχρέωσης (Obligation Policies)

Οι πολιτικές αυτές επιβάλλουν την εκτέλεση διαχειριστικών ενεργειών μέσα στο περιβάλλον διαχείρισης, προκαλώντας επαναρύθμιση του συστήματος. Κάθε πολιτική αυτού του τύπου αποτελείται από τρία μέρη (1) συμβάν, (2) συνθήκες και (3) ενέργειες. Το συμβάν μπορεί να πυροδοτηθεί από οποιοδήποτε τμήμα της αρχιτεκτονικής μέσω του ενιαίου διαύλου επικοινωνίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Οι συνθήκες αφορούν την κατάσταση λειτουργίας του κάθε Διαχειριστικού Αντικειμένου και διατυπώνονται με βάση τις τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων τους. Σε περίπτωση που ικανοποιούνται γίνεται εκτέλεση των ενεργειών. Ως ενέργειες ορίζονται μέθοδοι των Διαχειριστικών Αντικειμένων. Για παράδειγμα μια πολιτική Υποχρέωσης μπορεί να έχει σαν συμβάν την κατάρρευση ενός Link (linkfailure), σαν συνθήκη το εάν ανήκει σε διακεκριμένο χρήστη του παρόχου υπηρεσιών και σαν ενέργεια την εκτέλεση της μεθόδου replaceLink του Αντικειμένου Path που αντικαθιστά το Link.

Σαν υποσύνολο των πολιτικών αυτών ορίζονται οι Πολιτικές ανάθεσης ρόλων. Αυτές καθορίζουν διαφορετικές τάξεις χρηστών που λαμβάνουν διαφορετικά δικαιώματα πρόσβασης και χρήσης σε κάθε υπηρεσία που προσφέρεται από τα VNFs. Η ανάθεση ρόλων είναι δυναμική και γίνεται με βάση τις εφαρμοζόμενες πολιτικές της υποδομής.

2. Πολιτικές Εξουσιοδότησης (Authorization policies)

Οι πολιτικές αυτές ορίζουν ποιες ενέργειες επιτρέπεται να εκτελούν οι χρήστες με βάση το ρόλο που κατέχουν. Σαν υποκείμενο της κάθε πολιτικής ορίζονται συγκεκριμένοι ρόλοι ενώ σαν στόχος ορίζονται συγκεκριμένες μέθοδοι των Διαχειριστικών Αντικειμένων. Για παράδειγμα μια πολιτική επίτρεψης εκτέλεσης μπορεί να οριστεί για να απαγορεύει την δημιουργία Υπηρεσίας Παρακολούθησης για συγκεκριμένη ομάδα χρηστών.

Τα περιβάλλοντα NFV επιτρέπουν σε εικονικές υπηρεσίες να ενώνονται δυναμικά σε αλυσίδες, δημιουργώντας VNF γράφους προώθησης παραδίδοντας τελικά σαν εμπορικές εφαρμογές υπηρεσίες NFV από άκρο σε άκρο. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένας χρήστης ή

ένα συμβάν σε ένα δίκτυο πρέπει να περάσει από πολλές δικτυακές συναρτήσεις, κάτι που ονομάζεται αλυσίδα υπηρεσιών (Service Chaining).

5.4 Μελέτη Περίπτωσης

Σαν μελέτη περίπτωσης για το πρωτότυπο που δημιουργήσαμε, θεωρούμε ότι έχουμε ένα VNF για παρακολούθηση λειτουργίας (Monitoring VNF) και για ένα για ενσωμάτωση δικτύου (Network Embedder) καθώς και μια υπηρεσία NFV για διαχείριση της δικτυακής κίνησης με βάση ρόλους με το όνομα Role-based Traffic Engineering (RbTE). Αυτές τις δικτυακές συναρτήσεις διαχειρίζεται το προτεινόμενο NFVO. Η αξιοποίηση των δύο VNFs επιτρέπουν στο NFVO να προσφέρει την υπηρεσία RbTE ως μια δικτυακή συνάρτηση που βασίζεται στους ρόλους των χρηστών για την παροχή εικονικοποιημένων μονοπατιών πάνω από τη φυσική υποδομή.

Η υποδομή είναι χειριζόμενη από ένα OpenFlow ελεγκτή (Controller), ο οποίος αποτελεί ένα αρθρωτό δικτυακό λειτουργικό σύστημα βασισμένο σε συμβάντα (event-based) για τη διαχείριση ενός ή περισσότερων OF συσκευών [ETSI13a]. Για τον ελεγκτή, οτιδήποτε συμβαίνει εντός του υπό διαχείριση δικτύου, όπως δημιουργία νέων συνδέσεων, δημιουργία νέων μεταγωγέων ή ακόμα και νέα αιτήματα για προώθηση πακέτων εκλαμβάνεται ως συμβάν (event) [Pfaff12]. Ως εκ τούτου, ο ελεγκτής γνωρίζει όλα τα στοιχεία του δικτύου που αποτελούν τη φυσική υποδομή και την τοπολογία. Κάθε λογισμικό NF που ανήκει στη δεξαμενή με VNF αναμένει για συγκεκριμένα γεγονότα ή/και δεδομένα από τον ελεγκτή. Επιπλέον, είναι ικανό να αλληλεπιδρά με τον ελεγκτή προκειμένου να ζητήσει συγκεκριμένες πληροφορίες. Ειδικότερα:

1. Το VNF για παρακολούθηση (M-VNF): M-VNF είναι σε θέση να καθοδηγήσει τον ελεγκτή OF για την απόκτηση των στατιστικών στοιχείων που αφορούν συγκεκριμένη ροή, ή ένα σύνολο ροών. Ο ελεγκτής τότε θα αποστείλει αίτημα συλλογής στατιστικών ροών (flow-stats) προς τους μεταγωγείς για παρακολούθηση της πληροφορίας σχετικά με τη ροή. Κάθε μεταγωγέας θα απαντήσει κατάλληλα, δεδομένου ότι υπάρχει αρχικοποιημένη κάποια καταχώρηση ροής στον πίνακα ροών. Για τον ελεγκτή κάθε απάντηση θεωρείται ότι είναι συμβάν απάντησης συλλογής στατιστικών δεδομένων ροής όπως

περιγράφεται αναλυτικά στο [Gude08]. Με τη λήψη αυτού του συμβάντος, ο ελεγκτής προωθεί τα δεδομένα παρακολούθησης στο VNF παρακολούθησης. Με τον ίδιο τρόπο, μέσα από αίτημα για στατιστικά θυρών (port-stats) και κατάλληλες απαντήσεις ο ελεγκτής είναι σε θέση να συλλέγει και να διαδίδει πληροφορίες σχετικά με κάθε θύρα των υπό διαχείριση μεταγωγέων.

2. Το VNF για ενσωμάτωση δικτύου (NE-VNF): NE-VNF είναι υπεύθυνο για τη χαρτογράφηση μιας εικονικής διαδρομής προς τη φυσική τοπολογία, κατόπιν αιτήματος του χρήστη. Υπήρξε σημαντική έρευνα στον τομέα της εικονικής ενσωμάτωσης δικτύων (Virtual Network Embedding - VNE) ([Giotis14], [Chowdhury12]). Ως εκ τούτου θεωρήσαμε ότι η επίλυση του προβλήματος VNE είναι εκτός από τους στόχους της δικής μας μελέτης και επιλέξαμε στο σενάριο επαλήθευσης της ορθότητας τον αλγόριθμο του Dijkstra για την επίλυση των προβλημάτων συντομότερης διαδρομής. Το NE-VNF ζητά πληροφορίες τοπολογίας από τον ελεγκτή, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων OF-συσκευών, τις συνδέσεις τους, και τα στατιστικά στοιχεία των συνδέσεων τους όπως το εύρος ζώνης και η χρήση. Μόλις ένας χρήστης ζητήσει μια από άκρη σε άκρη (end to end E2E) εικονική σύνδεση, το NE-VNF είναι σε θέση να βρει την πιο κατάλληλη διαδρομή και να δώσει εντολή στον ελεγκτή να ρυθμίσει τις κατάλληλες ροές. Θεωρούμε ότι οι χρήστες μπορεί να είναι μεγάλοι πελάτες, όπως οι πάροχοι περιεχομένου πολυμέσων ή εναλλακτικοί τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι που επιθυμούν να δεσμεύσουν εικονικά μονοπάτια. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται ένα σημαντικός αριθμός αναγνωριστικών για διαχωρισμό των ρευμάτων του κάθε χρήστη. Εμείς επιλέξαμε να αξιοποιήσουμε το VLAN ID ως ένα αναγνωριστικό για κάθε ενοικιαστή για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μέθοδοι όπως περιγράφονται στο [Riggio13].

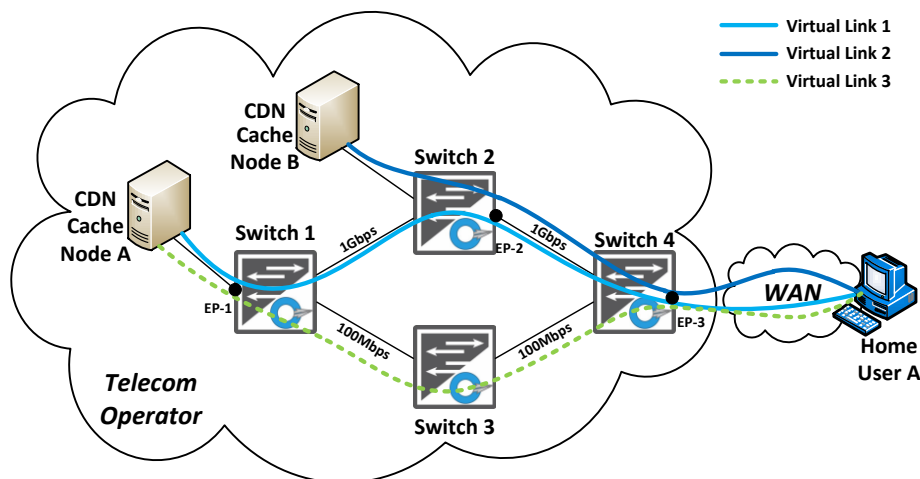
Σε μια προσπάθεια επίδειξης της ελαστικότητας της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής που βασίζεται σε πολιτικές, αναπτύξαμε ένα σύστημα διαχείρισης με βάση ρόλους για τους πελάτες της προαναφερθείσας υποδομής, με χρήση του μηχανισμού πολιτικών του

NFVO. Ανάλογα με το ρόλο που κατέχει ο κάθε πελάτης λαμβάνει διαφορετικό τύπο και ποιότητα υπηρεσιών.

Ειδικότερα, όταν ένας νέος πελάτης αιτείται ένα εικονικό σύνδεσμο που συνδέει δύο σημεία, η υπηρεσία αιτείται από το NE-VNF μια λίστα με επιλογές από δυνατά μονοπάτια. Το NE-VNF υπολογίζει: (i) το συντομότερο μονοπάτι που συνδέει τα δύο σημεία και (ii) το μονοπάτι που περιέχει τις λιγότερο χρησιμοποιημένες συνδέσεις, αλλοιώνοντας τις τιμές των βαρών για την κάθε σύνδεση πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου Dijkstra για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής. Ανάλογα με το ρόλο που κατέχει ο κάθε πελάτης (όπως επιβάλλει ο μηχανισμός ορισμού πολιτικών) το RbTE θα επιλέξει κάποια επιλογή από τα μονοπάτια. Ακολούθως το NE-VNF θα καθοδηγήσει τον ελεγκτή για να εγκαταστήσει τις κατάλληλες εγγραφές ροών στους πίνακες ροών των αντίστοιχων OF-συσκευών ούτως ώστε να γίνει η αντιστοίχιση του εικονικού μονοπατιού με τους φυσικούς κόμβους. Επίσης το RbTE λαμβάνει πληροφορίες παρακολούθησης από το M-VNF ούτως ώστε να μπορεί να εντοπίζει παραβιάσεις πολιτικών σχετικών με τη χρησιμοποίηση των φυσικών συνδέσεων από πελάτες της υποδομής. Στο πρωτότυπο που δημιουργήσαμε υπάρχουν δύο επίπεδα παρεχόμενης υπηρεσίας. Στην υπηρεσία επιπέδου 1 προσφέρονται μονοπάτια με τους λιγότερο χρησιμοποιούμενους συνδέσμους ενώ στο επίπεδο 2 η κίνηση διοχετεύεται μέσω του συντομότερου μονοπατιού.

5.5 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων - Εξέταση Περίπτωσης CDN

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης, εξετάστηκε η περίπτωση παρόχων υπηρεσιών παράδοσης περιεχομένου (Content Delivery Networks - CDN) που αξιοποιούν CDN κόμβους εκτός των υποδομών τους. Ο πάροχος υπηρεσιών CDN είναι ο πελάτης και δεσμεύεται να εφαρμόσει την πολιτική του ιδιοκτήτη της υποδομής που αξιοποιεί. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής δημιουργήθηκε μια απλή τοπολογία στην πειραματική πλατφόρμα του εργαστηρίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4 που προσομοιώνει ένα τμήμα του δικτύου ενός παρόχου.



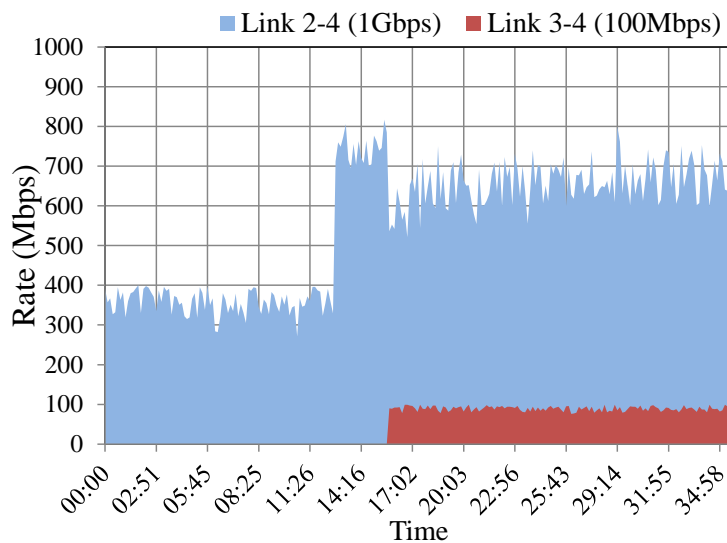
Σχήμα 5.4 : Πειραματική Διάταξη

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις εικονικές μηχανές με Open vSwitch [Argyroulos15], που αποτελεί λογισμικό που αναπαριστά μεταγωγέα. Δημιουργήθηκε δικτυακή κίνηση τύπου UDP data-stream με χρήση της εντολής Iperf [Pfaff09] προσομοιώνοντας έτσι τη διαδικασία ροής του βίντεο.

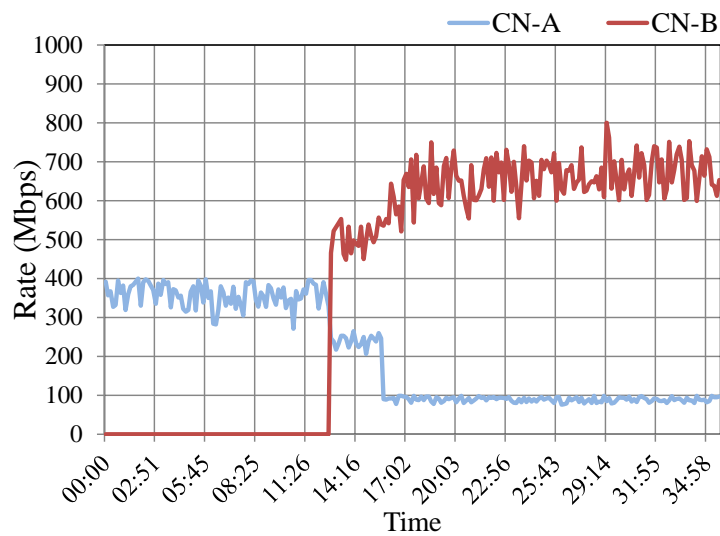
Σε αυτή την περίπτωση, οι δύο πάροχοι CDN (A και B) θεωρούνται ως πελάτες ενός τηλεπικοινωνιακού παρόχου, όπου ο κάθε ένας κατέχει ένα CDN Caching Node (CN) στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Στα πειράματα οι πάροχοι A και B είναι πελάτες επιπέδου Tier1 και Tier2 αντίστοιχα ενώ τους ανήκουν οι κόμβοι CN-A και CN-B αντίστοιχα, με σκοπό την εξυπηρέτηση του Οικιακού Χρήστη (Home User – HU). Όταν ο χρήστης ζητά να

λάβει συγκεκριμένο περιεχόμενο από το CN-A, ο διαχειριστής είναι υπεύθυνος για την αντιστοίχιση του εικονικού μονοπατιού με τη φυσική υποδομή ενώνοντας το σημείο (End Point) EP-1 με το σημείο EP-3. Το NFVO αναπτύσσει ένα νέο στιγμιότυπο της υπηρεσίας RbTE σαν αλυσίδα υπηρεσιών M-VNF και NE-VNF για να αναλάβουν αυτό το έργο. Αρχικά όλα τα μονοπάτια παρουσιάζονται ως άδεια και ως εκ τούτου όλη η κίνηση διοχετεύεται μέσω της γρήγορης γραμμής του 1Gbps, δημιουργώντας το εικονικό μονοπάτι (Virtual Link) VL-1 όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.

Μετά από 15 λεπτά ο HU-B ζητά περιεχόμενο από το CN-B, ο οποίος λαμβάνει υπηρεσία προτεραιότητας λόγω του ότι ο CDN πάροχός του είναι πελάτης Tier2. Το NFVO θα αναπτύξει ένα νέο στιγμιότυπο της υπηρεσίας RbTE και θα επιβάλει τη δέσμευση του ταχύτερου μονοπατιού της φυσικής υποδομής (το VL-2 σε αυτή την περίπτωση). Ο μηχανισμός πολιτικών του NFVO θα διαχειριστεί και τα δύο στιγμιότυπα της υπηρεσίας RbTE και τα σχετικά στιγμιότυπα των VNFs που χειρίζονται με τη σειρά τους τα VLs.



Σχήμα 5.5 : Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε κάθε σύνδεση



Σχήμα 5.6 : Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για κάθε χρήστη

Από τη στιγμή που η φυσική σύνδεση μεταξύ του Switch 2 και Switch 4 επέρχεται σε κορεσμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5 η δικτυακή κίνηση του CN-A επαναδρομολογείται δυναμικά μέσω του πιο αργού μονοπατιού VL-3 των 100Mbps, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση εύρους ζώνης από το CN-A, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την κατανάλωση μεγαλύτερου εύρους ζώνης από τον CN-B όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.

5.6 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η χρήση των SDN και NFV σαν δύο συμπληρωματικές τεχνολογίες. Επεκτείναμε την αυτοματοποίηση και τις αρχές εικονοποίησης που προσφέρουν για την επίτευξη επαυξημένης ελαστικότητας σε δίκτυα παραγωγής των τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Σχεδιάσαμε ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο για χρήση πολιτικών διαχείρισης στην ενορχήστρωση των Virtualized Network Functions (VNFs), επιτρέποντας ευκολότερη ανάπτυξη στιγμιότυπων δικτυακών υπηρεσιών με αυξημένη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής τους. Σαν σενάριο επαλήθευσης της ορθότητας υλοποιήσαμε VNFs για το χειρισμό δικτυακών εργασιών όπως παρακολούθηση (Monitoring) και αντιστοίχιση (Mapping) εικονικοποιημένων μονοπατιών με φυσικές συνδέσεις από άκρη σε άκρη. Επιπλέον αναπτύχθηκε μια υπηρεσία NFV που αξιοποιεί τα προαναφερθέντα VNFs σαν δομικά στοιχεία για να επιτύχει την εφαρμογή ρόλων κατά τη δημιουργία εικονικών συνδέσεων από άκρη σε άκρη επί της φυσικής τοπολογίας. Σαν σενάριο επαλήθευσης της ορθότητας η προτεινόμενη λύση εφαρμόστηκε σε περιβάλλον όπου πάροχος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών φιλοξενούσε CDN κόμβους εκ μέρους των παρόχων υπηρεσιών CDN.

Συμπεραίνουμε ότι είναι δυνατή η εφαρμογή διαχείρισης με βάση πολιτικές σε περιβάλλοντα SDN και NFV. Η διαχείριση μπορεί να επιτευχθεί σε πολλαπλά επίπεδα συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης των μεταγωγέων OpenFlow, του κύκλου ζωής των VNFs αλλά και της ενορχήστρωσης των υπηρεσιών NFV. Η προσέγγιση αυτή βοηθά στην πιο αποτελεσματική διαχείριση αφού αυτοματοποιεί κάποια από τα στάδια της διαδικασίας σε κάθε επίπεδο μέσω των πολιτικών Υποχρέωσης αλλά προσφέρει και δυνατότητες για επιπλέον ασφάλεια μέσω των πολιτικών εξουσιοδότησης.

6 Χρήση Πολιτικών σε Ομοσπονδίες Υποδομές Νέφους

Η ομοσπονδιοποίηση σε υποδομές υπολογιστικού νέφους (cloud computing) προέκυψε σαν αποτέλεσμα της ραγδαίας αύξησης των χρηστών και των παρόχων των υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους (cloud providers). Επιτρέπει στους παρόχους να δημιουργούν και να εφαρμόζουν Συμφωνίες Επιπέδου Παροχής Υπηρεσιών (Service Level Agreements - SLAs) ως προς τη διαχείριση των πόρων τους, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα να μοιράζονται πόρους αυξάνοντας το εύρος και τη διαθεσιμότητα των πόρων και των υπηρεσιών που προσφέρονται προς τους χρήστες.

Τα βασικά μοντέλα για την παροχή υπηρεσιών νέφους είναι: (1) Software as a Service (SaaS) που προσφέρει στους χρήστες εφαρμογές προσβάσιμες μέσω Internet, (2) Platform as a Service (PaaS) που προσφέρει ένα διαχειρίσιμο περιβάλλον για φιλοξενία εφαρμογών και (3) Infrastructure as a Service (IaaS) που προσφέρει στους χρήστες πόρους που μπορεί να είναι υπολογιστικοί, αποθηκευτικοί, δικτυακοί ή άλλοι, ανάλογα με τις ανάγκες που μπορεί να υπάρχουν [Mell11].

Η μεγάλη αποδοχή που είχε το υπολογιστικό νέφος και η ραγδαία αύξηση στον αριθμό των παρόχων τέτοιων υπηρεσιών προσφέρει δυνατότητες για συνεργασία μεταξύ τους. Μπορούν να συνάπτουν συμφωνίες με ποικίλους τρόπους και για πολλαπλά οφέλη. Σε κάθε περίπτωση βελτιώνεται η διαθεσιμότητα των πόρων καθώς σε περιόδους αυξημένης ζήτησης, εκμεταλλευόμενοι τις συμφωνίες ομοσπονδιοποίησης, μπορούν να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών τους με δέσμευση πόρων που ανήκουν σε άλλους παρόχους [Toosi14], [Villegas12]. Σε παρόχους με ετερογενείς υποδομές η ομοσπονδιοποίηση προσφέρει αύξηση των διαθέσιμων τύπων από υπηρεσίες που μπορούν να προσφερθούν [Buyya09]. Στο Κεφάλαιο 2.3 έγινε μια παρουσίαση της παρούσας κατάστασης σε σχέση με την ομοσπονδιοποίηση σε υπολογιστικά περιβάλλοντα νέφους. Διαφάνηκε ότι παρόλο που υπάρχει αρκετό ενδιαφέρον και πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις υπάρχουν ακόμα περιθώρια για νέες προτάσεις. Θεωρούμε ότι η χρήση πολιτικών για την ομοσπονδοποίηση, στη μορφή που προτάθηκε

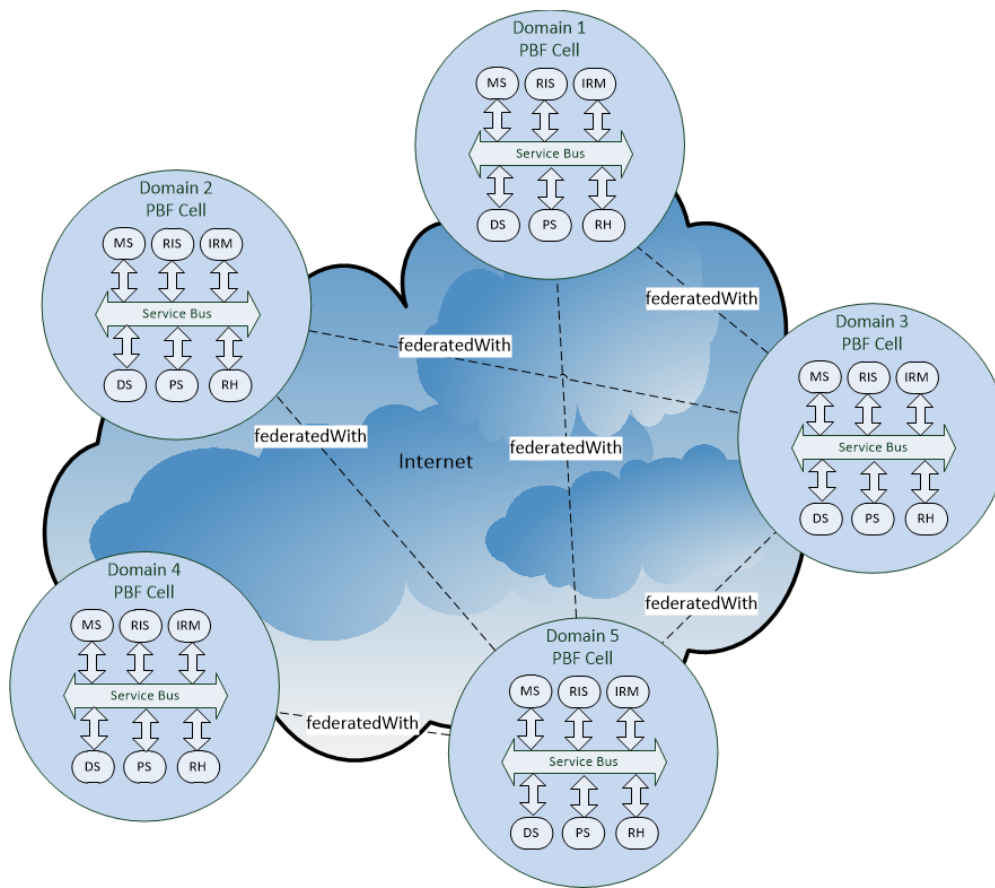
στην παρούσα Διατριβή, θα μπορούσε να δώσει σημαντικά οφέλη παρέχοντας πιο ξεκάθαρες συμφωνίες μεταξύ υποδομών και διευρύνοντας τις δυνατότητές τους.

6.1 Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική

Το πρόβλημα της ομοσπονδιοποίησης υποδομών υπολογιστικού νέφους εντάσσεται στο πλαίσιο της ομοσπονδιοποίησης εικονικοποιημένων υποδομών με εξειδίκευση της αρχιτεκτονικής Policy-Based Federation (PBF) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 και των πολιτικών που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Σημειωτέο πως αν υπάρχουν πόροι και υπηρεσίες που δεν καλύπτονται από το Πληροφοριακό Μοντέλο του Κεφαλαίου 3, αρκούν απλές επεκτάσεις για την περιγραφή πρόσθετων απαιτήσεων.

Ο μηχανισμός ορισμού και εφαρμογής πολιτικών (Policy Engine) στο Σχήμα 4.1, αποτελεί μέρος της αρχιτεκτονικής σε κάθε αυτόνομη περιοχή (domain) της ομοσπονδίας. Όλοι οι πόροι και οι υπηρεσίες της αναπαρίστανται ως Διαχειριστικά Αντικείμενα (Managed Objects - MOs) παρέχοντας στις πολιτικές μεταβαλλόμενες ιδιότητες και μεθόδους. Οι πολιτικές μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δέσμευση πόρων με βάση τα αιτήματα των χρηστών και τη διαθεσιμότητα των πόρων αυτών. Η δέσμευση πόρων (reservation) και η αυτόνομη περιοχή (domain) λειτουργούν ως διαχειριστικά αντικείμενα για τις πολιτικές.

Σε κάθε αυτόνομη περιοχή υλοποιείται ολόκληρη η αρχιτεκτονική του κελιού (cell) PBF η οποία έχει διμερείς πολιτικές SLA (federatedWith) με μία ή περισσότερες περιοχές μέσω Internet, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 : Ομοσπονδιοποίηση μεταξύ Περιχών

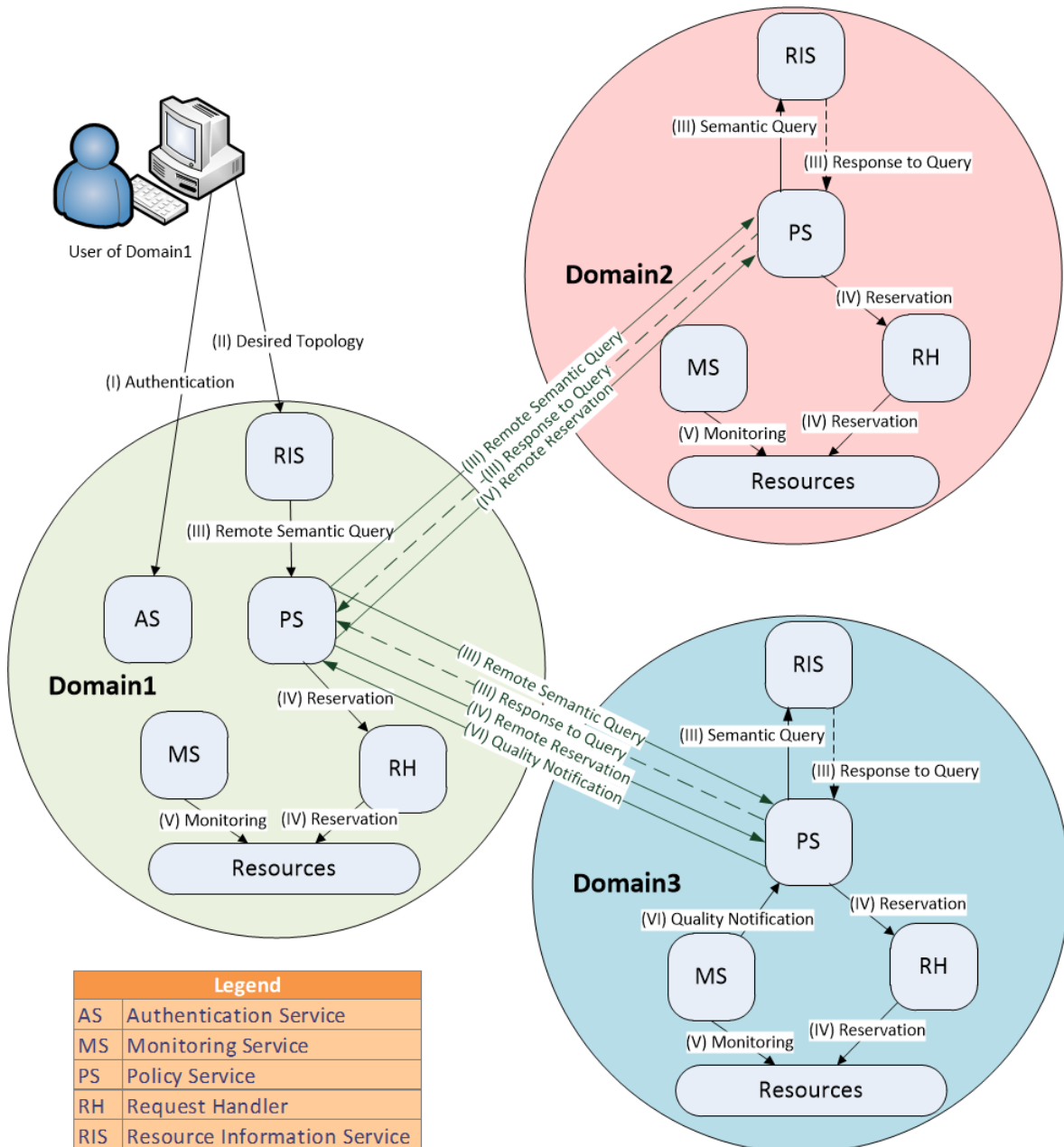
Η Υπηρεσία Πολιτικών κάθε αυτόνομης περιοχής είναι υπεύθυνη να αντιλαμβάνεται την κατάσταση του μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος και να εκτελεί πολιτικές που να το διατηρούν σε μια ικανοποιητική κατάσταση με βάση προκαθορισμένες προδιαγραφές. Στο ομόσπονδο περιβάλλον οι Πολιτικές Αντιπροσώπευσης εκτελούν ενέργειες σε απομακρυσμένες περιοχές με βάση τους όρους της ομοσπονδίας. Για τη δέσμευση των πόρων λαμβάνονται υπόψη ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια. Για παράδειγμα, μπορεί να ζητηθούν τρεις Εικονικοί Κόμβοι (Virtual Nodes) που να πληρούν τα εξής κριτήρια: (1) Συχνότητα Επεξεργαστή > 2GHz, (2) Μνήμη RAM > 4GByte και (3) Round Trip Delay Time (RTT) μεταξύ των υπό δέσμευση Κόμβων < 10 ms. Σε περίπτωση που κάποιος από τους τρεις δεσμευμένους Κόμβους βρεθεί εκτός κριτηρίων, η Υπηρεσία Παρακολούθησης (Monitoring Service - MS) που έχει ενεργοποιημένες κατάλληλες υπηρεσίες μετρήσεων, θα καταγράψει ένα συμβάν (π.χ. event: resourceFailure(NodeX)) και θα ακολουθήσει κατάλληλος χειρισμός από την Υπηρεσία Πολιτικών. Σε αυτήν την περίπτωση ο Εικονικός

Κόμβος που δεν ικανοποιεί κάποιο από τα προκαθορισμένα κριτήρια θα αποδεσμευτεί και θα ενεργοποιηθεί αυτόματος μηχανισμός αντικατάστασής του.

Στο Σχήμα 6.2 φαίνονται τα βήματα που απαιτούνται για τη δέσμευση πόρων στο ομόσπονδο περιβάλλον αποτελούμενο από τρεις Αυτόνομες Περιοχές (Domain1, Domain2, Domain3) της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Αυτά είναι :

- **Βήμα I:** Ο χρήστης του Domain1 μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (GUI) της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής αυθεντικοποιείται (Single Sign-On Authentication) με τη χρήση των διαπιστευτηρίων που έχουν οριστεί με τον πάροχο (Διαχειριστή του Domain1).
- **Βήμα II:** Ο χρήστης χρησιμοποιεί το Πληροφοριακό Μοντέλο για να περιγράψει τις απαιτήσεις του από την επιθυμητή τοπολογία.
- **Βήμα III:** Η Υπηρεσία Πληροφοριών για Πόρους (Resource Information Service - RIS) της Αυτόνομης Περιοχής στην οποία ανήκει ο χρήστης (Domain1) εκτελεί σημασιολογικά ερωτήματα τα οποία απευθύνονται στην τοπική του περιοχή αλλά και σε απομακρυσμένες περιοχές (Domain2, Domain3), ανάλογα με τις Πολιτικές Αντιπροσώπευσης. Τα αποτελέσματα που συγκεντρώνονται λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική κατάσταση και τη διαθεσιμότητα του κάθε πόρου, όπως επίσης και τις Πολιτικές Εξουσιοδότησης που τον αφορούν.
- **Βήμα IV:** Η Υπηρεσία Πολιτικών (Policy Service - PS) σε κάθε εμπλεκόμενη περιοχή ενεργοποιεί τις πολιτικές για τις δεσμεύσεις των πόρων της. Στη συνέχεια εκτελούνται ενέργειες της Υπηρεσίας Χειρισμού Αιτήσεων (Request Handler - RH) για τη δέσμευση των πόρων.
- **Βήμα V:** Η Υπηρεσία Παρακολούθησης (Monitoring Service - MS) κάθε εμπλεκόμενης περιοχής ενεργοποιεί τα κατάλληλα εργαλεία μετρήσεων στους δεσμευμένους πόρους. Παρακολουθεί ταυτόχρονα τη λειτουργία της δέσμευσης της εικονικής τοπολογίας αλλά και του κάθε εικονικού πόρου.
- **Βήμα VI:** Σε περίπτωση μη ικανοποιητικής λειτουργίας ενός πόρου (π.χ. στο Domain3), όπως αυτή προδιαγράφηκε στο αίτημα του χρήστη, η Υπηρεσία Παρακολούθησης ενεργοποιεί κατάλληλες ειδοποιήσεις προς την Υπηρεσία

Πολιτικών της περιοχής της. Η Υπηρεσία Πολιτικών της περιοχής του χρήστη (Domain1) λαμβάνει ειδοποιήσεις (notifications) από την Υπηρεσία Πολιτικών της περιοχής που παρουσίασε πρόβλημα (Domain3). Με βάση τις ισχύουσες πολιτικές η Υπηρεσία Πολιτικών του χρήστη εκτελεί διαχειριστικές ενέργειες προς επαναφορά της επιθυμητής ποιότητας των υπηρεσιών.



Σχήμα 6.2 : Βήματα Δέσμευσης Πόρων

6.2 Πολιτικές Ομοσπονδιοποίησης Υπολογιστικού Νέφους

Υπάρχουν κάποιες θεμελιώδεις απαιτήσεις [Lee16] που πρέπει να συνυπολογιστούν για τη δημιουργία του ομόσπονδου περιβάλλοντος. Αρχικά είναι απαραίτητος ο εντοπισμός απομακρυσμένων περιοχών με τις οποίες να μπορεί να επιτευχθεί ομοσπονδία. Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική αυτό γίνεται μέσω της Υπηρεσίας Αντιπροσώπευσης (Delegation Service - DS). Οι διαχειριστές των περιοχών ενεργοποιούν τις κατάλληλες Πολιτικές Αντιπροσώπευσης (Delegation Policies) για την έναρξη της διασύνδεσης. Όπως προτείνεται στα [Yaqub14], [Hamze14] η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί με χρήση μηχανισμών αυτόματης διαπραγμάτευσης μεταξύ λογισμικού αντιπροσώπων (agent processes) καθορισμού των όρων της ομοσπονδίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αλληλεπίδραση ετερογενών αυτόνομων υποδομών είναι η σημασιολογική οριοθέτηση κοινής γλώσσας επικοινωνίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του προτεινόμενου Πληροφοριακού Μοντέλου.

Η ομοσπονδιοποίηση απαιτεί την ύπαρξη ενοποιημένου μηχανισμού ταυτοποίησης και εμπιστοσύνης κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την Υπηρεσία Ταυτοποίησης και Αuthεντικοποίησης (Single Sign-On). Η πρόσβαση στους ομόσπονδους πόρους επιτυγχάνεται με χρήση ζεύγους δημόσιου και ιδιωτικού κλειδιού τα οποία καθορίζονται από την Υπηρεσία Χειρισμού Αιτήσεων (Request Handler - RH).

Οι απαιτούμενες Πολιτικές Αντιπροσώπευσης υλοποιούν τη σημασιολογική αναζήτηση πόρων και την τιμολόγηση των παρεχόμενων πόρων και υπηρεσιών μεταξύ περιοχών.

6.2.1 Σημασιολογική Αναζήτηση Πόρων

Στο πλαίσιο της ομοσπονδίας μεταξύ υποδομών, υπάρχει η ανάγκη για ενοποιημένη αναζήτηση. Αυτή εκτελείται από την Υπηρεσία Πληροφοριών για Πόρους (Resource Information Service - RIS) που σχηματίζει σημασιολογικά ερωτήματα και τα εκτελεί τοπικά αλλά και σε απομακρυσμένες περιοχές με βάση τις προδιαγεγραμμένες πολιτικές. Παράδειγμα μιας τέτοιας πολιτικής εμφανίζεται στην Καταγραφή_Κώδικα 6.1.

Πίνακας 7 : Καταγραφή_Κώδικα 6.1

```
Delegation policy execute_Semantic_Query
Interface "local"
Interface "remote"

event remote.executeSemanticQuery(query)
condition local.allowSemanticQueries=TRUE
action suitableResources=local.executeSemanticQuery(query)
    remote.publish(suitableResources)
Auth+ allow
```

Στην Καταγραφή_Κώδικα 6.1 η Πολιτική Αντιπροσώπευσης εφαρμόζεται σε τοπικό και απομακρυσμένο περιβάλλον μέσω κατάλληλων διεπαφών (local and remote interfaces). Περιέχει μια Πολιτική Υποχρέωσης (Obligation Policy) η οποία λαμβάνει από το απομακρυσμένο περιβάλλον το συμβάν για εκτέλεση σημασιολογικού ερωτήματος και επιστρέφει το αποτέλεσμα. Το ίδιο ερώτημα μπορεί να εκτελεστεί σε όλες τις περιοχές της ομοσπονδίας αφού είναι εκφρασμένο με όρους του Πληροφοριακού Μοντέλου (Information Model), ανεξάρτητα από Μοντέλα Δεδομένων (Data Models) των επιμέρους περιοχών. Η χρήση των κατάλληλων συνθηκών μπορεί να καθορίσει το βαθμό διαφάνειας των πόρων δίνοντας δικαίωμα για επιλεκτική απόκρυψη πληροφοριών. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιηθεί μια συνθήκη απαγόρευσης παροχής πληροφοριών για τον τύπο μνήμης RAM (condition: *allowSemanticQueries (RAM_type) = FALSE*), το απομακρυσμένο σημασιολογικό ερώτημα δε θα μπορεί να λάβει πληροφορίες σχετικά με τον τύπο της RAM ώστε να δεσμεύσει τις επιμέρους υποδομές για απαιτήσεις υπερβολικά συγκεκριμενοποιημένων προδιαγραφών (over-specified resources).

6.2.2 Τιμολόγηση Πόρων

Δεδομένης της ετερογένειας των πόρων που προσφέρουν οι υποδομές υπάρχει η ανάγκη καθορισμού της τιμής για κάθε είδος παρεχόμενου πόρου και υπηρεσίας. Η τιμή δεν πρέπει απαραίτητα να έχει χρηματική αξία αλλά είναι απαραίτητο να συμφωνηθούν τιμές για όλους τους τύπους πόρων ανά ζεύγος αυτόνομων περιοχών. Ο καθορισμός τους

μπορεί να γίνει με χρήση Πολιτικών Αντιπροσώπευσης, υπό τύπο συμφωνίας SLA μεταξύ τους. Μια απλή λογική για τον καθορισμό των τιμών είναι να οριστεί η τιμή δέσμευσης για ένα μέσο αντιπροσωπευτικό Εικονικό Κόμβο ανά μονάδα χρόνου. Κατά τη διαπραγμάτευση μεταξύ περιοχών πριν την εγκαθίδρυση της ομοσπονδίας μπορεί να συμφωνηθούν οι τιμές λαμβάνοντας υπόψη πόσο μεγαλύτερη ή μικρότερη αξία έχει κάποιος πόρος σε σχέση με το μέσο Εικονικό Κόμβο. Η Καταγραφή_Κώδικα 6.2 παρουσιάζει την πολιτική Αντιπροσώπευσης που χρησιμοποιείται για την καταγραφή των τιμών των πόρων που ανταλλάσσονται.

Πίνακας 8 : Καταγραφή_Κώδικα 6.2

```
Delegation policy update_Provisions
Interface "local"
Interface "remote"

event
remote.reserveResource('DomainX', userID, resourceID, resourceType)
condition local.checkQuota=TRUE
action local.addToValueOfOfferedResources(resourceType, XXXX)
        remote.addToValueOfReservedResources(resourceType, XXXX)
        local.reserveResource(userID, resourceID)
Auth+ allow
```

Στην καταγραφή αυτή φαίνεται ότι για κάθε νέο πόρο της τοπικής περιοχής που πρόκειται να παραχωρηθεί σε χρήστη απομακρυσμένης περιοχής εκτελούνται οι εξής ενέργειες: Τοπικά, στην περιοχή του υπό δέσμευση πόρου, ανανεώνεται η τιμή του συνόλου των παρεχόμενων πόρων προς χρήστες κάθε απομακρυσμένης περιοχής, με βάση την αξία που έχει οριστεί (price update of basket containing local resources reserved for remote users). Απομακρυσμένα, στην περιοχή του αιτούντα χρήστη, ανανεώνεται η συνολική τιμή δεσμευμένων πόρων από κάθε απομακρυσμένη περιοχή (price update of basket containing reserved resources per remote domain). Αντίστοιχη πολιτική εφαρμόζεται κατά τις αποδεσμεύσεις πόρων.

6.3 Δέσμευση Πόρων σε Ομόσπονδο Περιβάλλον

Οι πολιτικές μπορούν να αξιοποιηθούν για την επιλογή της καταλληλότερης περιοχής ή περιοχών που μπορεί να προσφέρουν τους ζητούμενους πόρους σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μια περιοχές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ικανοποίηση του αιτήματος ενός χρήστη.

6.3.1 Κριτήρια Επιλογής

Η επιλογή μπορεί να γίνει με βάση την τιμή θεωρώντας ότι υπάρχει χρηματική συναλλαγή μεταξύ περιοχών ή με βάση προκαθορισμένα όρια ανταλλαγής πόρων μεταξύ περιοχών.

1. Επιλογή με βάση την τιμή

Μεταξύ περιοχών γίνεται συμφωνία για ομοσπονδιοποίηση όπου τιμολογείται η παροχή πόρων και υπηρεσιών στους απομακρυσμένους χρήστες. Κατά τη δέσμευση των πόρων, μπορεί να προτιμηθούν δεσμεύσεις σε περιοχές με τη μικρότερη τιμή. Αυτή η προσέγγιση προστίθεται στις δυνατότητες για Συμφωνίες Παροχής Ποιότητας Υπηρεσιών (SLAs). Κάποιες περιοχές (ειδικότερα οι μεγαλύτερες σε μέγεθος) θα μπορούσαν να αξιοποιούν αυτού του τύπου την ομοσπονδιοποίηση για να αυξάνουν τα εισοδήματά τους αφού με αυτό τον τρόπο αυξάνουν έμμεσα την πελατειακή τους βάση.

2. Επιλογή με βάση τα διαθέσιμα όρια παροχής από κάθε περιοχή

Σε ένα ομόσπονδο περιβάλλον οι διμερείς συμφωνίες μπορεί να προβλέπουν δέσμευση πόρων μεταξύ περιοχών με βάση τη συνολική αξία (τιμή) των υπό ανταλλαγή πόρων η οποία θα διασφαλίζει συνθήκες αμοιβαιότητας εντός προκαθορισμένων ορίων. Συγκεκριμένα, υποθέτουμε πως ένας χρήστης μιας Αυτόνομης Περιοχής (Domain1) αιτείται τη δέσμευση πόρων μιας δεύτερης Αυτόνομης Περιοχής (Domain2). Βάσει της διμερούς συμφωνίας μεταξύ Domain1 και Domain2, προκαθορίζεται το όριο συνολικής τιμής πόρων Q_2 για διάθεση προς το Domain1 ως εξής:

$$Q_2 = K + \text{ValueOfOfferedResources} - \text{ValueOfReservedResources},$$

όπου *ValueOfOfferedResources* είναι η συνολική τιμή των πόρων που έχει διαθέσει το Domain1 σε χρήστες του Domain2, και *ValueOfReservedResources* είναι η συνολική τιμή των πόρων που έχουν χρεωθεί οι χρήστες του Domain2 για πόρους του Domain1. Το *K* είναι μια σταθερά που καθορίζει την αρχική τιμή του διαθέσιμου ορίου.

Σε περίπτωση πολλαπλών επιλογών για δέσμευση απομακρυσμένων πόρων προτεραιότητα μπορεί να δοθεί σε πόρους που προέρχονται από τις περιοχές με τα μεγαλύτερα όρια παροχής.

Εναλλακτικά, μπορεί να υλοποιηθεί αναλογική κατανομή των απαιτούμενων πόρων ως προς τα διαθέσιμα όρια για κάθε περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση ο υπολογισμός για την κατανομή μπορεί να γίνει με βάση τη συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) που παρουσιάζεται στη συνέχεια:

Έστω ότι ζητούνται πόροι υπολογιστικής επεξεργασίας, αποθήκευσης και δρομολόγησης:

- X_{tot} συνολικές ανάγκες σε επεξεργασία
- Y_{tot} συνολικές ανάγκες σε αποθήκευση
- Z_{tot} συνολικές ανάγκες σε δρομολόγηση

Τα διαθέσιμα όρια παροχής υπηρεσιών των περιοχών είναι:

- Q_1, Q_2, \dots, Q_n το συνολικό διαθέσιμο όριο παροχής από τις περιοχές 1, 2, ..., n

Η διαθεσιμότητα των διαφορετικών πόρων ανά περιοχή είναι:

- XA_1, XA_2, \dots, XA_n η διαθεσιμότητα για επεξεργασία από τις περιοχές 1, 2, ..., n
- YA_1, YA_2, \dots, YA_n η διαθεσιμότητα για αποθήκευση από τις περιοχές 1, 2, ..., n
- ZA_1, ZA_2, \dots, ZA_n η διαθεσιμότητα για δρομολόγηση από τις περιοχές 1, 2, ..., n

Τα ζητούμενα είναι :

- XU_1, XU_2, \dots, XU_n επεξεργασία που θα χρησιμοποιηθεί από τις περιοχές 1, 2, ..., n
- YU_1, YU_2, \dots, YU_n αποθήκευση που θα χρησιμοποιηθεί από τις περιοχές 1, 2, ..., n

- ZU_1, ZU_2, \dots, ZU_n δρομολόγηση που θα χρησιμοποιηθεί από τις περιοχές 1, 2, ..., n

Στην αναλογική δέσμευση το άθροισμα της αξίας των δεσμεύσεων ανά Αυτόνομη Περιοχή σε σχέση με το σύνολο των υπό δέσμευση πόρων είναι ίσο με το λόγο των επιτρεπτών ορίων όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση :

$$\frac{XU_n + YU_n + ZU_n}{X_{tot} + Y_{tot} + Z_{tot}} = \frac{Q_n}{Q_{tot}}$$

$$TotU_n = \frac{Q_n}{Q_{tot}} \cdot (X_{tot} + Y_{tot} + Z_{tot})$$

Το $TotU_n$ είναι η κατάλληλη δέσμευση ανά περιοχή n που οδηγεί στην αναλογική λύση. Επειδή αυτό δε μπορεί να επιτευχθεί πάντοτε (λόγω της ετερογένειας και της διαθεσιμότητας) επιχειρείται η εξεύρεση της πλησιέστερης εφικτής λύσης. Αυτή μπορεί να βρεθεί με χρήση της συνολικής ευκλείδειας απόστασης από αυτή που ορίστηκε ως η αναλογική λύση $TotU_n$ για κάθε περιοχή. Η ακόλουθη συνάρτηση χρησιμότητας είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την απόσταση :

$$\min_{XU_i, YU_i, ZU_i} \sum_{i=1}^n ((XU_i + YU_i + ZU_i) - TotU_n)^2$$

με τους περιορισμούς

$$\sum_{i=1}^n (XU_i) = X_{tot}$$

$$\sum_{i=1}^n (YU_i) = Y_{tot}$$

$$\sum_{i=1}^n (ZU_i) = Z_{tot}$$

$$\begin{aligned}
XU_i &\leq XA_i, \\
YU_i &\leq YA_i, \\
ZU_i &\leq ZA_i, \\
XU_i + YU_i + ZU_i &\leq Q_i.
\end{aligned}$$

Ο σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα που αντιπροσωπεύει την απόσταση από τη λύση που ορίστηκε ως βέλτιστη αναλογική, με βάση τους περιορισμούς που υπάρχουν. Οι περιορισμοί αφορούν τη διαθεσιμότητα για τον κάθε τύπο από πόρους αλλά την μη υπέρβαση των επιτρεπόμενων ορίων παροχής. Αν για παράδειγμα τα όρια της διαθεσιμότητας για αποθηκευτικό χώρο σε TeraBytes (TB) σε τρεις περιοχές (Domain2, Domain3 και Domain4) έχουν αναλογία 2:3:4 και υπάρχει αίτημα χρήστη του Domain1 για 9 TB που δε καλύπτεται από τη δική του περιοχή, θα επιχειρηθεί δέσμευση 2 TB στο Domain2, 3 TB στο Domain3 και 4 TB στο Domain4. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται στη Matlab με χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού (quadratic programming⁵⁶) [Venkataraman09].

6.3.2 Επέκταση της Ομοσπονδιοποίησης

Η προτεινόμενη λύση δεν είναι απαραίτητο να περιοριστεί σε απευθείας σχέσεις ανά δύο Αυτόνομες Περιοχές (domains): Αν ένα domain δεν μπορεί να ικανοποιήσει τοπικά κάποιο αίτημα ζητά πόρους από domains με τα οποία έχει διμερείς συμφωνίες. Σε περίπτωση που κάποιο από τα domains αυτά δεν έχει τη δυνατότητα να ικανοποιήσει το αίτημα μπορεί να αναζητήσει μέσω των δικών του διμερών συμφωνιών πόρους που μπορούν να εξυπηρετήσουν το αρχικό αίτημα. Με βάση τις προκαθορισμένες τιμές για τις παροχές μεταξύ domains, μπορεί να κρίνει αν το συμφέρει να δράσει ως ενδιάμεσος μεσολαβητής.

Ένα θέμα που προκύπτει από τον ορισμό του προβλήματος είναι η περίπτωση να σχηματιστούν κύκλοι με αποστολές αιτημάτων μεταξύ domains. Για παράδειγμα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχουν οι διασυνδέσεις που εμφανίζονται στο Σχήμα 6.1 και να εξετάσουμε την περίπτωση αιτήματος ενός χρήστη του domain2 που δεν

⁵⁶ <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/quadprog.html>

μπορεί να εξυπηρετηθεί εξ ολοκλήρου τοπικά. Το domain2 θα προωθήσει το μέρος του αιτήματος που δεν μπορεί να ικανοποιήσει προς το domain3 και προς το domain5. Έστω ότι το domain3 έχει την ικανότητα να εξυπηρετήσει το αίτημα και απαντά δηλώνοντας τη διαθεσιμότητά του και τους πόρους που μπορεί να προσφέρει. Το domain5 που δεν έχει την ευχέρεια πλήρους ικανοποίησης με δικούς του πόρους μπορεί να μεταβιβάσει το αίτημα στο domain1, στο domain3 και στο domain4 με τα οποία είναι διασυνδεδεμένο. Αυτό θα συμβεί μόνο στις περιπτώσεις που το συμφέρει να μεσολαβήσει, δηλαδή μόνο αν η τιμή στην οποία θα διαθέσει τους πόρους είναι ψηλότερη από την τιμή στην οποία μπορεί να τους λάβει (βάσει των πολιτικών Αντιπροσώπευσης). Τελικά, θα απαντήσει στο domain2 που είχε το αρχικό αίτημα, με τους πόρους που μπορεί να διαθέσει άμεσα ή μέσω ενδιάμεσου. Η τελική επιλογή θα γίνει από το domain2 βάσει των προσφερόμενων τιμών.

6.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Το Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει αποτελέσματα προσομοιώσεων (σε Matlab) που αφορούν σε αιτήματα χρηστών για δεσμεύσεις πόρων του ομόσπονδου περιβάλλοντος. Δημιουργήθηκαν σενάρια ομοσπονδιοποίησης βάσει των διασυνδέσεων SLA Αυτόνομων Περιοχών (domains) καθώς και των Πολιτικών Αντιπροσώπευσης (Delegation Policies) που εφαρμόζονται μεταξύ τους. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις αιτημάτων που προέρχονταν από χρήστες όλων των domains και καταγράφηκαν τα συνολικά επιτυχημένα και αποτυχημένα αιτήματα για χρήστες προερχόμενους από κάθε domain. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρήθηκε ότι υπάρχουν πέντε πάροχοι υπηρεσιών νέφους (cloud providers) που λειτουργούν σαν Αυτόνομες Περιοχές (domains). Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει τις συνολικές τους δυνατότητες για παροχή Υπηρεσιών εκφρασμένων σε αριθμό Εικονικών Πόρων Επεξεργασίας (Processing), Αποθήκευσης (Storage) και Δρομολόγησης (Routing).

Πίνακας 9: Δυνατότητες Παροχής Υπηρεσιών ανά Περιοχή

	Processing	Routing	Storage
Domain1	100	0	100
Domain2	0	100	100
Domain3	40	40	40
Domain4	50	10	50
Domain5	10	10	10

Η προσομοίωση εκτελείται για 10,000 διαδοχικά χρονικά βήματα (time steps). Σε κάθε βήμα δημιουργείται μια νέα αίτηση για παροχή ενός τυχαίου αριθμού από πόρους των τριών τύπων (μέση τιμή 1% και τυπική απόκλιση 0.2% του συνόλου των πόρων σε κάθε αίτημα). Η συνολική διάρκεια της κάθε δέσμευσης είναι τυχαία τιμή με μέσο όρο 100 χρονικά βήματα και τυπική απόκλιση 10. Επιτυχημένα θεωρούνται τα αιτήματα που

ικανοποιούνται πλήρως. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για: (1) την περίπτωση που οι διαχειριστικές περιοχές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους χωρίς διμερή SLA και δυνατότητα δέσμευσης απομακρυσμένων πόρων, (2) για την περίπτωση πλήρους ομοσπονδιοποίησης με SLA μεταξύ όλων των δυνατών ζευγών και (3) για διαφορετικά σενάρια μερικής ομοσπονδιοποίησης.

6.4.1 Ανεξάρτητες Αυτόνομες Περιοχές

Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι κάθε Αυτόνομη Περιοχή (domain) είναι ανεξάρτητη και μπορεί να παρέχει πόρους και υπηρεσίες στους χρήστες της στηριζόμενη μόνο στις δικές της δυνατότητες. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζονται στο Σχήμα 6.3.



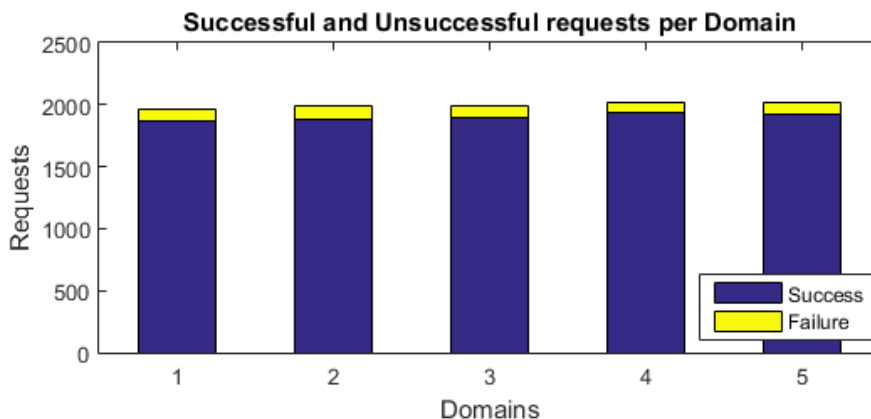
Σχήμα 6.3 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain – Ανεξάρτητα Domains

Παρατηρείται ότι τα περισσότερα αιτήματα απέτυχαν. Στο Domain1 και Domain2 αυτό συνέβη επειδή δεν είχαν τη δυνατότητα να προσφέρουν υπηρεσίες όλων των τύπων. Τα Domains3-5 έχουν ικανοποιήσει κάποιο ποσοστό των αιτημάτων αλλά οι περιορισμένες δυνατότητες παροχής συγκεκριμένων τύπων υπηρεσιών προκαλούν σημαντικά ποσοστά αποτυχιών. Τα καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζει το Domain3 το οποίο διαθέτει τα πιο ισορροπημένα ποσοστά σε πόρους.

6.4.2 Πλήρης Ομοσπονδιοποίηση

Υπάρχει πλήρης και χωρίς περιορισμούς ομοσπονδιοποίηση μεταξύ όλων των domains. Με όρους πολιτικών Αντιπροσώπευσης κάθε domain έχει ενεργοποιημένες πολιτικές που επιτρέπουν την παροχή πόρων όταν τους ζητηθούν. Αποτέλεσμα αυτών των πολιτικών είναι τα domains να συνενώνουν τις δυνατότητές τους και το κάθε ένα από αυτά να

μπορεί να προσφέρει το πλήρες εύρος του συνόλου των διαθέσιμων πόρων της ομοσπονδίας. Αυτός ο τύπος ομοσπονδιοποίησης ουσιαστικά οδηγεί στο να λειτουργούν όλα τα domains σαν ένα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζονται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Πλήρης Ομοσπονδιοποίηση

Τα περισσότερα αιτήματα είναι επιτυχημένα και υπάρχει μόνο ένα μικρό ποσοστό με αποτυχίες. Αυτές είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στα διάφορα domains. Οι αποτυχίες συμβαίνουν κατά τις χρονικές στιγμές που κανένα domain δεν έχει επαρκείς πόρους για να εξυπηρετήσει τα αιτήματα των χρηστών.

Το σενάριο αυτό παρουσιάζει δυσκολίες καθώς απαιτεί πλήρη ισοτιμία και ομοιόμορφη αντιμετώπιση χρηστών ανάμεσα σε Αυτόνομες Περιοχές που συνήθως παρουσιάζουν ετερογένεια στόχων και πολιτικών. Η ομοιομορφία αυτή δεν είναι προφανής σε εμπορικά περιβάλλοντα όπου μπορεί να κυριαρχεί ανταγωνισμός για τιμές και ποιότητα παροχής υπηρεσιών.

6.4.3 Μερική Ομοσπονδιοποίηση με Βάση Πολιτικές

Κάθε domain είναι διασυνδεδεμένο (έχει διμερή αμοιβαία SLA) με ένα υποσύνολο των υπόλοιπων domains. Η καταγραφή της αξίας των πόρων που παρέχονται στα απομακρυσμένα domains διέπονται από κατάλληλες Πολιτικές Αντιπροσώπευσης διατηρούν (βλέπε Πίνακας 8). Αυτός ο τύπος διμερών σχέσεων, επιτρέπει στα domains

να επεκτείνουν τους διαθέσιμους τύπους υπηρεσιών που προσφέρουν στους χρήστες τους και να ενισχύουν τη διαθεσιμότητά τους, με έναν ελεγχόμενο τρόπο.

Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει τις διασυνδέσεις μεταξύ των domains σε δύο σενάρια ομοσπονδιοποίησης. Το σενάριο 1 είναι αυτό που εμφανίζεται και στο Σχήμα 6.1 ενώ το σενάριο 2 περιλαμβάνει επιπλέον διμερή σχέση (federatedWith) μεταξύ του domain1 και του domain2.

Πίνακας 10 : Σενάρια Ομοσπονδιοποίησης

Σενάριο 1	Σενάριο 2
Domain1 federatedWith Domain3 και Domain5	Domain1 federatedWith <u>Domain2</u> , Domain3 και Domain5
Domain2 federatedWith Domain3 και Domain5	Domain2 federatedWith <u>Domain1</u> , Domain3 και Domain5
Domain3 federatedWith Domain1, Domain2 και Domain5	Domain3 federatedWith Domain1, Domain2 και Domain5
Domain4 federatedWith Domain5	Domain4 federatedWith Domain5
Domain5 federatedWith Domain1, Domain2, Domain3 και Domain4	Domain5 federatedWith Domain1, Domain2, Domain3 και Domain4

Δεδομένου ότι το κάθε domain μπορεί να διασυνδέεται με περισσότερα από ένα domains, υπάρχει η ανάγκη χρήσης πολιτικών για τον καθορισμό προτεραιοτήτων επιλογής. Έγιναν προσομοιώσεις για την περίπτωση επιλογής με βάση την τιμή και για την περίπτωση επιλογής με βάση τα διαθέσιμα όρια.

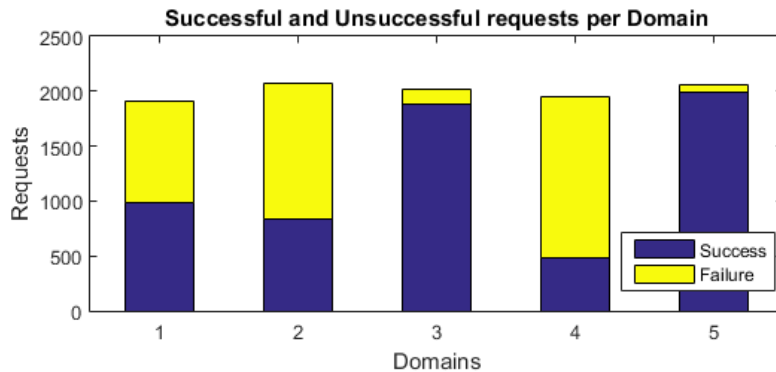
1. Επιλογή με βάση την τιμή

Τα domains στο πλαίσιο της συμφωνίας ομοσπονδιοποίησης (SLA) καθορίζουν τις τιμές για την παροχή κάθε πόρου. Κατά το χρόνο της δέσμευσης πόρων σε απομακρυσμένα domains, προτιμούνται οι πόροι με τη χαμηλότερη τιμή. Στις προσομοιώσεις που

ακολουθούν οι τιμές ανά Εικονικό Πόρο είναι σε όλα τα domains είναι οι ακόλουθες : (1) computing = 10, (2) storage = 20 και (3) networking = 30.

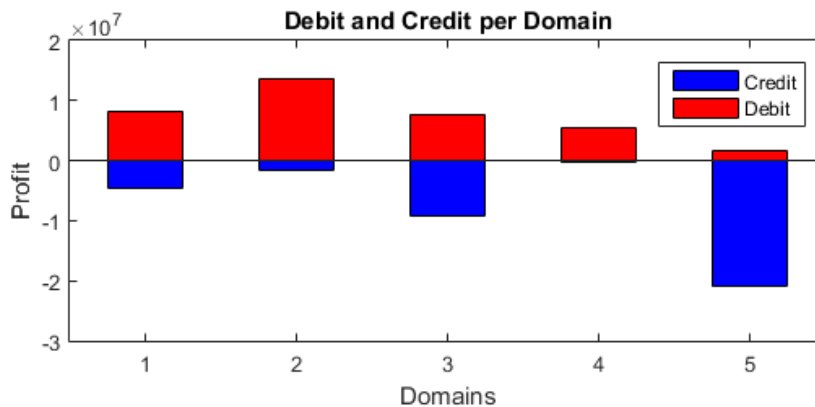
Σενάριο 1

Τα επιτυχημένα αιτήματα ανά domain εμφανίζονται στο Σχήμα 6.5



Σχήμα 6.5 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 1

Η συνολική οφειλή του κάθε domain προς τα υπόλοιπα παρουσιάζεται με μπλε χρώμα στο Σχήμα 6.6. Στο ίδιο σχήμα με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η συνολική οφειλή των domains προς το κάθε domain χωριστά.



Σχήμα 6.6: Συνολικές οφειλές ανά Domain - Σενάριο 1

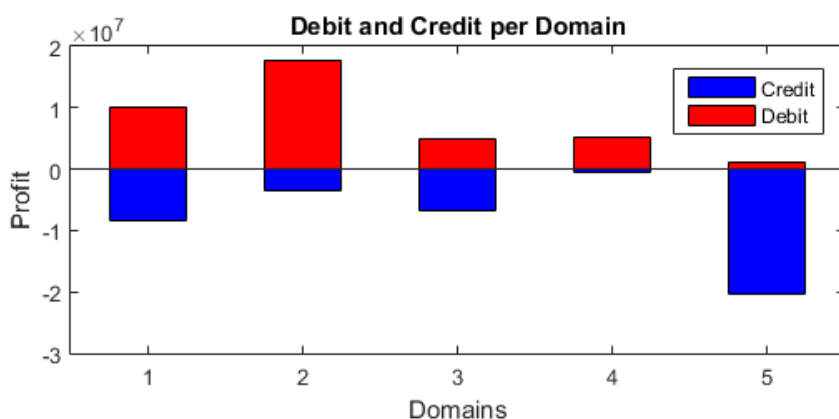
Παρατηρείται ότι το domain3 και το domain5 κατάφεραν να ικανοποιήσουν τα μεγαλύτερα ποσοστά των αιτημάτων τους. Το domain5 αναγκάστηκε να πληρώσει ένα σημαντικό ποσό προς τα υπόλοιπα. Το domain1 και το domain2 εμφανίζουν χαμηλά ποσοστά ικανοποίησης των αιτημάτων των χρηστών τους.

Σενάριο 2

Τα ποσοστά τους θα μπορούσαν να βελτιωθούν με τη διασύνδεσή τους, όπως περιγράφεται στο σενάριο 2 (Πίνακας 10). Τα δύο αυτά domains έχουν διαφορετικά μείγματα ειδών πόρων (Πίνακας 9) και επομένως η σύναψη διμερούς σχέσης SLA μπορεί να τους αποδώσει σημαντικά οφέλη. Τα αποτελέσματα εκτέλεσης για το σενάριο 2 εμφανίζονται στο Σχήμα 6.7 και στο Σχήμα 6.8.



Σχήμα 6.7 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 2



Σχήμα 6.8 : Συνολικές οφειλές ανά Domain - Σενάριο 2

Το domain4 θα μπορούσε επίσης να βελτιώσει τα ποσοστά επιτυχίας του αν διασυνδεόταν με άλλα domains πέρα από το domain5. Η επιλογή με βάση την τιμή είναι μια λύση που μπορεί να δουλέψει στις περισσότερες περιπτώσεις και ειδικά όταν διασυνδέεται ένα μικρό domain με κάποιο μεγαλύτερο.

2. Επιλογή με βάση τη διαθεσιμότητα

Κάποια domains ενδέχεται να επιδιώκουν διμερείς σχέσεις SLA στη βάση της συνεργασίας όπου θα γίνεται μόνο ανταλλαγή από πόρους χωρίς οικονομικά ανταλλάγματα. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται παροχή πόρων σε άλλα domains μέσα σε κάποια συμφωνημένα όρια συνολικής τιμής πόρων διαθέσιμων για ανταλλαγή. Σε περιπτώσεις όπου κάποιο αίτημα μπορεί να εξυπηρετηθεί από πολλά domains, αξιοποιείται η συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) που παρουσιάστηκε στο 6.3.1 για την επιλογή που θα εξυπηρετήσει τα αιτήματα διατηρώντας σε ικανοποιητικό επίπεδο τη μελλοντική διαθεσιμότητα.

Σενάριο 1

Τα αποτελέσματα εκτέλεσης για το σενάριο 1 εμφανίζονται στο Σχήμα 6.9.

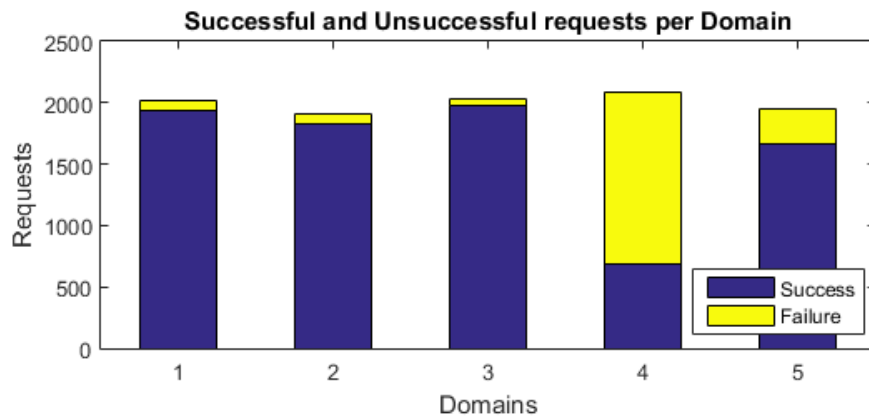


Σχήμα 6.9 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 1

Παρατηρείται ότι το domain3 και το domain5 ικανοποιούν σχεδόν πλήρως τα αιτήματα των χρηστών τους, ενώ το domain1, το domain2 και το domain4 παρουσιάζουν σημαντικά ποσοστά αποτυχιών.

Σενάριο 2

Στο Σχήμα 6.10 εμφανίζεται η εκτέλεση για το σενάριο 2 μετά την ομοσπονδιοποίηση μεταξύ του domain1 και domain2.



Σχήμα 6.10 : Επιτυχημένα Αιτήματα ανά Domain - Σενάριο 2

Μετά τη διασύνδεση μεταξύ του domain1 και του domain2, μόνο το domain4 συνεχίζει να εμφανίζει σημαντικά ποσοστά αποτυχιών. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι δεν έχει συνάψει διμερείς σχέσεις SLA με άλλα domains πέρα από το domain5.

6.5 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η εφαρμογή της προτεινόμενης Policy-based Federation (PBF) αρχιτεκτονικής για την ομοσπονδιοποίηση υποδομών υπολογιστικού νέφους μέσω διμερών πολιτικών SLA. Προτάθηκαν πολιτικές Αντιπροσώπευσης για την επίτευξη της ομοσπονδίας. Έμφαση δόθηκε σε πολιτικές για τον καθορισμό τιμολόγησης της παροχής πόρων μεταξύ περιοχών. Η τιμολόγηση δεν αντιμετωπίστηκε μόνο με την έννοια της αντιστοίχισης της παροχής πόρων σε χρηματικά ανταλλάγματα, αλλά καθορίστηκαν πολιτικές για διμερείς ανταλλαγές ετερογενών πόρων εντός προκαθορισμένων ορίων παροχής χωρίς χρηματικά ανταλλάγματα.

Λόγω του ότι η κάθε περιοχή είναι διασυνδεδεμένη με πολλαπλές άλλες, υπάρχει ανάγκη καθορισμού προτεραιοτήτων ως προς το ποια περιοχή θα εξυπηρετεί τα αιτήματα σε κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση ομοσπονδιοποίησης με βάση την τιμή μπορούν να επιλέγονται οι πόροι από την περιοχή με τη χαμηλότερη τιμή. Σε περίπτωση ομοσπονδιοποίησης με καθορισμένα όρια παροχής δεν υπάρχει προφανής λύση. Στο πλαίσιο της Διατριβής υλοποιήθηκε μια συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) η οποία εξασφαλίζει τη βέλτιστη αναλογική κατανομή των δεσμεύσεων σε περιοχές με βάση τα διαθέσιμα όρια που υπάρχουν. Έτσι δεν εξαντλούνται οι πόροι από τις Αυτόνομες Περιοχές (domains) που έχουν χαμηλά όρια και παραμένουν διαθέσιμοι για τις περιπτώσεις όπου αποτελούν μοναδική επιλογή βάσει των αιτημάτων των χρηστών.

Προσομοιώσεις σε σενάρια διασυνδεδεμένων υποδομών κατέγραψαν τα ποσοστά ικανοποίησης αιτημάτων όταν κάθε domain δρα ανεξάρτητα, όταν υπάρχει πλήρης ομοσπονδιοποίηση και για σενάρια μερικής ομοσπονδιοποίησης.

Οι πολιτικές που παρουσιάστηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο παρέχουν σημαντικές δυνατότητες στους παρόχους υποδομών νέφους για καθορισμό Συμφωνιών Επιπέδου Παροχής Υπηρεσιών (SLA) μεταξύ τους. Οι συγκεκριμένες πολιτικές μπορούν να επεκταθούν εφαρμόζοντας κριτήρια που ενδεχομένως να συνδυάζουν την τιμολόγηση με τα διαθέσιμα όρια.

7 Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έγινε μια εκτενής μελέτη σχετικά με τους τρόπους εφαρμογής πολιτικών για την επίτευξη ομοσπονδιοποίησης και τη διαχείριση δικτύων Internet του μέλλοντος. Αρχικά προτάθηκε ένα Πληροφορικό Μοντέλο που περιλαμβάνει μια Οντολογία Πολιτικών για την υποστήριξη του ομόσπονδου περιβάλλοντος. Το μεγαλύτερο μέρος της Διατριβής ασχολήθηκε με την περιγραφή της Αρχιτεκτονικής που βασίζεται σε Πολιτικές για την ομοσπονδιοποίηση ετερογενών Εικονικοποιημένων Υποδομών. Ένα μέρος της Διατριβής ασχολήθηκε με την εφαρμογή πολιτικών διαχείρισης σε Δίκτυα που Ορίζονται από Λογισμικό (SDN) και η έρευνα ολοκληρώθηκε με τη μελέτη και εφαρμογή ομοσπονδίας σε υποδομές υπολογιστικού νέφους (cloud computing).

Η ομοσπονδιοποίηση απαιτεί την ύπαρξη ενός Πληροφοριακού Μοντέλου που να καλύπτει τις έννοιες την εικονικοποίησης δικτυακών πόρων αλλά και της έκφρασης πολιτικών για την ομοσπονδιοποίηση. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μια Οντολογία Πολιτικών στο πλαίσιο ενός Πληροφοριακού Μοντέλου που επιτρέπει την ομοσπονδιοποίηση Εικονικοποιημένων Υποδομών. Ολόκληρο το Πληροφοριακό Μοντέλο, συμπεριλαμβανομένης της Οντολογίας Πολιτικών είναι σε ανοικτό κώδικα διαθέσιμο για περαιτέρω αξιοποίηση⁵⁷. Πέραν του ότι αξιοποιήθηκε από το Ευρωπαϊκό έργο NOVI στο πλαίσιο του οποίου αναπτύχθηκε, έχει αξιοποιηθεί και από άλλες ομάδες, όπως για παράδειγμα από την ομάδα εργασίας για την Network Markup Language (NML) στο Open Grid Forum επιδρώντας στην προτυποποίηση του NML schema [Van der Ham13]. Επίσης εκφράστηκε ενδιαφέρον από άλλα έργα όπως το GEYSERS⁵⁸ και το MANTYCHORE⁵⁹ που μελέτησαν τη δυνατότητα αξιοποίησης του μοντέλου και επηρεάστηκαν από αυτό. Τέλος, χρησιμοποιείται σαν βάση για την περιγραφή πολιτικών, στην υπό εξέλιξη δράση του W3C Federated Infrastructures Community Group⁶⁰ για τη δημιουργία μιας συνολικής οντολογίας που να περιγράφει ομοσπονδιοποίηση

⁵⁷ <http://wiki.fp7-novi.eu/pub/WP2/Documents/novi-im.owl>

⁵⁸ www.geyser-project.eu

⁵⁹ <http://www.mantychore.eu>

⁶⁰ <https://www.w3.org/community/omn/>

υποδομών [Willner17]. Ενδεικτικά, το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την Οντολογία Πολιτικών διαφαίνεται από συζητήσεις που γίνονται σε εξειδικευμένα ιστολόγια⁶¹ που την επικαλούνται.

Στη συνέχεια της διατριβής έγινε αναλυτική παρουσίαση της Policy-based Federation (PBF) αρχιτεκτονικής που επιτρέπει την ομοσπονδιοποίηση Εικονικοποιημένων Υποδομών με χρήση πολιτικών. Οι Πολιτικές μεταξύ αυτόνομων περιοχών έχουν τη μορφή Συμφωνιών Επιπέδου Παροχής Υπηρεσιών (SLA). Ελέγχουν και καταγράφουν τις δεσμεύσεις πόρων σε απομακρυσμένες περιοχές, καθορίζουν τις υποχρεώσεις της κάθε περιοχής ως προς τον αριθμό των πόρων που ανταλλάσσονται μεταξύ τους και καθορίζουν τις υποχρεώσεις ως προς την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ περιοχών μέσω ελέγχου της εκτέλεσης σημασιολογικών ερωτημάτων. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εφαρμόστηκε πιλοτικά στην Ευρωπαϊκή ερευνητική υποδομή του NOVI όπου φάνηκε η χρησιμότητα και επίδραση των Πολιτικών Αντιπροσώπευσης (Delegation Policies) που ορίστηκαν και κάνουν δυνατή την ομοσπονδιοποίηση με απλό και διάφανο τρόπο. Η γενικότητα της υλοποίησης την καθιστά κατάλληλη για αξιοποίηση σε πολλές άλλες περιοχές.

Το πλαίσιο διαχείρισης εικονικοποιημένων υποδομών εξειδικεύτηκε για τη διαχείριση δικτύων οριζόμενων από λογισμικό (Software Defined Networks - SDN) και την προσφορά δικτυακών εικονικοποιημένων υπηρεσιών (Network Function Virtualization - NFV). Η χρήση πολιτικών σε αυτήν την περίπτωση διευκολύνει τη διαχείριση σε πολλαπλά επίπεδα (OpenFlow, VNF, NFV). Θα μπορούσε μια μελλοντική εργασία να μελετήσει πιθανές επεκτάσεις που να επιτρέπουν την ομοσπονδιοποίηση δικτύων SDN καθώς και τη δυνατότητα προσφοράς υπηρεσιών τύπου NFV με χρήση πόρων από διασυνδεδεμένες ανεξάρτητες υποδομές.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αποτελεί μια γενική λύση για επίτευξη ομοσπονδιών και μπορεί να εξειδικευτεί για να καλύψει συγκεκριμένες απαιτήσεις όταν υπάρχουν. Στο πλαίσιο της Διατριβής μελετήθηκε η εφαρμογή της σε υποδομές υπολογιστικού νέφους.

⁶¹ <https://lists.open-multinet.info/pipermail/ontologies-open-multinet/2015-March/000167.html>

Προτάθηκαν συγκεκριμένες πολιτικές για τη διασύνδεση αυτών των υποδομών. Έμφαση δόθηκε σε πολιτικές τιμολόγησης και στον ορισμό προτεραιοτήτων σε περιπτώσεις που υπάρχουν περισσότερες επιλογές για την περιοχή στην οποία θα γίνει μια δέσμευση. Η προτεινόμενη λύση δεν περιορίζεται μόνο σε άμεση ομοσπονδιοποίηση μεταξύ δύο περιοχών αλλά περιλαμβάνει και την περίπτωση όπου μια περιοχή δρα ως μεσολαβητής για την ικανοποίηση κάποιου αιτήματος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης πολιτικών για την ομοσπονδιοποίηση είναι ο ξεκάθαρος τρόπος με τον οποίο γίνονται και εφαρμόζονται οι Συμφωνίες. Οδηγούν προς τη γενίκευση σε ενοποιημένες υπολογιστικές υποδομές νέφους του επιτυχημένου παραδείγματος (success story) του Border Gateway Protocol (BGP) [Rekhter05]. Υπενθυμίζουμε πως το BGP δρομολογεί την κίνηση πακέτων δεδομένων μεταξύ των πάνω από 60,000 Δημόσιων Αυτόνομων Περιοχών (Public Autonomous Systems - AS) στο επίπεδο ελέγχου (Control Plane) κάνοντας χρήση πολιτικών [Caesar05].

Σαν επόμενο βήμα της διατριβής θα μπορούσε να εξεταστεί η υλοποίηση πιο σύνθετων πολιτικών, εισάγοντας πιθανότατα κάποια πιο σύνθετα μοντέλα τιμολόγησης μεταξύ περιοχών. Επίσης θα μπορούσε να εξεταστεί ένα πιο σύνθετο φιλτράρισμα των επιτρεπτών σημασιολογικών ερωτημάτων μεταξύ περιοχών σαν επέκταση του παραδείγματος για εκτέλεση σημασιολογικών ερωτημάτων του Κεφαλαίου 4.4 και του Κεφαλαίου 6.2.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εταιρεία Cisco πρόσθεσε πρόσφατα στις εμπορικές της συσκευές τη λειτουργικότητα για διαχείριση με βάση πολιτικές⁶². Η προσέγγιση της Διατριβής σε ότι αφορά την έκφραση και εφαρμογή των πολιτικών είναι αντίστοιχη και στο πλαίσιο μιας μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να μελετηθεί και να εφαρμοστεί ομοσπονδιοποίηση για τις συσκευές αυτές μέσω μιας πιθανής επέκτασης των πολιτικών που εφαρμόζουν. Κάτι τέτοιο θα έδινε σημαντικά πλεονεκτήματα σε μεγάλες υποδομές νέφους (Cloud Computing) και κέντρα δεδομένων (Data Centers) που θα μπορούσαν με κατάλληλες συνεργασίες (ομοσπονδιοποίηση) με άλλες υποδομές να αξιοποιούν καλύτερα τον εξοπλισμό τους.

⁶² <https://cobra.readthedocs.org/en/latest/understanding.html>

Η ομοσπονδιοποίηση είναι ένα θέμα που έχει σημαντική εμπορική σημασία. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αντιμετωπίστηκε κυρίως τεχνικά αλλά το προτεινόμενο Πληροφοριακό Μοντέλο και η προτεινόμενη λύση θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για εμπορική διασύνδεση μεταξύ παρόχων υπηρεσιών γενικότερα [Adler16]. Η εκφραστικότητα (expressiveness) των πολιτικών που παρουσιάστηκαν καθώς και πιθανές νέες πολιτικές θα μπορούσαν να περιγράψουν τέτοιου είδους εμπορικές συμφωνίες (SLAs) με πολλαπλά οφέλη.

8 Κατάλογος Δημοσιεύσεων Συγγραφέα

8.1 Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με Κρίση

- [J1] **Y. Kryftis**, M. Grammatikou, D. Kalogeras and V. Maglaris, "Policy-based Management for Federation of Virtualized Infrastructures," *Journal of Network and Systems Management*, vol.25, pp. 229–252, 2017.
- [J2] **Y. Kryftis**, G. Mastorakis, C. X. Mavromoustakis, J. M. Batalla, J. P. C. Rodrigues, C. Dobre, "Resource Usage Prediction Models for Optimal Multimedia Content Provision," *IEEE Systems Journal*, vol.PP, no.99, pp. 1-12, 2016.
- [J3] **Y. Kryftis**, G. Mastorakis, C. X. Mavromoustakis, J. M. Batalla, E. Pallis, G. Kormontzas, "Efficient Entertainment Services Provision over a Novel Network Architecture," *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 14-21, 2016.
- [J4] J. van der Ham, J. Stéger, S. Laki, **Y. Kryftis**, V. Maglaris and C. de Laat, "The NOVI Information Models," *Future Generation Computer Systems*, vol. 42, pp. 64–73, 2015.

8.2 Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια με Κρίση

- [C1] **Y. Kryftis**, C. X. Mavromoustakis, G. Mastorakis, J. M. Batalla, P. Chatzimisios : "Epidemic Models using Resource Prediction Mechanism for Optimal Provision of Multimedia Services," in Proc. of *IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Guildford, UK, September 2015.
- [C2] **Y. Kryftis**, C. X. Mavromoustakis, G. Mastorakis, E. Pallis, J. M. Batalla, J. Rodrigues, C. Dobre and G. Kormontzas : "Resource Usage Prediction Algorithms for Optimal Selection of Multimedia Content Delivery Methods," in Proc. of *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK, June 2015.
- [C3] K. Giotis, **Y. Kryftis** and V. Maglaris, "Policy-based Orchestration of NFV Services in Software-Defined Networks," in Proc. of *IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, London, UK , April 2015.
- [C4] **Y. Kryftis**, C. X. Mavromoustakis, J. M. Batalla, G. Mastorakis, E. Pallis and G. Skourletopoulos, "Resource usage prediction for optimal and balanced provision of multimedia services," in Proc. of *IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Athens, Greece, December 2014.

[C5] J. Van der Ham, C. Papagianni, J. Steger, P. Matray, **Y. Kryftis**, P. Grosso and L. Lymberopoulos, "Challenges of an Information Model for Federating Virtualized Infrastructures," in *DMTF Academic Alliance Workshop on Systems and Virtualization Management (SVM)*, pp. 1–6, 2011.

[C6] N. Ng, N. Yoshida, O. Pernet, R. Hu and **Y. Kryftis** : "Safe Parallel Programming with Session Java," in *Coordination Models and Languages (COORDINATION)* Springer 2011.

8.3 Κεφάλαιο Βιβλίου

[B1] **Y. Kryftis**, C. X. Mavromoustakis, G. Mastorakis, J. M. Batalla, A. Bourdena, E. Pallis: "A resource prediction engine for efficient multimedia services provision" for the book "Resource Management of Mobile Cloud Computing Networks and *Environments*". published by *IGI Global*, May 2015.

9 Βιβλιογραφία

- [Addis15] B. Addis, D. Belabed, M. Bouet and S. Secci (2015). Virtual Network Functions Placement and Routing Optimization. In *Cloud Networking (CloudNet), IEEE 4th International Conference*, pp. 171–177.
- [Adler16] N. Adler and E. Hanany (2016). Regulating inter-Firm Agreements: The Case of Airline Codesharing in Parallel Networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 84:31–54.
- [Agrawal08] D. Agrawal, S. Calo, K.-w. Lee, J. Lobo and D. Verma (2008). *Policy Technologies for Self-managing Systems*. Pearson Education.
- [Alaettinoglu99] C. Alaettinoglu, C. Villamizar, E. Gerich, D. Kessens, D. Meyer, T. Bates, D. Karrenberg and M. Terpstra (1999). Routing Policy Specification Language (RPSL). IETF RFC 2622.
- [Anderson05] T. Anderson, L. Peterson, S. Shenker and J. Turner (2005). Overcoming the Internet Impasse Through Virtualization. *Computer*, (4):34–41.
- [Antoniou04] G. Antoniou and F. Van Harmelen (2004). Web Ontology Language: OWL. *Handbook on Ontologies*, pp. 67–92.
- [Argyropoulos15] C. Argyropoulos, S. Mastorakis, K. Giotis, G. Androulidakis, D. Kalogeras and V. Maglaris (2015). Control-plane Slicing Methods in Multi-tenant Software Defined Networks. *FIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management*, pp. 612–618.
- [Armbrust10] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. D. Joseph, R. Katz, A. Konwinski, G. Lee, D. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica, et al. (2010). A View of Cloud Computing. *Communications of the ACM*, 53(4):50–58.
- [Ata14] S. Ata, D. Huang, X. Liu, A. Wada, T. Xing, P. Juluri, C.-J. Chung, Y. Sato and D. Medhi (2014). SeRViTR: A framework, Implementation and a Testbed for a Trustworthy Future Internet. *Computer Networks*, 63:128–146.
- [Atkinson08] C. Atkinson and K. Kiko (2008). A Detailed Comparison of UML and OWL <https://sonet.ecoinformatics.org/semtools-svn/reference/UMLToOWLAtkinson.pdf>.
- [Auge14] J. Auge, T. Parmentelat, N. Turro, S. Avakian, L. Baron, M. A. Larabi, M. Y. Rahman, T. Friedman and S. Fdida (2014). Tools to Foster a Global Federation of Testbeds. *Computer Networks*, 63:205–220.
- [Baldauf07] M. Baldauf, S. Dustdar and F. Rosenberg (2007). A Survey on Context-aware Systems. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 2(4):263–277.

- [Bari15] M. Bari, S. R. Chowdhury, R. Ahmed, R. Boutaba, et al. (2015). On Orchestrating Virtual Network Functions. *International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, pp. 50–56.
- [Basta14] A. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, H. J. Morper and K. Hoffmann (2014). Applying NFV and SDN to LTE Mobile Core Gateways, the Functions Placement Problem. *Proceedings of the 4th workshop on All things cellular: operations, applications, & challenges*, pp. 33–38.
- [Batista14] B. L. A. Batista and M. P. Fernandez (2014). PonderFlow: A New Policy Specification Language to SDN OpenFlow-based Networks. *International Journal on Advances in Networks and Services*, 7(3 & 4).
- [Bavier06] A. Bavier, N. Feamster, M. Huang, L. Peterson and J. Rexford (2006). In VINI Veritas: Realistic and Controlled Network Experimentation. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 36(4):3–14.
- [Bell03] D. Bell (2003). UML basics: An introduction to the Unified Modeling Language. *The Rational Edge*.
- [Belter14] B. Belter, J. R. Martinez, J. I. Aznar, J. F. Riera, L. M. Contreras, M. Antoniak-Lewandowska, M. Biancani, J. Buysse, C. Develder, Y. Demchenko, et al. (2014). The GEYSERS Optical Testbed: A Platform for the Integration, Validation and Demonstration of Cloud-based Infrastructure Services. *Computer Networks*, 61:197–216.
- [Berman14] M. Berman, J. S. Chase, L. Landweber, A. Nakao, M. Ott, D. Raychaudhuri, R. Ricci and I. Seskar (2014). GENI: A Federated Testbed for Innovative Network Experiments. *Computer Networks*, 61:5–23.
- [Bhatia11] S. Bhatia, A. Bavier, L. Peterson and S. Sevinc (2011). sfatables: A Firewall-like Policy Engine for Federated Systems. *International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 467–476.
- [Boutaba07] R. Boutaba and I. Aib (2007). Policy-based Management: A Historical Perspective. *Journal of Network and Systems Management*, 15(4):447–480.
- [Boyle00] J. Boyle, R. Cohen, S. Herzog, R. Rajan, A. Sastry and D. Durham (2000). The COPS (Common Open Policy Service) Protocol.
- [Bray98] T. Bray, J. Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, E. Maler and F. Yergeau (1998). Extensible Markup Language (XML). *World Wide Web Consortium Recommendation REC-xml-19980210*. <http://www.w3.org/TR/1998/REC-xml-19980210>, 16.
- [Brennan14] R. Brennan, B. Walshe and D. O’Sullivan (2014). Managed Semantic Interoperability for Federations. *Journal of Network and Systems Management*, 22(3):302–330.

- [Buecker09] A. Buecker, C. Foster, S. Muppidi and B. Safabakhsh (2009). IBM Tivoli Security Policy Manager <http://www.redbooks.ibm.com/redpapers/pdfs/redp4483.pdf>.
- [Buyya10] R. Buyya, R. Ranjan and R. N. Calheiros (2010). *InterCloud: Utility-Oriented Federation of Cloud Computing Environments for Scaling of Application Services*, pp. 13–31. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Buyya09] R. Buyya, C. S. Yeo, S. Venugopal, J. Broberg and I. Brandic (2009). Cloud Computing and Emerging IT Platforms: Vision, Hype and Reality for Delivering Computing as the 5th Utility. *Future Generation computer systems*, 25(6):599–616.
- [Caesar05] M. Caesar and J. Rexford (2005). BGP Routing Policies in ISP Networks. *IEEE network*, 19(6):5–11.
- [Campanella14] M. Campanella and F. Farina (2014). The FEDERICA Infrastructure and Experience. *Computer Networks*, 61:176–183.
- [Carlini11] E. Carlini, M. Coppola, P. Dazzi, L. Ricci and G. Righetti (2011). Cloud federations in contrail. In *Euro-Par Workshops*, pp. 159–168.
- [Chappell04] D. Chappell (2004). *Enterprise Service Bus*. O’Reilly Media, Inc.
- [Chase16] J. Chase and I. Baldin (2016). A Retrospective on ORCA: Open Resource Control Architecture. In *The GENI Book*, pp. 127–147. Springer.
- [Chase07] J. Chase, L. Grit, D. Irwin, V. Marupadi, P. Shivam and A. Yumerefendi (2007). Beyond Virtual Data Centers: Toward an Open Resource Control Architecture. In *Selected Papers from the International Conference on the Virtual Computing Initiative (ACM Digital Library)*.
- [Chowdhury12] M. Chowdhury, M. R. Rahman and R. Boutaba (2012). Vineyard: Virtual Network Embedding Algorithms With Coordinated Node and Link Mapping. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 20(1):206–219.
- [Chowdhury10] N. M. K. Chowdhury and R. Boutaba (2010). A Survey of Network Virtualization. *Computer Networks*, 54(5):862–876.
- [Chun03] B. Chun, D. Culler, T. Roscoe, A. Bavier, L. Peterson, M. Wawrzoniak and M. Bowman (2003). PlanetLab: An Overlay Testbed for Broad-coverage Services. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 33(3):3–12.
- [Cisco14] Cisco (2014). The Cisco Application Policy Infrastructure Controller, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-fabric/white-paper-c11-730021.pdf>. Technical report, Cisco.
- [Corbató62] F. J. Corbató, M. Merwin-Daggett and R. C. Daley (1962). An Experimental Time-sharing System. *Spring Joint Computer Conference*, pp. 335–344.

- [Costa12] C. H. Costa, M. C. Amaral, G. C. Januário, T. C. Carvalho and C. Meirosu (2012). SustNMS: Towards Service Oriented Policy-based Network Management for Energy-efficiency. In *Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT)*, pp. 1–5.
- [Coyne14] L. Coyne, G. Becker, R. Langnor, M. Lindstrom, P. Nymann, F. Peres, N. Pott, J. Sauvanet, G. Yildirim, et al. (2014). *IBM Tivoli Storage Manager as a Data Protection Solution*, <http://www.redbooks.ibm.com/redbooks/pdfs/sg248134.pdf>. IBM Redbooks.
- [Creasy81] R. J. Creasy (1981). The Origin of the VM/370 time-sharing System. *IBM Journal of Research and Development*, 25(5):483–490.
- [Damianou01] N. Damianou, N. Dulay, E. Lupu and M. Sloman (2001). The Ponder Policy Specification Language. *Policies for Distributed Systems and Networks*, pp. 18–38.
- [Davy08] S. Davy, B. Jennings and J. Strassner (2008). The Policy Continuum–Policy Authoring and Conflict Analysis. *Computer Communications*, 31(13):2981–2995.
- [De Clercq02] J. De Clercq (2002). *Single Sign-On Architectures*, pp. 40–58. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Deitel11] P. Deitel and H. Deitel (2011). *Java: How to Program*. Prentice Hall Press.
- [Ding09] J. Ding (2009). *Advances in Network Management*. CRC press.
- [DMTF15] DMTF (2015). Managed Object Format (MOF) http://www.dmtf.org/sites/default/files/standards/documents/dsp0221_3.0.0.pdf.
- [DMTF16a] DMTF (2016a). CIM Policy Model http://www.dmtf.org/sites/default/files/cim/cim_schema_v2480/visio-cim_policy.pdf.
- [DMTF16b] DMTF (2016b). CIM Schema http://www.dmtf.org/standards/cim/cim_schema_v2480.
- [Doerr03] M. Doerr (2003). The CIDOC Conceptual Reference Module: An Ontological Approach to Semantic Interoperability of Metadata. *AI magazine*, 24(3):75.
- [El Hajjamy16] O. El Hajjamy, K. Alaoui, L. Alaoui and M. Bahaj (2016). Mapping UML to OWL2 Ontology. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 90(1):126.
- [Esposito13] C. Esposito, M. Ficco, F. Palmieri and A. Castiglione (2013). Interconnecting Federated Clouds by Using Publish-Subscribe Service. *Cluster computing*, 16(4):887–903.
- [ETSI13a] ETSI (2013a). Network Functions Virtualisation (NFV): Management and Orchestration http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/nfv-man/001_099/001/01.01.01_60/gs_nfv-man001v010101p.pdf. *ETSI Group Specification*.
- [ETSI13b] ETSI (2013b). Network Functions Virtualisation (NFV): Use Cases http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/nfv/001_099/001/01.01.01_60/gs_nfv001v010101p.pdf. *ETSI Group Specification*.

- [Farhady15] H. Farhady, H. Lee and A. Nakao (2015). Software-Defined Networking: A survey. *Computer Networks*, 81:79–95.
- [Ferrer12] A. J. Ferrer, F. Hernández, J. Tordsson, E. Elmroth, A. Ali-Eldin, C. Zsigri, R. Sirvent, J. Guitart, R. M. Badia, K. Djemame, et al. (2012). OPTIMIS: A Holistic Approach to Cloud Service Provisioning. *Future Generation Computer Systems*, 28(1):66–77.
- [Foster10] N. Foster, M. J. Freedman, R. Harrison, J. Rexford, M. L. Meola and D. Walker (2010). Frenetic: A High-level Language for OpenFlow Networks. *Proceedings of the Workshop on Programmable Routers for Extensible Services of Tomorrow*, page 6.
- [Garcia-Espin12] J. A. Garcia-Espin, J. Ferrer Riera, S. Figuerola, M. Ghijsen, Y. Demchemko, J. Buysse, M. De Leenheer, C. Develder, F. Anhalt and S. Soudan (2012). Logical Infrastructure Composition Layer, the GEYSERS Holistic Approach for Infrastructure Virtualisation. In *TERENA Networking Conference (TNC)*, pp. 1–16.
- [Gavras07] A. Gavras, A. Karila, S. Fdida, M. May and M. Potts (2007). Future Internet Research and Experimentation: the FIRE Initiative. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 37(3):89–92.
- [Ghijsen13] M. Ghijsen, J. Van Der Ham, P. Grosso, C. Dumitru, H. Zhu, Z. Zhao and C. De Laat (2013). A semantic-web Approach for Modeling Computing Infrastructures. *Computers & Electrical Engineering*, 39(8):2553–2565.
- [Giotis14] K. Giotis, C. Argyropoulos, G. Androulidakis, D. Kalogeras and V. Maglaris (2014). Combining OpenFlow and sFlow for an Effective and Scalable Anomaly Detection and Mitigation Mechanism on SDN Environments. *Computer Networks*, 62:122–136.
- [Giotis15] K. Giotis, Y. Kryftis and V. Maglaris (2015). Policy-based Orchestration of NFV Services in Software-Defined Networks. *IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, pp. 1–5.
- [Grozev14] N. Grozev and R. Buyya (2014). Inter-cloud architectures and application brokering: taxonomy and survey. *Software: Practice and Experience*, 44(3):369–390.
- [Gude08] N. Gude, T. Koponen, J. Pettit, B. Pfaff, M. Casado, N. McKeown and S. Shenker (2008). NOX: Towards an Operating System for Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(3):105–110.
- [Hakiri14] A. Hakiri, A. Gokhale, P. Berthou, D. C. Schmidt and T. Gayraud (2014). Software-defined networking: Challenges and research opportunities for future internet. *Computer Networks*, 75:453–471.
- [Haleplidis15] E. Haleplidis, K. Pentikousis, S. Denazis, J. H. Salim, D. Meyer and O. Koufopavlou (2015). Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology. Technical report.

- [Hamze14] M. Hamze, N. Mbarek and O. Togni (2014). Autonomic Brokerage Service for an end-to-end Cloud Networking Service Level Agreement. In *IEEE 3rd Symposium on Network Cloud Computing and Applications (NCCA)*, pp. 54–61.
- [Han15] B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji and S. Lee (2015). Network Function Virtualization: Challenges and Opportunities for Innovations. *IEEE Communications Magazine*, 53(2):90–97.
- [Han12] W. Han and C. Lei (2012). A Survey on Policy Languages in Network and Security Management. *Computer Networks*, 56(1):477–489.
- [Hawilo14] H. Hawilo, A. Shami, M. Mirahmadi and R. Asal (2014). NFV: State of the Art, Challenges and Implementation in Next Generation Mobile Networks (vEPC). *Network, IEEE*, 28(6):18–26.
- [Hume12] A. C. Hume, Y. Al-Hazmi, B. Belter, K. Campowsky, L. M. Carril, G. Carrozzo, V. Engen, D. Garcá-Pérez, J. J. Ponsat, R. Kúbert, et al. (2012). BonFIRE: A Multi-Cloud Test Facility for Internet of Services Experimentation. In *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures*, pp. 81–96. Springer.
- [Januário13] G. C. Januário, C. H. Costa, M. C. Amarai, A. C. Riekstin, T. C. Carvalho and C. Meirosu (2013). Evaluation of a Policy-Based Network Management System for Energy-Efficiency. In *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pp. 596–602.
- [Joshi16] K. Joshi and T. Benson (2016). Network Function Virtualization. *IEEE Internet Computing*, 20(6):7–9.
- [Kagal03] L. Kagal, T. Finin and A. Joshi (2003). A Policy Based Approach to Security for the Semantic Web. *International Semantic Web Conference*, 2870:402–418.
- [Kanada15] Y. Kanada and T. Tarui (2015). Federation-less Federation of ProtoGENI and VNode Platforms. In *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 271–276.
- [Kanada13] Y. Kanada, T. Tarui and K. Shiraishi (2013). Federation-less Federation of Network-virtualization Platforms. In *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pp. 34–41.
- [Kang13] J.-M. Kang, H. Bannazadeh and A. Leon-Garcia (2013). SAVI Testbed: Control and Management of Converged Virtual ICT Resources. In *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pp. 664–667.
- [Kim13] H. Kim and N. Feamster (2013). Improving Network Management with Software Defined Networking. *IEEE Communications Magazine*, 51(2):114–119.

- [Kreutz15] D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky and S. Uhlig (2015). Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1):14–76.
- [Kryftis17] Y. Kryftis, M. Grammatikou, D. Kalogeras and V. Maglaris (2017). Policy-Based Management for Federation of Virtualized Infrastructures. *Journal of Network and Systems Management*, 25(2):229–252.
- [Lee16] C. A. Lee (2016). Cloud federation management and beyond: Requirements, relevant standards and gaps. *IEEE Cloud Computing*, 3(1):42–49.
- [Leon-Garcia16] A. Leon-Garcia and H. Bannazadeh (2016). SAVI Testbed for Applications on Software-Defined Infrastructure. In *The GENI Book*, pp. 545–562. Springer.
- [Lewis09] K. D. Lewis (2009). Web Single Sign-On Authentication using SAML. *International Journal of Computer Science Issues*.
- [Li13] D. Li, X. Hong and D. Witt (2013). ProtoGENI, a Prototype GENI under Security Vulnerabilities: An Experiment-based Security Study. *IEEE Systems Journal*, 7(3):478–488.
- [Lupu08] E. Lupu, N. Dulay, M. Sloman, J. Sventek, S. Heeps, S. Strowes, K. Twidle, S.-L. Keoh and A. Schaeffer-Filho (2008). AMUSE: Autonomic Management of Ubiquitous e-Health Systems. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 20(3):277–295.
- [Lymberopoulos11] L. Lymberopoulos, P. Grosso, C. Papagianni, D. Kalogeras, G. Androulidakis, J. Van Der Ham, C. De Laat and V. Maglaris (2011). Managing Federations of Virtualized Infrastructures: A Semantic-aware Policy Based Approach. *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pp. 1235–1242.
- [Magedanz09] T. Magedanz and S. Wahle (2009). Control Framework Design for Future Internet Testbeds. *Elektrotechnik & Informationstechnik*, 126(7-8):274–279.
- [Maglaris15] V. Maglaris, C. Papagianni, G. Androulidakis, M. Grammatikou, P. Grosso, J. Van Der Ham, C. De Laat, B. Pietrzak, B. Belter, J. Steger, S. Laki, M. Campanella and S. Sallent (2015). Toward a Holistic Federated Future Internet Experimentation Environment: The Experience of NOVI Research and Experimentation. *IEEE, Communications Magazine*, 53(7):136–144.
- [McGeer16] R. McGeer, M. Berman, C. Elliott and R. Ricci (2016). *The GENI book*. Springer.
- [McKeown08] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker and J. Turner (2008). OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2):69–74.
- [Mell11] P. Mell and T. Grance (2011). The NIST Definition of Cloud Computing. Technical Report 800-145, National Institute of Standards and Technology (NIST).

- [Mijumbi16a] R. Mijumbi, J. Serrat, J.-L. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck and R. Boutaba (2016a). Network Function Virtualization: State-of-the-art and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1):236–262.
- [Mijumbi16b] R. Mijumbi, J. Serrat, J.-l. Gorricho, S. Latre, M. Charalambides and D. Lopez (2016b). Management and Orchestration Challenges in Network Functions Virtualization. *IEEE Communications Magazine*, 54(1):98–105.
- [Moore01] B. Moore, E. Ellesson, J. Strassner and A. Westerinen (2001). Policy Core Information Model–Version 1 Specification. IETF RFC 3060.
- [Moscato11] F. Moscato, R. Aversa, B. Di Martino, T.-F. Fortis and V. Munteanu (2011). An analysis of mOSAIC Ontology for Cloud Resources Annotation. In *Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, pp. 973–980.
- [Nakao12] A. Nakao (2012). VNode: A Deeply Programmable Network Testbed Through Network Virtualization. *3rd IEICE Technical Committee on Network Virtualization*.
- [Pan11] J. Pan, S. Paul and R. Jain (2011). A Survey of the Research on Future Internet Architectures. *IEEE, Communications Magazine*, 49(7):26–36.
- [Papagianni13] C. Papagianni, A. Leivadeas, S. Papavassiliou, V. Maglaris, C. Cervello-Pastor and A. Monje (2013). On the Optimal Allocation of Virtual Resources in Cloud Computing Networks. *IEEE Transactions on Computers*, 62(6):1060–1071.
- [Parashar13] M. Parashar, M. AbdelBaky, I. Rodero and A. Devarakonda (2013). Cloud Paradigms and Practices for Computational and Data-Enabled Science and Engineering. *Computing in Science & Engineering*, 15(4):10–18.
- [Pashalidis03] A. Pashalidis and C. J. Mitchell (2003). A Taxonomy of Single Sign-on Systems. *Information security and privacy*, pp. 249–264.
- [Pătrașcu15] A. Pătrașcu (2015). Comparative Analysis between OWL Modelling and UML Modelling. *Petroleum-Gas University of Ploiesti Bulletin, Technical Series*, 67(2).
- [Pérez06] J. Pérez, M. Arenas and C. Gutierrez (2006). Semantics and Complexity of SPARQL. *International semantic web conference*, 4273:30–43.
- [Petcu13] D. Petcu, B. Di Martino, S. Venticinquè, M. Rak, T. Máhr, G. E. Lopez, F. Brito, R. Cossu, M. Stopar, S. Šperka, et al. (2013). Experiences in building a mOSAIC of clouds. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, 2(1):12.
- [Peterson06a] L. Peterson, A. Bavier, M. E. Fiuczynski and S. Muir (2006a). Experiences Building PlanetLab. In *Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation*, pp. 351–366.
- [Peterson10] L. Peterson, R. Ricci, A. Falk and J. Chase (2010). Slice-based Federation Architecture. *Ad Hoc Design Document*.

- [Peterson06b] L. Peterson and T. Roscoe (2006b). The Design Principles of PlanetLab. *ACM SIGOPS operating systems review*, 40(1):11–16.
- [Petri14] I. Petri, T. Beach, M. Zou, J. D. Montes, O. Rana and M. Parashar (2014). Exploring Models and Mechanisms for Exchanging Resources in a Federated Cloud. In *IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)*, pp. 215–224.
- [Pfaff12] B. Pfaff, B. Lantz, B. Heller, et al. (2012). OpenFlow Switch Specification, version 1.3.0. *Open Networking Foundation*.
- [Pfaff09] B. Pfaff, J. Pettit, K. Amidon, M. Casado, T. Koponen and S. Shenker (2009). Extending Networking into the Virtualization Layer. In *Hotnets*.
- [Pittaras15] C. Pittaras, C. Papagianni, A. Leivadeas, P. Grosso, J. van der Ham and S. Papavassiliou (2015). Resource Discovery and Allocation for Federated Virtualized Infrastructures. *Future Generation Computer Systems*, 42:55–63.
- [Rak11] M. Rak, S. Venticinque, G. Echevarria, G. Esnal, et al. (2011). Cloud Application Monitoring: The mOSAIC Approach. In *IEEE Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*, pp. 758–763.
- [Reilly11] J. Reilly (2011). Implementing the TM Forum Information Framework (SID). A Practitioner’s Guide. Version 1.0.
- [Rekhter05] Y. Rekhter, T. Li and S. Hares (2005). A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). IETF RFC 4271.
- [Ricci12] R. Ricci, J. Duerig, L. Stoller, G. Wong, S. Chikkulapelly and W. Seok (2012). Designing a Federated Testbed as a Distributed System. In *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures*, pp. 321–337. Springer.
- [Riekstin16a] A. C. Riekstin, G. C. Januario, B. B. Rodrigues, V. T. Nascimento, T. C. M. de Brito Carvalho and C. Meirosu (2016a). A Survey of Policy Refinement Methods as a Support for Sustainable Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1):222–235.
- [Riekstin16b] A. C. Riekstin, B. B. Rodrigues, V. T. Nascimento, C. B. Progetti, T. C. M. de Brito Carvalho and C. Meirosu (2016b). Sustainability Information Model for Energy Efficiency Policies. *IEEE Communications Magazine*, 54(11):176–184.
- [Riera14] J. F. Riera, E. Escalona, J. Batalle, E. Grasa and J. A. Garcia-Espin (2014). Virtual Network Function Scheduling: Concept and Challenges. In *International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT)*, pp. 1–5.
- [Riggio13] R. Riggio, F. De Pellegrini, E. Salvadori, M. Gerola and R. Doriguzzi Corin (2013). Progressive Virtual Topology Embedding in OpenFlow Networks. *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management*, pp. 1122–1128.

- [Roberts09] J. Roberts (2009). The Clean-Slate Approach to Future Internet Design: a Survey of Research Initiatives. *annals of telecommunications*, 64(5-6):271–276.
- [Rochwerger11] B. Rochwerger, D. Breitgand, A. Epstein, D. Hadas, I. Loy, K. Nagin, J. Tordsson, C. Ragusa, M. Villari, S. Clayman, et al. (2011). Reservoir - When One Cloud is not Enough. *Computer*, 44(3):44–51.
- [Rumbaugh04] J. Rumbaugh, I. Jacobson and G. Booch (2004). *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Pearson Higher Education.
- [Sanner99] M. Sanner (1999). Python: A Programming Language for Software Integration and Development. *Journal of molecular graphics & modelling*, 17(1):57.
- [Shanahan99] M. Shanahan (1999). The Event Calculus Explained. *Artificial intelligence today*, pp. 409–430.
- [Sloman10] M. Sloman and E. Lupu (2010). Engineering Policy-based Ubiquitous Systems. *The Computer Journal*, 53(7):1113–1127.
- [Stéger13] J. Stéger, S. Laki and P. Mátray (2013). A Monitoring Framework for Federated Virtualized Infrastructures. *Measurement Methodology and Tools*, pp. 175–194.
- [Strassner02] J. Strassner (2002). DEN-ng: Achieving Business-driven Network Management. *IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, pp. 753–766.
- [Strassner03] J. Strassner (2003). *Policy-based Network Management: Solutions for the Next Generation*. Morgan Kaufmann.
- [Strassner06] J. Strassner, N. Agoulmine and E. Lehtihet (2006). FOCAL: A Novel Autonomic Networking Architecture.
- [Strassner09a] J. Strassner, J. N. de Souza, D. Raymer, S. Samudrala, S. Davy and K. Barrett (2009a). The Design of a Novel Context-aware Policy Model to Support Machine-based Learning and Reasoning. *Cluster Computing*, 12(1):17–43.
- [Strassner09b] J. Strassner, J. N. de Souza, S. van der Meer, S. Davy, K. Barrett, D. Raymer and S. Samudrala (2009b). The Design of a New Policy Model to Support Ontology-Driven Reasoning for Autonomic Networking. *Journal of Network and Systems Management*, 17(1):5–32.
- [Strassner04] J. Strassner, J. Fleck, J. Huang, C. Faurer and T. Richardson (2004). TMF white paper on NGOSS and MDA. In *TeleManagement Forum/Object Management Group*, February.
- [Strassner09c] J. Strassner, S. Van Der Meer, B. Jennings and M. P. De Leon (2009c). An Autonomic Architecture to Manage Ubiquitous Computing Networks and Applications. *Conference on Ubiquitous and Future Networks*, pp. 116–121.

- [Thomas16] A. Thomas, A. J. Gerber and A. van der Merwe (2016). An Investigation into OWL for Concrete Syntax Specification Using UML Notations. In *International Conference on Theory and Application of Diagrams*, pp. 197–211. Springer.
- [TMFa] TMF. The Shared Information and Data Model – Common Business Entity Definitions: Policy”, GB922 Addendum 1-POL
<https://www.tmforum.org/resources/standard/gb922-information-framework-standards-addenda-r14-5-1-pdf/>.
- [TMFb] TMF. GB922 Addendum 4SO - Service Overview R14.5.1
<https://www.tmforum.org/resources/standard/gb922-information-framework-standards-addenda-r14-5-1-pdf/>.
- [TMFc] TMF. Shared Information/Data (SID) Model- Business View Concepts, Principles and Domains. GB922, Ed. NGOSS R6.1
https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=t-rec-m.3190-200807-i!!pdf-e&type=items.
- [Toosi14] A. N. Toosi, R. N. Calheiros and R. Buyya (2014). Interconnected Cloud Computing Environments: Challenges, Taxonomy and Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(1):7.
- [Tranoris12] C. Tranoris and S. Denazis (2012). FSToolkit: Adopting Software Engineering Practices for Enabling Definitions of Federated Resource Infrastructures. *The Future Internet*, pp. 201–212.
- [Turner05] J. S. Turner and D. E. Taylor (2005). Diversifying the Internet. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’)*, volume 2.
- [Twidle09] K. Twidle, N. Dulay, E. Lupu and M. Sloman (2009). Ponder2: A Policy System for Autonomous Pervasive Environments. *IEEE Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS)*, pp. 330–335.
- [Uslar12] M. Uslar, M. Specht, S. Rohjans, J. Trefke and J. M. González (2012). *The Common Information Model CIM: IEC 61968/61970 and 62325-A practical introduction to the CIM*. Springer Science & Business Media.
- [Uszok04] A. Uszok, J. M. Bradshaw, M. Johnson, R. Jeffers, A. Tate, J. Dalton and S. Aitken (2004). KAoS Policy Management for Semantic Web Services. *IEEE, Intelligent Systems*, 19(4):32–41.
- [Van der Ham13] J. Van der Ham, F. Dijkstra, R. Lapacz and J. Zurawski (2013). Network Markup Language (NML) Base Schema version 1
<https://www.ogf.org/documents/gfd.206.pdf>.
- [Van der Ham11] J. Van der Ham, C. Papagianni, J. Steger, P. Matray, Y. Kryftis, P. Grosso and L. Lymberopoulos (2011). Challenges of an Information Model for Federating

- Virtualized Infrastructures. *DMTF Academic Alliance Workshop on Systems and Virtualization Management (SVM)*, pp. 1–6.
- [Van der Ham15] J. Van der Ham, J. Stéger, S. Laki, Y. Kryftis, V. Maglaris and C. de Laat (2015). The NOVI Information Models. *Future Generation Computer Systems*, 42:64–73.
- [Van Ooteghem14] J. Van Ooteghem, S. Taylor, P. Grace, F. Lobillo, M. Smirnov and P. Demeester (2014). Sustaining a Federation of Future Internet Experimental Facilities. *European Regional Conference of the International Telecommunications Society (ITSEurope)*, pp. 1–19.
- [Vandenberghe13] W. Vandenberghe, B. Vermeulen, P. Demeester, A. Willner, S. Papavassiliou, A. Gavras, M. Sioutis, A. Quereilhac, Y. Al-Hazmi, F. Lobillo, F. Schreiner, C. Velayos, A. Vico-Oton, G. Androulidakis, C. Papagianni, O. Ntofon and M. Boniface (2013). Architecture for the Heterogeneous Federation of Future Internet Experimentation Facilities. *Future Network and Mobile Summit (FutureNetworkSummit)*, pp. 1–11.
- [Vaughan-Nichols11] S. J. Vaughan-Nichols (2011). OpenFlow: The Next Generation of the Network? *Computer*, 44(8):13–15.
- [Venkataraman09] P. Venkataraman (2009). *Applied optimization with MATLAB programming*. John Wiley & Sons.
- [Verma00] D. C. Verma (2000). *Policy-Based Networking: Architecture and Algorithms*. New Riders Publishing.
- [Verma02] D. C. Verma (2002). Simplifying Network Administration Using Policy-based Management. *IEEE network*, 16(2):20–26.
- [Villegas12] D. Villegas, N. Bobroff, I. Rodero, J. Delgado, Y. Liu, A. Devarakonda, L. Fong, S. M. Sadjadi and M. Parashar (2012). Cloud Federation in a Layered Service Model. *Journal of Computer and System Sciences*, 78(5):1330–1344.
- [Voellmy12] A. Voellmy, H. Kim and N. Feamster (2012). Procera: A Language for High-Level Reactive Network Control. In *Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks*, pp. 43–48. ACM.
- [Vollbrecht00] J. Vollbrecht, P. Calhoun, S. Farrell, L. Gommans, G. Gross, B. de Bruijn, C. de Laat, M. Holdrege and D. Spence (2000). AAA Authorization Framework. IETF RFC2904.
- [W3C14] W3C (2014). RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax <https://www.w3.org/tr/rdf-concepts/>.
- [Wang13] A. Wang, M. Iyer, R. Dutta, G. N. Rouskas and I. Baldine (2013). Network Virtualization: Technologies, Perspectives and Frontiers. *Journal of Lightwave Technology*, 31(4):523–537.

- [Westerinen01] A. Westerinen, J. Schnizlein, J. Strassner, M. Scherling, B. Quinn, S. Herzog, A. Huynh, M. Carlson, J. Perry and S. Waldbusser (2001). Terminology for Policy-based Management. IETF RFC 3198.
- [Wibisono13] A. Wibisono, R. Koning, P. Grosso, A. Belloum, M. Bubak and C. Laat (2013). OIntEd: Online Ontology Instance Editor Enabling a new Approach to Ontology Development. *Software: Practice and Experience*, 43(11):1319–1335.
- [Willner17] A. Willner, M. Giatili, P. Grosso, C. Papagianni, M. Morsey and I. Baldin (2017). Using SemanticWeb Technologies to Query and Manage Information within Federated Cyber-Infrastructures. *Data*, 2(3):21.
- [Xing12] T. Xing, X. Liu, C. J. Chung, A. Wada, S. Ata, D. Huang and D. Medhi (2012). Constructing a Virtual Networking Environment in a Geo-distributed Programmable Layer-2 Networking Environment (G-PLaNE). *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 5879–5884.
- [Xu11] M. Xu, D. Wijesekera and X. Zhang (2011). Runtime Administration of an RBAC Profile for XACML. *IEEE Transactions on Services Computing*, 4(4):286–299.
- [Yaqub14] E. Yaqub, R. Yahyapour, P. Wieder, C. Kotsokalis, K. Lu and A. I. Jehangiri (2014). Optimal Negotiation of Service Level Agreements for Cloud-based Services Through Autonomous Agents. In *IEEE International Conference on Services Computing (SCC)*, pp. 59–66.
- [Zeilenga06] K. Zeilenga (2006). Lightweight Directory Access Protocol (LDAP): RFC 4510.