



ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ (MSc)
στα ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Τα Οικονομικά της Διανομής Περιεχομένου
στο Διαδίκτυο»**

Οικονομίδης Δημήτριος

M3010020

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2003

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ (MSc)
στα ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Τα Οικονομικά της Διανομής Περιεχομένου στο
Διαδίκτυο»**

Οικονομίδης Δημήτριος
M3010020

Επιβλέπων Καθηγητής: Καθηγ. Κ. Κουρκουμπέτης
Εξωτερικός Κριτής: Επικ. Καθηγ. Γ. Σταμούλης

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2003

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
EXECUTIVE SUMMARY	15
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
1.1 Παρουσίαση προβλήματος	20
1.1.1 Αδυναμίες Διαδικτύου και Παγκοσμίου Ιστού	21
1.2 Προτεινόμενες Λύσεις	21
1.2.1 Clustering & Mirroring	21
1.2.2 Web Caching	23
1.2.3 Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (ΔΔΠ)	24
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : WEB CACHING	25
2.1 Εισαγωγή στο caching	25
2.2 Τρόπος Λειτουργίας μιας cache	27
2.3 Οφέλη υπηρεσίας caching	28
2.4 Μετρικές απόδοσης	29
2.5 Ιεραρχικό caching	29
2.5.1 Οργάνωση ιεραρχικού caching	29
2.5.2 Επίλυση αιτήσεων	31
2.5.3 Προβλήματα ιεραρχικού caching	31
2.6 Γενικά προβλήματα παραδοσιακού caching	32
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ (ΔΔΠ)	34
3.1 Υπηρεσίες διανομής και παράδοσης περιεχομένου	34
3.2 Οφέλη Δικτύων Διανομής Περιεχομένου	35
3.3 Λειτουργίες ενός ΔΔΠ	36
3.4 Συστατικά στοιχεία ενός ΔΔΠ	38

3.5 Μηχανισμοί Ανακατεύθυνσης Χρηστών	39
3.6 Κανόνες πολιτικών για Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου	41
3.6.1 Εισαγωγή στις Πολιτικές Δικτύου.....	41
3.6.2 Μοντέλα Συνέπειας	41
3.6.3 Άλλες πολιτικές δικτύου για ΔΔΠ.....	42
3.7 Υπηρεσίες Άκρου – Caching Δυναμικού Περιεχομένου	43
3.8 Δίκτυα Διανομής Εφαρμογών Περιεχομένου (ΔΔΕΠ)	45
3.8.1 Εισαγωγή στα ΔΔΕΠ.....	45
3.8.2 Απαιτήσεις ΔΔΕΠ	45
3.9 Peer-To-Peer (P2P) Διανομή Περιεχομένου	47
3.10 Σύγκριση υπηρεσιών caching και ΔΔΠ.....	49
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	51
4.1 Γενικά περί επιχειρηματικών μοντέλων	51
4.2 Επιχειρηματική Αλυσίδα Διανομής Περιεχομένου	52
4.3 Επιχειρηματικά Μοντέλα στη Διανομή Περιεχομένου	53
4.3.1 Περιεχόμενο-κεντρικό μοντέλο.....	54
4.3.2 Προσβασιο-κεντρικό μοντέλο	56
4.3.3 Εναλλακτικά επιχειρηματικά μοντέλα	58
4.3.4 Peer-To-Peer (P2P) Μοντέλο	61
4.3.5 Επιχειρηματικά Μοντέλα Πληρωμής – Ανά - Θέαση και Διαφημίσεων.....	64
4.4 Συμπεράσματα.....	64
5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ	67
5.1 Εισαγωγή	67
5.2 Σχετική βιβλιογραφία	68
5.3 Περιγραφή του προβλήματος	69

5.3.1 Περιορισμοί προβλήματος.....	70
5.3.2 Παράμετροι προβλήματος	71
5.3.3 Ευρετικές Μέθοδοι	71
5.4 Ανάπτυξη μοντέλου μορφοποίησης	72
5.5 Σύγκριση αλγόριθμων caching και τοποθέτησης περιεχομένου	77
5.6 Εισαγωγή στον χρονοπρογραμματισμό.....	78
5.7 Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού για Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου	79
5.7.1 Παραδείγματα Αλγόριθμων.....	81
6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	84
6.1 Μοντέλα λειτουργίας μίας cache.....	84
6.2 Γενικά περί πολιτικών αντικατάστασης περιεχομένου	85
6.3 Κατάταξη των πολιτικών αντικατάστασης.....	87
6.4 Μεροληπτικές πολιτικές αντικατάστασης.....	90
6.4.1 Παραδείγματα μεροληπτικών πολιτικών αντικατάστασης	91
6.4.2 Σύγκριση των πολιτικών αντικατάστασης	93
7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΤΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΤΟΥ CACHING	94
7.1 Μοντέλο Μορφοποίησης του προβλήματος.....	94
7.2 Ανάγκη για χρήση οικονομικών μηχανισμών	98
7.3 Μηχανισμοί Κινήτρων στην κατανομή του χώρου	100
7.4 Ανασκόπηση οικονομικών μηχανισμών στα Δίκτυα	103
7.4.1 Σύστημα τιμών	103
7.4.2 Δημοπρασίες.....	104
7.4.3 Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες.....	105
7.5 Εφαρμογή των οικονομικών μηχανισμών στο caching.....	106
7.5.1 Στάθμιση των αντικειμένων περιεχομένου	106
7.5.2 Caching με μηχανισμό αγοράς	109

7.5.3 Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες Caching.....	113
7.5.4 Επέκταση μοντέλου διαφοροποιημένων υπηρεσιών.....	121
8^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	125
8.1 Πρόβλημα των πελατών.....	125
8.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	127
8.3 Επίλογος.....	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΑΚΡΟΥ (EDGE SERVICES).....	131
A.1 Εισαγωγή.....	131
A.2 Ορισμός άκρου δικτύου.....	131
A.3 Σχέση ΔΔΠ και Υπηρεσιών άκρου.....	131
A.4 Παραδείγματα Υπηρεσιών άκρου.....	132
A.5 Επωφελούμενοι από τις υπηρεσίες άκρου.....	133
A.6 Εξελιγμένες υπηρεσίες caching δυναμικού περιεχομένου.....	134
A.6.1 Προκλήσεις Δημιουργίας Δυναμικού Περιεχομένου.....	134
A.6.2 Edge Side Includes (ESI).....	135
A.6.3 Χαρακτηριστικά Λειτουργίας ESI.....	136
A.6.4 Κύρια οφέλη ESI.....	137
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΧΡΗΣΤΩΝ.....	139
B.1 Εισαγωγή.....	139
B.2 Απαιτήσεις μηχανισμών ανακατεύθυνσης χρηστών.....	139
B.3 Βασικές Μέθοδοι Επικοινωνίας Πελάτη-Ρέπλικας.....	140
B.4 Κριτήρια αντιστοίχισης.....	141
B.5 Ανακατεύθυνση βάσει Domain Name System (DNS).....	142
B.5.1 Πλήρης Ανακατεύθυνση.....	143
B.5.2 Επιλεκτική Ανακατεύθυνση.....	144
B.6 Επαναγραφή του URL.....	146

B.7 Σύγκριση μεθόδων ανακατεύθυνσης	146
B.8 Location Data System (LDS) - Μια νέα προσέγγιση	147
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	149

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πληρεξούσια cache	26
Εικόνα 2: Λειτουργία ιεραρχικού caching	30
Εικόνα 3 : Δίκτυο Διανομής Περιεχομένου	35
Εικόνα 4: Αλυσίδα διανομής περιεχομένου	53
Εικόνα 5: Επιχειρηματικό Μοντέλο Περιεχομενο-Κεντρικού ΔΔΠ.....	56
Εικόνα 6: Επιχειρηματικό Μοντέλο Προσβασιο-Κεντρικού ΔΔΠ.....	57
Εικόνα 7: Επιχειρηματικό Μοντέλο Συμμαχίας Content Bridge	59
Εικόνα 8 : Επιχειρηματικό Μοντέλο Σύζευξης Κέντρου Δεδομένων & ΔΔΠ.....	61
Εικόνα 9: Επιχειρηματικό Μοντέλο Peer2Peer ΔΔΠ.....	63
Εικόνα 10 : Τοποθέτηση αντιγράφων σε ένα ΔΔΠ.....	73
Εικόνα 11: Κατανομή αποθηκευτικού χώρου cache.....	95
Εικόνα 12: Μηχανισμός ανάδρασης στο caching	122

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Μήτρα Τοποθέτησης Αντιγράφων.....	74
Πίνακας 2 : Κλειδιά Πολιτικών Αντικατάστασης Περιεχομένου	87
Πίνακας 3 : Διαστάσεις ποικιλίας QoS caching.....	113
Πίνακας 4 : Παράμετροι μοντέλου διαφοροποιημένης υπηρεσίας caching.....	116

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει εκπονηθεί στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης που προσφέρει το Οικονομικό Πανεπιστήμιο στα Πληροφοριακά Συστήματα από τον μεταπτυχιακό φοιτητή Οικονομίδα Δημήτριο. Τίτλος της εργασίας είναι «Τα Οικονομικά της Διανομής Περιεχομένου στο Διαδίκτυο».

Σκοπός της εργασίας είναι η τεχνική και οικονομική μελέτη του προβλήματος της Διανομής Περιεχομένου στο Διαδίκτυο. Κατ' αρχήν, ο όρος περιεχόμενο (content) όπως χρησιμοποιείται στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναφέρεται σε οποιοδήποτε είδους περιεχόμενο το οποίο βρίσκεται στο Διαδίκτυο και είναι διαθέσιμο στους τελικούς χρήστες για ανάκτηση. Ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει για παράδειγμα ιστοσελίδες, εικόνες, γραφικά, αρχεία ήχου και βίντεο, προγράμματα λογισμικού κτλ. Αντίστοιχα, με τον όρο αντικείμενο περιεχομένου εννοούμε οποιοδήποτε έγγραφο-αρχείο του Διαδικτύου το οποίο ανακαλείται με την χρήση ενός Ομοιόμορφου Εντοπιστή Πόρων (Universal Resource Locator – URL).

Αρχικά πραγματοποιείται μια ανασκόπηση των τεχνικών λύσεων που έχουν εφαρμοσθεί για την αντιμετώπιση των εγγενών αδυναμιών του Διαδικτύου ως όχημα διανομής περιεχομένου σε ευρεία κλίμακα. Στην πρώτη περίοδο εμφάνισης του Διαδικτύου και κατόπιν του Παγκόσμιου Ιστού, η χρήση του υπήρξε κυρίως εκπαιδευτική και επιστημονική. Με την εκρηκτική διάδοσή του όμως τα τελευταία χρόνια, την είσοδο εκατομμυρίων νέων χρηστών και την υιοθέτησή του ως μέσου για την μαζική προώθηση περιεχομένου αντικαθιστώντας άλλα παραδοσιακά μέσα ενημέρωσης και ψυχαγωγίας (π.χ. εφημερίδες, τηλεόραση κτλ), η αρχιτεκτονική πελάτη-εξυπηρετητή στην οποία βασίζεται αποδείχθηκε προβληματική. Υπερφόρτωση των εξυπηρετητών περιεχομένου και συμφόρηση των δικτυακών συνδέσμων, μη διαθεσιμότητα περιεχομένου, καθυστέρηση απόκρισης είχαν ως αποτέλεσμα την μειωμένη ικανοποίηση του τελικού χρήστη από την υπηρεσία.

Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, υιοθετήθηκε από το πεδίο των υπολογιστικών συστημάτων η τεχνική του caching με την αντιγραφή δημοφιλούς περιεχομένου σε αποθηκευτικούς κόμβους (caches) στα άκρα του δικτύου και κοντά στους τελικούς χρήστες. Το caching εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της *χρονικής γειννίαςσης* (temporal locality) που χαρακτηρίζει τις αιτήσεις για περιεχόμενο στο

Διαδίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο αποσυμφορείται ο πυρήνας του δικτύου και η κίνηση μεταφέρεται στην περιφέρεια, μειώνοντας έτσι την τελική καθυστέρηση που υφίσταται ο τελικός χρήστης κατά την ανάκτηση του περιεχομένου. Εξέλιξη των ανεξάρτητων caches που αναπτύσσονται σε διάφορα σημεία του Διαδικτύου από ιδιωτικούς οργανισμούς ή παροχείς πρόσβασης στο Διαδίκτυο για εξυπηρέτηση των χρηστών-πελατών τους, αποτέλεσε το ιεραρχικό caching. Αυτή η μορφή caching προβλέπει επιπλέον την συνεργασία και ανταλλαγή περιεχομένου μεταξύ των caches.

Τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου - ΔΔΠ (Content Distribution Network) αποτελούν την πιο πρόσφατη εξέλιξη στο χώρο της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο. Τα ΔΔΠ δεν είναι τίποτα άλλο από ένα συνεργατικό σχήμα caches υπό την επίβλεψη μιας κεντρικής διαχειριστικής οντότητας, του διανομέα περιεχομένου. Ο διανομέας περιεχομένου είναι υπεύθυνος για την αντιγραφή του περιεχομένου στους κόμβους του ΔΔΠ, καθώς και για την ευφυή ανακατεύθυνση των τελικών χρηστών προς τον βέλτιστο κόμβο που περιέχει το αντικείμενο περιεχομένου που επιθυμούν. Η ανακατεύθυνση αυτή γίνεται με βάση γεωγραφικούς παράγοντες, την κατάσταση των γραμμών, την συμφόρηση στο δίκτυο κτλ.

Η εργασία κατόπιν προχωρά στην παρουσίαση και συγκριτική ανάλυση των επιχειρηματικών μοντέλων στο χώρο της Διανομής Περιεχομένου, και συγκεκριμένα στα μοντέλα που ακολουθούν οι διανομείς περιεχομένου, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την λειτουργία των ΔΔΠ. Η διάκριση των μοντέλων γίνεται ανάλογα με την ταυτότητα του πελάτη του ΔΔΠ, που μπορεί να είναι είτε ο προμηθευτής περιεχομένου είτε ο πάροχος πρόσβασης στο Διαδίκτυο (ISP), και την κατεύθυνση των χρηματικών ροών. Τυπικά ο πελάτης ενός ΔΔΠ επιλέγει το περιεχόμενο που θα αντιγραφεί προληπτικά στους κόμβους του ΔΔΠ και χρεώνεται από τον διανομέα περιεχομένου για την υπηρεσία που του παρέχεται. Κατόπιν ο διανομέας περιεχομένου αποδίδει ένα μέρος της προσόδου του σε τρίτες επιχειρηματικές οντότητες του Διαδικτύου που συνεισφέρουν στην παροχή της υπηρεσίας διανομής περιεχομένου, όπως είναι τα κέντρα δεδομένων (data centers) και οι προμηθευτές δικτύου κορμού (backbone providers).

Η εργασία κατόπιν επικεντρώνεται στην οικονομική διάσταση του προβλήματος της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου μιας cache. Ο αποθηκευτικός χώρος μιας cache μπορεί να θεωρηθεί ως ένας δικτυακός πόρος ο οποίος βρίσκεται σε σπανιότητα. Αφενός η προσφορά του είναι περιορισμένη και αφετέρου η ζήτηση για αυτόν, δηλαδή

το περιεχόμενο στο Διαδίκτυο, είναι πολλαπλάσια. Σκοπός είναι η κατανομή του χώρου μεταξύ των χρηστών κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η κοινωνική ευημερία. Αναπτύσσεται επομένως ένα οικονομικό μοντέλο για την αγορά αποθηκευτικού χώρου στις caches του Διαδικτύου, όπου οι χρήστες του συστήματος ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την τοποθέτηση του δικού τους περιεχομένου. Υπογραμμίζεται η ανάγκη για την θέσπιση των κατάλληλων μηχανισμών κινήτρων προκειμένου οι χρήστες να δηλώνουν την αληθινή αποτίμηση της αξίας της υπηρεσίας για αυτούς. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι αποθηκεύεται το πιο δημοφιλές-χρήσιμο περιεχόμενο στους αποθηκευτικούς κόμβους του Διαδικτύου έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική χρησιμότητα που αποκομίζεται από την παρεχόμενη υπηρεσία..

Στην συνέχεια δίνεται μια κριτική παρουσίαση των οικονομικών μηχανισμών που έχουν προταθεί για την επίλυση του προβλήματος της κατανομής του χώρου μιας cache. Πρόκειται για μηχανισμούς οι οποίοι έχουν εφαρμοσθεί με σχετική επιτυχία στο πεδίο της μετάδοσης δεδομένων, όπως είναι ο μηχανισμός της αγοράς με διενέργεια δημοπρασίας για την διάθεση του αποθηκευτικού χώρου, ή η παροχή μιας διαφοροποιημένης υπηρεσίας caching, όπου ο χρήστης επιλέγει την κλάση υπηρεσίας που μεγιστοποιεί την χρησιμότητά του ανάλογα με το επίπεδο ποιότητας και την αντίστοιχη χρέωση.

Βασικοί περιορισμοί της οικονομικής ανάλυσης που πραγματοποιείται στην εργασία αυτή είναι ότι λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση κατανομής του χώρου μόνο μιας cache, καθώς και ότι ως χρήστες του συστήματος θεωρούνται μόνο οι προμηθευτές περιεχομένου. Οπότε παραμένουν δύο ανοικτά ζητήματα στο χώρο για μελλοντική εργασία και επεκτάσεις του μοντέλου. Πρώτον, πρέπει να εξετασθεί η περίπτωση ενός ιεραρχικού-συνεργατικού σχήματος caching και των παρενεργειών που παρουσιάζονται από την δυνατότητα μεταφοράς αιτήσεων και περιεχομένου μεταξύ των caches. Δεύτερον, η ανάλυση μπορεί να επεκταθεί προκειμένου να συμπεριλάβει και τον δεύτερο τύπο χρήστη της υπηρεσίας που είναι οι πελάτες, οι οποίοι ορίζονται ως εκπρόσωποι των τελικών χρηστών και προχωρούν σε ενοικίαση χώρου για την αποθήκευση δημοφιλούς περιεχομένου εκ μέρους τους.

Αναλυτικότερα, η δομή της εργασίας κατά κεφάλαιο παρουσιάζεται ακολούθως:

Στο 1^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη εισαγωγή στην παρουσίαση του προβλήματος της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο και στις διάφορες λύσεις που

έχουν κατά καιρούς προταθεί και υλοποιηθεί. Το πρόβλημα πηγάζει κατά κύριο λόγο από τις αδυναμίες της αρχιτεκτονικής πελάτη-εξυπηρετητή του Διαδικτύου, την best-effort φύση του καθώς και από την σπανιότητα πόρων, όπως είναι το εύρος ζώνης.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος του caching η οποία έχει υιοθετηθεί σχετικά επιτυχώς στο χώρο της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο από άλλα πεδία της επιστήμης των υπολογιστών. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας μιας cache, παρουσιάζονται τα κύρια οφέλη καθώς και οι μετρικές απόδοσής της. Μια cache αξιολογείται συνήθως ως προς τον βαθμό επιτυχιών της (*hit-rate*), δηλαδή το λόγο αιτήσεων περιεχομένου που εξυπηρετεί τοπικά ως προς το σύνολο των εισερχόμενων αιτήσεων. Γίνεται επίσης μια εισαγωγή στο ιεραρχικό caching, ενώ το κεφάλαιο κλείνει με μια σύντομη επισκόπηση των κυριότερων προβλημάτων που έχουν εμφανισθεί στο παραδοσιακό caching στο Διαδίκτυο.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου - ΔΔΠ (Content Distribution Network) τα οποία αποτελούν την πιο πρόσφατη εξέλιξη στο χώρο της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο. Αποτελούν στην ουσία μια εξέλιξη του ιεραρχικού caching. Ένα ΔΔΠ είναι μια συλλογή από caches οι οποίες συνεργάζονται υπό την επίβλεψη μιας κεντρικής οντότητας, του διανομέα περιεχομένου. Το περιεχόμενο αντιγράφεται προληπτικά στις caches του δικτύου κοντά στους τελικούς χρήστες έτσι ώστε να παραδίδεται γρηγορότερα και παράλληλα να ανακουφίζονται οι πηγαίοι εξυπηρετητές των προμηθευτών περιεχομένου.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται κατηγοριοποιημένα τα επιχειρηματικά μοντέλα λειτουργίας ενός ΔΔΠ. Προηγουμένως, γίνεται μια σύντομη ανάλυση των επιχειρηματικών ρόλων που εμπλέκονται στην εφοδιαστική αλυσίδα της διανομής περιεχομένου.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των μηχανισμών αναπαραγωγής αντικειμένων περιεχομένου που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια ενός ΔΔΠ. Έργο τους είναι η επιλογή των αποθηκευτικών κόμβων μέσα στην υποδομή ενός ΔΔΠ στους οποίους θα τοποθετηθούν τα αντικείμενα των προμηθευτών περιεχομένου. Αναλύονται επίσης ζητήματα χρονοπρογραμματισμού του προωθητικού εξυπηρετητή ενός ΔΔΠ, ο οποίος αποστέλλει προληπτικά το περιεχόμενο προς τους κόμβους του ΔΔΠ.

Στο 6^ο κεφάλαιο συνοψίζονται οι πολιτικές αντικατάστασης περιεχομένου που χρησιμοποιούνται στο caching. Ο αποθηκευτικός χώρος μιας cache είναι περιορισμένος

σε σχέση με την ζήτηση για περιεχόμενο, οπότε απαιτείται η υιοθέτηση συγκεκριμένων πολιτικών για την διαχείρισή του και την ανανέωση των αντιγράφων που αποθηκεύονται σε αυτόν, με βασικό στόχο την μεγιστοποίηση του βαθμού επιτυχιών της cache.

Στο 7^ο κεφάλαιο αναπτύσσεται ένα οικονομικό μοντέλο για την αγορά αποθηκευτικού χώρου στις caches του Διαδικτύου και αναλύεται η ανάγκη για παροχή κινήτρων στους χρήστες της υπηρεσίας με σκοπό την μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας. Μετά από μια σύντομη ανασκόπηση των οικονομικών μηχανισμών που έχουν εφαρμοσθεί στον χώρο των τηλεπικοινωνιακών Δικτύων γενικότερα, πραγματοποιείται μια ανάλυση αντίστοιχων συστημάτων στο χώρο του caching, τα οποία στηρίζονται στην αποκάλυψη της αποτίμησης της υπηρεσίας από τους χρήστες. Οι μηχανισμοί κινήτρων σε αυτά τα συστήματα στηρίζονται είτε στην διενέργεια δημοπρασίας, είτε στην παροχή διαφοροποιημένης υπηρεσίας caching με πολλαπλά επίπεδα ποιότητας και ανάλογη χρέωση της κάθε κλάσης υπηρεσίας.

Στο Παράρτημα Α, συμπληρωματικά ως προς τα ΔΔΠ, γίνεται μια αναφορά γενικότερα στις υπηρεσίες άκρου, δηλαδή τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφερθούν στους τελικούς χρήστες από πληρεξούσιους εξυπηρετητές που βρίσκονται στο άκρο του δικτύου, σε αντίθεση προς τους πηγαίους εξυπηρετητές.

Τέλος, στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται οι μηχανισμοί ανακατεύθυνσης χρηστών που εφαρμόζονται στα σύγχρονα ΔΔΠ προκειμένου να ανακατευθυνθούν οι τελικοί χρήστες προς τον βέλτιστο αποθηκευτικό κόμβο που περιέχει ένα αντίγραφο του περιεχομένου που επιθυμούν.

Κλείνοντας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κουρκουμπέτη και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Αντωνιάδη για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τους συναδέλφους μου και τα μέλη του εργαστηρίου «Ασύρματων Δικτύων και Επικοινωνιών» του Οικονομικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την ποικιλότητα βοήθεια που μου προσέφεραν.

Οικονομίδης Δημήτριος

EXECUTIVE SUMMARY

This thesis has been authored as a part of the Post-Graduate Programme in Information Systems, offered by the Athens University of Economics and Business. Its title is “Internet Content Distribution Economics”.

This thesis studies the technical and economical aspects of Internet Content Distribution. First of all, the term “content” as it is been used in the context of this thesis refers to any kind of resource available in Internet for downloading by end users. This definition, thus, comprises web pages, pictures, graphic files, sound and video files, software programs etc. Equivalently, by using the term “content object” we mean any document-file that can be recalled with the use of a Uniform Resource Locator (URL).

In the beginning, we make a review of the technical solutions that have been applied in order to deal with the incapacibilities of Internet as a large-scale content distribution vehicle. In the first years of the appearance of Internet and later the World Wide Web, their use was mainly scientific and educational. However, in the last decade millions of new users gained access to Internet, which has been used as a medium for massive content distribution replacing, thus, traditional media like newspapers, television etc. This phenomenal growth of Internet disclosed the problems of its client-server architecture. Overloading of content servers, congestion of network links, content unavailability, response delay are some common symptoms that result to reduced end-user satisfaction.

In order to alleviate these problems, the caching technique has been adopted from the field of computer systems. Specifically, storage nodes for temporary caching of popular content are deployed in the network *edge* near to end users. Caching takes advantage of the *temporal locality* phenomenon, which characterizes content requests over the Internet. In this way, the network core is relieved and packet traffic is diverted to network periphery so that download times end users experience are reduced dramatically.

While the deployment of these single caches in several network points by organizations or access providers is beneficial for their end users-customers, they operate independently, not achieving, thus, the optimal result. An evolution to this form of caching has been the hierarchical caching, which enables cooperation and content exchange between different caches. The latest development in the field of content

distribution has been the appearance of Content Distribution Networks (CDN). CDNs are a cooperative scheme of caches operating under the supervision of a central administrative entity, the content distributor. CDNs act as a virtual overlay network of caches on top of the existing Internet infrastructure. The content distributor is responsible for the replication of content in the storage nodes of its CDN, as well as for the intelligent redirection of end-users to the optimal node which contains the requested object. This redirection is based on several factors, such as geographical constraints, the links state and the network congestion.

Consecutively, we present and make a comparative analysis of the content distribution business models. More specifically we analyze the models adopted by content distributors, who are responsible for the CDNs' operation. These models can be distinguished according to the CDN customer identity, the content identity to be replicated as well as the direction of money flow. The customer of a CDN may be a content provider, who pays for her content to be near the end-users, or an ISP, who pays for popular content to be near his customers. Typically, a customer of a CDN selects the content which will be proactively replicated to the nodes of the CDN and is charged by the content distributor for this service. The content distributor consecutively attributes a part of her revenue to third business entities which contribute to the content delivery service, such as the data centers and the backbone providers.

The thesis next focuses on the economic dimension of the cache storage space allocation problem. Cache storage space can be regarded as a scarce network resource. Demand for cache space, that is content requests to be served by cache, exceeds its supply. The objective is to allocate cache space to users in such a way that social welfare is maximized. An economic model is developed about the market of storage space in web caches. Users of the system compete in order to place their own content to the cache space. Emphasis is given to the need of setting the appropriate incentive mechanisms so that it is in the users' interest to declare their true valuations of the caching service. In this way, it is assured that the most popular and "useful" content is stored in cache storage space in order to maximize the total utility that is extracted from the consumption of the service.

What follows is a comparative analysis of the economic mechanisms that have been proposed for the solution of the cache space allocation problem. These are mechanisms that have been applied successfully in the field of data transmission.

Specifically, the presentation comprises a market mechanism which holds an auction for storage space allocation, as well as the provision of a differentiated caching service, where users self-select the class of service that maximizes their utility, depending on the level of quality of service and the corresponding tariff.

The main constraints of the economic analysis that takes place in this thesis are the facts that we take account the case of space allocation for only one cache, and also that content providers are the only kind of users of systems that are examined. So, there remain two open issues in this domain for future work and extensions of the economic model. First, there must be examined the case of a hierarchical-cooperative caching scheme and the consequences that arise from the capability of moving content and requests between caches. Second, the analysis can be extended in order to include another type of user of the caching service, who are the clients. Clients are defined as the end users' delegates who proceed with renting cache space in order to replicate popular content on behalf of them.

In detail, the structure of the thesis per chapter is presented following:

The 1st chapter gives a short introduction to the problem of Internet content distribution and the different solutions that have proposed and implemented. This problem stems mainly from the drawbacks of client-server architecture of the web, the best-effort nature of Internet, as well as from scarcity of resources, such as the available network bandwidth.

The 2nd chapter describes the technique of caching, which has been adopted relatively successfully in the field of Internet content distribution from other domains of computer science. The operation mode of a cache is analyzed, as well as the main benefits of caching and its metrics of evaluation. A cache is usually evaluated according to its *hit-rate*, that is the ratio of content requests which is able to serve locally towards the total incoming requests. We give also an introduction to hierarchical caching, where caches cooperate exchanging content and requests. The chapter concludes with a short review of the main drawbacks of plain traditional web caching.

Content Distribution Networks (CDNs) are presented in the 3rd chapter. CDNs constitute the most recent development in the field of internet content distribution, being in fact an evolution of hierarchical caching. A CDN is a collection of caches which cooperate under the supervision of a central administrative entity, who is the content

distributor. Content is replicated and pushed proactively to network caches near end users, so that it is delivered faster and the origin servers of the content providers (who are customers of CDNs) are alleviated.

In the 4th chapter we present the business models that have been followed by content distributors, after we give a brief description of the business entities which deal with the supply chain of content distribution. What differs the various models is the identity of the customer of the service who decides what content will be replicated, the direction of money flow, as well as the degree of cooperation between different business entities.

The 5th chapter analyzes the content object replication algorithms that are implemented in the context of a CDN. Their task is the selection of the objects that will be replicated as well as of the storage nodes inside the CDN infrastructure, in which these will be placed. An introduction to scheduling issues of the push server of a CDN, which sends proactively content to its nodes, is also given at the end of the chapter.

The 6th chapter summarizes the content replacement policies that are used in web caching. Storage space of a cache is limited in relation to its demand for storing content. Therefore, it is required to adopt a specific policy for its proper management and the replacement of the replicas placed in it. Main objective of a content replacement policy is to evict the most “useless” objects from a cache in order to maximize its hit-rate.

In the 7th chapter we develop an economic model for the market of storage space in web caches. Emphasis is given on the need for providing users of the service with incentives so that the social welfare is maximized. After a short review of the economic mechanisms that have been applied in the domain of data transmission, follows an analysis of similar systems in the field of caching. These systems rely upon the declaration of users’ valuations of the caching service. Their incentive mechanisms are based either on an auction holding, or on the provision of a differentiated service with multiple quality levels and a proportional charging of each service class.

In Appendix A, complementary to content delivery and CDNs, we make a short reference to edge services in general. Edge services are services that can be offered to end users by proxy servers deployed at the edge of the network instead of origin servers. Content delivery is, thus, an edge service.

Finally, the thesis closes in Appendix B with a presentation of the user redirection mechanisms that are implemented in CDNs. Their task is to redirect end users to the optimal storage node that contains a copy of the content object they requested.

Ending, I feel the obligation to thank my supervisor professor Dr. C. Courcoubetis as well as the PhD candidate Mr. P. Antoniadis for their guidance, support and valuable advice that they gave me during the authoring of this thesis. Also I would like to thank my colleagues and the members of the “Wireless Networks and Communications” laboratory of AUEB for the diversified assistance that they offered me.

Oikonomidis Dimitris

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Παρουσίαση προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια η δημοτικότητα του Διαδικτύου (Internet) και ειδικότερα του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web) ως πηγών πληροφόρησης και ψυχαγωγίας για τους ανθρώπους παγκοσμίως έχει αυξηθεί κατακόρυφα. Η πρωτοφανής αυτή ανάπτυξη οφείλεται κατά μεγάλο βαθμό τόσο στην ευκολία της πρόσβασης στο Διαδίκτυο και της χρήσης του ειδικού λογισμικού επισκόπησης (browsers), όσο και στην προσθήκη πιο ελκυστικού περιεχομένου, όπως ήχου και βίντεο. Επιπρόσθετα, νέες προκλήσεις τίθενται από την τεχνολογική ανάπτυξη [16],[36]. Καθώς οι τελικοί χρήστες αποκτούν ταχύτερη πρόσβαση στο Διαδίκτυο από την οικία τους μέσω DSL και καλωδιακών μόντεμ, η ζήτηση για περιεχόμενο υψηλής ποιότητας θα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό στα επόμενα χρόνια. Επίσης, μέσω των νέων εξελιγμένων ασύρματων συσκευών, όπως κινητών τηλεφώνων και υπολογιστών παλάμης (PDAs), η πρόσβαση στο Διαδίκτυο γίνεται δυνατή από οποιοδήποτε μέρος και σε οποιαδήποτε ώρα.

Αυτή η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για περιεχόμενο όμως τοποθετεί ένα βαρύ φορτίο στην υπάρχουσα υποδομή του Διαδικτύου. Οι εξυπηρετητές και οι δικτυακές συνδέσεις πρέπει να είναι ικανοί ανά πάσα στιγμή να ικανοποιήσουν την ζήτηση, που μπορεί να είναι υψηλά μεταβαλλόμενη και απρόβλεπτη. Το μεγαλύτερο πρόβλημα το αποτελούν τα λεγόμενα «θερμά σημεία» (hot-spots). Αυτά δημιουργούνται όταν κάποιο αντικείμενο περιεχομένου αποκτά εξαιρετικά υψηλή δημοτικότητα, τυπικά για μια περιορισμένη χρονική περίοδο. Παραδείγματα τέτοιων «θερμών σημείων» συνιστούν η μετάδοση μεγάλων αθλητικών και άλλων γεγονότων, ή η δημόσια κυκλοφορία δημοφιλούς λογισμικού μέσω Διαδικτύου. Όλα αυτά τα περιστατικά παράγουν ένα υψηλό φόρτο για τον πηγαίο εξυπηρετητή του περιεχομένου. Παράλληλα, αποτελεί ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα η ακριβής πρόβλεψη της απαιτούμενης δικτυακής χωρητικότητας. Επιπροσθέτως, η αναβάθμιση των εξυπηρετητών ή των δικτυακών συνδέσεων για την ικανοποίηση της ζήτησης δεν αποτελεί μια εφικτή λύση καθώς εκατομμύρια νέων χρηστών κάθε φορά επιθυμούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο ίδιο περιεχόμενο.

1.1.1 Αδυναμίες Διαδικτύου και Παγκοσμίου Ιστού

Το Διαδίκτυο είναι ένα πολυσύνθετο μωσαϊκό από διασυνδεόμενα δίκτυα. Συμφόρηση και αποτυχίες (δηλ. απόρριψη πακέτων) ενδέχεται να εμφανισθούν σε πολλά σημεία, όπως [1]:

- Το «πρώτο μίλι» (first mile), που αποτελεί την σύνδεση του εξυπηρετητή που βρίσκεται σε κάποιο κέντρο δεδομένων με το Διαδίκτυο.
- Το δίκτυο κορμού (backbone).
- Τα σημεία διασύνδεσης και ανταλλαγής κίνησης (peering points) μεταξύ των προμηθευτών δικτυακών υπηρεσιών.
- Το «τελευταίο μίλι» (last mile), που συνδέει το Διαδίκτυο, με τον χρήστη.

Ο Παγκόσμιος Ιστός βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική πελάτη-εξυπηρετητή (client-server). Το περιεχόμενο στον Ιστό φιλοξενείται σε εξυπηρετητές Ιστού (Web servers), ενώ οι αιτήσεις των χρηστών για αυτό εξυπηρετούνται με την χρήση του πρωτοκόλλου μεταφοράς υπερκειμένου HTTP (HyperText Transfer Protocol) [36]. Οι χρήστες χρησιμοποιούν προγράμματα επισκόπησης (browsers) ως λογισμικό πελάτη για να επικοινωνήσουν με το λογισμικό που είναι αποθηκευμένο στους εξυπηρετητές. Τα αντικείμενα στον Ιστό αναγνωρίζονται μοναδικά από τους Ομοιόμορφους Εντοπιστές Πόρων (Uniform Resource Locators – URLs), οι οποίοι προσδιορίζουν το όνομα του εξυπηρετητή που έχει το αντικείμενο και επίσης την τοποθεσία στον δίσκο του εξυπηρετητή όπου βρίσκεται το αντικείμενο. Οι ιστοσελίδες είναι γραμμένες στην Γλώσσα Υποσημείωσης Υπερκειμένου HTML (HyperText Markup Language) και μπορούν να περιέχουν κείμενο, εικόνες και συνδέσμους σε άλλες εικόνες. Το πρόβλημα της διανομής περιεχομένου πηγάζει από τις αδυναμίες της αρχιτεκτονικής πελάτη-εξυπηρετητή η οποία δεν μπορεί να χειριστεί τις αυξημένες απαιτήσεις του Ιστού σε σύγκριση με παραδοσιακές εφαρμογές του είδους.

1.2 Προτεινόμενες Λύσεις

1.2.1 Clustering & Mirroring

Οι ερευνητές έχουν μελετήσει αρκετές προσεγγίσεις για την παράδοση του περιεχομένου στο Διαδίκτυο με έναν τρόπο που να παρέχει αφενός την ζητούμενη αξιοπιστία και αφετέρου μεγάλες δυνατότητες κλιμάκωσης [1]. Μια από αυτές τις

προσεγγίσεις που μπορεί να συμβάλει στην επίλυση των προβλημάτων της ανοχής σε σφάλματα και της κλιμάκωσης είναι η τοπική συνάθροιση ομάδας εξυπηρετητών (local clustering) σε κάποιο κέντρο δεδομένων. Παρόλα αυτά, εάν αποτύχει κατά την λειτουργία του το κέντρο δεδομένων ή ο προμηθευτής υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP) που παρέχει την συνδεσιμότητα, τότε ολόκληρο το συγκρότημα εξυπηρετητών είναι απροσπέλαστο από τους χρήστες.

Για την επίλυση του προβλήματος της αποτυχίας μοναδικού σημείου (single-point failure), οι δικτυακοί τόποι μπορούν να προβούν στην υιοθεσία κατανεμημένων μεθόδων, όπως είναι το mirroring (η ανάπτυξη ομάδων εξυπηρετητών-αντιγράφων του πηγαιού σε αρκετές διαφορετικές τοποθεσίες) και το multihoming (η χρήση πολλαπλών ISPs για την σύνδεση του δικτυακού τόπου με το Διαδίκτυο). Στην προσέγγιση του mirroring το περιεχόμενο ενός πηγαιού εξυπηρετητή (origin server) αντιγράφεται εξολοκλήρου σε έναν άλλο εξυπηρετητή, καλούμενο εξυπηρετητή-είδωλο (mirror) ήρέπλικα. Το περιεχόμενο ενός mirror πρέπει να είναι πανομοιότυπο με το αποθηκευμένο περιεχόμενο στον πηγαιό εξυπηρετητή, έτσι ώστε οι χρήστες να μπορούν να προσπελάζουν οποιοδήποτε από τα δύο μηχανήματα είναι πιο προσιτό σε αυτούς και να λαμβάνουν το περιεχόμενο που επιθυμούν.

Επομένως, η δημιουργία συγκροτημάτων εξυπηρετητών Διαδικτύου (web farms), η εγκατάσταση πλήρων αντιγράφων του πηγαιού εξυπηρετητή σε διαφορετικές τοποθεσίες (mirroring) και το multihoming αποτελούν δημοφιλείς μεθόδους για την υποστήριξη δικτυακών τόπων με αυστηρές απαιτήσεις σε αξιοπιστία και κλιμάκωση. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές δεν επιλύουν όλα τα προβλήματα συνδεσιμότητας, εισάγοντας αρκετά συχνά επιπρόσθετες δυσκολίες στο σύστημα διανομής περιεχομένου, όπως είναι οι ακόλουθες:

- Η κλιμάκωση συγκροτημάτων σε τάξεις χιλιάδων εξυπηρετητών αποτελεί μια επίπονη διαδικασία.
- Στην περίπτωση του multihoming τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν συγκλίνουν αρκετά γρήγορα μεταξύ τους για την εύρεση νέων διαδρομών σε περιπτώσεις αποτυχίας των αρχικών συνδέσεων με τους εξυπηρετητές.
- Το mirroring απαιτεί συνεχή συγχρονισμό των αντιγράφων με τα περιεχόμενα του αυθεντικού δικτυακού τόπου.

Κοινό χαρακτηριστικό και των τριών περιπτώσεων είναι η εισαγωγή στο σύστημα *πλεονάσματος δυναμικότητας*. Στην περίπτωση του clustering πρέπει να υπάρχουν αρκετοί εξυπηρετητές σε κάθε τοποθεσία για την επεξεργασία του φόρτου σε ώρες αιχμής (που μπορεί να είναι τάξεις μεγέθους υψηλότερος από το μέσο φόρτο). Με το multihoming κάθε σύνδεση με ISP πρέπει να μπορεί να μεταφέρει όλη την εισερχόμενη προς αυτό κίνηση. Με το mirroring κάθε αντίγραφο-καθρέφτης πρέπει να μπορεί να αντεπεξέρχεται σε όλον τον εισερχόμενο προς αυτόν φόρτο. Επομένως κάθε μια από αυτές τις λύσεις συνεπάγεται σημαντικά οικονομικά κόστη, τα οποία μπορεί να υπερβαίνουν το διπλάσιο των εξόδων αρχικής υποδομής και λειτουργικών δαπανών ενός δικτυακού τύπου.

1.2.2 Web Caching

Το caching ως μέθοδος επιτάχυνσης της μετάδοσης δεδομένων, και γενικότερα περιεχομένου, υιοθετήθηκε από το πεδίο των υπολογιστικών μονάδων. Η τοποθέτηση ταχύτερης λανθάνουσας μνήμης (cache memory) κοντά στον επεξεργαστή επιταχύνει τα συνολικό ρυθμό μεταφοράς των δεδομένων από την κύρια μνήμη προς αυτόν. Αντίστοιχα, στο caching στο Διαδίκτυο πληρεξούσιοι (proxy) εξυπηρετητές με μεγάλο αποθηκευτικό χώρο, στον οποίο αντιγράφεται δημοφιλές περιεχόμενο, τοποθετούνται κοντά στους τελικούς χρήστες, με σκοπό την επιτάχυνση της διανομής περιεχομένου.

Το caching αποτελεί μια κατανεμημένη τακτική παραπλήσια με το mirroring, όσον αφορά την αντιγραφή περιεχομένου σε διάφορες τοποθεσίες πλησιέστερα στους καταναλωτές του περιεχομένου, με δύο όμως βασικές διαφορές. Ένας εξυπηρετητής-mirror τυπικά φιλοξενεί το περιεχόμενο ενός προμηθευτή περιεχομένου (ενός δικτυακού τύπου), ενώ σε μια cache αντιγράφεται με βάση την ζήτηση, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, περιεχόμενο από διάφορους δικτυακούς τύπους. Επιπλέον, το caching έχει έναν πιο δυναμικό χαρακτήρα από το mirroring, καθώς λειτουργεί σε επίπεδο αντικειμένων και στηρίζεται σε μια δυναμική διαδικασία αναπλήρωσης του περιεχομένου της cache ανάλογα με τις μεταβολές της ζήτησης. Το mirroring αντιθέτως προϋποθέτει πλήρη αντιγραφή του περιεχομένου ενός δικτυακού τύπου και ακολουθεί μια μέθοδο στατική και αργά μεταβαλλόμενη όσον αφορά στην ανανέωση του περιεχομένου.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται με την υιοθέτηση της τακτικής του mirroring είναι η πληροφόρηση των χρηστών για την ύπαρξη των πολλαπλών mirrors. Συνήθως, ο

πηγαίος εξυπηρετητής διατηρεί μια λίστα των διαθέσιμων mirrors, την οποία προμηθεύεται ο χρήστης, που κατόπιν πρέπει να επιλέξει έναν διαθέσιμο mirror κάθε φορά που επισκέπτεται τον δικτυακό τόπο. Οι χρήστες όμως δεν είναι πάντα ενήμεροι για την ταυτότητα αυτών των mirrors και μπορεί να μην γνωρίζουν ποιος είναι ο βέλτιστος που πρέπει να επιλέξουν για να εξυπηρετηθούν ταχύτερα. Επίσης, η διαχείριση πολλαπλών mirrors για έναν πηγαίο εξυπηρετητή είναι απαιτητική για τον διαχειριστή του δικτυακού τόπου καθώς πρέπει να διασφαλίζει ότι το περιεχόμενο στους mirrors είναι πάντοτε ενημερωμένο με τις τελευταίες αλλαγές στον κεντρικό εξυπηρετητή.

Από την άλλη πλευρά, για την χρήση μιας πληρεξούσιας cache οι χρήστες πρέπει να ρυθμίσουν το πρόγραμμα επισκόπησής τους, ή αλλιώς ο διαχειριστής του οργανισμού μπορεί να εγκαταστήσει έναν διαφανή πληρεξούσιο (transparent proxy) [14] ο οποίος συλλαμβάνει (intercepts) όλες τις αιτήσεις του χρήστη και τις ανακατευθύνει στην cache. Τελικά, η ανακατεύθυνση του χρήστη στην cache μπορεί να μην είναι πάντοτε αποτελεσματική, να μην περιέχει δηλαδή η cache το ζητούμενο περιεχόμενο, οπότε η cache αναγκάζεται να φορτώσει την σελίδα από τον πηγαίο εξυπηρετητή.

1.2.3 Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (ΔΔΠ)

Μια άλλη λύση, η οποία θα περιγραφεί αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο και στην οποία βασίζονται όλες οι μοντέρνες αρχιτεκτονικές διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο, είναι η αναπαραγωγή (replication) του περιεχομένου και αποθήκευσή του σε πληρεξούσιους εξυπηρετητές (proxy caches), οι οποίοι βρίσκονται σε στενή συνεργασία μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένα εικονικό Δίκτυο Διανομής Περιεχομένου (Content Distribution Network). Για την λειτουργία αυτών των δικτύων υπεύθυνοι είναι τρίτοι φορείς, οι διανομείς περιεχομένου (content distributors). Τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου γενικά παρέχουν καλύτερες εγγυήσεις από το απλό caching σε ό,τι αφορά την εξυπηρέτηση ενός πελάτη από μια cache αντί του πηγαίου εξυπηρετητή. Σε αυτήν την προσέγγιση, ο επεξεργαστικός φόρτος διαμοιράζεται μεταξύ των εξυπηρετητών του ΔΔΠ. Αυτή η τακτική εγγυάται ότι ο φόρτος εργασίας στους εξυπηρετητές και τις δικτυακές γραμμές παραμένει διαχειρίσιμος και ότι οι χρήστες μπορούν να αποκτούν το περιεχόμενο που επιθυμούν μέσα σε ένα λογικό χρονικό διάστημα.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

WEB CACHING

2.1 Εισαγωγή στο *caching*

Το *caching* μπορεί να ορισθεί ως μια υπηρεσία καταμεμημένης αποθήκευσης αρχείων και γενικότερα αντικειμένων περιεχομένου του Παγκόσμιου Ιστού [4], [6], [37], [38], [39]. Αποτελεί μια μέθοδο για την βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρει ένα δίκτυο σε περιπτώσεις σπανιότητας εύρους ζώνης. Μια *cache* στο Διαδίκτυο τοποθετείται μεταξύ των πηγαίων εξυπηρετητών Ιστού και των τελικών χρηστών και παρακολουθεί τις αιτήσεις για περιεχόμενο, είτε πρόκειται για ιστοσελίδες HTML, εικόνες και γενικά αρχεία (συλλογικά γνωστά ως αντικείμενα περιεχομένου) που διέρχονται από αυτήν, αποθηκεύοντας ένα αντίγραφο τοπικά. Μελλοντικές αιτήσεις για το ίδιο αντικείμενο θα εξυπηρετηθούν από το τοπικά αποθηκευμένο αντίγραφο, αποφεύγοντας την προσπάθεια στον πηγαίο εξυπηρετητή.

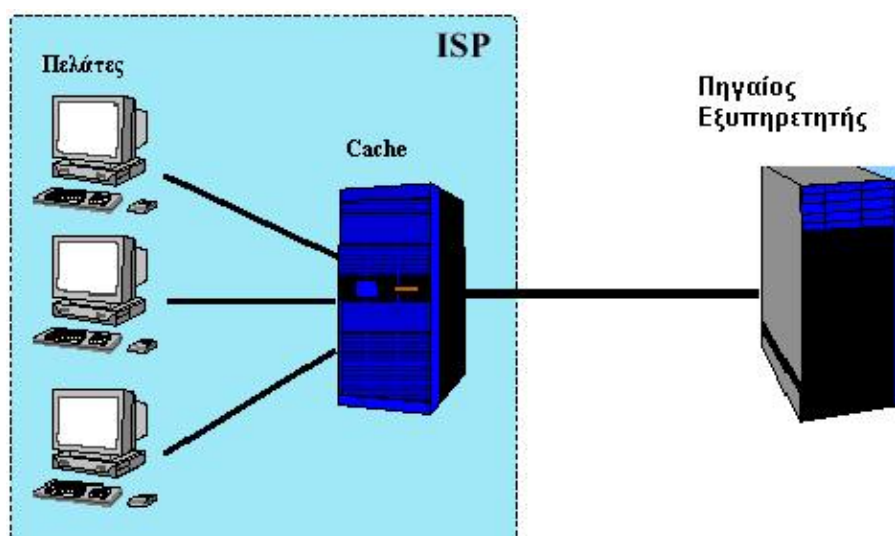
Το *caching* εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της *χρονικής γειννίαςσης* (*temporal locality*) που χαρακτηρίζει τις αιτήσεις για περιεχόμενο στο Διαδίκτυο και όχι μόνο. Συγκεκριμένα, οι αιτήσεις για ένα αντικείμενο τείνουν να συγκεντρώνονται σε ένα σχετικά στενό χρονικό διάστημα, για το οποίο το αντικείμενο παρουσιάζει υψηλή δημοτικότητα η οποία φθίνει με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι, με την αντιγραφή του αντικειμένου σε μια *cache* προσδοκάται ότι αυτό θα εξυπηρετήσει το μεγαλύτερο ποσοστό των μελλοντικών αιτήσεων προτού αντικατασταθεί από κάποιο άλλο αντικείμενο.

Υπάρχουν διάφορα σημεία στο Διαδίκτυο όπου μπορεί να τοποθετηθεί μια *cache*, όπως στο πρόγραμμα επισκόπησης του χρήστη (*browser cache*), στο δίκτυο ενός ISP ή ενός οργανισμού, και τέλος κοντά στον πηγαίο εξυπηρετητή. Παρατηρούνται δηλαδή τα ακόλουθα επίπεδα ιεραρχίας όσον αφορά την ανάπτυξη των *caches* στο Διαδίκτυο:

- *Browser Caches*: Βρίσκονται στο κατώτερο άκρο της ιεραρχίας των *caches* στο Διαδίκτυο. Ένα καθοριζόμενο από τον χρήστη τμήμα του σκληρού δίσκου του υπολογιστή χρησιμοποιείται για την αποθήκευση αντικειμένων που έχει ήδη «κατεβάσει» στο μηχάνημα του, έτσι ώστε στην επόμενη επίσκεψη του σε έναν δικτυακό τόπο να εξυπηρετηθεί από την δική του τοπική *cache*.

- *Proxy Caches*: Οι πληρεξούσιες caches λειτουργούν στηριζόμενες στην ίδια αρχή, αλλά σε μεγαλύτερη κλίμακα, εξυπηρετώντας εκατοντάδες ή και χιλιάδες χρήστες. Οι πληρεξούσιες caches είναι ένας τύπος μοιραζόμενης (shared) cache σε αντίθεση με τις ατομικές browser caches. Οι περισσότερες πληρεξούσιες caches εγκαθίστανται από μεγάλες εταιρείες και ISPs με σκοπό την μείωση του εύρους ζώνης που καταναλώνουν, καθώς υπάρχει μεγάλος αριθμός κοινών αιτήσεων για τα ίδια αντικείμενα από πολλούς χρήστες, οπότε εξυπηρετούνται από το ίδιο αποθηκευμένο αντίγραφο. Σχηματικά μια πληρεξούσια cache απεικονίζεται στην εικόνα 1.

- *Reverse proxy caches*: Τοποθετούνται κοντά στον πηγαίο εξυπηρετητή ή λειτουργούν προς όφελός του. Επιτρέπεται έτσι στον συγκεκριμένο προμηθευτή περιεχομένου να βελτιώσει την διαθεσιμότητα του περιεχομένου του, αφετέρου όμως τα οφέλη περιορίζονται στον ίδιο, σε αντίθεση με τις proxy caches που φιλοξενούν περιεχόμενο διαφορετικών προμηθευτών.



Εικόνα 1: Πληρεξούσια cache

Τα βασικά προβλήματα διαχείρισης πόρων που παρουσιάζονται στο caching είναι δύο. Το πρώτο αναφέρεται στον τρόπο και χρόνο ανανέωσης των αποθηκευμένων αντιγράφων, προκειμένου να είναι συγχρονισμένα με τα πηγαία αντικείμενα που ενδέχεται να αλλάξουν. Εάν η cache λειτουργεί παθητικά αναμένοντας αιτήσεις πελατών για περιεχόμενο, ο έλεγχος της ενημερότητας των αντιγράφων πραγματοποιείται ύστερα από κάθε αίτηση. Στην περίπτωση που λειτουργεί ενεργητικά και γεμίζεται προληπτικά με περιεχόμενο (όπως συμβαίνει στην περίπτωση των reverse

proxy caches), νέα αντίγραφα αποστέλλονται μόλις γίνονται ενημερώσεις στον πηγαίο εξυπηρετητή.

Το δεύτερο πρόβλημα, το οποίο οφείλεται στον περιορισμένο αποθηκευτικό χώρο μιας cache, είναι η επιλογή των αντικείμενων που πρέπει να αφαιρεθούν από την cache στην περίπτωση που δεν υπάρχει ελεύθερος χώρος για την αποθήκευση νέων αντικείμενων για τα οποία δεν υπάρχει αποθηκευμένο αντίγραφο. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, που συναντάται και στην διαχείριση του χώρου της μνήμης σε ένα υπολογιστικό σύστημα, υιοθετείται μια από τις υπάρχουσες πολιτικές αντικατάστασης περιεχομένου, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Τρόπος Λειτουργίας μιας cache

Για την κατανόηση της λειτουργίας μιας cache [6], ας υποθέσουμε έναν πελάτη που χρησιμοποιεί έναν πληρεξούσιο εξυπηρετητή P και ο οποίος αιτεί το αντικείμενο D από τον πηγαίο εξυπηρετητή S. Ο πελάτης στέλνει ένα HTTP GET μήνυμα αίτησης στον P για το URL *http://S/D*. Τρεις περιπτώσεις είναι δυνατές:

(1) Ο P έχει ένα αντίγραφο του D το οποίο εκτιμάται ότι είναι συνεπές(consistent) με το πρωτότυπο στον πηγαίο εξυπηρετητή.

(2) Ο P έχει ένα αντίγραφο του D το οποίο θεωρείται μη συνεπές.

(3) Ο P δεν έχει αντίγραφο του D.

Στην περίπτωση (1) ο P αποστέλλει στον πελάτη το τοπικό αντίγραφο που έχει, όποτε και θεωρείται ότι πραγματοποιείται ένα *hit*, μια *επιτυχής πρόσβαση* στην cache. Στην περίπτωση (2) Ο P αποστέλλει ένα HTTP μήνυμα στον S που περιλαμβάνει τον χρόνο από την τελευταία τροποποίηση του αντιγράφου. Εάν το πρωτότυπο τροποποιήθηκε μετά από αυτό το χρονικό σημείο ο S αποκρίνεται στον P με την νέα έκδοση του αντικείμενου, οπότε θεωρείται ότι πραγματοποιείται μια αποτυχία, ένα *miss*. Αλλιώς ο P αποστέλλει στον πελάτη το τοπικό αντίγραφο οπότε έχουμε και πάλι μια επιτυχία. Στην περίπτωση (3) Ο P προωθεί το μήνυμα GET του πελάτη είτε σε έναν άλλο πληρεξούσιο εξυπηρετητή μήπως τυχόν έχει αυτός αντίγραφο, είτε στον S. Επίσης θεωρείται ότι σημειώνεται μια *αποτυχία (miss)*.

2.3 Οφέλη υπηρεσίας caching

Το όφελος από την χρήση των caches για την διανομή περιεχομένου στο Διαδίκτυο είναι τριπλό. Συγκεκριμένα οι caches μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση τριών μεγεθών :

1. *Μείωση του αριθμού των αιτήσεων* για περιεχόμενο που εξυπηρετούν οι πηγαίοι εξυπηρετητές περιεχομένου, με επακόλουθη μείωση του επεξεργαστικού φόρτου και των δαπανών για την απαιτούμενη υποδομή του δικτυακού τόπου.
2. *Μείωση της κυκλοφορίας στο Δίκτυο*: Καθώς κάθε αντικείμενο περιεχομένου λαμβάνεται μόνο την πρώτη φορά από τον πηγαίο εξυπηρετητή και τις επόμενες από την cache, μειώνεται το ποσό εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση μιας αίτησης. Πιο συγκεκριμένα, μειώνεται το μέγεθος της κίνησης των πακέτων στο δίκτυο κορμού που οφείλεται σε αιτήσεις για περιεχόμενο, με παράλληλη μετατόπιση της κίνησης στην περιφέρεια του δικτύου όπου βρίσκονται οι caches.
3. *Μείωση της καθυστέρησης απόκρισης για τον τελικό χρήστη*: Καθώς η αίτηση ικανοποιείται από την cache που είναι πλησιέστερα στον πελάτη αντί από τον πηγαίο εξυπηρετητή, απαιτείται λιγότερος χρόνος ανάκτηση ενός αντικειμένου περιεχομένου.

Ωφελημένοι από το πρώτο κριτήριο προκύπτουν οι προμηθευτές περιεχομένου που αντιμετωπίζουν μικρότερες απαιτήσεις για υποδομή των κεντρικών τους εξυπηρετητών και εξοικονομούν δαπάνες για αγορά εύρους ζώνης μέσω της εξυπηρέτησης λιγότερων αιτήσεων.

Από το δεύτερο κριτήριο ωφελημένοι προκύπτουν οι ISPs που πληρώνουν μικρότερα ποσά στους προμηθευτές δικτύου κορμού για transit συμφωνίες μεταφοράς της κίνησής τους, καθώς εξυπηρετούν τους πελάτες τους από τις τοπικές caches αντί να προωθούν τις αιτήσεις προς τους κεντρικούς εξυπηρετητές κάνοντας μεγαλύτερη χρήση εύρους ζώνης.

Από το τρίτο κριτήριο προκύπτουν ωφελημένοι άμεσα οι τελικοί χρήστες και έμμεσα οι προμηθευτές περιεχομένου και οι ISPs, καθώς προσφέρεται καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας στους πελάτες τους και αυξάνεται ο βαθμός ικανοποίησής τους από την κατανάλωσή της.

Καθένα από τα παραπάνω οφέλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα κριτήριο απόδοσης της αποτελεσματικότητας μιας cache. Όμως, η βελτιστοποίηση του ενός κριτηρίου δεν οδηγεί απαραίτητα και στην βελτιστοποίηση ενός άλλου κριτηρίου. Η επιλογή ενός κριτηρίου προς βελτιστοποίηση εξαρτάται από το ποιος πόρος βρίσκεται σε μεγαλύτερη σπανιότητα και αποτελεί το σημείο συμφόρησης (*bottleneck*) του συστήματος: οι κύκλοι της ΚΜΕ στον εξυπηρετητή ή το εύρος ζώνης του δικτύου.

2.4 Μετρικές απόδοσης

Για καθένα από τα προαναφερθέντα κριτήρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μια διαφορετική μετρική απόδοσης. Για το κριτήριο των αριθμών αιτήσεων που φτάνουν στον πηγαίο εξυπηρετητή γίνεται χρήση του βαθμού επιτυχιών (*hit rate*), του ποσοστού δηλαδή των αιτήσεων που εξυπηρετούνται από την cache:

$$HitRate = \frac{\text{Αριθμός Αιτήσεων που εξυπηρετήθηκαν από την cache}}{\text{Συνολικός αριθμός αιτήσεων}}$$

Για το δεύτερο κριτήριο της δικτυακής κίνησης εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ο αριθμός των bytes ή των πακέτων που δεν εστάλησαν από τον εξυπηρετητή, ή η μείωση της απόστασης (αριθμός των hops δικτύου) που δεν ταξίδεψαν τα πακέτα. Μια σχετική μετρική είναι ο βαθμός επιτυχιών σταθμισμένος σε bytes (Byte Hit Rate) ο οποίος δηλώνει το ποσοστό των bytes που ζητήθηκαν από τον χρήστη και εξυπηρετήθηκαν από την cache:

$$ByteHitRate = \frac{\text{Αριθμός bytes που εξυπηρετήθηκαν από την cache}}{\text{Συνολικός αριθμός bytes που αιτήθηκαν}}$$

Για το τελευταίο κριτήριο της καθυστέρησης μια κατάλληλη μετρική απόδοσης είναι ο χρόνος μεταφοράς που αποφεύχθηκε.

2.5 Ιεραρχικό caching

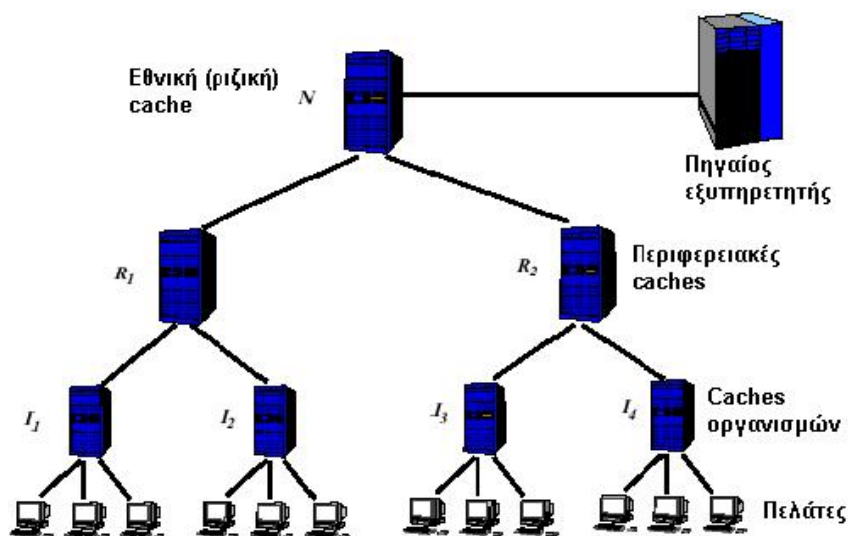
2.5.1 Οργάνωση ιεραρχικού caching

Μολονότι οι πληρεξούσιες caches είναι χρήσιμες και αποδοτικές για την εξυπηρέτηση των χρηστών ενός οργανισμού ή ενός ISP, δεν μπορούν να καλύψουν παρά μόνο ένα σχετικά μικρό πληθυσμό χρηστών. Οι ιεραρχίες από caches προσπαθούν να επιλύσουν το πρόβλημα της κλιμάκωσης με την επικοινωνία μεταξύ των πληρεξούσιων caches πριν προσπελάσουν τον πηγαίο εξυπηρετητή ([2], [16]).

Στο ιεραρχικό caching, οι caches δημιουργούν ένα πλέγμα (mesh) στο οποίο είναι λογικά οργανωμένες σε μια ιεραρχία. Αρχικά οι *εθνικές* (national) caches είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο κορμού (backbone) ευρισκόμενες στην κορυφή της ιεραρχίας. Οι *περιφερειακές* (regional) caches βρίσκονται στο χαμηλότερο επίπεδο ιεραρχίας και συνδέονται με τις εθνικές. Οι *υπό-περιφερειακές* (subregional) συνδέονται στο χαμηλότερο επίπεδο με τις περιφερειακές, ενώ οι caches των οργανισμών υπηρετούν ως πύλες (gateways) προς τις υπό-περιφερειακές caches. Στην εικόνα 2 απεικονίζεται σχηματικά η δομή μιας ιεραρχίας από caches.

Στην οργάνωση του ιεραρχικού caching, κάθε αποθηκευτικός κόμβος έχει ένα γονέα, αδελφούς (κόμβους στο ίδιο επίπεδο) και παιδιά. Ο όρος «γειτονικός» αναφέρεται στον γονέα ή σε αδελφικούς κόμβους που βρίσκονται ένα cache-hop μακριά. Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιούν για να επικοινωνήσουν οι caches σε μια ιεραρχία είναι το Internet Cache Protocol (ICP) [3].

Υπάρχουν δύο κύριοι αντικειμενικοί στόχοι κατά την σχεδίαση των ιεραρχικών caches. Ο πρώτος είναι η διασφάλιση ότι τα δημοφιλή αντικείμενα αποθηκεύονται στα χαμηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας, ενώ τα λιγότερο δημοφιλή αντικείμενα στα υψηλότερα επίπεδα. Ο δεύτερος στόχος είναι η διασφάλιση ότι όταν υπάρχει μια αποτυχία σε μια cache να ικανοποιείται η αίτηση από μια άλλη cache στο ίδιο ή υψηλότερο επίπεδο, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα προσπέλασης του πηγαίου εξυπηρετητή. Αυτοί οι δύο στόχοι μειώνουν την αντιλαμβανόμενη από το χρήστη καθυστέρηση καθώς και τη συνολική δικτυακή κίνηση.



Εικόνα 2: Λειτουργία ιεραρχικού caching

2.5.2 Επίλυση αιτήσεων

Το πρωτόκολλο επίλυσης των αιτήσεων στο ιεραρχικό caching λειτουργεί ως ακολούθως (βλ. και εικόνα 2): Έστω ένας τελικός χρήστης που εξυπηρετείται από μια cache $I1$ σε επίπεδο οργανισμού, και ο οποίος κάνει αίτηση για ένα αντικείμενο που βρίσκεται σε κάποιο πηγαίο εξυπηρετητή. Πρώτα, ο χρήστης στέλνει την αίτηση στην $I1$. Όταν η cache λάβει την αίτηση, ελέγχει εάν έχει το αιτηθέν αντικείμενο. Σε θετική περίπτωση ικανοποιεί την αίτηση παραδίδοντας το αντικείμενο από τον αποθηκευτικό της χώρο (αφού πρώτα πιθανόν επαληθεύσει με την πηγή την εγκυρότητα του αποθηκευμένου αντιγράφου). Σε αρνητική περίπτωση, κάνει πολυμετάδοση μιας ICP αίτησης στους γειτονικούς της κόμβους (τις caches $I2, I3, I4$).

Εάν ένας ή περισσότεροι γείτονες έχουν το αντικείμενο, τότε αυτό ανακτάται από τον γείτονα με την ελάχιστη καταγεγραμμένη καθυστέρηση, αποστέλλεται στον χρήστη και διατηρείται ένα τοπικό αντίγραφο. Εάν κανένας γείτονας δεν έχει το αντικείμενο, η αίτηση προωθείται είτε στον γονέα (στην περιφερειακή cache $R1$) είτε άμεσα στον πηγαίο εξυπηρετητή. Ο πηγαίος εξυπηρετητής αποτελεί την αρχική και μόνιμη αποθήκη του αντικειμένου. Η προώθηση της αίτησης σε έναν γονέα απλώς επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία. Εάν η αίτηση αποτύχει για κάθε επίπεδο της ιεραρχίας, τότε ο γονέας του ανώτερου επιπέδου ανακτά το αντικείμενο από τον πηγαίο εξυπηρετητή, το αποθηκεύει και το μεταβιβάζει προς τα κάτω στην ιεραρχία ως τον κόμβο-φύλλο από τον οποίο προήλθε η αίτηση.

Καθώς τα αντικείμενα αιτούνται μέσω της ιεραρχίας, αντίγραφά τους δημιουργούνται αυτόματα κατά μήκος του μονοπατιού που ακολουθούν. Εάν άλλος πελάτης που εξυπηρετείται από την $I1$ αιτήσει το ίδιο αντικείμενο, η $I1$ θα μπορέσει να ικανοποιήσει την αίτηση του από την cache της. Παρομοίως εάν ένας πελάτης υπό την $I2$ ζητήσει το ίδιο αντικείμενο, τότε η αίτηση του θα χρειασθεί να ταξιδέψει μόνο μέχρι την $R1$ που έχει ένα αντίγραφο του αντικειμένου.

2.5.3 Προβλήματα ιεραρχικού caching

Ένα κύριο πρόβλημα με μια ιεραρχία από caches είναι ότι ενδέχεται να εισάγει μια σημαντική επιπρόσθετη καθυστέρηση στις αιτήσεις. Εάν ένας πελάτης ζητήσει ένα μη δημοφιλές αντικείμενο το οποίο δεν είναι αποθηκευμένο σε καμία cache, η αίτηση θα πρέπει και πάλι να διασχίσει όλη την ιεραρχία προς τα ανώτερα επίπεδα πριν η cache ανωτέρου επιπέδου στείλει την αίτηση στον πηγαίο εξυπηρετητή. Αυτή η

καθυστέρηση μπορεί να επιδεινωθεί από πρωτόκολλα όπως το ICP το οποίο στην χειρότερη περίπτωση μπορεί να επιβάλλει μια πρόσθετη καθυστέρηση 2 δευτερολέπτων σε κάθε βήμα της ιεραρχίας.

Επίσης δεν παρέχεται καμία εγγύηση ότι οι caches υψηλότερα στην ιεραρχία βρίσκονται πλησιέστερα στον πηγαίο εξυπηρετητή. Το τελευταίο πρόβλημα συνήθως επιλύεται με φιλτράρισμα των αιτήσεων που αποστέλλονται προς την κορυφή της ιεραρχίας. Για παράδειγμα, η εθνική cache μπορεί να δέχεται αιτήσεις μόνο για αντικείμενα των οποίων η χώρα προέλευσης (όπως διακρίνεται από το URL τους) είναι στο εξωτερικό.

2.6 Γενικά προβλήματα παραδοσιακού caching

Η εγκατάσταση caches είτε πρόκειται για απλούς πληρεξούσιους εξυπηρετητές ενός οργανισμού ή για μια ιεραρχία caching, έχει συνοδευτεί από την εμφάνιση μιας σειράς προβλημάτων ([16], [35]). Το κυριότερο από αυτά είναι ότι ο προμηθευτής περιεχομένου χάνει τον έλεγχο στο περιεχόμενό του από την στιγμή που αυτό ανακτηθεί από τον πηγαίο εξυπηρετητή και τοποθετηθεί σε μια cache. Έτσι, οι προμηθευτές περιεχομένου παρά τα όποια πλεονεκτήματα που αποκομίζουν από την αποθήκευση του περιεχομένου τους κοντά στους τελικούς χρήστες, συχνά προτιμούν να χαρακτηρίζουν το περιεχόμενό τους ως μη αποθηκεύσιμο (non-cacheable) ώστε να μην αντιγράφεται στις caches. Η τακτική τους αυτή οφείλεται σε ορισμένα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι παραδοσιακές τεχνικές caching.

Καταρχήν, η υποστήριξη για αποθήκευση δυναμικού περιεχομένου στις caches έχει υπάρξει για αρκετό καιρό από ελάχιστη έως ανύπαρκτη. Ως εκ τούτου οι προμηθευτές περιεχομένου αποφεύγουν το caching λόγω του κινδύνου παράδοσης στον τελικό χρήστη περιεχομένου μη ενημερωμένου με τις τελευταίες αλλαγές που έγιναν στο πρωτότυπο του πηγαίου εξυπηρετητή. Ο προμηθευτής περιεχομένου δεν κατέχει έναν αξιόπιστο τρόπο για να εξασφαλίσει ότι μετά από μια ενημέρωση του περιεχομένου όλοι οι χρήστες θα λάβουν πάντοτε το νέο περιεχόμενο. Υπάρχουν μερικοί απλοί μηχανισμοί για την πληροφόρηση των caches σχετικά με αλλαγές στο περιεχόμενο, όπως η επικεφαλίδα “Expires” ή οι μηχανισμοί ελέγχου της cache του HTTP/1.1 αλλά δεν έχουν τύχει ευρείας ανάπτυξης.

Επίσης, το απλό caching οδηγεί σε απώλεια επιχειρηματικής γνώσης όσον αφορά τους επισκέπτες των δικτυακών τόπων των προμηθευτών περιεχομένου. Η

ακρίβεια των αναφορών πρόσβασης και πλοήγησης των πελατών στο δικτυακό τόπο κατέχει κρίσιμο ρόλο όσον αφορά το μάρκετινγκ και την προώθηση πωλήσεων. Το caching μπορεί να επιφέρει απώλεια της ακρίβειας των στατιστικών προσπέλασης καθώς ο πηγαίος εξυπηρετητής που τα διατηρεί, μπορεί να μην ενημερωθεί κατά την παράδοση περιεχομένου από την cache αντί του ιδίου.

Επιπλέον, μια ποικιλία τεχνικών ηλεκτρονικού μάρκετινγκ στηρίζεται στην εξατομίκευση του περιεχομένου με χρήση cookies. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις caching παρακωλύουν τις υπηρεσίες εξατομίκευσης λόγω της πιθανότητας παράδοσης περιεχόμενου σε άλλο χρήστη από τον αρχικά προοριζόμενο.

Τέλος, οι υπηρεσίες caching μπορεί ενδεχομένως να δημιουργήσουν νέες προκλήσεις όσον αφορά την ασφάλεια, όπως παραβίαση εμπιστευτικότητας, ακεραιότητας ή αυθεντικοποίησης για ευαίσθητα δεδομένα π.χ. ιατρικούς φακέλους, όταν αυτά δεν βρίσκονται υπό τον άμεσο έλεγχο των προμηθευτών τους.

Προκείμενου, συνεπώς, να αποφύγουν το πρόβλημα των caches να παραδίδουν «μπαγιάτικο» (stale) ή μη-ενημερωμένο περιεχόμενο, αρκετοί προμηθευτές περιεχομένου καταφεύγουν στον χαρακτηρισμό του συνόλου του περιεχομένου τους ως μη-αποθηκεύσιμου (non-cacheable) ώστε να μην διατηρείται καθόλου στις caches. Αυτή η λύση, μολονότι είναι αποτελεσματική στην επίλυση του προβλήματος της παράδοσης μη-ενημερωμένου περιεχομένου, είναι επιζήμια ως προς τον σκοπό εγκατάστασης των caches, καθώς πλέον δεν μπορούν να αποθηκεύσουν περιεχόμενο. Αυτό το πρόβλημα αποτέλεσε και το κύριο έναυσμα για την ανάπτυξη και την επιτυχία των Δικτύων Διανομής Περιεχομένου - ΔΔΠ (Content Distribution Networks – CDN), τα οποία παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

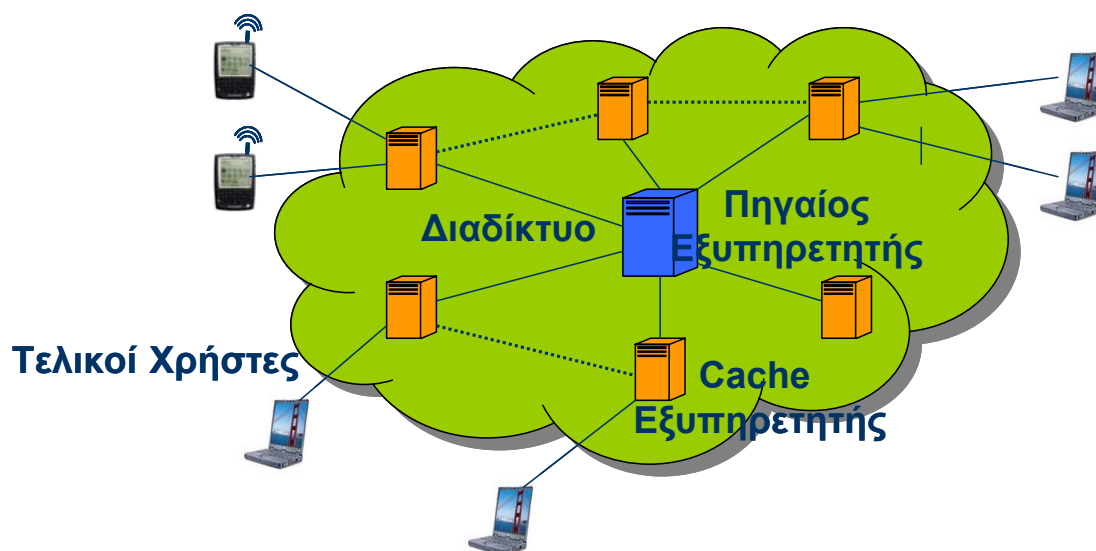
ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ (ΔΔΠ)

3.1 Υπηρεσίες διανομής και παράδοσης περιεχομένου

Οι υπηρεσίες διανομής και παράδοσης περιεχομένου παρέχουν ένα επίπεδο υπηρεσιών που συμπληρώνει και επεκτείνει το Διαδίκτυο προωθώντας προληπτικά περιεχόμενο υψηλής ζήτησης όσο δυνατόν πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες και δρομολογώντας κάθε αίτηση χρήστη στο βέλτιστο διαθέσιμο εξυπηρετητή. Προσπαθώντας να κάνουμε μια διάκριση μεταξύ των όρων διανομή και παράδοση περιεχομένου, θα μπορούσαμε να ορίσουμε την παράδοση περιεχομένου ως την απευθείας εξυπηρέτηση περιεχομένου προς τους τελικούς χρήστες, ενώ την διανομή περιεχομένου ως την μετάδοση περιεχομένου από έναν κεντρικό εξυπηρετητή προς πολλούς περιφερειακούς εξυπηρετητές εγκαταστημένους στο άκρο του δικτύου.

Τα δίκτυα διανομής και παράδοσης περιεχομένου έχουν προκύψει σαν δίκτυα προστιθέμενης αξίας πάνω στην υπάρχουσα υποδομή του Διαδικτύου, προσφέροντας νέες δυνατότητες για την επεξεργασία των ροών περιεχομένου, μέσω της αναγνώρισης του τύπου του, της δρομολόγησης των αιτήσεων στο βέλτιστο εξυπηρετητή και της δυναμικής σύνθεσης περιεχομένου. Δημιουργείται ένα νέο «παράδειγμα» (paradigm), η περιεχόμενο-γνωστική δικτύωση (content-aware networking), όπου τα στοιχεία του δικτύου (network elements) έχουν την απαραίτητη ευφυΐα να αναγνωρίσουν και να κατανοήσουν το συγκεκριμένο περιεχόμενο που αιτήθηκε, επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο την βέλτιστη προώθηση της κίνησης και παράδοση του περιεχομένου [7], [8], [11], [36].

Ένα Δίκτυο Διανομής Περιεχομένου – ΔΔΠ (Content Distribution Network) αποτελείται από μια συλλογή ενδιάμεσων (μη-πηγαίων) caching εξυπηρετητών, οι οποίοι προσπαθούν να αποδεσμεύσουν ένα μέρος του φόρτου εργασίας από τους πηγαιούς εξυπηρετητές παραδίδοντας δικτυακό περιεχόμενο εκ μέρους τους. Οι εξυπηρετητές που ανήκουν σε ένα ΔΔΠ μπορεί να είναι τοποθετημένοι στον ίδιο φυσικό χώρο με τον πηγαίο εξυπηρετητή, ή σε διαφορετικές τοποθεσίες στο δίκτυο, κοντά στον τελικό χρήστη. Μια σχηματική αναπαράσταση ενός ΔΔΠ διακρίνεται στην εικόνα 3.



Εικόνα 3 : Δίκτυο Διανομής Περιεχομένου

Υπάρχουν δύο συστήματα ΔΔΠ ανάλογα με το μέρος του περιεχομένου του πηγαίου εξυπηρετητή που αντιγράφεται στις caches των εξυπηρετητών ενός ΔΔΠ. Στην περίπτωση που αντιγράφεται το σύνολο το περιεχομένου ακολουθείται το σύστημα της πλήρους αναπαραγωγής του περιεχομένου ενός δικτυακού τόπου (full site replication scheme), ενώ στην περίπτωση που αντιγράφεται μόνο ένα μέρος το σύστημα της μερικής αναπαραγωγής του περιεχομένου ενός δικτυακού τόπου (partial site replication scheme). Στο σύστημα της πλήρους αναπαραγωγής περιεχομένου δικτυακού τόπου αντιγράφεται το σύνολο του περιεχομένου του δικτυακού τόπου από τον πηγαίο εξυπηρετητή στους κόμβους του ΔΔΠ. Στο σύστημα της μερικής αναπαραγωγής περιεχομένου δικτυακού τόπου αντιγράφεται μόνο ένα υποσύνολο των αντικειμένων (κυρίως στατικά και μεγάλα σε μέγεθος αντικείμενα όπως εικόνες, γραφικά κτλ.) από τον πηγαίο εξυπηρετητή του προμηθευτή περιεχομένου στους εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ.

3.2 Οφέλη Δικτύων Διανομής Περιεχομένου

Τα κυριότερα οφέλη από την χρήση των Δικτύων Διανομής Περιεχομένου σε σύγκριση με τις best-effort υπηρεσίες μετάδοσης που προσφέρουν τα κατώτερα επίπεδα του Διαδικτύου μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- *Πολλαπλασιασμός του εύρους ζώνης:* Τα συστήματα διανομής περιεχομένου μπορούν να διπλασιάσουν τη χωρητικότητα της ζεύξης από τον χρήστη προς τον εξυπηρετητή περιεχομένου, εάν το μεγαλύτερο ποσοστό των αιτήσεων ικανοποιείται τοπικά από cache εξυπηρετητές.

- *Αγοραπωλησία εύρους ζώνης*: Για τους ISPs και τους παρόχους δικτυακών υπηρεσιών η μετατόπιση της κυκλοφορίας από τον πυρήνα του Διαδικτύου στον τοπικό βρόγχο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας. Με την τοπική αναπαραγωγή και αποθήκευση του περιεχομένου οι ISPs μπορούν να χρησιμοποιήσουν τοπικό εύρος ζώνης, που έχει χαμηλότερο κόστος από το εύρος ζώνης δικτύου κορμού, και να διαχειρισθούν αποτελεσματικότερα το κόστος της παράδοσης περιεχομένου υψηλών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης.
- *Βελτίωση της απόδοσης*: Με την τοπική αποθήκευση δημοφιλούς περιεχομένου πλησιέστερα στον τελικό χρήστη μειώνονται κατά μέσο όρο στο μισό οι χρόνοι φόρτωσης των σελίδων.
- *Έλεγχος εκρήξεων κοσμοσυρροής (flash-crowds)*: Όταν ιστοσελίδες ή μεταδόσεις γεγονότων προσπελάζονται ταυτόχρονα από μεγάλα πλήθη, η προληπτική αναπαραγωγή και αποθήκευση του περιεχομένου σε περιφερειακές caches κατανέμει τον φόρτο σε όλο το Διαδίκτυο και αποτρέπει συνωστισμούς στους πηγαίους εξυπηρετητές.

Βέβαια, η ποιότητα της υπηρεσίας διανομής περιεχομένου εξαρτάται άμεσα και από το μέγεθος του ΔΔΠ, δηλαδή τον αριθμό των τοποθεσιών όπου έχει εγκαταστήσει caches ο προμηθευτής της υπηρεσίας αυτής [42]. Η ύπαρξη περισσότερων κόμβων στο ΔΔΠ με περιφερειακές caches υπονοεί μια μικρότερη μέση απόσταση από έναν τελικό χρήστη προς μια τέτοια cache. Από την στιγμή κιάλας που ένας διανομέας περιεχομένου επιτρέπει την πρόσβαση στην πληροφορία να γίνεται τοπικά αντί με χρήση του κορμού δικτύου (backbone) του Διαδικτύου, βρίσκεται σε άμεσο ανταγωνισμό με τους προμηθευτές υπηρεσιών δικτύου κορμού (Backbone Service Providers). Αυτός ο ανταγωνισμός επηρεάζεται κατά πολύ από τις σχετικές τιμές του αποθηκευτικού χώρου και του εύρους ζώνης. Μια μεγάλη αύξηση στην τιμή αγοράς εύρους ζώνης με σταθερή την τιμή αποθήκευσης, θα είχε σαν συνέπεια, εφόσον πρόκειται για υποκατάστατα αγαθά, την αύξηση της ζήτησης για υπηρεσίες διανομής περιεχομένου.

3.3 Λειτουργίες ενός ΔΔΠ

Τα ΔΔΠ προσπαθούν να επιλύσουν τα προβλήματα της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο μέσω της αποθήκευσης και διανομής περιεχομένου από πολλές κατακεντρωμένες τοποθεσίες παρά από λίγα κεντρικά πηγαία σημεία. Με την χρήση

τεχνολογιών caching, τα ΔΔΠ φυλάσσουν αντίγραφα του αυθεντικού περιεχομένου κοντά στους τελικούς χρήστες, αποφεύγοντας την επανειλημμένη μετάδοση πανομοιότυπων εκδόσεων του περιεχομένου από κάποιον κεντρικό εξυπηρετητή. Το αποτέλεσμα είναι η επιτάχυνση της διαδικασίας και βελτίωση της ποιότητας του περιεχομένου που παραδίδεται στους χρήστες, με την παράλληλη μείωση της δικτυακής συμφόρησης και των δαπανών για χρήση εύρους ζώνης από τους ISP.

Για κάθε αίτηση περιεχομένου, το ΔΔΠ προσπαθεί να εντοπίσει ένα εξυπηρετητή του πλησίον του πελάτη για την παράδοση του περιεχομένου, όπου η έννοια «πλησίον» περιλαμβάνει παράγοντες γεωγραφικούς, τοπολογικούς και καθυστέρησης του δικτύου. Με την χρήση ΔΔΠ, οι πηγαίοι εξυπηρετητές τηρούν τον έλεγχο πάνω στο περιεχόμενο και μπορούν να προχωρήσουν στην σύναψη ξεχωριστών συμφωνιών με τους εξυπηρετητές που διανέμουν το περιεχόμενο αντί αυτών.

Συνοπτικά οι κύριες λειτουργίες ενός ΔΔΠ είναι οι ακόλουθες: Αντιγραφή, διανομή, αποθήκευση περιεχομένου σε τοπικούς εξυπηρετητές στην άκρη του δικτύου, εξασφάλιση της ενημερότητας των δεδομένων, και κατεύθυνση των χρηστών προς τους πλέον κατάλληλους εξυπηρετητές. Πιο αναλυτικά:

- Το πρώτο βήμα είναι η αντιγραφή, διανομή και αποθήκευση περιεχομένου σε τοπικούς εξυπηρετητές. Το περιεχόμενο μπορεί να διανεμηθεί από τον πηγαίο εξυπηρετητή στην άκρη του δικτύου μέσω επίγειων συνδέσεων από το Διαδίκτυο ή μέσω δορυφορικών ζεύξεων. Μολονότι η διανομή μέσω του Διαδικτύου είναι η απλούστερη και πιο διαδεδομένη μέθοδος, η χρήση δορυφόρου ως μέσου διανομής κατέχει τα πλεονεκτήματα αποδοτικότητας, αξιοπιστίας και μεγαλύτερης εξοικονόμησης κόστους. Επιπλέον μέσω δορυφορικών ζεύξεων μπορεί να διανεμηθεί περιεχόμενο υψηλών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, όπως streaming εφαρμογές πραγματικού χρόνου, σε περιοχές με έλλειψη επαρκούς επίγειας τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Μολονότι η μεταφορά δεδομένων πάνω από δορυφόρο είναι απαγορευτικά ακριβή για συνδέσεις από σημείο σε σημείο, υπερέχει για συνδέσεις πολυμετάδοσης από ένα σε πολλά σημεία, σε σχέση με τις επίγειες συνδέσεις.
- Τα συστήματα διανομής περιεχομένου ενημερώνουν, αποθηκεύουν και παραδίδουν στους τελικούς χρήστες αντίγραφα του γνήσιου περιεχομένου από το άκρο του δικτύου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ενημέρωσης του περιεχομένου.

Μερικά συστήματα προωθούν προληπτικά περιεχόμενο στους τοπικούς εξυπηρετητές υπό την καθοδήγηση ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου, ή προωθούν ενημερώσεις όταν αυτές πραγματοποιούνται στον πηγαίο εξυπηρετητή. Εναλλακτικά, το κεντρικό σύστημα κατευθύνει τις αιτήσεις σε συγκεκριμένους εξυπηρετητές και αυτοί κατόπιν ανακτούν το περιεχόμενο σε βάση ζήτησης.

- Τέλος τα συστήματα διανομής περιεχομένου δρομολογούν εισερχόμενες αιτήσεις περιεχομένου στον κατάλληλο εξυπηρετητή αντιγράφων. Αυτή η δρομολόγηση βελτιστοποιεί τους χρόνους πρόσβασης και μειώνει το κόστος της παράδοσης περιεχομένου. Μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την δρομολόγηση των αιτήσεων είναι η ανακατεύθυνση κατά HTTP, IP ή DNS.

3.4 Συστατικά στοιχεία ενός ΔΔΠ

Προκειμένου να επιτελέσει αποτελεσματικά τις παραπάνω λειτουργίες ένα ολοκληρωμένο σύστημα ΔΔΠ πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα θεμελιώδη συστατικά στοιχεία [7], [8], [36]:

1. *Μηχανισμό διανομής και διαχείρισης περιεχομένου* (content distribution and management), που διανέμει το περιεχόμενο σε κόμβους παράδοσης στο άκρο του δικτύου. Η κεντρική διαχείριση προσδιορίζει την προμήθεια περιεχομένου και τις ρυθμίσεις πολιτικής για όλους τους κόμβους μέσα στο ΔΔΠ και είναι υπεύθυνη για τον συγχρονισμό του περιεχομένου στον πηγαίο εξυπηρετητή με τα αντίγραφα στους cache εξυπηρετητές. Ο συγχρονισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με πρωτοβουλία του πηγαίου εξυπηρετητή και προώθηση του περιεχομένου καθώς αυτό τροποποιείται, είτε με αντιγραφή του περιεχομένου από τους cache εξυπηρετητές καθώς αυξάνεται η ζήτηση του από τους τελικούς χρήστες.
2. *Μηχανισμό δρομολόγησης περιεχομένου* (content routing), ο οποίος κατευθύνει τις αιτήσεις των χρηστών στους βέλτιστους πόρους του ΔΔΠ, βάσει μετρήσεων πραγματικού χρόνου που περιλαμβάνουν την καθυστέρηση, την τοπολογία του δικτύου, τον φόρτο των εξυπηρετητών και πολιτικές όπως η τοποθεσία του περιεχομένου. Πρέπει να υπάρχει μια μηχανή λογισμικού εγγύτητας, η οποία λαμβάνει αιτήσεις ανάλυσης ονόματος DNS και συνδέει συγκεκριμένες αιτήσεις περιεχομένου με τους πλησιέστερους εξυπηρετητές.
3. *Μηχανισμό μεταγωγής περιεχομένου* (content switching), ο οποίος εξισορροπεί την κίνηση ανάμεσα στους κόμβους παράδοσης που βρίσκονται είτε στα σημεία

παρουσίας (Point-Of-Presence POPs) των παρόχων πρόσβασης είτε σε κατακευματισμένα κέντρα δεδομένων. Τα στοιχεία μεταγωγής περιεχομένου προσδιορίζουν τον τρόπο εξισορρόπησης του φορτίου αιτήσεων βάσει της διαθεσιμότητας του περιεχομένου και του φόρτου των εξυπηρετητών. Με αυτήν την μέθοδο όχι μόνο προστατεύεται από παρεμβολές και διακοπές διαθεσιμότητας κρίσιμο περιεχόμενο, όπως υπηρεσίες ηλεκτρονικού εμπορίου, αλλά είναι δυνατή και η παροχή εξατομικευσης του περιεχομένου για τους καταναλωτές.

4. *Μηχανισμό παράδοσης περιεχομένου από το άκρο του δικτύου* (content edge delivery), ο οποίος επιτελεί την κρίσιμη λειτουργία αποστολής του ακριβούς περιεχομένου στον τελικό χρήστη.

5. *Ευφρείς υπηρεσίες δικτύου* (intelligent network services), οι οποίες συμπεριλαμβάνουν λειτουργίες υποδομής IP – όπως ποιότητα υπηρεσίας (QOS), ιδεατά ιδιωτικά δίκτυα (VPNs) και πολυμετάδοση – που υποβοηθούν τα υπόλοιπα στοιχεία ενός συστήματος ΔΔΠ.

6. *Ένα διαχειριστικό πλαίσιο* – Επιτρέπει στους παρόχους των υπηρεσιών διανομής και παράδοσης περιεχομένου να παρακολουθούν, διαχειρίζονται, και να ελέγχουν τις διαδικασίες όπως απαιτείται.

3.5 Μηχανισμοί Ανακατεύθυνσης Χρηστών

Ένα από τα κύρια προβλήματα σε ένα κατακευματισμένο δίκτυο διανομής περιεχομένου είναι η εξασφάλιση ότι οι τελικοί χρήστες θα μπορέσουν να εντοπίσουν το αντιγραμμένο περιεχόμενο σε κάποια περιφερειακή cache. Οι *μηχανισμοί ανακατεύθυνσης χρηστών* (client redirection mechanisms) έρχονται να δώσουν απάντηση σε αυτό το ερώτημα κατευθύνοντας τις αιτήσεις των χρηστών για κάποιο αντικείμενο που εξυπηρετείται από το ΔΔΠ προς τον βέλτιστο εξυπηρετητή στο δίκτυο. Η βελτιστότητα είναι μια απόφαση πολιτικής που βασίζεται στον παράγοντα της εγγύτητας της ρέπλικας (του πληρεξούσιου εξυπηρετητή) προς τον πελάτη, αλλά μπορεί και να χρησιμοποιεί άλλα κριτήρια όπως το φόρτο εργασίας και την συμφόρηση των γραμμών του δικτύου. Μια αναλυτική παρουσίαση των μηχανισμών ανακατεύθυνσης χρηστών σε ένα ΔΔΠ περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Β.

Τα κυριότερα συστήματα επικοινωνίας μεταξύ πελάτη και ρέπλικας πηγαίων εξυπηρετητών Ιστού που έχουν εμφανισθεί στο Διαδίκτυο χρονικά είναι οι *Σύνδεσμοι Πλοήγησης*, όπου ο χρήστης επιλέγει χειρωνακτικά μια ρέπλικα του πηγαίου

εξυπηρετητή, η *HTTP Ανακατεύθυνση*, με χρήση ειδικών κωδικών απόκρισης του HTTP, και τέλος η *Ανακατεύθυνση βάσει DNS*, που αποτελεί την πλέον εξελιγμένη και διαδεδομένη τεχνική για την κατεύθυνση των αιτήσεων των χρηστών προς τον βέλτιστο εξυπηρετητή σε ένα καταμεμημένο δίκτυο εξυπηρετητών περιεχομένου. Στην τελευταία μέθοδο, ο εξυπηρετητής DNS του πηγαίου εξυπηρετητή ανακατευθύνει τις αιτήσεις των χρηστών αντιστοιχίζοντας την ονομαστική διεύθυνση του πηγαίου εξυπηρετητή στην IP διεύθυνση ενός εξυπηρετητή περιεχομένου του ΔΔΠ. Αυτή η αντιστοίχιση πραγματοποιείται βάσει παραγόντων όπως είναι η διαθεσιμότητα πόρων και η κατάσταση του δικτύου.

Όσον αφορά την μέθοδο της Ανακατεύθυνσης βάσει DNS, διακρίνονται δύο μηχανισμοί, ανάλογα με το εάν είναι αντιγραμμένο το σύνολο ενός δικτυακού τόπου στο ΔΔΠ ή μόνο ένα μέρος του. Στην πρώτη περίπτωση ακολουθείται ο μηχανισμός της *πλήρους ανακατεύθυνσης* (full redirection) των χρηστών, ενώ στην δεύτερη περίπτωση ο μηχανισμός της *επιλεκτικής ανακατεύθυνσης* (selective redirection) των χρηστών.

Με το μηχανισμό της *πλήρους ανακατεύθυνσης* όλες οι αιτήσεις των πελατών προς τον πηγαίο εξυπηρετητή ανακατευθύνονται μέσω του DNS προς κάποιον εξυπηρετητή περιεχομένου του ΔΔΠ. Το κύριο όφελος από αυτό τον μηχανισμό είναι ότι όλες οι αιτήσεις των πελατών πάντοτε αποστέλλονται πρώτα στους εξυπηρετητές περιεχομένου και όχι στους πηγαίους εξυπηρετητές. Ένα άλλο πλεονέκτημα της πλήρους ανακατεύθυνσης είναι ότι προσαρμόζεται δυναμικά στην δημιουργία νέων «θερμών σημείων» (hot-spots), καθώς όλες οι αιτήσεις των πελατών ανακατευθύνονται σε γεωγραφικά διασκορπισμένους εξυπηρετητές περιεχομένου.

Με το μηχανισμό της επιλεκτικής ανακατεύθυνσης, τροποποιούνται οι αναφορές στα αντιγραμμένα αντικείμενα έτσι ώστε να δείχνουν προς έναν εξυπηρετητή περιεχομένου του ΔΔΠ. Πιο συγκεκριμένα, ο πηγαίος εξυπηρετητής μετατρέπει τα ενσωματωμένα στις ιστοσελίδες URLs των αντικείμενων που έχουν αντιγραφεί στο ΔΔΠ έτσι ώστε οι ονομαστικές διευθύνσεις των εξυπηρετητών να αναλύονται από τον εξυπηρετητή DNS του φορέα ΔΔΠ σε IP διευθύνσεις εξυπηρετητών περιεχομένου του ΔΔΠ. Το όφελος από τον μηχανισμό της επιλεκτικής ανακατεύθυνσης είναι ότι μόνο αντικείμενα τα οποία χρειάζεται λόγω μεγέθους να αναπαραχθούν τοποθετούνται στους εξυπηρετητές περιεχομένου, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις χωρητικότητας.

3.6 Κανόνες πολιτικών για Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου

3.6.1 Εισαγωγή στις Πολιτικές Δικτύου

Γενικά οι *πολιτικές δικτύου* (network policies) είναι ένα σύνολο κανόνων για την διοίκηση, διαχείριση, και τον έλεγχο πρόσβασης σε δικτυακούς πόρους. Οι πολιτικές παρέχουν έναν τρόπο για την συνεπή διαχείριση πολλαπλών συσκευών που υλοποιούν πολύπλοκες τεχνολογίες από ένα κεντρικό σημείο. Ο βασικός κανόνας για τον καθορισμό μιας πολιτικής είναι μια έκφραση της μορφής «Αν ισχύει η X συνθήκη ακολούθησε την ενέργεια Y».

Σε ένα δίκτυο διανομής περιεχομένου οι πόροι που πρέπει να διαχειρισθούν συνετά είναι οι διαθέσιμοι αποθηκευτικοί χώροι στις περιφερειακές caches του δικτύου. Γι αυτό πρέπει να καθορισθούν πολιτικές κατάλληλες [9] για τον έλεγχο της διανομής των προγραμμάτων και των αρχείων ανάμεσα στους διάφορους κόμβους του εικονικού δικτύου των caches. Μια πολιτική στο πλαίσιο ενός δικτύου διανομής περιεχομένου θα ήταν μια δήλωση που καθορίζει ποιος τύπος προγραμμάτων / δεδομένων μπορεί να μεταφερθεί σε έναν κόμβο του διανομέα περιεχομένου, και ποιος τύπος προγραμμάτων / δεδομένων πρέπει να εκτελείται στον πηγαίο εξυπηρετητή (origin server).

Με αυτόν τον ορισμό της πολιτικής υπάρχουν μόνο δυο τύποι πιθανών ενεργειών. Συγκεκριμένα ένα αρχείο / πρόγραμμα είναι είτε αποθηκεύσιμο, (όπου είναι δυνατόν ένα πρόγραμμα να εκτελεσθεί σε έναν κόμβο του ΔΔΠ ή ένα αντικείμενο περιεχομένου να αντιγράψει και αποθηκευθεί σε έναν κόμβο του ΔΔΠ), είτε μη αποθηκεύσιμο και πρέπει να εκτελείται στον πηγαίο εξυπηρετητή. Παρόλα αυτά κάθε τύπος αποθήκευσης συνοδεύεται από υποθέσεις σχετικά με τον τρόπο διατήρησης της συνέπειας των αποθηκευμένων δεδομένων. Δηλαδή όταν μια ενέργεια καθορίζει ότι ένα αντικείμενο είναι αποθηκεύσιμο πρέπει παράλληλα να ορίζει και το μοντέλο συνέπειας που οφείλει να ακολουθηθεί από το αποθηκευμένο αντικείμενο, ή αλλιώς το προφίλ αποθηκευσιμότητας του.

3.6.2 Μοντέλα Συνέπειας

Διάφορες εφαρμογές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σχετικά με την συνέπεια των αποθηκευμένων δεδομένων στις caches. Στην περίπτωση της αποθήκευσης στατικού περιεχομένου ιστοσελίδων τρία διαφορετικά μοντέλα συνέπειας είναι ευρέως διαδεδομένα. Το πρώτο μοντέλο, η *ισχυρή συνέπεια* (strong consistency), απαιτεί από

κάθε πρόσβαση στην αποθηκευμένη σελίδα να επιστρέφει το πλέον ενήμερο αντίγραφο της σελίδας (δηλ. την σελίδα που γράφτηκε τελευταία φορά στον πηγαίο εξυπηρετητή). Αυτός ο τύπος συνέπειας μπορεί να εγγυηθεί μέσω της επικύρωσης της αποθηκευμένης σελίδας έναντι του πηγαίου εξυπηρετητή σε κάθε πρόσβαση στην cache. Μια άλλη προσέγγιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί απαιτεί από τον πηγαίο εξυπηρετητή να ακυρώνει (δηλ. να ανανεώνει) όλα τα αντίγραφα στις caches πριν την συμπλήρωση μιας ενημέρωσης στο κύριο αντίγραφο της σελίδας. Δηλαδή μια ενημέρωση στον κεντρικό εξυπηρετητή προωθείται προς τους κόμβους του άκρου πριν θεωρηθεί ολοκληρωμένη.

Ένα δεύτερο μοντέλο συνέπειας, η *χρονικά-περιορισμένη συνέπεια*, (time-limited consistency) προϋποθέτει την ενημέρωση μιας αποθηκευμένης σελίδας μέσα σε ένα συγκεκριμένο μέγιστο χρονικό παράθυρο σε ακολουθία μιας ενημέρωσης του κύριου αντίγραφου στον πηγαίο εξυπηρετητή. Αυτό το μοντέλο μπορεί να υλοποιηθεί με την ανανέωση των αποθηκευμένων αντιγράφων σε αρκετά συχνά τακτικά χρονικά διαστήματα.

Ένα τρίτο μοντέλο συνέπειας, η *χαλαρή συνέπεια* (loose consistency), απαιτεί από τις αποθηκευμένες σελίδες στην cache να ενημερώνονται όσο πιο σύντομα το δίκτυο μπορεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί έχοντας τον πηγαίο εξυπηρετητή να συλλέγει σε δεσμίδες τις ενημερώσεις ή ακυρώσεις (invalidations) και να τις μεταδίδει στις caches του άκρου του δικτύου λιγότερο συχνά από ότι στα αλλά μοντέλα σύμφωνα με μια πολιτική βέλτιστης προσπάθειας. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο μπορεί να βοηθήσει στην προφύλαξη του δικτύου από αυξημένο φόρτο και μεγάλη κατανάλωση εύρους ζώνης και παράλληλα να είναι επαρκές για τις ανάγκες ορισμένων εφαρμογών.

3.6.3 Άλλες πολιτικές δικτύου για ΔΔΠ

Πέρα από το μοντέλο συνέπειας υπάρχουν και άλλες αποφάσεις πολιτικής του δικτύου που πρέπει να ληφθούν. Έτσι, δεν μπορούν να θεωρηθούν όλα τα δεδομένα ότι είναι αποθηκεύσιμα σε όλες τις τοποθεσίες. Μερικοί από τους κόμβους του ΔΔΠ που είναι διάσπαρτοι σε διάφορες τοποθεσίες μπορεί να υπόκεινται σε περιορισμούς που δεν τους επιτρέπουν να αποθηκεύουν περιεχόμενο συγκεκριμένων τύπων. Επομένως πρέπει να υπάρχει μια ενέργεια πολιτικής η οποία να περιορίζει την λειτουργία της αποθήκευσης να τελείται σε συγκεκριμένες μόνο τοποθεσίες.

Σε αρκετές περιπτώσεις η απόφαση για αντιγραφή και αποθήκευση εφαρμογών ή περιεχομένου στους κόμβους ενός ΔΔΠ προσδιορίζεται από την τρέχουσα κατάσταση

του δικτύου. Ένας κόμβος του ΔΔΠ μπορεί να χρειάζεται μόνο εάν υπάρχουν ορισμένα σημεία συμφόρησης στο δίκτυο τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα της υπηρεσίας προς τον χρήστη, ενώ αντιθέτως να μην παρέχει μεγάλη αξία σε ένα μη συμφορημένο δίκτυο. Παρόμοια, ορισμένοι πηγαίοι εξυπηρετητές μπορεί να επιθυμούν την χρησιμοποίηση ενός ΔΔΠ μόνο σε περιπτώσεις απότομης αύξησης του φόρτου.

Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να ορισθεί ένα ελάχιστο όριο που να προσδιορίζει τον ρυθμό αφίξεων πέρα από τον οποίο να επιτρέπεται η αντιγραφή του περιεχομένου στους κόμβους του ΔΔΠ. Για αυτό τον λόγο πρέπει να υπάρχει μια ξεχωριστή διαδικασία πέρα από το πλαίσιο των πολιτικών για την παρακολούθηση του φόρτου εργασίας στο σύστημα, τόσο στον πηγαίο εξυπηρετητή όσο και στους κόμβους του ΔΔΠ. Για παράδειγμα ένα σύστημα ελέγχου της απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιήσει την πληροφορία για τον φόρτο ενός εξυπηρετητή και να το ταξινομήσει ως υποφορτωμένο, μέτρια φορτωμένο και υπερφορτωμένο. Η αντιγραφή και αποθήκευση του περιεχομένου ή των εφαρμογών στους κόμβους του ΔΔΠ θα επιτρεπόταν μόνο όταν ο φόρτος του εξυπηρετητή θεωρείτο αρκετά υψηλός.

3.7 Υπηρεσίες Άκρου – *Caching Δυναμικού Περιεχόμενου*

Η εμφάνιση των δικτύων διανομής περιεχομένου δεν επιταχύνει μόνο την απόδοση της διαδικασίας παράδοσης περιεχομένου στο Διαδίκτυο και σε εταιρικά δίκτυα, άλλα επιτρέπει επίσης την παράδοση νέων εξειδικευμένων υπηρεσιών από το άκρο δικτύου. Οι νέες αυτές υπηρεσίες καλούνται *υπηρεσίες άκρου* (edge services) και αποτελούν ίσως τον πρόδρομο για την εμφάνιση ενός νέου υπολογιστικού προτύπου, κατά το οποίο ολόκληρο το Διαδίκτυο μετατρέπεται σε μια κατανεμημένη πλατφόρμα επεξεργασίας και παράδοσης όχι μόνο πλέον περιεχομένου αλλά και εφαρμογών. Το *άκρο του δικτύου* είναι ένα σημείο το οποίο βρίσκεται κάπου στο μονοπάτι που συνδέει τον πηγαίο εξυπηρετητή από τον οποίο αιτείται το περιεχόμενο ή η υπηρεσία και τον χρήστη που αιτεί πρόσβαση σε αυτό.

Οι υπηρεσίες άκρου εκμεταλλεύονται τα συστατικά της υποδομής των ΔΔΠ και επικαλύπτονται σε κάποιο βαθμό με τις υπηρεσίες των ΔΔΠ. Μπορούν να ποικίλλουν από την προσαρμογή του περιεχομένου στο προφίλ ενός ανεξάρτητου πελάτη, μέχρι την μεταγλώττιση του περιεχομένου και την παροχή προστασίας από ιομορφικό λογισμικό. Μια εκτενής λίστα παραδειγμάτων υπηρεσιών άκρου δικτύου καθώς και μια αναλυτικότερη παρουσίαση τους περιλαμβάνεται στο παράρτημα Α.

Βεβαίως, απαραίτητη τεχνολογική προϋπόθεση για την παροχή υπηρεσιών άκρου είναι η ανάπτυξη της κατάλληλης τεχνολογίας στους κόμβους επεξεργασίας στο άκρο του δικτύου, έτσι ώστε να αποκτήσουν την απαραίτητη ευφυΐα για την παραγωγή σελίδων δυναμικού περιεχομένου. Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές των δικτυακών τόπων προϋποθέτουν την χρήση της ίδιας υποδομής για της δημιουργία και την παράδοση του περιεχομένου στους χρήστες. Όσον αφορά τις στατικές σελίδες και στατικό περιεχόμενο αυτή η αρχιτεκτονική αποδίδει ικανοποιητικά. Η δημιουργία όμως δυναμικού περιεχομένου επιβαρύνει σημαντικά την υποδομή ενός δικτυακού τύπου. Χρειάζεται επομένως ένας τρόπος για τον διαχωρισμό της διαδικασίας παράδοσης περιεχομένου από την δημιουργία του.

Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες τα τελευταία χρόνια, τόσο από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην βιομηχανία περιεχομένου όσο και από ανεξάρτητους φορείς τυποποίησης στο Διαδίκτυο. Απαύγασμα αυτών των προσπαθειών υπήρξε η δημιουργία της Edge Side Includes (ESI) [14], που προσπαθεί να δώσει λύση στα προβλήματα απόδοσης που περικλείει η αποθήκευση (caching) περιεχομένου επιταχύνοντας την εκτέλεση δυναμικών εφαρμογών στον Ιστό. Η ESI είναι μια απλή γλώσσα σήμανσης (mark-up language), βασισμένη στην XML, που αποσκοπεί στην περιγραφή των αποθηκεύσιμων (cacheable) και μη-αποθηκεύσιμων (non-cacheable) συστατικών (τεμαχίων περιεχομένου) μιας ιστοσελίδας τα οποία μπορούν να συγκεντρωθούν, συναρμολογηθούν δυναμικά και παραδοθούν στο άκρο του δικτύου, από εξυπηρετητές που έχουν την τεχνολογική ευφυΐα να κατανοήσουν την γλώσσα.

Η ESI δεν σκοπεύει στην αντικατάσταση της HTML ή άλλων γλωσσών που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία δυναμικού περιεχομένου. Αντιθέτως, συνυπάρχει μαζί τους για τον διαχωρισμό του στατικού από το δυναμικό τμήμα μιας σελίδας. Το στατικό μέρος μιας σελίδας, ένα πρότυπο σχεδίασης (template) στην ουσία, μπορεί τότε να αποθηκευθεί στην cache και να αιτηθεί από τον πηγαίο εξυπηρετητή μόνο το δυναμικό περιεχόμενο που έχει αλλάξει. Η συναρμολόγηση κατόπιν της σελίδας από τα τμήματα που αποτελείται πραγματοποιείται στον κόμβο επεξεργασίας στο άκρο του δικτύου, όπου είναι τοποθετημένη και η cache. Μια λεπτομερέστερη παρουσίαση της ESI και των γενικότερων προκλήσεων που θέτει η παράδοση δυναμικού περιεχομένου περιέχεται στο Παράρτημα Α.

3.8 Δίκτυα Διανομής Εφαρμογών Περιεχομένου (ΔΔΕΠ)

3.8.1 Εισαγωγή στα ΔΔΕΠ

Ένα Δίκτυο Διανομής Εφαρμογών Περιεχομένου – ΔΔΕΠ (Application Content Delivery Network - ACDN) [10] είναι ένα ΔΔΠ το οποίο βελτιώνει την πρόσβαση σε δυναμικό περιεχόμενο το οποίο δεν μπορεί να αποθηκευθεί σε caches. Ένα ΔΔΕΠ επιτρέπει την εγκατάσταση της εφαρμογής σε έναν και μόνο υπολογιστή οπουδήποτε στο δίκτυο και μετά αναλαμβάνει αυτό την αντιγραφή και μεταφορά της εφαρμογής όπου χρειάζεται σύμφωνα με την παρατηρούμενη ζήτηση.

Σε αντίθεση με ένα παραδοσιακό ΔΔΠ που εξυπηρετεί στατικό περιεχόμενο είτε από την cache κάποιου τοπικού εξυπηρετητή είτε απευθείας από τον πηγαίο εξυπηρετητή, ένα ΔΔΕΠ πρέπει να έχει την απαιτούμενη εφαρμογή, περιλαμβανομένων των εκτελέσιμων αρχείων, των δεδομένων και του υπολογιστικού περιβάλλοντος για να μπορέσει να επεξεργαστεί μια αίτηση. Η μεταφορά και εγκατάσταση της εφαρμογής κατά την ώρα της αίτησης δεν αποτελεί μια πρακτική λύση στο πρόβλημα. Για αυτό το λόγο ένα ΔΔΕΠ μπορεί να διανείμει αιτήσεις μόνο μεταξύ των εξυπηρετητών που έχουν εκείνη την στιγμή εγκατεστημένο ένα αντίγραφο της εφαρμογής. Παράλληλα οι εφαρμογές πρέπει να τοποθετηθούν στους εξυπηρετητές του ACDN *ασύγχρονα* με τις αιτήσεις.

3.8.2 Απαιτήσεις ΔΔΕΠ

Πέρα από τις κλασικές απαιτήσεις ενός παραδοσιακού ΔΔΠ, ένα ΔΔΕΠ πρέπει να παρέχει λύσεις και στα ακόλουθα προβλήματα:

- *Πλαίσιο διανομής εφαρμογής (Application distribution framework)*: Ένα ΔΔΕΠ χρειάζεται ένα μηχανισμό για την δυναμική εγκατάσταση ενός αντιγράφου μιας εφαρμογής σε κάποιον εξυπηρετητή, και την διατήρηση της συνέπειας του ως προς το αυθεντικό αντίγραφο. Το τελευταίο ζήτημα είναι περίπλοκο λόγω του γεγονότος ότι μια εφαρμογή αποτελείται από πολλά συστατικά (components) στοιχεία των οποίων όλων οι εκδόσεις πρέπει να είναι ενημερωμένες προκειμένου να λειτουργήσει κανονικά η εφαρμογή.
- *Αλγόριθμος τοποθέτησης περιεχομένου (Content Placement Algorithm)*: Ένα ΔΔΕΠ πρέπει να αποφασίσει ποιες εφαρμογές θα εγκαταστήσει σε ποιους

εξυπηρετητές και πότε. Στα παραδοσιακά ΔΔΠ αυτό το πρόβλημα επιλύεται με γνωστούς αλγορίθμους αναπλήρωσης του χώρου των caches.

- *Αλγόριθμος διανομής αιτήσεων (Request distribution algorithm)*: Σε προσθήκη των παραγόντων φόρτου και εγγύτητας που πρέπει να συνυπολογίσουν τα παραδοσιακά ΔΔΠ, οι μηχανισμοί διανομής αιτήσεων σε ένα ΔΔΕΠ πρέπει να λάβουν υπόψη τους και σε ποια σημεία του συστήματος είναι εγκατεστημένες οι εφαρμογές ανά πάσα στιγμή.

Όσον αφορά το πλαίσιο διανομής μιας εφαρμογής σε ένα ΔΔΕΠ, αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της χρήσης ενός μετα-αρχείου (metafile) της εφαρμογής, το οποίο αποτελείται από δύο μέρη: την λίστα όλων των αρχείων που περιλαμβάνονται στην εφαρμογή μαζί με την ημερομηνίες τελευταίας τροποποίησης τους, και ένα αρχείο σεναρίου αρχικοποίησης (*initialization script*) το οποίο περιλαμβάνει όλες τις ενέργειες που πρέπει να εκτελέσει ο αποδέκτης εξυπηρετητής της εφαρμογής πριν δεχθεί οποιεσδήποτε αιτήσεις. Το μετα-αρχείο έχει το δικό του URL και τυγχάνει μεταχείρισης παρόμοιας με οποιασδήποτε άλλης στατικής ιστοσελίδας. Έτσι, με την χρήση του μετα-αρχείου της εφαρμογής το πρόβλημα διατήρησης της συνέπειας της εφαρμογής μειώνεται στο αντίστοιχο της διατήρησης της συνέπειας μιας ανεξάρτητης στατικής σελίδας (του μετα-αρχείου).

Όποτε τροποποιηθεί κάποιο αντικείμενο της εφαρμογής από τον πηγαίο εξυπηρετητή ενημερώνεται κατάλληλα το μετα-αρχείο της εφαρμογής. Οι άλλοι εξυπηρετητές του ΔΔΕΠ ανιχνεύουν ότι τα αποθηκευμένα αντίγραφα του μετα-αρχείου τους δεν είναι πλέον έγκυρα, αποκτούν το ενημερωμένο μετα-αρχείο και κατόπιν αντιγράφουν στους αποθηκευτικούς τους χώρους όλα τα τροποποιημένα αντικείμενα της εφαρμογής σύμφωνα με το μετα-αρχείο.

Σχετικά με τις πολιτικές τοποθέτησης της εφαρμογής και διανομής των αιτήσεων, κάθε εξυπηρετητής του ΔΔΕΠ λειτουργεί έναν τοπικό αντιγραφέα (replicator) ο οποίος παρακολουθεί την ζήτηση για τοπικές εφαρμογές και τον φόρτο σε όλους τους εξυπηρετητές του ΔΔΕΠ, και περιοδικά λαμβάνει αυτόνομα αποφάσεις για την τοποθέτηση περιεχομένου για τις τοπικές εφαρμογές. Υπάρχει επίσης στο ΔΔΕΠ ένας κεντρικός αντιγραφέας ο οποίος διευκολύνει την ανταλλαγή αναφορών φόρτου μεταξύ των εξυπηρετητών και περιοδικά υπολογίζει μια πολιτική διανομής των αιτήσεων. Η πολιτική αυτή εκφράζεται ως ένα ποσοστό των αιτήσεων που προέρχονται

από μια δεδομένη γεωγραφική ή δικτυακή περιοχή οι οποίες πρέπει να αποσταλούν σε έναν δεδομένο εξυπηρετητή του ΔΔΕΠ. Αυτή η πολιτική αποστέλλεται σε ένα εξυπηρετητή DNS εξισορρόπησης φορτίου, ο οποίος την χρησιμοποιεί για να επιλέξει έναν εξυπηρετητή όταν επιλύει αιτήσεις DNS των πελατών της εφαρμογής. Για δύσκολες στην ενημέρωση εφαρμογές μπορεί να καθορισθεί το όριο στον αριθμό των αντιγράφων της εφαρμογής. Συγκεκριμένα εάν επιτρέπεται μόνο ένα αντίγραφο, τότε αυτό τοποθετείται σε σημείο που θα είναι πιο κοντά στην πλειοψηφία των αιτήσεων.

3.9 Peer-To-Peer (P2P) Διανομή Περιεχομένου

Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στην διανομή περιεχομένου είναι η ανάπτυξη των ομοβάθμιων δικτύων (peer-to-peer or P2P networks). Αυτό που ξεχωρίζει τα ομοβάθμια δίκτυα από τις παραδοσιακές μορφές διανομής περιεχομένου, caching και ΔΔΠ, είναι ότι σε ένα ομοβάθμιο δίκτυο κάθε κόμβος είναι ταυτόχρονα πελάτης και εξυπηρετητής. Ως κύρια εφαρμογή των ομοβάθμιων δικτύων έχει αναδειχθεί η ανταλλαγή μεγάλων σε μέγεθος αρχείων. Οι χρήστες επιλέγουν τα αρχεία στα μηχανήματά τους τα οποία θα είναι διαθέσιμα για ανάκτηση από άλλους χρήστες. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους χρήστες να εκμεταλλευθούν την υπολογιστική δύναμη που υπάρχει στα μηχανήματά τους. Οι χρήστες πρέπει πρώτα να εγκαταστήσουν ειδικό λογισμικό P2P στις συσκευές-πελάτες τους, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν σαν cache για άλλες τερματικές συσκευές που επιθυμούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο ίδιο περιεχόμενο. Το μοντέλο αυτό προσδοκάται να μειώσει τις δυσχέρειες που σχετίζονται με άλλα μοντέλα βασιζόμενα σε κεντρικούς εξυπηρετητές, χωρίς να απαιτεί μεγάλες κεφαλαιακές επενδύσεις.

Προκειμένου οι χρήστες να μπορούν να προσδιορίσουν από πού θα ανακτήσουν τα διάφορα αρχεία, το δίκτυο χρειάζεται κάποιου είδους υπηρεσία καταλόγου, η οποία να αντιστοιχίζει ονόματα αρχείων στις μηχανές που διαθέτουν αυτά τα αρχεία. Οι κύριες προσεγγίσεις που υπάρχουν για την δημιουργία μιας υπηρεσίας αναζήτησης για ένα ομοβάθμιο δίκτυο είναι τρεις: η συγκεντρωτική (centralized), η κατανεμημένη (distributed) και η υβριδική (hybrid).

Στην *συγκεντρωτική αρχιτεκτονική* η αντιστοίχιση των αρχείων με υπολογιστές πραγματοποιείται από ένα κεντρικό εξυπηρετητή, που είναι υπεύθυνος για την απάντηση των ερωτήσεων. Η πραγματική πάντως μεταφορά αρχείων γίνεται άμεσα μεταξύ των ομότιμων χρηστών (peer) και όχι μέσω του κεντρικού εξυπηρετητή. Κάθε

χρήστης πρέπει να εγγραφεί στον κεντρικό εξυπηρετητή όταν εγκαθίσταται το λογισμικό της εφαρμογής, και επίσης να ενημερώνει τον κεντρικό εξυπηρετητή όταν είναι εντός ή εκτός δικτύου, καθώς και ποια αρχεία διαθέτει για ανταλλαγή. Εφόσον όλη η κίνηση από επερωτήσεις κατευθύνεται στον κεντρικό εξυπηρετητή, τότε αυτός γρήγορα εξελίσσεται σε πιθανό σημείο συμφόρησης.

Η *κατανεμημένη αρχιτεκτονική* από την άλλη πλευρά έχει το κύριο πλεονέκτημα ότι όλοι οι ομότιμοι κόμβοι του δικτύου είναι ισοδύναμοι μεταξύ τους (δεν υπάρχουν κεντρικοί εξυπηρετητές), χωρίς να διατηρείται μόνιμη πληροφορία για την τοποθεσία των διάφορων αντικειμένων. Επίσης δεν συντηρείται κατάλογος των κόμβων που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Όταν ένας χρήστης θέλει να συνδεθεί σε ένα τέτοιο δίκτυο, πρέπει πρώτα να αποκτήσει την IP διεύθυνση ή το όνομα ενός κόμβου που είναι ήδη μέλος του δικτύου. Για την ανάκτηση ενός αρχείου αποστέλλεται επερώτηση στους γειτονικούς κόμβους, οι οποίοι σε περίπτωση που δεν το διαθέτουν προωθούν την επερώτηση στους δικούς τους γείτονες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον κατακλυσμό (flooding) του δικτύου με επερωτήσεις, τοποθετώντας έτσι έναν αξιοσημείωτο φόρτο πάνω του.

Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι η χρήση ενός ορίου ζωής (Time-To-Leave) για κάθε επερώτηση το οποίο καθορίζει πόσες φορές μπορεί αυτή να προωθηθεί. Η χρήση όμως του χρονικού ορίου ζωής μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την πρόωρη λήξη της επερώτησης και την μη διάδοση της σε όλο το δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση η αίτηση αποτυγχάνει μολονότι το αιτηθέν αρχείο είναι διαθέσιμο στο δίκτυο. Στην συγκεντρωτική αρχιτεκτονική, αντίθετα, εάν ένα αρχείο είναι διαθέσιμο ανακαλύπτεται πάντοτε, καθώς ο κεντρικός εξυπηρετητής διατηρεί ενημερωμένη λίστα όλων των διαθέσιμων αντικειμένων στο δίκτυο.

Η *υβριδική αρχιτεκτονική* προσπαθεί να διατηρήσει μια ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας της συγκεντρωτικής αρχιτεκτονικής και του χαμηλότερου φόρτου της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής, δανειζόμενη στοιχεία και από τις δύο αρχιτεκτονικές. Ορισμένοι κόμβοι επιλέγονται ως υπέρ-κόμβοι (super-nodes), οι οποίοι συντηρούν έναν κατάλογο με όλα τα αντικείμενα που διαθέτουν οι κόμβοι υπό την δικαιοδοσία του. Όταν δέχονται επερωτήσεις τις προωθούν σε άλλους υπέρ-κόμβους οι οποίοι αποκρίνονται άμεσα στον αιτούντα κόμβο αποστέλλοντας τις διευθύνσεις των κόμβων υπό την δικαιοδοσία τους που έχουν το αιτηθέν αντικείμενο.

3.10 Σύγκριση υπηρεσιών caching και ΔΔΠ

Οι υπηρεσίες caching παρέχουν την βασική λειτουργία αντιγραφής δημοφιλούς περιεχομένου από ένα πηγαίο εξυπηρετητή σε έναν τοπικό εξυπηρετητή, μειώνοντας έτσι την απόσταση μεταξύ του χρήστη και του συχνά αιτούμενου περιεχομένου και επιταχύνοντας την διαδικασία παράδοσης του. Τα συστήματα διανομής περιεχομένου από την άλλη πλευρά είναι δίκτυα caching εξυπηρετητών, συνδεδεμένων σε ένα εικονικό ή πραγματικό δίκτυο, τα οποία λειτουργούν συστημικά. Επιπροσθέτως, τα συστήματα διανομής περιεχομένου προσθέτουν ένα επίπεδο λειτουργικότητας προσφέροντας εξελιγμένες υπηρεσίες όπως διανομή streaming μέσω, ανίχνευση δεδομένων, εξατομίκευση (personalization) και γεωγραφική προσαρμογή (localization) περιεχομένου, συγχρονισμό με τον πηγαίο εξυπηρετητή, εξισορρόπηση φορτίου κ.α.

Οι υπηρεσίες caching είναι τυπικά παθητικές, δηλαδή κατεβάζουν ενημερωμένο περιεχόμενο από τον πηγαίο εξυπηρετητή μόνο όταν κάποιος χρήστης το ζητήσει και αυτό έχει τροποποιηθεί από την τελευταία φορά που αποθηκεύθηκε. Εναλλακτικά, τα ενεργητικά caching συστήματα κάνουν υποθέσεις για την προσδοκώμενη ζωή του περιεχομένου σύμφωνα με τον χρόνο διατήρησης του και την συχνότητα των τροποποιήσεών του, και ενημερώνουν το περιεχόμενο υπολογίζοντας πότε ένα αντικείμενο εισήλθε στην cache και την ιστορία αποθήκευσής του.

Από την πλευρά τους τα συστήματα διανομής περιεχομένου προωθούν προληπτικά περιεχόμενο στους τοπικούς εξυπηρετητές, σε τακτά προσχεδιασμένα χρονικά διαστήματα, διασφαλίζοντας έτσι την εγκυρότητα του περιεχομένου. Συνήθως, ο προμηθευτής περιεχομένου ετοιμάζει μια λίστα με τα ενημερωμένα αντικείμενα που πρέπει να αντιγραφούν και να προωθηθούν στους τοπικούς εξυπηρετητές, και την μεταβιβάζει στον διανομέα περιεχομένου.

Καθώς όμως τα ΔΔΠ χρεώνουν υψηλά τιμολόγια για τις υψηλής ποιότητας υπηρεσίες τους, απευθύνονται περισσότερο προς μεγάλους οργανισμούς-προμηθευτές περιεχομένου οι οποίοι θέλουν να διανείμουν αποδοτικά το περιεχόμενο που παράγουν στους πελάτες τους μέσω του Διαδικτύου. Ανεξάρτητοι ιδιώτες ή μικροί οργανισμοί που δεν μπορούν να αντεπεξέλθουν στις οικονομικές απαιτήσεις της χρήσης των υπηρεσιών ενός ΔΔΠ, παραμένουν αναγκασμένοι να στηρίζονται στο παραδοσιακό caching προκειμένου να διανείμουν αποτελεσματικότερα το περιεχόμενό τους. Επομένως, τα ΔΔΠ δεν αποτελούν ένα υποκατάστατο του παραδοσιακού μοντέλου

πελάτη-εξυπηρετητή ή του παραδοσιακού caching, αλλά μάλλον μια συμπληρωματική προσέγγιση η οποία επιτρέπει την αποδοτική παράδοση δημοφιλούς περιεχομένου σε ένα μεγάλο πλήθος ενδιαφερομένων χρηστών.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ

4.1 Γενικά περί επιχειρηματικών μοντέλων

Τα επιχειρηματικά μοντέλα συνιστούν γενικά μία από τις περισσότερο συζητημένες και λιγότερο κατανοητές εκφάνσεις του Παγκόσμιου Ιστού. Οι αλλαγές που επιφέρει το Διαδίκτυο στα παραδοσιακά επιχειρηματικά μοντέλα έχουν αποτελέσει το θέμα μακροχρόνιων διαλόγων και αντεγκλήσεων [24]. Ένα επιχειρηματικό μοντέλο καθορίζει τη μέθοδο με την οποία μια επιχείρηση διεξάγει τις λειτουργίες της και παράγει πρόσοδο. Το επιχειρηματικό μοντέλο διασαφηνίζει τον τρόπο με τον οποίο μια επιχείρηση δημιουργεί έσοδα προσδιορίζοντας την θέση της στην αλυσίδα αξίας.

Πιο συγκεκριμένα τρία είναι τα βασικά στοιχεία που ορίζουν ένα επιχειρηματικό μοντέλο: [28]

- Μία αρχιτεκτονική για τις ροές προϊόντων, υπηρεσιών και πληροφορίας, περιλαμβανομένης και μιας περιγραφής των διάφορων επιχειρηματικών παικτών και των ρόλων τους,
- Μια περιγραφή των δυνατών οφελών για τους διάφορους επιχειρηματικούς παίκτες, και
- Μια περιγραφή των πηγών των προσόδων.

Στον τομέα της διανομής και παράδοσης περιεχομένου στο Διαδίκτυο, ίσως το πιο γνωστό επιχειρηματικό μοντέλο είναι εκείνο που ακολουθεί η πρωτοπόρος στον χώρο εταιρεία Akamai [41]. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, ένας προμηθευτής περιεχομένου πληρώνει το διανομέα περιεχομένου, μια εταιρεία δηλαδή που λειτουργεί Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (Content Distribution Networks) για να εξασφαλίσουν την αποθήκευση αντιγράφων του περιεχομένου της επιλογής τους σε εξυπηρετητές τοποθετημένους σε Κέντρα Δεδομένων και πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες από ότι οι πηγαίοι εξυπηρετητές. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι φορείς των υπηρεσιών διανομής περιεχομένου δεν κατέχουν ιδιόκτητη υποδομή μεταφοράς δεδομένων, αλλά χρησιμοποιούν έναντι αντιτίμου την δικτυακή υποδομή τρίτων φορέων, δημιουργώντας στην ουσία ένα δίκτυο επικάλυψης (overlay network). Πέρα από αυτό το μοντέλο όμως υπάρχει μια πλειάδα επιχειρηματικών μοντέλων τα οποία διακρίνονται μεταξύ τους

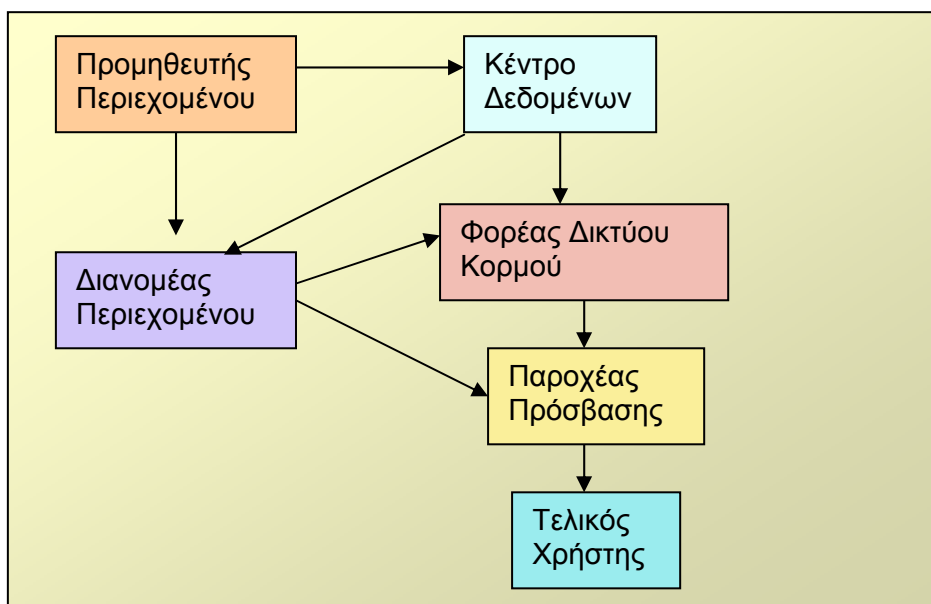
ανάλογα με την ταυτότητα της επωφελούμενης από την υπηρεσία οντότητας, τον τρόπο επιλογής του περιεχομένου προς αντιγραφή και την κατεύθυνση της χρηματικής ροής.

4.2 Επιχειρηματική Αλυσίδα Διανομής Περιεχομένου

Η επιχειρηματική αλυσίδα της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο αποτελείται από οντότητες πέντε διαφορετικών κατηγοριών [43], καθεμία με τις δικές της ανάγκες, συγκεκριμένα από:

- **Προμηθευτές Περιεχομένου (Content Providers)** : Είναι οι οντότητες που επιθυμούν να φέρουν το περιεχόμενο που παράγουν πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες.
- **Παροχείς χώρου φιλοξενίας (Hosting Providers)** : Είναι οντότητες που λειτουργούν τα κέντρα δεδομένων (*data centers*) παρέχοντας στους Προμηθευτές Περιεχομένου μια ασφαλή υποδομή που εγγυάται την υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα των εξυπηρετητών τους και σύνδεση υψηλής ταχύτητας με το δίκτυο κορμού.
- **Φορείς Δικτύου Κορμού (Backbone Providers)** : Οντότητες που προσφέρουν υπηρεσίες μεταφοράς ευρείας-περιοχής στους παροχείς πρόσβασης, μέσω της σύνδεσης στα υψηλής χωρητικότητας δίκτυά τους. Τα δίκτυα κορμού διασυνδέονται μεταξύ τους στα Σημεία Πρόσβασης Δικτύου (Network Access Points).
- **Παροχείς Πρόσβασης στο Διαδίκτυο (Access Providers - ISPs)** : Παρέχουν στους τελικούς χρήστες σύνδεση με το Διαδίκτυο, καλύπτοντας το τελευταίο μίλι μεταξύ του τελικού χρήστη και του Φορέα Δικτύου Κορμού με την χρήση χάλκινων καλωδίων, οπτικών ινών ή ασύρματων τεχνολογιών.
- **Διανομείς Περιεχομένου (Content Distributors)** : Είναι οι οντότητες που λειτουργούν τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου και παρέχουν υπηρεσίες διανομής περιεχομένου στους προμηθευτές περιεχομένου. Είναι υπεύθυνοι για την αντιγραφή του περιεχομένου στους κόμβους των ΔΔΠ και για την ευφυή ανακατεύθυνση των τελικών χρηστών στο βέλτιστο κατά περίπτωση κόμβο.
- **Τελικοί Χρήστες (End Users)** : Είναι οι οντότητες που καταναλώνουν μια δικτυακή υπηρεσία, εν προκειμένω την διανομή περιεχομένου.

Αυτές οι πέντε ομάδες παικτών συνιστούν την αλυσίδα διανομής περιεχομένου, σκοπός της οποίας είναι η σύνδεση των καταναλωτών με τους προμηθευτές περιεχομένου. Παρά τις πιθανές επικαλύψεις που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των παρόχων πρόσβασης στο Διαδίκτυο, των παρόχων χώρου φιλοξενίας και των φορέων Δικτύου Κορμού, πάντοτε είναι δυνατή η διάκριση των λειτουργιών μιας οντότητας ακόμη και αν αυτή συγκεντρώνει περισσότερες της μιας λειτουργίας. Σχηματικά, η αλληλοσυσχέτιση των παραπάνω οντοτήτων, που απαρτίζουν την αλυσίδα της διανομής περιεχομένου απεικονίζεται στην εικόνα 4. Τα βελάκια απεικονίζουν την ροή κατεύθυνσης των δεδομένων. Διακρίνεται καθαρά ο πολυσύνθετος ρόλος που διαδραματίζει ο διανομέας περιεχομένου, ο οποίος προκειμένου να παραδώσει την υπηρεσία του στον τελικό χρήστη, πρέπει να συνεργαστεί με ένα σύνολο άλλων οντοτήτων.



Εικόνα 4: Αλυσίδα διανομής περιεχομένου

4.3 Επιχειρηματικά Μοντέλα στη Διανομή Περιεχομένου

Δύο είναι τα πρωταρχικά, βασικά επιχειρηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στο χώρο των ΔΔΠ ([25], [26]). Το πρώτο μοντέλο ΔΔΠ επικεντρώνεται στην ικανοποίηση των αναγκών των προμηθευτών του περιεχομένου και είναι γνωστό στην βιβλιογραφία ως περιεχόμενο-κεντρικό (*Content-Centric*) ΔΔΠ. Στο δεύτερο μοντέλο η βαρύτητα δίνεται στην ικανοποίηση των αναγκών των παρόχων πρόσβασης, και ως εκ τούτου αναφέρεται ως προσβασιο-κεντρικό (*Access – Centric*) ΔΔΠ. Η ομοιότητα και στα δύο μοντέλα είναι ότι αυτός που πληρώνει επιθυμεί την ικανοποίηση

των καταναλωτών του περιεχομένου. Οι διαφορές τους έγκεινται στην ταυτότητα της οντότητας που χρεώνεται για την παροχή της υπηρεσίας, που επιλέγει το περιεχόμενο που θα διανεμηθεί μέσω του ΔΔΠ, και στον τρόπο διανομής του (σε τι ποσοστό θα αντιγραφεί σε περιφερειακούς εξυπηρετητές κλπ.).

Στο πρώτο μοντέλο (content-centric), ο προμηθευτής περιεχομένου πληρώνει τον διανομέα περιεχομένου για την διανομή του περιεχομένου στους πελάτες του με σκοπό την μείωση των δαπανών του για αγορά εύρους ζώνης και φιλοξενία των κεντρικών εξυπηρετητών του στα κέντρα δεδομένων. Στο δεύτερο μοντέλο η οντότητα που χρεώνεται για υπηρεσίες caching από τον διανομέα περιεχομένου είναι ο πάροχος πρόσβασης, με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση εύρους ζώνης και την διατήρηση των πελατών τους μέσω της καλύτερης και ταχύτερης εξυπηρέτησή τους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η ροή των δεδομένων έχει κατεύθυνση πάντοτε από τους προμηθευτές περιεχομένου προς τους καταναλωτές του, η ροή του χρήματος δεν είναι πάντοτε η ίδια. Στο περιεχόμενο-κεντρικό μοντέλο, όπως είδαμε, πραγματοποιείται μια χρηματική ροή από τους προμηθευτές περιεχομένου προς τους διανομείς περιεχομένου, ενώ στο προσβασιο-κεντρικό μοντέλο η χρηματική ροή κατευθύνεται από τους παρόχους πρόσβασης στο Διαδίκτυο προς τους διανομείς περιεχομένου.

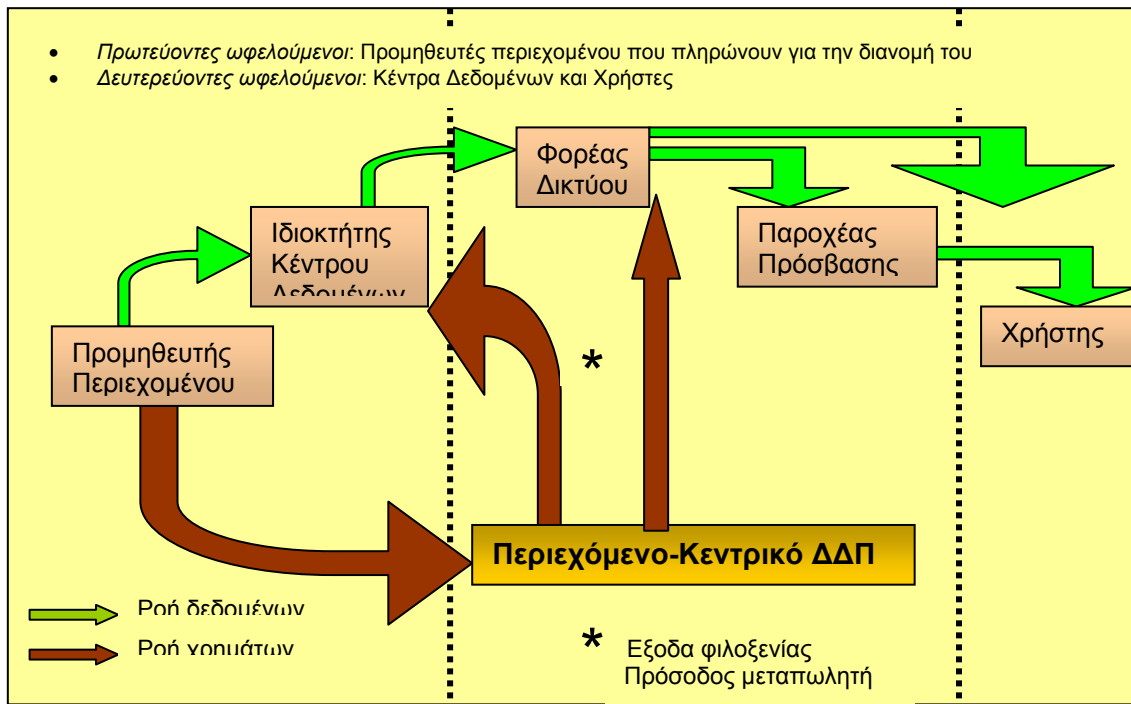
4.3.1 Περιεχόμενο-κεντρικό μοντέλο

Πρόκειται για το μοντέλο που έχει υιοθετηθεί από την πλειοψηφία των εταιρειών που δραστηριοποιούνται στο χώρο της διανομής περιεχομένου, όπως οι Akamai και Speedera. Στο μοντέλο αυτό, η πρόσδοδος των διανομέων περιεχομένου προέρχεται από τους προμηθευτές περιεχομένου, οι οποίοι χρεώνονται για την χρήση των ΔΔΠ προκειμένου να επιταχυνθεί η διανομή του περιεχομένου τους. Η επιλογή του περιεχομένου που θα αντιγραφεί στους εξυπηρετητές του ΔΔΠ γίνεται από τους προμηθευτές του. Οι πελάτες της υπηρεσίας, δηλαδή οι προμηθευτές περιεχομένου, χρεώνονται ανάλογα με την ποσότητα του περιεχομένου τους που παραδόθηκε μέσω του ΔΔΠ, χωρίς να αποκλείεται και η ύπαρξη μιας ελάχιστης μηνιαίας χρέωσης. Στο συμβόλαιο που υπογράφεται μεταξύ του προμηθευτή περιεχομένου και του λειτουργού του ΔΔΠ περιγράφονται λεπτομερώς οι συμβατικές υποχρεώσεις του παρόχου της υπηρεσίας προς τον πελάτη, σε μορφή εγγυήσεων για αδιάλειπτη και συνεχή παράδοση του περιεχομένου στους τελικούς χρήστες μέσω των περιφερειακών caches του ΔΔΠ.

Οι εξυπηρετητές των ΔΔΠ εγκαθίστανται μέσα σε κέντρα δεδομένων τα οποία ανήκουν σε τρίτες οντότητες, όπως είναι οι παροχείς πρόσβασης στο Διαδίκτυο, οι παροχείς χώρου φιλοξενίας και οι φορείς δικτύου κορμού. Συνήθως οι διανομείς περιεχομένου πληρώνουν κάποιο ενοίκιο έναντι του χώρου που καταλαμβάνουν οι εξυπηρετητές τους, της παροχής ενέργειας και της σύνδεσης στο Δίκτυο που τους εξασφαλίζεται, χωρίς όμως να αποκλείεται και η δωρεάν φιλοξενία τους [44]. Πιο συγκεκριμένα, με την εγκατάσταση των εξυπηρετητών ενός ΔΔΠ στις εγκαταστάσεις ενός παρόχου πρόσβασης (ISP) προκύπτουν αμοιβαία ωφελημένοι τόσο ο διανομέας περιεχομένου όσο και ο πάροχος πρόσβασης και οι πελάτες του. Φιλοξενώντας ο ISP τους εξυπηρετητές του ΔΔΠ, αποκτά ταυτόχρονα άμεση πρόσβαση σε δημοφιλές περιεχόμενο του Διαδικτύου που διακινείται μέσω του ΔΔΠ. Με αυτόν τον τρόπο, όταν περιεχόμενο, του οποίου αντίγραφο βρίσκεται σε κάποιο εξυπηρετητή του ΔΔΠ, ζητείται από κάποιον πελάτη του ISP, τότε ωφελούνται τόσο ο τελικός χρήστης, καθώς απολαμβάνει ταχύτερη παράδοση του περιεχομένου, όσο και ο ISP, που δεν χρειάζεται να αγοράσει από τους φορείς δικτύου κορμού το εύρος ζώνης που θα του ήταν απαραίτητο υπό άλλες συνθήκες για την ανάκτηση του περιεχομένου από την αρχική δικτυακή πηγή του.

Έτσι, μέσω *peering* συμφωνιών ο διανομέας περιεχομένου προσφέρει δωρεάν χρήση των εξυπηρετητών του στους ISP για την άντληση περιεχομένου και σε αντάλλαγμα οι ISP παρέχουν σε πολύ χαμηλή τιμή ή και τελείως δωρεάν χώρο για την εγκατάσταση των εξυπηρετητών και πρόσβαση στο εύρος ζώνης τους για την μεταφορά του περιεχομένου στους τελικούς χρήστες.

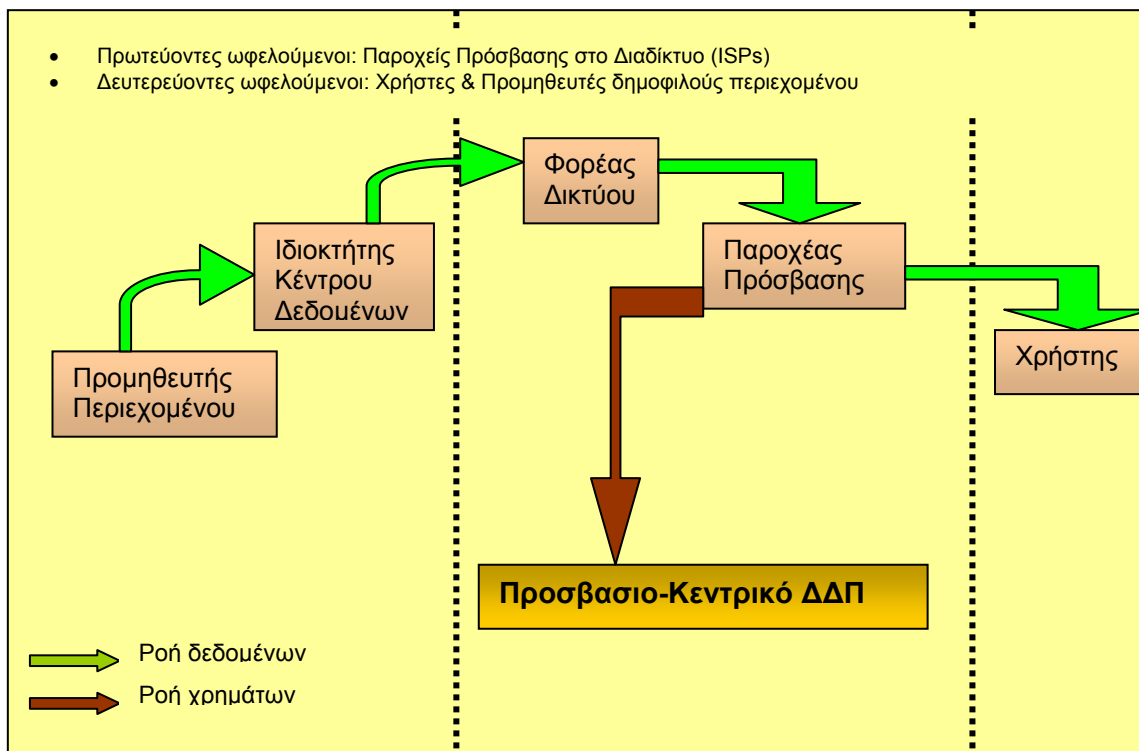
Πέρα από τις δαπάνες φιλοξενίας των εξυπηρετητών ενός ΔΔΠ σε κάποιο κέντρο δεδομένων, οι διανομείς περιεχομένου χρεώνονται επίσης από τους φορείς δικτύου κορμού και για την χρήση εύρους ζώνης για την σύνδεση των κόμβων του εικονικού δικτύου τους και την μεταφορά περιεχομένου μέσα σε αυτό. Η χρέωση αυτή γίνεται με βάση τον όγκο του περιεχομένου που διακινείται, σύμφωνα με συμβόλαια αντίστοιχα αυτών που συνάπτουν οι διανομείς περιεχομένου με τους δικούς τους πελάτες. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, οι ιδιοκτήτες των κέντρων δεδομένων μεταπωλούν τις υπηρεσίες του ΔΔΠ στους πελάτες τους μέσω του δικού τους δικτύου, λαμβάνοντας ένα μερίδιο από την πρόσοδο του διανομέα του περιεχομένου.



Εικόνα 5: Επιχειρηματικό Μοντέλο Περιεχομενο-Κεντρικού ΔΔΠ

4.3.2 Προσβασιο-κεντρικό μοντέλο

Σε αυτό το επιχειρηματικό μοντέλο, η πρόσοδος των διανομέων περιεχομένου προέρχεται από τους παρόχους πρόσβασης (ISP) οι οποίοι χρεώνονται προκειμένου να εξυπηρετούν τους συνδρομητές τους με δημοφιλείς περιεχόμενο το οποίο είναι αντιγραμμένο στους περιφερειακές-caches ενός ΔΔΠ. Η επιλογή του περιεχομένου τώρα γίνεται ανεξάρτητα από την ταυτότητα του ιδιοκτήτη του, και με βάση την δημοτικότητά του όπως αυτή καταγράφεται μέσα από τη ζήτησή του. Το μοντέλο αυτό έχει στηριχθεί στην ιδέα ότι το κόστος αποθήκευσης είναι φτηνότερο από το κόστος εύρους ζώνης. Μέσω της αντιγραφής συχνά προσπελάσιμου περιεχομένου σε εξυπηρετητές πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες, επιταχύνεται αφενός η διαδικασία διανομής του και αφετέρου οι ISP εξοικονομούν πόρους μέσω της κατανάλωσης μικρότερων ποσοτήτων εύρους ζώνης, το κόστος αγοράς του οποίου αποτελεί για αυτούς την μεγαλύτερη δαπάνη.



Εικόνα 6: Επιχειρηματικό Μοντέλο Προσβασιο-Κεντρικού ΔΔΠ

Επιπλέον το προσβασιο-κεντρικό μοντέλο αντλεί δύναμη από τους αριθμούς, καθώς μια μεγάλη κοινότητα χρηστών αιτεί περισσότερα αντικείμενα από ότι μια μικρότερη σε πληθυσμό. Όσο πολυπληθέστερη είναι η ομάδα των χρηστών που εξυπηρετούνται τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα να υπάρξουν κοινές αιτήσεις και η διανομή του περιεχομένου να γίνει από τοπικούς, περιφερειακούς εξυπηρετητές αντί του κεντρικού. Ωστόσο, το προσβασιο-κεντρικό μοντέλο λειτουργίας ενός ΔΔΠ αποδείχθηκε μέσα από την εφαρμογή του από συγκεκριμένες εταιρείες διανομής περιεχομένου ως μη βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης. Οι παράγοντες που συνέβαλαν σε αυτό το γεγονός είναι οι ακόλουθοι:

1. Η άσχημη οικονομική κατάσταση των ISPs, αποτέλεσμα του έντονου ανταγωνισμού μεταξύ τους που ωθεί τις τιμές στα άκρα και αφήνει ελάχιστα περιθώρια κέρδους. Σε ένα τέτοιο επιχειρηματικό περιβάλλον η αγορά υπηρεσιών διανομής περιεχομένου κρίνεται ως μη απαραίτητη, καθώς το κόστος της δεν μπορεί εύκολα να μεταβιβασθεί στους χρήστες, μεταφράζοντας την αξία της υπηρεσίας για τον πελάτη σε μια πρόσθετη πρόσοδο για τον πάροχο.
2. Οι λειτουργοί περιεχομενο-κεντρικών ΔΔΠ, όπως αναλύθηκε, παρέχουν τις ίδιες υπηρεσίες διανομής δημοφιλούς περιεχομένου με τα ίδια οφέλη δωρεάν, ως

αντάλλαγμα για την τοποθέτηση των εξυπηρετητών τους στα δίκτυα των παρόχων πρόσβασης στο Διαδίκτυο.

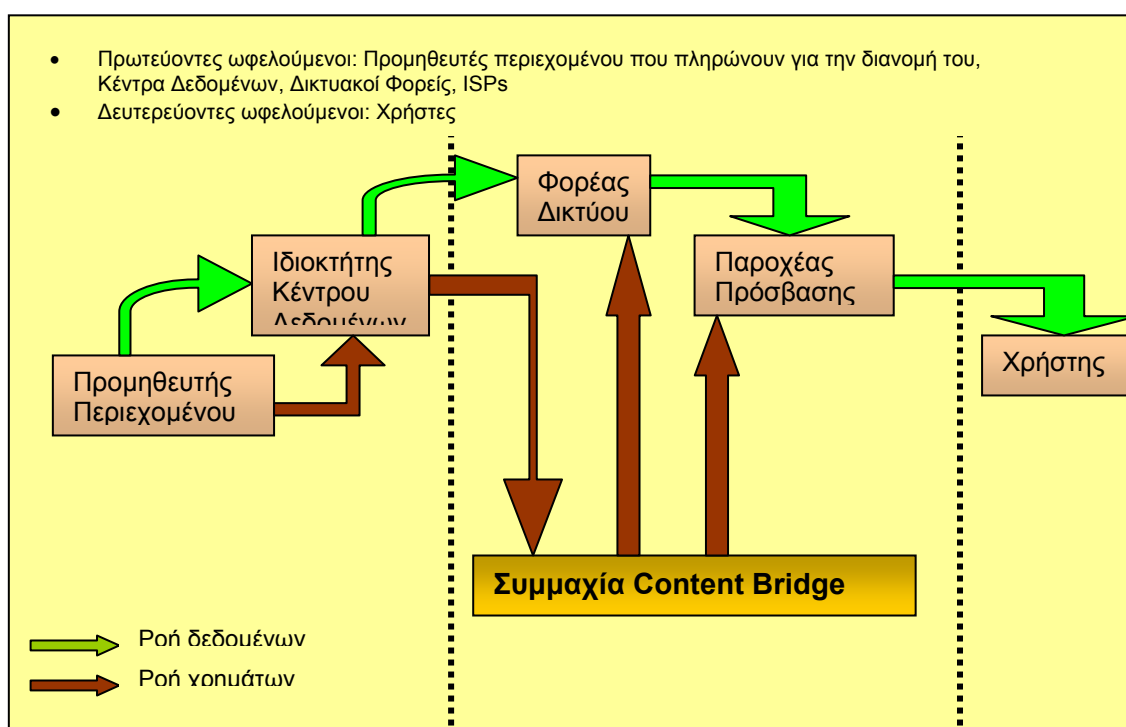
3. Οι ISPs προβαίνουν οι ίδιοι σε μια περιορισμένης κλίμακας αντιγραφή και αποθήκευση περιεχομένου σε δικούς τους cache εξυπηρετητές.

4.3.3 Εναλλακτικά επιχειρηματικά μοντέλα

Άλλα επιχειρηματικά μοντέλα τα οποία έχουν αναπτυχθεί από εταιρείες-κατόχους δικτυακής υποδομής στηρίζονται στην συγκέντρωση πολλών από τους ρόλους που περιγράφηκαν νωρίτερα σε μία οντότητα. Το σκεπτικό που υπάρχει πίσω από αυτά τα μοντέλα είναι ότι οι αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας του περιεχομένου σήμερα, δυναμικού και streaming, επιβάλλουν την συμμετοχή προμηθευτών ευρυζωνικού δικτύου κορμού στην διαδικασία της διανομής περιεχομένου. Οι υποστηρικτές αυτής της άποψης υποστηρίζουν ότι συστήματα διανομής περιεχομένου βασισμένα σε ένα εικονικό επικαλυπτικό δίκτυο εξυπηρετητών χωρίς ιδιόκτητη δικτυακή υποδομή δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτές τις αυξημένες απαιτήσεις. Εξάλλου η συγκέντρωση των ρόλων του παρόχου χώρου φιλοξενίας, φορέα δικτύου, παρόχου πρόσβασης στο Διαδίκτυο και διανομέα περιεχομένου σε μια οντότητα παρέχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας ελέγχου της ποιότητας της υπηρεσίας από-άκρη-σε-άκρη (end-to-end service).

Τα εναλλακτικά αυτά επιχειρηματικά μοντέλα, αποτέλεσμα των ενεργειών των τρίτων φορέων εμπλέκονται στην διανομή του περιεχομένου και επιδιώκουν να αποκτήσουν ένα μεγαλύτερο μερίδιο από την πίτα των κερδών, διέπονται από τις αρχές της συνεργασίας μεταξύ των οντοτήτων και της ύπαρξης διακανονιστικών συμφωνιών (settlements). Συμμαχίες εταιρειών έχουν προκύψει στο προσκήνιο οι οποίες συναγωνίζονται για την θέσπιση προτύπων για ανοικτή δια-δικτυακή διανομή περιεχομένου, όπως η Content Bridge [60], στην οποία ηγετικό στέλεχος είναι η εταιρεία Inktomi, κατασκευαστής συσκευών δικτυακού εξοπλισμού, η Content Exchange με υποκινητή την εταιρεία Cisco και το Broadband Content Delivery Forum, με πρωτεργάτη τον τηλεπικοινωνιακό φορέα Nortel. Παραπλήσιας λογικής είναι η τεχνολογία του *content peering*, που υποστηρίζεται από την Content Alliance [61] και η οποία επιτρέπει την συνεργασία μεταξύ ΔΔΠ διαφορετικών παρόχων υπηρεσίας σε επίπεδο προώθησης αιτήσεων περιεχομένου και ανακατεύθυνσης χρηστών από το ένα εικονικό δίκτυο στο άλλο.

Συγκεκριμένα όσον αφορά την συμμαχία Content Bridge, σκοπός της είναι η δημιουργία μιας από-άκρη-σε-άκρη συμφωνίας για την πώληση και παροχή υπηρεσιών διανομής περιεχομένου, με μια ταυτόχρονη αμοιβαία ωφέλιμη ευθυγράμμιση των επιχειρηματικών συμφερόντων των εμπλεκόμενων οντοτήτων. Η συμμαχία αυτή επιτρέπει σε ιδιοκτήτες κέντρων δεδομένων, δικτυακούς φορείς και παροχείς πρόσβασης στο Διαδίκτυο να προσφέρουν υπηρεσίες διανομής περιεχομένου πέρα από τα όρια των ιδιόκτητων δικτύων τους, επιδίδοντας τους ένα μερίδιο των εσόδων έναντι των υπηρεσιών που παρέχονται μέσω των δικών τους δικτύων. Παράλληλα παραχωρεί στους ιδιοκτήτες του περιεχομένου έλεγχο και διαφάνεια όσον αφορά το περιεχόμενο που διανέμεται από τους τοπικούς εξυπηρετητές.



Εικόνα 7: Επιχειρηματικό Μοντέλο Συμμαχίας Content Bridge

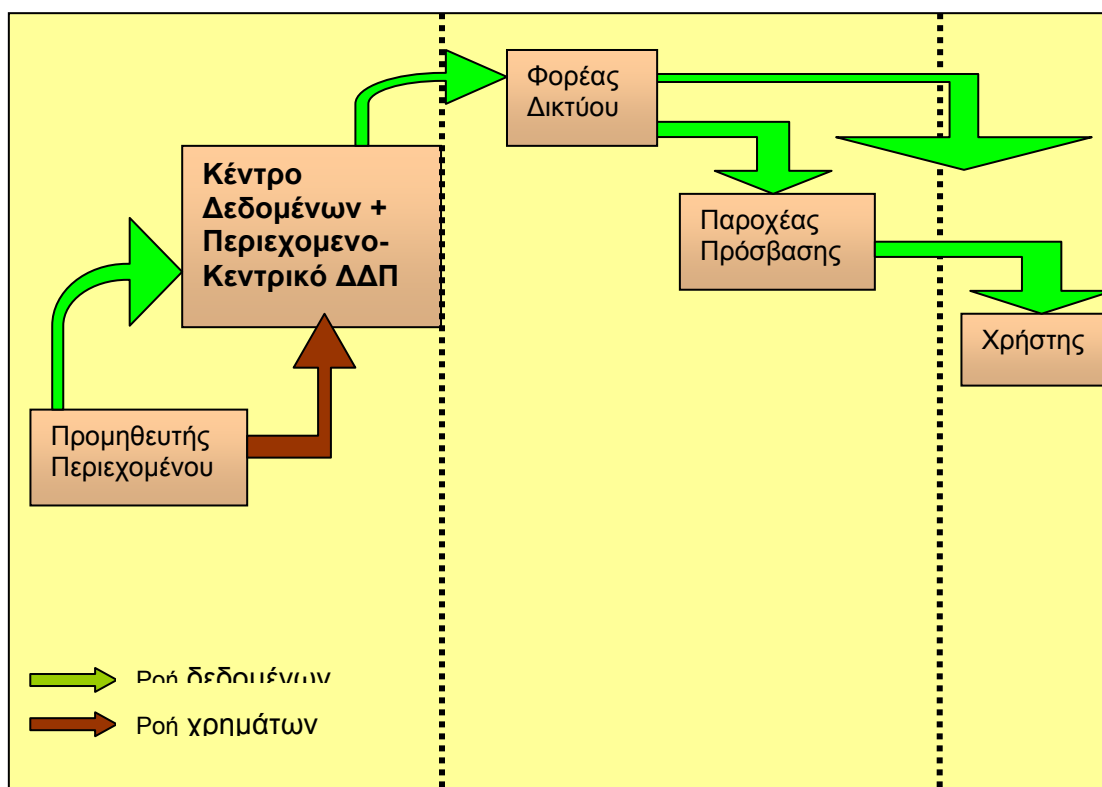
Το επιχειρηματικό μοντέλο που προωθείται από την συμμαχία βασίζεται:

1. στους ιδιοκτήτες των κέντρων δεδομένων για την πώληση της υπηρεσίας, εκμεταλλευόμενοι υπάρχουσες εμπορικές σχέσεις που έχουν συναφθεί με τους προμηθευτές περιεχομένου,
2. στους συνεργαζόμενος δικτυακούς φορείς για την παράδοση του περιεχομένου στους παροχείς πρόσβασης στο Διαδίκτυο, οι οποίοι και αποθηκεύουν το περιεχόμενο σε τοπικούς εξυπηρετητές.

Από την άλλη πλευρά και οι παροχές χώρου φιλοξενίας είναι οντότητες που προκύπτουν ζημιωμένες από την λειτουργία των ΔΔΠ. Η παράδοση περιεχομένου από τους τοπικούς εξυπηρετητές των ΔΔΠ συνεπάγεται μείωση του φόρτου των πηγαίων εξυπηρετητών, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε λιγότερους και μικρότερους σε μέγεθος φιλοξενούμενους εξυπηρετητές, μικρότερες απαιτήσεις εκ μέρους τους για εύρος ζώνης και περιορισμένη ανάγκη για ύπαρξη mirror εξυπηρετητών. Η χρήση ΔΔΠ για την παράδοση του περιεχομένου στους τελικούς χρήστες πλεονεκτεί στην δομή κόστους για τους προμηθευτές περιεχομένου συγκριτικά με την φιλοξενία των εξυπηρετητών τους σε μεγάλα κέντρα δεδομένων. Με την τοποθέτηση εξυπηρετητών κοντά στους τελικούς χρήστες στο άκρο του Διαδικτύου, τα ΔΔΠ μειώνουν σε δραστικό βαθμό την χρήση εξερχόμενου εύρους ζώνης από τους πηγαίους εξυπηρετητές. Παράλληλα το κόστος μεταφοράς είναι μεγαλύτερο για περιεχόμενο που εξυπηρετείται από τον πυρήνα του δικτύου καθώς εμπεριέχει και έξοδα διασύνδεσης μεταξύ των επιμέρους δικτύων.

Ως εκ τούτου, έχει παρατηρηθεί μια σύζευξη των υπηρεσιών φιλοξενίας με υπηρεσίες διανομής περιεχομένου. Εξάλλου οι υπηρεσίες που παρέχουν τα ΔΔΠ μπορούν να θεωρηθούν ως μια κατανομημένη επέκταση των συγκεντρωτικών υπηρεσιών φιλοξενίας εξυπηρετητών Διαδικτύου (web-hosting). Μία ακόμη θετική συνέπεια αυτής της σύζευξης υπηρεσιών όσον αφορά τους ιδιοκτήτες των κέντρων δεδομένων είναι το ισχυρότερο «κλείδωμα» (lock-in) των πελατών τους. Όσο αυξάνεται το σύνολο υπηρεσιών που προμηθεύονται από έναν και μόνο προμηθευτή, τόσο μειώνεται η πιθανότητα να αλλάξουν προμηθευτή στο μέλλον, ή να προχωρήσουν στην εσωτερική παραγωγή αντί της αγοράς των υπηρεσιών αυτών.

Η σύζευξη των υπηρεσιών ΔΔΠ με τις υπηρεσίες φιλοξενίας αποτελεί μια φυσική απειλή για τους αυτόνομους λειτουργούς ΔΔΠ. Ο συνδυασμός αυτός γνωστός και ως “one-stop-shop” είναι αρκετά δελεαστικός για τους προμηθευτές περιεχομένου, πελάτες τόσο των κέντρων δεδομένων όσο και των ΔΔΠ, καθώς είναι λιγότερο δαπανηρός από την διατήρηση πολλαπλών προμηθευτών. Η απάντηση των λειτουργών ΔΔΠ μπορεί να επέλθει με την επέκταση του χαρτοφυλακίου των υπηρεσιών τους, ώστε να περιλαμβάνει και υπηρεσίες φιλοξενίας. Σε αυτήν την περίπτωση κινδυνεύουν όμως να έρθουν σε άμεση ρήξη με τους ιδιοκτήτες των συνεργαζόμενων κέντρων δεδομένων που αποτελούν κανάλι διοχέτευσης των υπηρεσιών τους ως μεταπωλητές.



Εικόνα 8 : Επιχειρηματικό Μοντέλο Σύζευξης Κέντρου Δεδομένων & ΔΔΠ

Μια εναλλακτική προσέγγιση για την σύζευξη των δύο αυτών ετερογενών υπηρεσιών προτείνεται από την εταιρεία Speedera [45], λειτουργό αυτόνομου ΔΔΠ. Η προσέγγιση αυτή στοχεύει στην αναβάθμιση των παρόχων φιλοξενίας από απλούς μεταπωλητές σε συνεταιίρους στην παροχή υπηρεσιών διανομής περιεχομένου. Σε αυτό το μοντέλο η εταιρεία που ειδικεύεται στην διανομή περιεχομένου προχωρά στην σχεδίαση, δημιουργία και λειτουργία ΔΔΠ για τα κέντρα δεδομένων, τα οποία προσθέτουν τις υπηρεσίες αυτές σε αυτές που ήδη παρέχουν έναντι κάποιου χρηματικού ανταλλάγματος. Με αυτόν τον τρόπο οι παροχείς φιλοξενίας μπορούν να ασκούν καλύτερο έλεγχο της ποιότητας και του κόστους της υπηρεσίας παρά όταν είναι απλοί μεταπωλητές της, αυξάνοντας έτσι το μερίδιό τους από την πίτα των εσόδων.

4.3.4 Peer-To-Peer (P2P) Μοντέλο

Η κύρια διαφορά του P2P μοντέλου από τα προηγούμενα μοντέλα έγκειται στον ορισμό του *άκρου του δικτύου*. Στα επιχειρηματικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν ως τώρα, το *άκρο του δικτύου* από το οποίο γίνεται η παράδοση του περιεχομένου βρίσκεται είτε στην περίμετρο του δικτύου κορμού ενός φορέα είτε μέσα στο δίκτυο ενός παρόχου πρόσβασης στο Διαδίκτυο, ανάλογα με την ταυτότητα του λειτουργού του ΔΔΠ. Η πρώτη περίπτωση υφίσταται όταν το ΔΔΠ λειτουργείται από έναν

δικτυακό φορέα, ενώ η δεύτερη όταν ο λειτουργός του ΔΔΠ αποτελεί ανεξάρτητη επιχειρηματική οντότητα. Με την εμφάνιση όμως του νέου επιχειρηματικού μοντέλου του P2P ΔΔΠ, το άκρο του δικτύου μετατίθεται ακόμα πιο έξω, για να περιλάβει και τους υπολογιστές των χρηστών οι οποίοι πλέον ανταλλάσσουν περιεχόμενο μεταξύ τους.

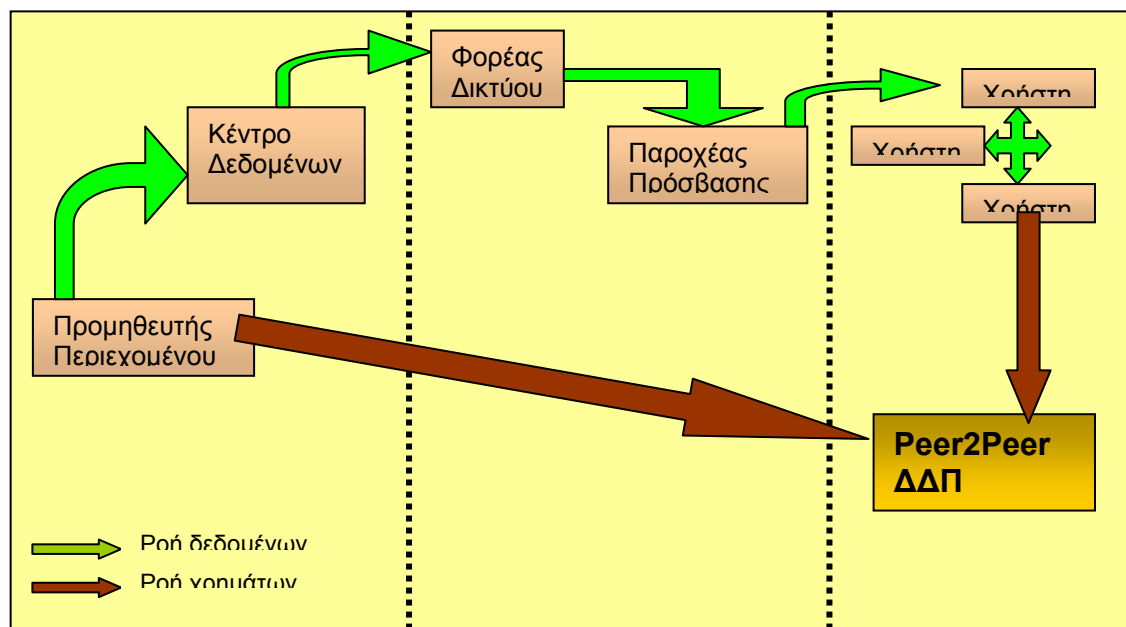
Η ιδέα πίσω από το μοντέλο είναι η μετατροπή όλων των κόμβων του δικτύου σε καλώς-συμπεριφερόμενους εξυπηρετητές. Οι τελικοί χρήστες μετατρέπονται σε διανομείς περιεχομένου για να παραδίδουν περιεχόμενο από το «*άκρο του χρήστη*» (user edge), σε αντιδιαστολή προς το «*άκρο του δικτύου*». Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση ειδικού λογισμικού πελάτη στα μηχανήματα των τελικών χρηστών, το οποίο τους επιτρέπει να ανταλλάσσουν μεταξύ τους περιεχόμενο. Το περιεχόμενο μπορεί να αποστέλλεται προς τους χρήστες από τους κεντρικούς εξυπηρετητές σε περιόδους χαμηλής κίνησης ώστε να μειώνεται το κόστος εύρους ζώνης του οποίου κάνει χρήση ο προμηθευτής περιεχομένου καθώς και ο φόρτος των εξυπηρετητών του. Οι υπολογιστές των πρώτων χρηστών που αντλούν το περιεχόμενο από τους κεντρικούς εξυπηρετητές του παρόχου του ΔΔΠ λειτουργούν σαν caches για τους επόμενους χρήστες που θα ζητήσουν το ίδιο περιεχόμενο.

Κύρια πηγή εσόδων για τους παρόχους της υπηρεσίας διανομής περιεχομένου στο επιχειρηματικό μοντέλο των P2P ΔΔΠ αποτελούν οι προμηθευτές περιεχομένου. Η χρέωση αυτή δικαιολογείται από την αρχική αντιγραφή του περιεχομένου τους στους εξυπηρετητές του λειτουργού του ΔΔΠ και την μετέπειτα διανομή του προς τους τελικούς χρήστες. Δευτερεύουσα πηγή προσόδου συνιστούν οι τελικοί χρήστες, οι οποίοι μπορούν να λάβουν το λογισμικό είτε έναντι κάποιας χρέωσης ή και τελείως δωρεάν στην αρχή, προκειμένου να αποκτήσει γρήγορα μεγάλες διαστάσεις το δίκτυο διανομής. Επιπρόσθετα μπορεί να υπάρξει και χρέωση για το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για την μεταφορά περιεχομένου μεταξύ των κόμβων των τελικών χρηστών καθώς και από τους κεντρικούς εξυπηρετητές του λειτουργού του P2P ΔΔΠ.

Αυτή η πλήρως κατανεμημένη peer-to-peer προσέγγιση συνεπάγεται την οικονομικά αποδοτική παράδοση μεγάλων αρχείων και streaming περιεχομένου στους τελικούς χρήστες. Συγκριτικά με την παραδοσιακή διανομή περιεχομένου, όπου κάθε νέος χρήστης αποτελεί πρόσθετο φόρτο για το δίκτυο, τα P2P δίκτυα ωφελούνται σε απόδοση και αξία από την ύπαρξη περισσότερων χρηστών. Εφόσον κάθε χρήστης αποτελεί νέο κόμβο για το δίκτυο, η συμμετοχή περισσότερων χρηστών αυξάνει τον

διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο για caching, βελτιώνοντας την απόδοση όλου του δικτύου.

Επιπλέον, τα καθιερωμένα στην αγορά ΔΔΠ στηρίζονται στην ανάπτυξη ενός παγκοσμίου και ακριβού στην συντήρηση δικτύου δεκάδων χιλιάδων περιφερειακών caching εξυπηρετητών αφοσιωμένων στην παράδοση περιεχομένου. Η αποτελεσματικότητα αυτών των δικτύων εξαρτάται άμεσα από την φυσική εγγύτητα των ιδιόκτητων caches ως προς τον αποδέκτη του περιεχομένου. Σε αντιδιαστολή με τα προαναφερθέντα μοντέλα, τα δίκτυα διανομής περιεχομένου του P2P μοντέλου είναι πρώτιστα βασισμένα στο λογισμικό. Συνεπώς, το P2P μοντέλο κερδίζει έδαφος σαν όχημα για την διανομή περιεχομένου την στιγμή που οι λειτουργοί παραδοσιακών P2P ασφυκτιούν οικονομικά υπό το βάρος των μεγάλων λειτουργικών δαπανών για αγορά εύρους ζώνης και εγκατάσταση του δικτύου των εξυπηρετητών τους.



Εικόνα 9: Επιχειρηματικό Μοντέλο Peer2Peer ΔΔΠ

Το μοντέλο του P2P ΔΔΠ αναμένεται να έχει μεγαλύτερη απήχηση όσον αφορά την εφαρμογή του στα ενδοδίκτυα (intranets) μεγάλων οργανισμών. Οι παράγοντες που συνηγορούν σε αυτό αφενός είναι ότι πρέπει να υπάρχει κάποιος έλεγχος των τελικών χρηστών, τόσο σχετικά με το λογισμικό που εγκαθίσταται για την αποφυγή ασυμβατοτήτων όσο και την διαχείριση του αποθηκευτικού χώρου στο δίσκο των μηχανημάτων. Αφετέρου οι παροχείς πρόσβασης στο Διαδίκτυο δεν επιτρέπουν στους πελάτες τους να δρουν σαν εξυπηρετητές περιεχομένου, γιατί με αυτόν τον τρόπο προκαλείται συμφόρηση στις γραμμές πρόσβασης στο δίκτυο, ενώ ο πυρήνας του παραμένει αναξιοποίητος.

4.3.5 Επιχειρηματικά Μοντέλα Πληρωμής – Ανά - Θέαση και Διαφημίσεων

Το επιχειρηματικό μοντέλο ΔΔΠ Πληρωμής – Ανά – Θέαση (pay-per-view) απαιτεί από τους χρήστες να πληρώνουν για το περιεχόμενο που καταναλώνουν. Οι περιοχές στις οποίες προβλέπεται να ευδοκιμήσει είναι αυτές των ζωντανών μεταδόσεων αθλητικών γεγονότων και προβολής κινηματογραφικών ταινιών σε streaming μορφή. Προς το παρόν, όμως, το συγκεκριμένο μοντέλο βρίσκεται σε εμβρυϊκή μορφή. Για την ευρύτερη διάδοσή του, πέρα από την προθυμία των χρηστών να δεχτούν χρέωση για την κατανάλωση περιεχομένου, απαιτούνται αφενός μεγάλες μάζες πελατών με πρόσβαση ευρείας ζώνης στο Διαδίκτυο, και αφετέρου χαμηλό κόστος χρήσης του εύρους ζώνης.

Εναλλακτικό μοντέλο που μπορεί να επιδοτήσει την διανομή του περιεχομένου με έναν τρόπο παραπλήσιο με αυτόν της συμβατικής τηλεόρασης είναι η εισαγωγή διαφημίσεων στο περιεχόμενο. Πρόκειται για έναν έμμεσο τρόπο χρέωσης των χρηστών οι οποίοι δέχονται την εμβόλιμη προβολή διαφημιστικών μηνυμάτων, τα οποία μπορεί να εξατομικεύονται ανάλογα με τα ενδιαφέροντα και την γεωγραφική περιοχή των χρηστών. Στην ουσία αυτοί που χρεώνονται και επιδοτούν την διανομή περιεχομένου είναι οι διαφημιζόμενοι, οι οποίοι είναι διατεθειμένοι να προβούν σε αυξημένες δαπάνες καθώς αντλούν πρόσθετη αξία από την στοχευόμενη διαφήμιση και την λήψη ανάδρασης σχετικά με τον χρόνο και τρόπο κατανάλωσης του περιεχομένου που συνόδευε την διαφήμιση. Αναμένεται να αναδειχθεί ως μια δευτερεύουσα πηγή εσόδων για τους διανομείς περιεχομένου.

4.4 Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ο ρόλος των διανομέων περιεχομένου στην αλυσίδα της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο. Οι caches τυπικά τοποθετούνται στις εγκαταστάσεις των ISPs γιατί αφενός αποτελούν τον αγωγό για σύνδεση με τους τελικούς χρήστες και αφετέρου βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από αυτούς. Ένας προμηθευτής περιεχομένου, όμως, δεν μπορεί να έλθει σε επικοινωνία με όλους τους ISP για να ικανοποιήσει το ευρύ φάσμα των πελατών του. Εδώ έρχεται να συμπληρώσει την αλυσίδα αξίας ως μεσάζοντας ο διανομέας περιεχομένου, ως μια οντότητα υπεύθυνη για την ανάπτυξη εικονικών δικτύων αποθηκευτικών κόμβων, που τοποθετούνται στις εγκαταστάσεις των ISP. Άρα στην ουσία είναι ένας μηχανισμός συλλογής και διανομής μετέπειτα όχι μόνο του

περιεχομένου αλλά και των χρηματικών ροών. Εισπράττει από τους προμηθευτές περιεχομένου την αξία που τοποθετούν αυτοί στο περιεχόμενό τους και καταβάλλει ένα αντίτιμο προς τους φορείς του δικτύου κορμού για την μεταφορά των δεδομένων και στους ISP για την φιλοξενία των μηχανημάτων τους (εάν αυτό δεν πραγματοποιείται δωρεάν με αντάλλαγμα την χρήση του αποθηκευμένου στις caches περιεχομένου).

Όπως είναι λογικό και αναμενόμενο για ένα νεοεμφανιζόμενο τομέα, καθένα από τα επιχειρηματικά μοντέλα που αναλύθηκαν σε αυτό το μοντέλο έχει τους υποστηρικτές και τους επικριτές του. Το «παραδοσιακό» περιεχόμενο-κεντρικό μοντέλο λειτουργίας ενός ΔΔΠ έχει τα θετικά του στοιχεία, όπως τις peering συμφωνίες με τους ISP για δωρεάν εγκατάσταση των caches, παρουσιάζει όμως και τις αδυναμίες του. Οι κυριότερες είναι αφενός τα μεγάλα λειτουργικά έξοδα για την συντήρηση της παγκόσμιας υποδομής από caches, και αφετέρου η έλλειψη ελέγχου της υπηρεσίας από άκρη σε άκρη, καθώς η μεταφορά του περιεχομένου γίνεται μέσω υποδομής τρίτων φορέων. Για αυτό οι εταιρείες που υιοθετούν αυτό το μοντέλο οφείλουν να αναπτύξουν ισχυρές συμμαχίες και συμφωνίες συνεργασίας με τους προμηθευτές δικτυακών υπηρεσιών, από την αποτελεσματικότητα των οποίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και η δική τους απόδοση.

Για την επίλυση του προβλήματος του πλήρους έλεγχου της υπηρεσίας διανομής έχουν προταθεί όπως είδαμε εναλλακτικά μοντέλα, όπως αυτό της Content Bridge, τα οποία στηρίζονται στην συνεργασία πολλών οντοτήτων για την παροχή μιας ολοκληρωμένης υπηρεσίας. Οι κριτικές αυτών των μοντέλων επικεντρώνονται στην πολυπλοκότητα τους και την δυσκολία διαχείρισης των συνεργασιών και των επιμέρους συμφωνιών μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Οι θιασώτες τους ωστόσο διατείνονται ότι η συνεργασία μεταξύ των δικτυακών φορέων είναι απαραίτητη καθώς οι βασικές υπηρεσίες διανομής περιεχομένου τείνουν να μετεξελιχθούν σε κοινότοπα προϊόντα τιμολογούμενα στο κόστος τους (commodities), και είναι απαραίτητη η παροχή πρόσθετων στοιχείων.

Τέλος, το P2P μοντέλο διανομής περιεχομένου εμφανίζεται ως μια φιλόδοξη και ελπιδοφόρα απάντηση στα προβλήματα της διανομής περιεχομένου. Εισάγοντας στην αλυσίδα της διανομής τους τελικούς χρήστες και μετατρέποντας τους σε ομότιμους κόμβους, μεταφέρει τελείως τον επεξεργαστικό φόρτο εκτός του πυρήνα του Διαδικτύου και των εξυπηρετητών. Παράλληλα απελευθερώνει τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτό το μοντέλο από την ανάγκη διατήρησης πολυδάπανης

υποδομής, καθώς η μεταφορά περιεχομένου γίνεται πλέον μεταξύ των τελικών χρηστών, με ελάχιστη δική τους παρέμβαση. Παραμένουν ωστόσο αρκετά ζητήματα ανοικτά σε αυτό το μοντέλο έως ότου θεωρηθεί μια πλήρης και υπολογίσιμη απάντηση προς τα άλλα μοντέλα. Τέτοια θέματα είναι αυτά της ασφάλειας, της διατήρησης της συνέπειας του περιεχομένου, της μη τροποποίησής του χωρίς εξουσιοδότηση, των τυχόν ασυμβατοτήτων μεταξύ διαφορετικών εκδόσεων του απαραίτητου λογισμικού κτλ.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

Έχοντας κάνει μια εκτενή εισαγωγή στα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (ΔΔΠ) και έχοντας παρουσιάσει τα επιχειρηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στον χώρο της διανομής περιεχομένου, σε αυτό το κεφάλαιο προχωράμε στην μελέτη των *μηχανισμών αναπαραγωγής αντικειμένων που υλοποιούνται μέσα σε ένα ΔΔΠ*.

5.1 Εισαγωγή

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που έχουν να αντιμετωπίσουν τα ΔΔΠ είναι η επιλογή των αποθηκευτικών κόμβων στους οποίους θα τοποθετηθούν τα αντικείμενα των προμηθευτών περιεχομένου, οι οποίοι αποτελούν τους πελάτες τους. Οι *μηχανισμοί αναπαραγωγής αντικειμένων* (object replication mechanisms), γνωστοί στην βιβλιογραφία και ως *αλγόριθμοι τοποθέτησης περιεχομένου* (content placement algorithms) ή *αλγόριθμοι τοποθέτησης αντιγράφων* (replica placement algorithms), προσπαθούν να δώσουν απάντηση στο πρόβλημα της προληπτικής αναπαραγωγής του περιεχομένου σε ένα ΔΔΠ ([19], [20], [21]), δηλαδή σε ποιους κόμβους θα αντιγραφεί ποιο περιεχόμενο. Οι μηχανισμοί τοποθέτησης περιεχομένου αποτελούν μια μετεξέλιξη των αλγορίθμων αντικατάστασης περιεχομένου που χρησιμοποιούνται στο απλό παραδοσιακό caching, όπως είναι οι LRU (Least Recently Used) και LFU (Least Frequently Used), και οι οποίοι θα αναλυθούν διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Όπως περιγράφηκε στο 2^ο κεφάλαιο, στο απλό caching το περιεχόμενο αντιγράφεται βάσει ζήτησης στις caches, εφόσον δηλαδή πραγματοποιηθεί κάποια αίτηση για αυτό από έναν τελικό χρήστη-καταναλωτή. Το μοντέλο αυτό λειτουργίας μιας cache καλείται μοντέλο έλκυσης (pull caching). Από την άλλη πλευρά, τα ΔΔΠ ακολουθούν το μοντέλο της ώθησης (push caching), όπου το περιεχόμενο αποστέλλεται προληπτικά στους αποθηκευτικούς κόμβους ενός ΔΔΠ ανά την υφήλιο. Οι αλγόριθμοι αντικατάστασης περιεχομένου προσπαθούν να λύσουν το πρόβλημα του περιορισμένου αποθηκευτικού χώρου μιας cache, ανανεώνοντας το περιεχόμενο της cache με νέα αντικείμενα που αιτήθηκαν και απομακρύνοντας παλαιότερα. Ένας αλγόριθμος caching είναι γενικά ένας πλήρως καταναμημένος αλγόριθμος ο οποίος αξιολογεί την τρέχουσα τοποθέτηση του περιεχομένου ύστερα από κάθε αίτηση ενός χρήστη. Από την πλευρά του, ένας αλγόριθμος τοποθέτησης αντιγράφων αξιολογείται με συχνότητα ωρών ή

ακόμα και ημερών, οπότε μπορεί να είναι πιο περίπλοκος και λεπτομερειακός, ακόμα και συγκεντρωτικός, να υλοποιείται δηλαδή από μια κεντρική οντότητα.

Οι μηχανισμοί αναπαραγωγής των αντικειμένων σε συνέργια με τους αντιστοίχους μηχανισμούς της ανακατεύθυνσης χρηστών που εφαρμόζονται σε ένα ΔΔΠ, προσφέρουν την δυνατότητα κατανομής του φόρτου σε διάφορους εξυπηρετητές, στοχεύοντας στην αποδοτική διανομή του περιεχομένου στους τελικούς χρήστες. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου, θα αναλυθεί επίσης στο τέλος το πρόβλημα της διανομής του περιεχομένου από τον πηγαίο εξυπηρετητή στους κόμβους ενός ΔΔΠ, ενώ θα παρουσιασθούν και αντιπροσωπευτικοί αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού που προσπαθούν να το επιλύσουν.

5.2 Σχετική βιβλιογραφία

Η σχετική βιβλιογραφία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τις δικτυακές τοπολογίες που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση των αποθηκευτικών κόμβων στο Διαδίκτυο. Αυτές είναι η δενδρική τοπολογία (tree topology) και η τοπολογία γράφου (graph topology). Όσον αφορά την δενδρική τοπολογία, στην σχετική βιβλιογραφία έχουν αναλυθεί τρεις περιπτώσεις:

- Η τοποθέτηση αντιγράφων (replicas) για το περιεχόμενο ενός μόνο πηγαίου εξυπηρετητή [56],[57]. Μολονότι η αληθινή τοπολογία του Διαδικτύου δεν είναι δενδρική και υπάρχουν πολλοί πηγαίοι εξυπηρετητές, αυτή η απλή προσέγγιση επιτρέπει την ανάπτυξη βέλτιστων αλγορίθμων μέσω δυναμικού προγραμματισμού. Ωστόσο η υπολογιστική πολυπλοκότητα των αλγορίθμων που προκύπτει είναι αρκετά υψηλή $O(N^3M^2)$.
- Η τοποθέτηση διάφανων πληρεξούσιων εξυπηρετητών (transparent intercepting proxies) μέσα στο δίκτυο [58]. Οι πληρεξούσιες αυτές caches τοποθετούνται μέσα στο δίκτυο «διάφανα», μόνο όμως κατά μήκος των διαδρομών μεταξύ χρηστών και εξυπηρετητών, «υποκλέπτουν» τις αιτήσεις περιεχομένου και αν μπορούν τις εξυπηρετούν αλλιώς τις προωθούν. Αναπτύσσονται βέλτιστες λύσεις για απλές τοπολογίες γραμμής και δακτυλίου, ενώ μελετάται και πάλι η περίπτωση τοποθέτησης αντιγράφων ενός πηγαίου εξυπηρετητή σε μια δενδρική τοπολογία..
- Η τοποθέτηση αντιγράφων εξυπηρετητών σε ένα ΔΔΠ [59]. Αναλύεται η περίπτωση πλήρων αντιγράφων ενός πηγαίου εξυπηρετητή και όχι η τοποθέτηση ανά αντικείμενο περιεχομένου. Το πρόβλημα μορφοποιείται ως πλήρες-NP K -

median και αναπτύσσονται ευρετικές μέθοδοι για την επίλυση του. Οι εξυπηρετητές-αντίγραφα δρουν ανεξάρτητα χωρίς να ερευνάται κάποιο συνεργατικό σχήμα.

Οι προηγούμενες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία για την αναπαραγωγή περιεχομένου επικεντρώνονται στο πρόβλημα της τοποθέτησης αντιγράφων-εξυπηρετητών για έναν πηγαίο εξυπηρετητή. Στην τελευταία προσέγγιση μόνο της τοπολογίας γράφου [19], έχει ερευνηθεί η περίπτωση της αναπαραγωγής αντικειμένων περιεχομένου που προέρχονται από πολλούς πηγαίους εξυπηρετητές και όπου μάλιστα η απόφαση τοποθέτησης γίνεται ανά αντικείμενο και όχι για το σύνολο του περιεχομένου. Αυτή η προσέγγιση κρίνεται και πιο κατάλληλη για την περίπτωση ενός ΔΔΠ με πολλούς προμηθευτές περιεχομένου ως πελάτες όπου γίνεται επιλεκτική αναπαραγωγή περιεχομένου, και γι' αυτό πρόκειται να παρουσιασθεί στην συνέχεια στην παράγραφο 5.4.

5.3 Περιγραφή του προβλήματος

Ένας αλγόριθμος τοποθέτησης αντιγράφων τυπικά μορφοποιείται μέσω ενός *ορισμού προβλήματος* (problem definition) και μιας *ευρετική* (heuristic) μεθόδου επίλυσής του. Ο ορισμός του προβλήματος αποτελείται από μια *συνάρτηση κόστους* (cost function) που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ή μεγιστοποιηθεί υπό μερικούς περιορισμούς (constraints). Η ευρετική μέθοδος χρησιμοποιείται για την παραγωγή σχεδόν βέλτιστων λύσεων για το προκύπτον πρόβλημα, το οποίο είναι συνήθως NP-πλήρες. Ο γενικός στόχος του προβλήματος τοποθέτησης των αντιγράφων είναι η επιλογή των τοποθεσιών των αντιγράφων των αντικειμένων στο δίκτυο, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται κάποιο κριτήριο. Παραδείγματα τέτοιων κριτηρίων αποτελούν η μεγιστοποίηση της αντιλαμβανόμενης από τον χρήστη απόδοσης με δεδομένη την υποδομή, ή η ελαχιστοποίηση του κόστους της υποδομής με δεδομένη την απόδοση του συστήματος. Ο στόχος του συστήματος περικλείεται αφαιρετικά μέσα στον ορισμό του προβλήματος, που χρησιμοποιείται σαν στόχος βελτιστοποίησης (optimization goal).

Φορμαλιστικά, το πρόβλημα τοποθέτησης των αντιγράφων μπορεί να δηλωθεί ως ακολούθως [20]: Το σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο πελατών C , αποθηκευτικών κόμβων N , αντικειμένων K και δικτυακών συνδέσμων L . Στους κόμβους φυλάσσονται τα αντίγραφα των αντικειμένων, τα οποία αναπαριστούν συγκεντρώσεις δεδομένων, όπως ολόκληρους δικτυακούς τόπους, καταλόγους, ή

ανεξάρτητα αρχεία. Εάν υπάρχει φυσικό κανάλι επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων προστίθεται ένας δικτυακός σύνδεσμος μεταξύ τους. Οι πελάτες του συστήματος συνδέονται στους κόμβους και αιτούν πρόσβαση ανάγνωσης στα αποθηκευμένα αντικείμενα. Κάθε πελάτης $i \in C$ αντιστοιχίζεται σε έναν κόμβο $j \in N$ για κάθε αντικείμενο $k \in K$, υφιστάμενος κάποιο κόστος σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να αντανακλά για παράδειγμα την μέση καθυστέρηση που υφίστανται οι πελάτες όταν προσπελάζουν αντικείμενα στους κόμβους του συστήματος.

5.3.1 Περιορισμοί προβλήματος

Η μορφοποίηση του προβλήματος συμπληρώνεται από έναν αριθμό περιορισμών. Η δυαδική μεταβλητή y_{ijk} υποδηλώνει εάν ο πελάτης i αποστέλλει την αίτησή του για το αντικείμενο k στον κόμβο j . Η μεταβλητή x_{jk} υποδηλώνει εάν ο κόμβος j διατηρεί το αντικείμενο k . Οι δύο περιορισμοί που συναντώνται συχνότερα στην βιβλιογραφία των ΔΔΠ είναι ο *περιορισμός του αριθμού αντιγράφων* (number-of-replicas) ($\sum_{j \in N} x_{jk} \leq P, \forall k$), που περιορίζει τον αριθμό των αντιγράφων ενός αντικειμένου στο σύστημα, και ο *περιορισμός της αποθηκευτικής δυναμικότητας* (storage capacity) ($\sum_{k \in K} size_k \times x_{jk} \leq S_j, \forall j$), ο οποίος τοποθετεί ένα άνω όριο στην αποθηκευτική χωρητικότητα ενός κόμβου. Άλλοι περιορισμοί που εμφανίζονται σε πολλούς ορισμούς προβλημάτων είναι οι ακόλουθοι:

- $\sum_{j \in N} y_{ijk} = 1 \quad \forall i, k$: Κάθε πελάτης μπορεί να στείλει αίτηση για ένα αντικείμενο σε έναν μόνο κόμβο.
- $y_{ijk} \leq x_{jk} \quad \forall i, j, k$: Μόνο κόμβοι που περιέχουν ένα αντικείμενο μπορούν να απαντήσουν σε αιτήσεις για αυτό.
- $x_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j, k$, και $y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k$: Αντικείμενα και αιτήσεις δεν μπορούν να τεμαχισθούν, δηλαδή μόνο ολόκληρα αντικείμενα αποθηκεύονται στους κόμβους, ενώ οι αιτήσεις ικανοποιούνται αποκλειστικά και μόνο από ένα κόμβο.

5.3.2 Παράμετροι προβλήματος

Οι συναρτήσεις κόστους των προβλημάτων τοποθέτησης αντιγράφων μπορούν να χρησιμοποιούν μια πληθώρα παραμέτρων, οι πιο κοινές από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

- *Αναγνώσεις* ($reads_{ik} \geq 0$) : Ο αριθμός των προσπελάσεων ανάγνωσης από έναν πελάτη i σε ένα αντικείμενο k στη μονάδα του χρόνου. Υποδηλώνει την δημοτικότητα του αντικειμένου.
- *Απόσταση* ($dist_{ij} \geq 0$) : Η απόσταση μεταξύ ενός πελάτη i και ενός κόμβου j αναπαριστώμενη με κάποια μετρική, όπως είναι η καθυστέρηση δικτύου, ο αριθμός δικτυακών συνδέσεων, ή το συνολικό «κόστος» της σύνδεσης.
- *Μέγεθος αντικειμένου* ($size_k > 0$) : Το μέγεθος ενός αντικείμενου k σε bytes.
- *Χρόνος πρόσβασης* ($acctime_{jk} \geq 0$) : Χρονοσφραγίδα της τελευταίας φοράς που προσπελάστηκε το αντικείμενο k στον κόμβο j .
- *Μήτρα τοποθέτησης* ($x_{jk} \in \{0, 1\}$) : Μια μήτρα κάθε κελί της οποίας υποδεικνύει εάν το αντικείμενο k είναι αποθηκευμένο στον κόμβο j . Η μήτρα τοποθέτησης είναι κενή στην αρχή και μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου περιέχει το αποτέλεσμα της τοποθέτησης.

5.3.3 Ευρετικές Μέθοδοι

Οι ευρετικές μέθοδοι μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας τρεις βασικές έννοιες (primitives):

- *Εύρος μετρικής* (scope metric): Το εύρος των πελατών, κόμβων, αντικειμένων που εκτιμούνται όταν λαμβάνει χώρα μια απόφαση τοποθέτησης. Η μέθοδος μπορεί να καθορίζει οποιοδήποτε εύρος, από το μηδέν (π.χ. κανέναν πελάτη) ως το σύνολο (π.χ. όλους τους πελάτες). Εάν ένας μόνο κόμβος λαμβάνεται υπόψη, η ευρετική μέθοδος είναι κατανεμημένη και πρέπει να εκτελεσθεί τοπικά και ανεξάρτητα σε κάθε κόμβο, ενώ εάν όλοι οι κόμβοι υπολογίζονται, τότε η μέθοδος είναι συγκεντρωτική και μπορεί να εκτελεσθεί σε κάποιο κεντρικό κόμβο.
- *Μέθοδος προσέγγισης* (approximation method): Η τεχνική που χρησιμοποιείται προκειμένου να ληφθεί η απόφαση τοποθέτησης. Παραδείγματα μεθόδων προσέγγισης είναι τα ακόλουθα:

- **Βαθμολόγηση** (ranking) : Αρχικά υπολογίζεται η επίδραση στο κόστος για κάθε πιθανό συνδυασμό τοποθέτησης ενός επιπλέον αντικειμένου σε έναν κόμβο. Τα ζεύγη κόμβων και αντικειμένων ταξινομούνται σύμφωνα με το κόστος και επιλέγεται το βέλτιστο ζεύγος που δεν παραβιάζει κάποιον περιορισμό. Εάν παραβιάζεται ένας περιορισμός τότε επιλέγεται η επόμενη τοποθέτηση από την λίστα. Μια ειδική μέθοδος βαθμολόγησης είναι η *greedy βαθμολόγηση*, κατά την οποία επανυπολογίζεται η συνάρτηση κόστους μετά από κάθε τοποθέτηση αντικειμένου.
- **Βελτίωση** (improvement): Ξεκινά με μια αρχική μήτρα τοποθέτησης η οποία έχει προκύψει είτε τυχαία είτε ως αποτέλεσμα άλλης ευρετικής μεθόδου. Κατόπιν επιλέγεται τυχαία ένα αντικείμενο και τοποθετείται σε έναν άλλο κόμβο που έχει επιλεγεί και αυτός τυχαία, έτσι ώστε να εξακολουθούν να ικανοποιούνται οι περιορισμοί. Εάν η τοποθέτηση που προκύψει παρουσιάζει τιμή κόστους καλύτερη από την παρούσα διατηρείται, αλλιώς το σύστημα επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έναν προκαθορισμένο αριθμό φορών.
- **Lagrangian relaxation** : Χαλαρώνει τους περιορισμούς του αρχικού προβλήματος μεταφέροντας τους στην συνάρτηση κόστους, κάνοντας έτσι το προκύπτον πρόβλημα ευκολότερο προς επίλυση.
- **Απλοποίηση συνάρτησης κόστους** (cost function simplification): Ένας αλγόριθμος μπορεί επίσης να τροποποιήσει (απλοποιήσει) την συνάρτηση κόστους όπως αυτή καθορίζεται από τον ορισμό.

5.4 Ανάπτυξη μοντέλου μορφοποίησης

Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος αναπτύσσεται στη συνέχεια ένα αφαιρετικό μοντέλο μορφοποίησης [19]: Έστω ένα ΔΔΠ το οποίο αποτελείται από I κόμβους (caches) περιορισμένης χωρητικότητας για την αποθήκευση αντικειμένων. Κάθε αποθηκευτικός κόμβος i , $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ έχει S_i bytes χωρητικότητας. Ο ρυθμός των εισερχομένων αιτήσεων στον κόμβο i είναι λ_i . Έστω επίσης ότι υπάρχουν στο σύστημα συνολικά J αντικείμενα προς αναπαραγωγή και αντιγραφή σε κάποιον κόμβο του ΔΔΠ. Το αντικείμενο j , $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ έχει μέγεθος b_j και πιθανότητα να αιτηθεί από κάποιον πελάτη p_j , η οποία υποδηλώνει την δημοτικότητά του. Έστω ότι τα

πρότυπα αιτήσεων των πελατών είναι ομογενή, δηλ. ότι οι πιθανότητες αίτησης p_j είναι ίδιες για όλους τους κόμβους του ΔΔΠ.

Η δυαδική μεταβλητή του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

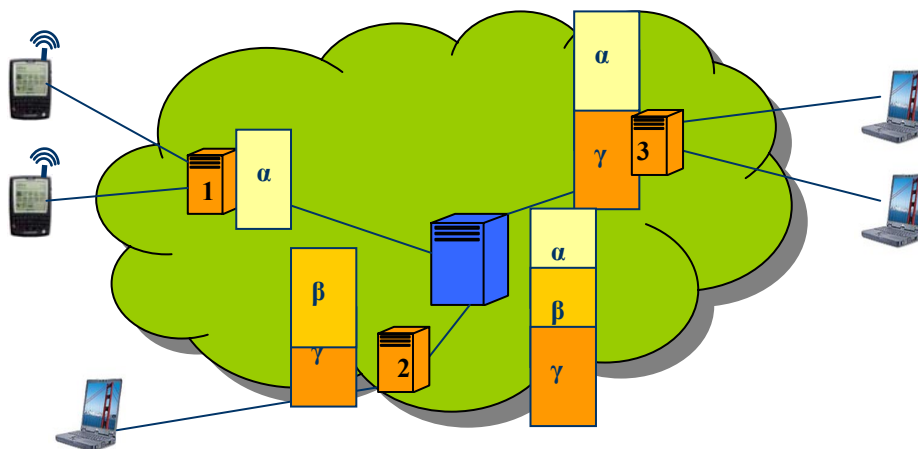
$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{εάν το αντικείμενο } j \text{ αντιγράφεται και αποθηκεύεται στον κόμβο } i \\ 0, & \text{στην αντίθετη περίπτωση} \end{cases}$$

Η χωρητικότητα περιορίζεται από τον διαθέσιμο χώρο στον κόμβο i , δηλαδή:

$$\sum_{j=1}^J b_j x_{ij} \leq S_i, \quad i = 1, 2, \dots, I$$

Ο στόχος του συστήματος είναι η επιλογή εκείνων των x_{ij} έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο μέσος αριθμός δικτυακών συνδέσεων (network hops) τις οποίες πρέπει να διασχίσει μια αίτηση περιεχομένου μέχρι τον αποθηκευτικό κόμβο που περιέχει το αιτηθέν αντικείμενο. Ο αριθμός των δικτυακών συνδέσεων επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τον χρόνο ανάκτησης ενός αντικειμένου, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης της αντιλαμβανόμενης από τον χρήστη καθυστέρησης.

Ορίζουμε ως x την *μήτρα τοποθέτησης* (placement matrix) που περιέχει τις τιμές των μεταβλητών x_{ij} . Οι γραμμές αυτού του πίνακα αντιστοιχούν στους αποθηκευτικούς κόμβους (caches) ενώ οι στήλες στα αντικείμενα περιεχομένου. Υποθέτουμε επιπλέον ότι όλα τα αντικείμενα είναι πάντα διαθέσιμα στους πηγαίους εξυπηρετητές τους, ανεξάρτητα από τον πίνακα τοποθέτησης x . Η τοποθέτηση των αντικειμένων στους πηγαίους εξυπηρετητές συμβολίζεται ως x_0 . Ένα παράδειγμα αντιγραφής και τοποθέτησης 3 αντικειμένων σε 3 εξυπηρετητές ενός ΔΔΠ με έναν πηγαίο εξυπηρετητή απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 10.



Εικόνα 10 : Τοποθέτηση αντιγράφων σε ένα ΔΔΠ

Η αντίστοιχη μήτρα τοποθέτησης για το παραπάνω παράδειγμα είναι η εξής:

		Αντικείμενα		
		Α	β	γ
Αποθηκευτικοί Κόμβοι	1	1	0	0
	2	0	1	1
	3	1	1	1

Πίνακας 1 : Μήτρα Τοποθέτησης Αντιγράφων

Η συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί σε αυτό το πρόβλημα θυμίζουμε ότι είναι ο μέσος αριθμός δικτυακών συνδέσεων που πρέπει να διασχίσει μια αίτηση περιεχομένου ενός πελάτη μέχρι να ικανοποιηθεί από έναν κόμβο που περιέχει το αιτηθέν αντικείμενο. Για τον κόμβο i , ο οποίος εξυπηρετεί αρχικά ένα σύνολο πελατών ως ο πλησιέστερος προς αυτούς, το προαναφερθέν μέγεθος είναι ίσο με:

$$C_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^J p_j d_{ij}(\mathbf{x}) \quad (1),$$

όπου p_j έχει ορισθεί προηγουμένως και $d_{ij}(\mathbf{x})$ είναι η βραχύτερη διαδρομή από τον κόμβο i προς ένα αντίγραφο του αντικειμένου j σε κάποιον άλλο κόμβο (ή στον πηγαίο εξυπηρετητή), με δεδομένη την μήτρα τοποθέτησης \mathbf{x} . Υποθέτουμε ότι ένας πελάτης ανακατευθύνεται πάντοτε προς τον πλησιέστερο κόμβο που περιέχει το αντίγραφο. Εάν ο κόμβος i έχει αντιγραμμένο το αντικείμενο j τότε προφανώς $d_{ij}(\mathbf{x})=0$.

Έστω $\Lambda = \sum_i \lambda_i$ ο συνολικός ρυθμός αφίξεων αιτήσεων για όλους τους αποθηκευτικούς κόμβους. Ο μέσος αριθμός δικτυακών συνδέσεων για όλους τους αποθηκευτικούς κόμβους με δεδομένη την μήτρα τοποθέτησης \mathbf{x} είναι:

$$\begin{aligned} C(\mathbf{x}) &= 1/\Lambda \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i(\mathbf{x}) \\ &= 1/\Lambda \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \lambda_i p_j d_{ij}(\mathbf{x}) \\ &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J s_{ij} d_{ij}(\mathbf{x}) \quad (2), \end{aligned}$$

όπου $s_{ij} = \lambda_i p_j / \Lambda$.

Η σχέση (2) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση κόστους του προβλήματος που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Αυτή η συνάρτηση κόστους αναπαριστά το μακροπρόθεσμο μέσο κόστος. Για έναν μεγάλο αριθμό αντικειμένων και αποθηκευτικών κόμβων δεν είναι εφικτό να επιλυθεί βέλτιστα το πρόβλημα. Στην ουσία, όπως αποδεικνύεται στο [19], αυτό το πρόβλημα είναι NP- πλήρες. Για αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες ευρετικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν την διαθέσιμη πληροφορία με διαφορετικό τρόπο για την λήψη των καλύτερων αποτελεσμάτων και οι οποίες παρουσιάζονται στην συνέχεια:

1. **Τυχαία (Random):** Τυχαία εκχώρηση των αντικειμένων στους αποθηκευτικούς κόμβους (caches) έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, επιλέγεται ένα ζεύγος αντικείμενο και κόμβου με ομοιόμορφη πιθανότητα και αποθηκεύεται το αντικείμενο σε αυτόν τον κόμβο. Εάν ο επιλεγμένος κόμβος ήδη διατηρεί το επιλεγμένο αντικείμενο, τότε επιλέγεται νέο ζεύγος αντικείμενου-κόμβου. Ένα αντικείμενο μπορεί να εκχωρηθεί για αντιγραφή σε διάφορους κόμβους, αλλά ένας κόμβος είναι δυνατό να έχει το μέγιστο ένα αντίγραφο ενός αντικείμενου.
2. **Δημοτικότητα (Popularity):** Κάθε κόμβος διατηρεί το πλέον δημοφιλές αντικείμενο ανάμεσα στους πελάτες του. Ο κόμβος ταξινομεί τα αντικείμενα σε φθίνουσα σειρά δημοτικότητας και διατηρεί τόσα πολλά αντικείμενα όσα του επιτρέπει ο περιορισμός της χωρητικότητάς του. Η εκτίμηση της δημοτικότητας των αντικειμένων μπορεί να γίνει με παρατήρηση των αιτήσεων που λαμβάνει ένας κόμβος από τους πελάτες του. Η μέθοδος αυτή δεν απαιτεί από τον κόμβο να διαθέτει πληροφορία εκτός αυτού, να προβεί δηλαδή σε επικοινωνία με άλλους κόμβους. Από την στιγμή που έχουμε υποθέσει ότι οι δημοτικότητες των αντικειμένων p_j , οι πιθανότητες δηλαδή αιτήσεώς τους, είναι ίδιες για όλους τους κόμβους, τότε όλοι οι κόμβοι θα διατηρούν τα αντικείμενα με την ίδια σειρά αποθήκευσης, υποκείμενοι ο καθένας σε διαφορετικό περιορισμό χωρητικότητας.
3. **Greedy-Single:** Κάθε κόμβος i υπολογίζει για κάθε αντικείμενο j το κόστος $C_{ij}(\mathbf{x}_0) = p_j d_{ij}(\mathbf{x}_0)$, το οποίο αναπαριστά την συνεισφορά κάθε ανεξάρτητου αντικείμενου στο κόστος της σχέσης (1) υπό την αρχική τοποθέτηση \mathbf{x}_0 , όπου όλα τα αντικείμενα είναι αποθηκευμένα σε έναν πηγαίο εξυπηρετητή. Ο κόμβος κατόπιν

ταξινομεί τα αντικείμενα σε φθίνουσα τάξη του μεγέθους $C_{ij}(\mathbf{x}_0)$ και φυλάσσει όσα το δυνατόν περισσότερα αντικείμενα σύμφωνα με την χωρητικότητα του. Οι δημοτικότητες των αντικειμένων μπορούν να ληφθούν με τον ίδιο τρόπο όπως και στην προηγούμενη μέθοδο της Δημοτικότητας. Παράλληλα όμως το ΔΔΠ χρειάζεται πληροφορία για την δικτυακή τοπολογία προκειμένου να υπολογισθούν οι αποστάσεις d_{ij} , του κόμβου i από τον πηγαίο εξυπηρετητή του αντικειμένου j . Τα κόστη C_{ij} υπολογίζονται μόνο μια φορά υπό την αρχική τοποθέτηση \mathbf{x}_0 , και δεν αναπροσαρμόζονται αφού αντιγραφούν τα αντικείμενα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος διατηρεί αντικείμενα ανεξάρτητα από τους άλλους κόμβους χωρίς να υπάρχει συνεργασία μεταξύ τους. Στην ουσία, με αυτήν την μέθοδο σε κάθε κόμβο αποθηκεύονται τα αντικείμενα που συνεισφέρουν περισσότερο στο κόστος C_{ij} , δηλαδή τα πλέον δημοφιλή από εκείνα που απέχουν περισσότερο μακριά.

4. **Greedy-Global:** Στην μέθοδο αυτή θεωρείται ότι υπάρχει μια κεντρική οντότητα, ο λειτουργός π.χ. του ΔΔΠ, που έχει ολική γνώση του συστήματος και των παραμέτρων για κάθε κόμβο. Το ΔΔΠ πρώτα υπολογίζει τα κόστη $C_{ij}(\mathbf{x}_0) = \lambda_i p_j d_{ij}(\mathbf{x}_0)$ για όλους τους κόμβους i και τα αντικείμενα j . Το ΔΔΠ επιλέγει το ζεύγος κόμβου-αντικειμένου με το υψηλότερο C_{ij} και αντιγράφει το αντικείμενο στον κόμβο αυτό. Αυτό οδηγεί σε μια νέα μήτρα τοποθέτησης \mathbf{x}_1 . Το ΔΔΠ κατόπιν επανυπολογίζει τα κόστη C_{ij} υπό την νέα τοποθέτηση και επιλέγει πάλι το ζεύγος κόμβου-αντικειμένου με το υψηλότερο κόστος C_{ij} . Αντιγράφεται το αντικείμενο αυτό στον κόμβο του ζεύγους και προκύπτει νέα μήτρα τοποθέτησης \mathbf{x}_2 . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου γεμίσουν οι αποθηκευτικοί χώροι όλων των κόμβων.

Από τα αποτελέσματα εκτέλεσης προσομοιώσεων στο [19] με αληθινές δικτυακές τοπολογίες προκύπτει ότι η καλύτερη ευρετική μέθοδος σε απόδοση είναι η *Greedy-Global*. Η δεύτερη καλύτερη είναι η *Greedy-Single* ακολουθούμενη από κοντά από την μέθοδο της *Δημοτικότητας*. Η μέθοδος της τυχαίας εκχώρησης παραμένει σε όλα τα πειράματα η χειρότερη μέθοδος. Η διαφορά μεταξύ της *Greedy-Single* και της μεθόδου της *Δημοτικότητας* μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των αντικειμένων, καθώς οι ατομικές δημοτικότητες (πιθανότητες αίτησης) κάθε αντικειμένου γίνονται μικρότερες. Για αυτό και η συμμετοχή του κόστους ανάκτησης ενός ανεξάρτητου αντικειμένου στο συνολικό κόστος της σχέσης (2) αναλογικά φθίνει, με αποτέλεσμα η δημοτικότητα ενός αντικειμένου να γίνεται πιο σημαντική για τον προσδιορισμό του

κόστους. Το γινόμενο της δημοτικότητας με την απόσταση που χρησιμοποιείται από την *Greedy-Single* παραμένει ένας καλύτερος δείκτης, αλλά με την αύξηση των αντικειμένων η διαφορά είναι ελάχιστη. Ο αλγόριθμος της Δημοτικότητας γενικά προτιμάται καθώς είναι κατά πολύ λιγότερο δαπανηρός σε υπολογιστικούς πόρους.

Γενικά η καλύτερη απόδοση αποσπάται όταν η αντιγραφή των αντικειμένων πραγματοποιείται με την χρήση ευρετικών μεθόδων οι οποίες προϋποθέτουν την συνεργασία όλων των εξυπηρετητών του ΔΔΠ για την λήψη αποφάσεων αντιγραφής υπό τον συντονισμό μιας πηγής, όπως ο φορέας του ΔΔΠ. Ένα ΔΔΠ κατέχει τυπικά πλήρη γνώση του δικτύου του, όποτε μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρατηγικές που απαιτούν συνολική πληροφόρηση ή συνεργασία. Ένα ΔΔΠ επομένως θα έπρεπε να χρησιμοποιεί μια εναρμονισμένη στρατηγική αντιγραφής και να μην επιτρέπει στους εξυπηρετητές του να λειτουργούν ανεξάρτητα και αυθαίρετα.

5.5 Σύγκριση αλγόριθμων *caching* και τοποθέτησης περιεχομένου

Ένας αλγόριθμος *caching* εκτελείται μετά από κάθε ανεξάρτητη προσπέλαση ενός χρήστη, ενώ ένας αλγόριθμος τοποθέτησης αντιγράφων (*replica placement algorithm - RPA*) πολύ λιγότερο συχνά. Εφόσον ένας αλγόριθμος RPA εκτελείται τόσο σπάνια όσο μια φορά την μέρα, κάθε κόμβος γνωρίζει ανά πάσα στιγμή που βρίσκεται η πλησιέστερη ρέπλικα κάθε αντικειμένου που δεν διατηρεί ο ίδιος. Αυτή η πληροφορία μπορεί να διαχυθεί στο σύστημα με μικρό κόστος καθώς μεταβάλλεται με χαμηλή συχνότητα. Από την άλλη πλευρά, για την περίπτωση ενός κόμβου που χρησιμοποιεί τοπικό *caching* και πιθανόν να μεταβάλει την τοποθέτησή του μετά από κάθε προσπέλαση, η πληροφορία αυτή είναι απαγορευτικά ακριβή. Για αυτό συνήθως δεν γνωρίζει που βρίσκεται η πλησιέστερη ρέπλικα ενός αντικειμένου σε περίπτωση αποτυχίας, όποτε και θα πρέπει να αιτήσει το αντικείμενο από έναν πηγαίο κόμβο.

Εξαιτίας αυτής της επιβάρυνσης της επίσκεψης στον πηγαίο εξυπηρετητή, το απλό τοπικό *caching* δεν αποδίδει καλά σε σχέση με τους αλγορίθμους RPA όταν η αποθηκευτική δυναμικότητα είναι περιορισμένη. Στην περίπτωση όμως που ο αποθηκευτικός χώρος αυξάνεται κατά πολύ, η διαφορά μεταξύ των RPA και του *caching* παύει να υφίσταται.

Στην περίπτωση της περιορισμένης αποθηκευτικής δυναμικότητας, ο αλγόριθμος *caching* μπορεί να βελτιωθεί με κατάλληλη τροποποίηση έτσι ώστε να εκτελείται λιγότερο συχνά (π.χ. μια φορά την ημέρα) και να μεταδίδει την πληροφορία

της πλησιέστερης ρέπλικας μόνο στα ενδιαμέσα χρονικά διαστήματα των μεταβολών. Έτσι η επιβάρυνση (*overhead*) και το ποσό της πληροφορίας που θα αποστέλλεται θα είναι το ίδιο όπως και για οποιονδήποτε RPA. Έτσι αποκτάται η πληροφορία τοποθεσίας της πλησιέστερης ρέπλικας ενός αντικειμένου με το κόστος μόνο της εκτέλεσης του αλγορίθμου και μεταβολής του περιεχομένου ενός κόμβου λιγότερο συχνά. Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι γνωστός ως καθυστερημένο caching (*delayed caching*) [21].

Το αποτέλεσμα συγκριτικών προσομοιώσεων, όπως αυτές παρουσιάζονται στο [21] είναι ότι με το απλό caching μπορεί να αποκτηθεί κατά μέσο όρο μια καλύτερη ή τουλάχιστον το ίδιο καλή τοποθέτηση με τους καλύτερους αλγορίθμους τοποθέτησης αντιγράφων, εάν μονάχα αυξηθεί το μεσοδιάστημα εκτέλεσης του αλγορίθμου από το συνηθισμένο που είναι ανά προσπέλαση στο περιεχόμενο σε ορισμένες ώρες ή και μέρες ακόμα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιοι μηχανισμοί που χρησιμοποιούν και οι RPA για την μετάδοση πληροφορίας σχετικής με την τοποθεσία άλλων αντικειμένων.

Συνοπτικά, εάν δεν απαιτούνται αυστηρές εγγυήσεις απόδοσης, τότε τα συστήματα απλού caching υπερτερούν των καλύτερων RPA. Για ΔΔΠ του πρόσφατου παρελθόντος που δεν παρείχαν εγγυήσεις υψηλής ποιότητας, δεν προέκυπτε ιδιαίτερος λόγος χρήσης αλγορίθμων RPA καθώς οι αλγόριθμοι caching αποδίδουν το ίδιο καλά αν όχι καλύτερα. Ωστόσο, για τα ΔΔΠ που θέλουν να υποστηρίξουν δυνατότητες τροποποιήσεων περιεχομένου, συνέπειας και να παρέχουν εγγυήσεις ποιότητας, καθίσταται επιτακτική η χρήση αλγορίθμων RPA ως η μόνη λύση για να αντιμετωπισθούν τέτοιες απαιτήσεις. Εφόσον ένα ΔΔΠ θα πρέπει να παρέχει μελλοντικά κάποιο επίπεδο απόδοσης, εγγυήσεις αξιοπιστίας ή διαθεσιμότητας, θα υπάρξει ανάγκη για αλγορίθμους RPA προκειμένου να επιτύχουν αυτούς τους σκοπούς, καθώς το απλό caching δεν μπορεί να παρέχει καμία χρήσιμη εγγύηση για αυτές τις μετρικές.

5.6 Εισαγωγή στον χρονοπρογραμματισμό

Το πρόβλημα του *χρονοπρογραμματισμού* (scheduling) [22] αναφέρεται στην κατανομή πόρων και τον προγραμματισμό δραστηριοτήτων, οι οποίες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για έναν επαναχρησιμοποιήσιμο πόρο περιορισμένης διαθεσιμότητας. Κάθε δραστηριότητα χρησιμοποιεί μια συγκεκριμένη ποσότητα του πόρου κατά την

διάρκεια την εκτέλεση της και την απελευθερώνει με την ολοκλήρωσή της. Το πρόβλημα είναι η επιλογή ενός εφικτού υποσυνόλου των δραστηριοτήτων, δηλαδή ενός συνόλου δραστηριοτήτων τέτοιου ώστε η συνολική ποσότητα του πόρου που κατανέμεται ταυτόχρονα για την εκτέλεση αυτών των δραστηριοτήτων να μην υπερβαίνει την διαθέσιμη ποσότητα του πόρου.

Μια τυπική δραστηριότητα μπορεί να λάβει χώρα εναλλακτικά σε ένα το πολύ από ένα σύνολο διαθέσιμων χρονικών διαστημάτων. Κάθε δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από την διάρκεια εκτέλεσης της, τις απαιτήσεις σε πόρους για την εκτέλεση της, καθώς και από το κέρδος το οποίο προκύπτει από τον προγραμματισμό της την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η τιμή καθενός από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εκτελείται η δραστηριότητα. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι η εύρεση ενός εφικτού χρονοδιαγράμματος το οποίο καθορίζει ποιες δραστηριότητες επιλέγονται για εκτέλεση και πότε, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το συσσωρευμένο κέρδος. Εναλλακτικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του χαμένου κέρδους, δηλαδή της ζημίας που προκύπτει, από τον μη προγραμματισμό συγκεκριμένων δραστηριοτήτων.

5.7 Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού για Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου

Στο ευρύτερο πλαίσιο των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού εντάσσεται και το ειδικότερο πρόβλημα της αποθήκευσης αντιγράφων (caching), στο οποίο ένας αποθηκευτικός χώρος (cache) σταθερού μεγέθους χρησιμοποιείται για την φύλαξη αντικειμένων περιεχομένου μεταβλητού μεγέθους και κόστους μεταφοράς το καθένα. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα εισόδου του προβλήματος σε αυτή την περίπτωση είναι το μέγεθος του αποθηκευτικού χώρου και μια ακολουθία αιτήσεων για σελίδες, ή γενικότερα για περιεχόμενο. Όταν μια σελίδα ή ένα αντικείμενο αιτείται από κάποιον πελάτη, πρέπει να αντιγραφεί στον αποθηκευτικό χώρο, εκτός εάν βρίσκεται ήδη σε αυτόν και δεν έχει λήξει. Κάθε σελίδα χαρακτηρίζεται από το μέγεθός της και το κόστος φόρτωσης, το οποίο υφίσταται όποτε η σελίδα φορτώνεται στον αποθηκευτικό χώρο. Αιτήσεις για σελίδες ευρισκόμενες ήδη σε αυτόν δεν επιφέρουν πρόσθετο κόστος. Εφόσον το μέγεθος του αποθηκευτικού χώρου είναι σταθερό, το φόρτωμα ενός αντικειμένου μπορεί να επιβάλλει την αφαίρεση από την αποθήκη κάποιου άλλου αντικειμένου. Σκοπός επομένως είναι η εύρεση ενός χρονοδιαγράμματος

αντικατάστασης που να επιφέρει το ελάχιστο συνολικό κόστος μεταφοράς των αντικειμένων.

Η παραδοσιακή προσέγγιση για την πλήρωση του χώρου μιας cache είναι η παθητική, όπου νέα δεδομένα αποστέλλονται μόνο όταν το περιεχόμενο που αιτείται δεν είναι διαθέσιμο τοπικά ή έχει λήξει, μέσω πρόσβασης στον πηγαίο εξυπηρετητή ή κάποια άλλη cache. Η cache κατόπιν παραδίδει ένα αντίγραφο του αιτηθέντος αντικείμενου στον πελάτη και αποθηκεύει τοπικά ένα ακόμα αντίγραφο για να ικανοποιήσει μελλοντικές αιτήσεις.

Η σύγχρονη προσέγγιση η οποία υιοθετείται από τα ΔΔΠ, όπως έχει αναφερθεί, είναι ενεργητική και προληπτική, και έχει να κάνει με την *προ-πλήρωση* (Pre-Filling) ενός αποθηκευτικού κόμβου (cache). Η προ-πλήρωση μιας cache έχει αναδειχθεί ως μια νέα τεχνική για την αύξηση της διαθεσιμότητας δημοφιλών αντικειμένων περιεχομένου στους cache εξυπηρετητές. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, τα αντικείμενα αποστέλλονται από έναν *προωθητικό* (push) εξυπηρετητή στους πληρεξούσιους cache εξυπηρετητές μέσω ενός μηχανισμού διανομής βασισμένου είτε σε *πολυμετάδοση* (multicast) ή *εκπομπή* (broadcast) μέσω κάποιας δορυφορικής σύνδεσης. Με την εισαγωγή προ-επιλεγμένου περιεχομένου στους αποθηκευτικούς χώρους ενός αριθμού N πληρεξούσιων εξυπηρετητών που ανήκουν σε μια ομάδα πολυμετάδοσης ενός ΔΔΠ διασφαλίζεται ένα χαμηλότερο κόστος μετάδοσης από το κόστος N ανεξάρτητων μεταδόσεων (unicasts).

Μια από τις πιο δύσκολες προκλήσεις είναι η σχεδίαση του *αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού* (scheduling algorithm) του προωθητικού εξυπηρετητή. Έργο του αλγορίθμου είναι ο καθορισμός των αντικειμένων που θα αποσταλούν και του χρονικού σημείου κατά το οποίο θα πραγματοποιηθεί η αποστολή, με άλλα λόγια η δημιουργία του *χάρτη χρονοπρογραμματισμού της εκπομπής* (broadcast scheduling map). Υπάρχουν 2 διαφορετικές προσεγγίσεις για την σχεδίαση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού, μια *συγκεντρωτική* και μια *κατανεμημένη* [23].

Σύμφωνα με την συγκεντρωτική προσέγγιση, ο προωθητικός εξυπηρετητής, ευρισκόμενος στο μονοπάτι σύνδεσης των πληρεξούσιων εξυπηρετητών με το υπόλοιπο Διαδίκτυο, αναλύει τις αιτήσεις που δέχονται οι διάφοροι πληρεξούσιοι εξυπηρετητές και καθορίζει το χάρτη χρονοπρογραμματισμού της εκπομπής. Πλεονέκτημα της συγκεντρωτικής προσέγγισης αποτελεί το γεγονός ότι οι πληρεξούσιοι εξυπηρετητές

δεν συμμετέχουν ενεργά στην διαδικασία και δεν επιβαρύνονται υπολογιστικά. Απλώς προωθούν στο Διαδίκτυο όλες τις αιτήσεις που δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τοπικά. Μειονέκτημα συνιστά η απαίτηση να διέρχονται από τον προωθητικό εξυπηρετητή όλα τα μονοπάτια σύνδεσης των πληρεξούσιων εξυπηρετητών με το Διαδίκτυο.

Σύμφωνα με την κατανεμημένη προσέγγιση, κάθε πληρεξούσιος εξυπηρετητής αναλύει σε τακτά σταθερά χρονικά διαστήματα λ (π.χ. $\lambda=60$ δευτερόλεπτα) τις αιτήσεις για περιεχόμενο που έχει δεχθεί στο παρελθόν (π.χ. σε διάστημα $\delta=1$ ώρα) και προσδιορίζει τα αντικείμενα που επιθυμεί να λάβει και πότε μέσω δορυφορικής εκπομπής. Ο προωθητικός εξυπηρετητής σε αυτήν την προσέγγιση πρέπει να συγκεράσει όλες τις αιτήσεις που λαμβάνει από τους N πληρεξούσιους σε έναν χάρτη χρονοπρογραμματισμού της εκπομπής. Μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης αποτελεί η ύπαρξη πιθανών συγκρούσεων μεταξύ των αιτήσεων των πληρεξούσιων εξυπηρετητών που καθιστά δύσκολη διαδικασία την δημιουργία του πλέον αποδοτικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης.

5.7.1 Παραδείγματα Αλγόριθμων

Τα παραδείγματα αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού για ΔΔΠ που ακολουθούν αναφέρονται στην κατανεμημένη προσέγγιση [23]. Κάθε πληρεξούσιος εξυπηρετητής αναλύει τις αιτήσεις περιεχομένου από τους πελάτες που εξυπηρετεί και κατασκευάζει μια δι-διάστατη *μήτρα οφέλους* (benefit matrix). Οι γραμμές της μήτρας αναφέρονται στα αντικείμενα του συστήματος ενώ οι στήλες στις διαθέσιμες χρονοθυρίδες εκπομπής αντικειμένων. Οι τιμές του κέρδους που παίρνουν τα κελιά του πίνακα κυμαίνονται στο διάστημα $[0, 1]$, ανάλογα με την επιθυμία λήψης ενός αντικείμενου σε μια δοσμένη χρονοθυρίδα. Η μέγιστη τιμή 1 προφανώς εκχωρείται σε ένα αντικείμενο για την χρονοθυρίδα που ισοδυναμεί με το χρονικό σημείο λήξης του αποθηκευμένου τοπικού αντιγράφου. Οι τιμές κέρδους παρουσιάζουν μια φθίνουσα τάση καθώς εάν δεν αποσταλεί το αντικείμενο με εκπομπή από τον προωθητικό-εξυπηρετητή όταν ζητηθεί (ή όταν λήξει το τοπικό αντίγραφο), υπάρχουν εναλλακτικοί τρόποι προμήθειας του (π.χ. με ανεξάρτητη επίγεια μετάδοση unicast από άλλη cache).

Ο προωθητικός εξυπηρετητής συλλέγει κατόπιν όλους τους επιμέρους πίνακες κερδών από τους πληρεξούσιους εξυπηρετητές και κατασκευάζει τον συνολικό πίνακα οφέλους όπου κάθε κελί περιέχει το κανονικοποιημένο άθροισμα των τιμών οφέλους όλων των πληρεξούσιων για το συγκεκριμένο συνδυασμό αντικειμένου και

χρονοθυρίδα εκπομπής. Στηριζόμενος σε αυτόν τον πίνακα ο προωθητικός εξυπηρετητής πρέπει να προβεί στον χρονοπρογραμματισμό της εκπομπής των αντικειμένων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται το συνολικό όφελος.

- *Αλγόριθμος μέγιστου τοπικού οφέλους (maximum local benefit algorithm)*

Σε κάθε χρονοθυρίδα είναι γνωστά τα ως τότε οφέλη (*on-line αλγόριθμος*) και όχι ολόκληρος ο πίνακας. Αποστέλλεται κάθε φορά το πιο ωφέλιμο (με το μεγαλύτερο όφελος) αντικείμενο που δεν έχει ήδη μεταδοθεί. Δεν είναι ο πλέον βέλτιστος αλγόριθμος. Έχει καλά αποτελέσματα όταν ο λόγος των αντικειμένων ως προς τις χρονοθυρίδες μετάδοσης είναι μεγάλος. Είναι κατάλληλος για πρακτικά συστήματα λόγω της μη ύπαρξης απαιτήσεως για γνώση του συνολικού πίνακα οφέλους, παρά μόνο της τρέχουσας χρονοθυρίδας.

- *Αλγόριθμος μέγιστου συνολικού οφέλους (maximum global benefit algorithm)*

Ελέγχει όλον τον πίνακα οφέλους και επιλέγει το αντικείμενο προς μετάδοση με το μεγαλύτερο κέρδος (όφελος). Τείνει προς το βέλτιστο αποτέλεσμα. Μειονέκτημά του αποτελεί η απαίτηση γνώσης του συνολικού πίνακα πριν τη σχεδίαση του χρονοπρογραμματισμού, που συνήθως δεν είναι εφικτό για πραγματικά συστήματα.

- *Αλγόριθμος μέγιστου ταιριάσματος σε διμερή γραφήματα (maximum-matching algorithm in bipartite graphs)*

Ο αλγόριθμος προϋποθέτει την κατασκευή ενός διμερούς (bipartite) γραφήματος, το ένα σύνολο κόμβων του οποίου είναι τα αντικείμενα περιεχομένου, ενώ το άλλο οι διαθέσιμες χρονοθυρίδες. Το σύνολο των ακμών που αποτελούν το ταίριασμα¹ του γραφήματος κατασκευάζεται έτσι ώστε κάθε κόμβος που αναπαριστά ένα αντικείμενο να συνδέεται με κάποιον κόμβο που παριστάνει μια χρονοθυρίδα. Σε κάθε ακμή συσχετίζουμε ένα βάρος ίσο με το κέρδος μετάδοσης του αντικειμένου στην

¹ Ταίριασμα σε ένα γράφημα $G(V,E)$ [48] είναι ένα υποσύνολο των ακμών του $M \subseteq E$ τέτοιο ώστε για όλους τους κόμβους $v \in V$ το πολύ μία ακμή του συνόλου M να είναι γειτονική στον v . Το σύνολο M είναι το μέγιστο ταίριασμα σε ένα σταθμισμένο γράφημα εάν για κάθε άλλο ταίριασμα M' το άθροισμα των βαρών του M δεν είναι μικρότερο του αθροίσματος των βαρών του M' . Στην περίπτωση του χρονοπρογραμματισμού το συνολικό όφελος που προκύπτει από το συγκεκριμένο ταίριασμα είναι το μέγιστο δυνατό.

συγκεκριμένη χρονοθυρίδα. Είναι ο βέλτιστος αλγόριθμος, αλλά έχει υψηλή πολυπλοκότητα. Επίσης απαιτεί την γνώση εκ των προτέρων όλου του πίνακα οφέλους.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ

6.1 Μοντέλα λειτουργίας μίας cache

Όπως έχει ήδη αναφερθεί συνοπτικά, υπάρχουν δύο μοντέλα πλήρωσης του αποθηκευτικού χώρου μιας cache [34]. Το πρώτο είναι το *μοντέλο της έλκυσης* (pull model), όπου το περιεχόμενο της cache καθορίζεται από την ζήτηση, δηλαδή από τις αιτήσεις των τελικών χρηστών για περιεχόμενο. Για κάθε αντικείμενο περιεχομένου που ζητείται από έναν καταναλωτή, ένα αντίγραφο του αποθηκεύεται στην cache για μελλοντική χρήση. Λόγω του περιορισμένου αποθηκευτικού χώρου, το περιεχόμενο της cache ανανεώνεται με βάση την ζήτηση και σύμφωνα με κάποια πολιτική αντικατάστασης. Στην περίπτωση που υιοθετείται αυτό το μοντέλο για την λειτουργία της cache, η υπηρεσία caching που προσφέρεται στους τελικούς χρήστες μπορεί να θεωρηθεί ως μια υπηρεσία *βέλτιστης προσπάθειας* (best-effort service), δανειζόμενοι τον όρο από το πεδίο της μετάδοσης δεδομένων. Ο χαρακτηρισμός αυτός αιτιολογείται από την μη παροχή εγγυήσεων παρουσίας ενός αντικειμένου μέσα στην cache, καθώς και από το γεγονός ότι δεν πραγματοποιούνται δεσμεύσεις πόρων, δηλαδή αποθηκευτικού χώρου, κατά την προσφορά της υπηρεσίας.

Το δεύτερο μοντέλο που μπορεί να εφαρμοσθεί κατά την λειτουργία μιας cache είναι το *μοντέλο της ώθησης* (push model). Οι κύριες διαφορές αυτού του μοντέλου από το προηγούμενο είναι δύο. Πρώτον, η επιλογή των αντικειμένων που θα αντιγραφούν στην cache πραγματοποιείται από τους προμηθευτές περιεχομένου. Δεύτερον, η αποστολή των αντικειμένων προς τις caches για αποθήκευση γίνεται προληπτικά (pro-actively), πριν δηλαδή δημιουργηθεί ζήτηση για αυτά. Με αυτόν τον τρόπο όλες οι αιτήσεις για τα αντικείμενα που θα αντιγραφούν στην cache ικανοποιούνται από αυτήν, ενώ στο πρώτο μοντέλο τουλάχιστον η πρώτη αίτηση για κάποιο αντικείμενο ικανοποιείται πάντοτε από τον πηγαίο εξυπηρετητή.

Συνήθως αυτή η τακτική συνοδεύεται και από την δέσμευση χώρου για το περιεχόμενο που προωθείται στην cache, έτσι ώστε να παρέχεται εγγύηση ότι τα αντικείμενα που θα ζητηθούν θα βρίσκονται πάντοτε μέσα στην cache. Κρίνοντας από τα παραπάνω, μια υπηρεσία caching που ακολουθεί μοντέλο της ώθησης μπορεί να θεωρηθεί ότι παρέχει κάποια ποιότητα υπηρεσίας (Quality Of Service – QoS) στους

πελάτες της, για αυτό και είναι γνωστή ως QoS caching. Έτσι δικαιολογείται η υιοθέτηση του μοντέλου της ώθησης από τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου, τα οποία έχουν υψηλές απαιτήσεις απόδοσης, κατά την αντιγραφή του περιεχομένου στους αποθηκευτικούς κόμβους τους.

6.2 Γενικά περί πολιτικών αντικατάστασης περιεχομένου

Βασικό παράγοντα για την αποτελεσματικότητα σε επιτυχείς προσβάσεις (hits) μιας cache αποτελεί ο αλγόριθμος αντικατάστασης περιεχομένου που αυτή υλοποιεί ([5], [6], [30], [31]). Ως γνωστόν, για κάθε αίτηση που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί τοπικά (είτε λόγω μη ύπαρξης του αντικειμένου στην cache ή λήξης του χρόνου ζωής του αντιγράφου του), η cache επικοινωνεί με τον πηγαίο εξυπηρετητή περιεχομένου, αντλεί το αιτηθέν αντικείμενο και αποθηκεύει ένα αντίγραφο του προς εξυπηρέτηση μελλοντικών αιτήσεων για το ίδιο αντικείμενο. Λόγω του περιορισμένου όμως αποθηκευτικού χώρου μιας cache, σε περίπτωση πληρότητάς της μια αίτηση για ένα μη αποθηκευμένο σε αυτές αντικείμενο θα προκαλέσει την απομάκρυνση ενός ή περισσοτέρων από τα αντικείμενα που ήδη φυλάσσονται στην cache προκειμένου να απελευθερωθεί επαρκής χώρος για το νέο περιεχόμενο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των αλγορίθμων αντικατάστασης περιεχομένου ευδοκιμεί συνήθως με την υιοθέτηση του μοντέλου της έλκυσης κατά την λειτουργία της cache, όπου το περιεχόμενό της ανανεώνεται με βάση την ζήτηση, και όχι τόσο με το αντίστοιχο της ώθησης.

Οι πολιτικές αντικατάστασης περιεχομένου (content replacement policies) γνωστές και ως πολιτικές απομάκρυνσης περιεχομένου (content removal policies) αποφασίζουν με βάση κάποια ορισμένα κριτήρια ποια αντικείμενα θα απομακρυνθούν από μια cache προκειμένου να αποθηκευθούν τα νέα. Σκοπός των πολιτικών αντικατάστασης περιεχομένου είναι η διατήρηση στην cache των αντικειμένων περιεχομένου που είναι περισσότερο πιθανόν να αιτηθούν στο μέλλον, ώστε να αυξηθεί ο βαθμός επιτυχίας (hit-rate) της cache. Οι παραδοσιακές πολιτικές διαχείρισης του χώρου μιας cache που χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση του περιεχομένου είναι αυτές της Ελάχιστης Συχνότητας Χρήσης (LFU) και της Λιγότερο Πρόσφατης Χρήσης (LRU), οι οποίες βασίζονται στο ιστορικό πρόσβασης των αντικειμένων για την λήψη αποφάσεων και θα αναλυθούν λεπτομερειακά στην συνέχεια.

Το caching δεν είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται αποκλειστικά στο Διαδίκτυο. Αντίθετα έχει εφαρμοσθεί επιτυχώς στο πεδίο των υπολογιστικών συστημάτων για να αυξήσει την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων από την κύρια μνήμη στην ΚΜΕ. Τεχνικές, όμως, που έχουν αναπτυχθεί για τις caches των ΚΜΕ και την εικονική μνήμη (virtual memory) δεν μπορούν απαραίτητα να μεταφερθούν αυτούσιες στο πεδίο του caching στο Διαδίκτυο [5]. Αυτό ισχύει επειδή υπάρχουν τρεις βασικές διαφορές μεταξύ του caching στο Διαδίκτυο και των συμβατικών προβλημάτων σελιδοποίησης:

Πρώτον, το web caching είναι μεταβλητού μεγέθους. Λόγω περιορισμών στο πρωτόκολλο HTTP που υποστηρίζει μόνο μεταφορές ολόκληρου αρχείου, μια επιτυχής πρόσβαση στην cache πραγματοποιείται μόνο εάν ολόκληρο το αρχείο είναι αποθηκευμένο σε αυτήν. Παρομοίως, τα έγγραφα του Ιστού ποικίλλουν δραματικά στο μέγεθος ανάλογα με την πληροφορία που μεταφέρουν (κείμενο, εικόνα, βίντεο κτλ). Επίσης ο *τύπος* του αντικειμένου, αν είναι δηλαδή κείμενο, ήχος ή εικόνα, μπορεί να συνεκτιμηθεί από μια πολιτική αντικατάστασης, σε αντίθεση με τις caches των ΚΜΕ που μεταχειρίζονται όλα τα δεδομένα ως ομογενή. Από την άλλη πλευρά, οι caches του Διαδικτύου είναι απλούστερες στο ότι δεν υπάρχουν ποτέ «βρώμικα» (τροποποιημένα) αρχεία για να ξαναγραφούν στον αποθηκευτικό χώρο της πηγής τους.

Δεύτερον, οι ιστοσελίδες απαιτούν συνήθως διαφορετικό ποσό χρόνου για να ανακτηθούν, ακόμα και εάν έχουν το ίδιο μέγεθος. Μια πληρεξούσια cache που θέλει να μειώσει την μέση καθυστέρηση πρόσβασης στον Ιστό για έναν τελικό χρήστη, μπορεί να χρειαστεί να ρυθμίσει την στρατηγική αντικατάστασης βάσει της καθυστέρησης ανάκτησης (download latency).

Τρίτον, οι αιτήσεις περιεχομένου που λαμβάνει μια πληρεξούσια cache προέρχονται από δεκάδες ως χιλιάδες διαφορετικούς χρήστες, αντί λίγων προγραμματισμένων πηγών όπως συμβαίνει στην περίπτωση της σελιδοποίησης εικονικής μνήμης.

Οι πολιτικές αντικατάστασης είναι ad hoc με την έννοια ότι δεν υπάρχει ομοφωνία μεταξύ τους όσον αφορά τους παράγοντες που πρέπει να εκτιμηθούν κατά την διαδικασία επιλογής των αντικειμένων που θα απομακρυνθούν, ή ακόμα και την σχετική σημασία τους. Παράγοντες οι οποίοι λαμβάνονται υπ' όψιν είναι το μέγεθος του αντικειμένου, ο χρόνος εισαγωγής του στην cache, ο χρόνος τελευταίας πρόσβασης, ο αριθμός αναφορών σε αυτό κτλ.

6.3 Κατάταξη των πολιτικών αντικατάστασης

Οι πολιτικές αντικατάστασης μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με την διαδικασία ταξινόμησης που έχουν ενσωματωμένη στον αλγόριθμό τους [6]. Μια πολιτική αντικατάστασης μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει δύο φάσεις. Πρώτα, ταξινομούνται τα αντικείμενα που είναι αποθηκευμένα στην cache ανάλογα με ένα ή περισσότερα κλειδιά, τα οποία καθορίζουν την «χρησιμότητα» διατήρησης ενός αντικειμένου για την cache. Κατόπιν απομακρύνονται μηδέν ή περισσότερα αντικείμενα από την κεφαλή της ταξινομημένης λίστας, δηλαδή τα πιο «άχρηστα» αντικείμενα, μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο, όπως π.χ. ότι το ποσό του ελεύθερου αποθηκευτικού χώρου της cache είναι ίσο ή υπερβαίνει το μέγεθος του εισερχομένου αντικειμένου.

Ενδεικτικά κλειδιά τα οποία χρησιμοποιούνται σε πολιτικές που περιλαμβάνονται στην σχετική βιβλιογραφία με παράλληλη σειρά ταξινόμησης που προκύπτει παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Κλειδί	Ορισμός
SIZE	Μέγεθος του αντικειμένου (σε bytes)
$\lceil \log_2(\text{SIZE}) \rceil$	Λογάριθμος με βάση 2 του μεγέθους
ETIME	Χρόνος εισαγωγής στην cache
ATIME	Χρόνος τελευταίας πρόσβασης
DAY(ATIME)	Μέρα τελευταίας πρόσβασης
NREF	Αριθμός αναφορών (αιτήσεων) του αντικειμένου

Πίνακας 2 : Κλειδιά Πολιτικών Αντικατάστασης Περιεχομένου

Γνωστές από την βιβλιογραφία πολιτικές χρησιμοποιούν συνδυασμούς των παραπάνω κλειδιών. Έτσι έχουμε τις παρακάτω πολιτικές, αρκετές εκ των οποίων είναι υιοθετημένες από το πεδίο διαχείρισης της εικονικής μνήμης:

- *FIFO (First-In-First-Out)*: Τα αντικείμενα ταξινομούνται σύμφωνα με το κλειδί ETIME σε αύξουσα σειρά, έτσι ώστε να αφαιρείται το αντικείμενο με τον αρχαιότερο χρόνο εισαγωγής στην cache, δηλαδή το πρώτο που αντιγράφηκε στην cache από όσα είναι ήδη αποθηκευμένα.

- *LRU (Least Recently Used)*: Τα αντικείμενα ταξινομούνται με βάση τον χρόνο τελευταίας πρόσβασης (το κλειδί ATIME). Αφαιρείται το αντικείμενο που έχει χρησιμοποιηθεί (αιτηθεί) λιγότερο πρόσφατα. Σήμερα τα περισσότερα συστήματα πληρεξουσίων caches χρησιμοποιούν κάποια μορφή της LRU. Μολονότι μερικά συστήματα υπολογίζουν επίσης και τα πεδία προθεσμίας λήξεως των εγγράφων TTL (Time-To-Leave) αντικαθιστώντας πρώτα τα ληγμένα αντικείμενα, μελέτες έχουν αποδείξει ότι τα συγκεκριμένα πεδία σπανίως ανταποκρίνονται στην πραγματική διάρκεια ζωής του εγγράφου και επομένως είναι καλύτερο να διατηρούνται τα ληγμένα-αλλά-πρόσφατα-χρησιμοποιημένα έγγραφα στην cache και να επικυρώνονται με επερώτηση στον πηγαίο εξυπηρετητή. Το πλεονέκτημα της LRU είναι η απλότητά της. Το μειονέκτημα είναι ότι δεν λαμβάνει υπ' όψιν της τα μεγέθη των αρχείων ή την καθυστέρηση και δεν αποδίδει το βέλτιστο βαθμό επιτυχιών (hit rate).
- *LFU (Least Frequently Used)*: Τα αντικείμενα ταξινομούνται με βάση τον αριθμό αναφορών (το κλειδί NREF) προς αυτά. Αφαιρείται το αντικείμενο που έχει χρησιμοποιηθεί λιγότερο συχνά, έχει δηλαδή τον μικρότερο αριθμό αναφορών προς αυτό. Μέσα στον μηχανισμό υπάρχει βεβαίως η πρόνοια παραχώρησης σε κάθε νεοαφιχθέν αντικείμενο ενός ελάχιστου χρονικού διαστήματος παραμονής (μιας περιόδου «χάριτος») στην cache, πριν αρχίσει να εφαρμόζεται η πολιτική για αυτό.
- *LRU-MIN*: Πρώτα εξετάζει εάν υπάρχουν αντικείμενα ίσα ή μεγαλύτερα σε μέγεθος με το εισερχόμενο αντικείμενο. Αν υπάρχουν, επιλέγεται ένα με χρήση της LRU. Αλλιώς, ελέγχει εάν υπάρχουν αντικείμενα μεγαλύτερα από το μισό του μεγέθους του εισερχόμενου αντικείμενου. Αν ναι, επιλέγεται πάλι ένα με χρήση της LRU. Αν όχι, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για το ένα τέταρτο του μεγέθους του αντικειμένου κ.ο.κ. Στην ουσία χρησιμοποιείται το $\lceil \log_2(\text{SIZE}) \rceil$ σαν πρωτεύον κλειδί (για την απόκτηση των παραγόντων $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, ..) και κατόπιν το ATIME σαν δευτερεύον κλειδί.
- *Hyper-G*: Ξεκινά με χρήση LFU χρησιμοποιώντας το NREF σαν πρωτεύον κλειδί, κατόπιν επιλύει ισοπαλίες μεταξύ αντικειμένων με LRU χρησιμοποιώντας το ATIME σαν δευτερεύον κλειδί και τέλος σαν τριτεύον κλειδί το μέγεθος του αντικειμένου.

- *Pitkow/Recker*: Χρησιμοποιεί διαφορετικό πρωτεύον κλειδί ανάλογα με το αν έχουν προσπελασθεί ή όχι όλα τα αποθηκευμένα αντικείμενα την τρέχουσα μέρα. Αν ναι, τότε πρωτεύον κλειδί είναι το SIZE και αφαιρείται το μεγαλύτερο αντικείμενο. Αν όχι, τότε πρωτεύον κλειδί είναι το DAY(ATIME) και αφαιρείται το αντικείμενο με την μικρότερη τιμή, δηλαδή εκείνο που προσπελάστηκε τις πιο πολλές μέρες πριν. Επιπλέον, ο αλγόριθμος αυτής της πολιτικής τρέχει επίσης και στο τέλος κάθε μέρας.

Υπάρχουν ακόμα δύο διαστάσεις ως προς τις οποίες μπορούν να ταξινομηθούν οι πολιτικές αντικατάστασης περιεχομένου. Αφενός ως προς την συχνότητα εκτέλεσης του αλγορίθμου και της αντικατάστασης των αντικειμένων στην cache, και αφετέρου ως προς τον αριθμό των αντικειμένων που πρέπει να απομακρύνονται κάθε φορά που εκτελείται ο αλγόριθμος. Το ερώτημα του χρονικού σημείου στο οποίο πρέπει να εκτελείται η πολιτική έχει στην βιβλιογραφία αντιμετωπισθεί με τους ακόλουθους τρόπους [6]:

- *Με βάση την ζήτηση (on-demand)*: Η πολιτική εφαρμόζεται όταν το μέγεθος του αιτηθέντος αντικειμένου υπερβαίνει τον ελεύθερο χώρο μέσα στην cache.
- *Περιοδικά*: Η πολιτική εφαρμόζεται κάθε T χρονικές μονάδες, για κάποιο T.
- *Με βάση την ζήτηση και περιοδικά*: Η πολιτική εφαρμόζεται με βάση την ζήτηση και επιπλέον στο τέλος κάθε μέρας (όπως η πολιτική Pitkow/Recker που αναφέρθηκε νωρίτερα).

Ένα μειονέκτημα της εκτέλεσης της πολιτικής με βάση την ζήτηση, και παράλληλα πλεονέκτημα της περιοδικής εφαρμογής, είναι ότι σε περίπτωση που η cache πλησιάζει τα όρια πληρότητας ο αλγόριθμος αντικατάστασης πρέπει να εκτελείται σχεδόν για κάθε αίτηση νέου αντικειμένου καθώς δεν υπάρχει επαρκής ελεύθερος χώρος. Εάν ειδικότερα η απομάκρυνση είναι χρονοβόρα, τότε προξενείται σημαντική επιβάρυνση στο σύστημα. Αυτή η επιβάρυνση μπορεί να μειωθεί μέσω της περιοδικής απομάκρυνσης αντικειμένων έως ότου ο ελεύθερος χώρος προσεγγίσει ένα ορισμένο όριο. Ωστόσο, η περιοδική απομάκρυνση αντικειμένων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του βαθμού επιτυχιών, καθώς και περισσότερα αντικείμενα από τα απαιτούμενα αφαιρούνται και νωρίτερα από ό,τι απαιτείται, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα κριτήρια ελάχιστου χώρου. Γενικά, η διαδικασία απομάκρυνσης αντικειμένων μπορεί να επιταχυνθεί εάν η λίστα των αποθηκευμένων αντικειμένων

διατηρείται ταξινομημένη κατά την λειτουργία της cache, οπότε απλώς αφαιρείται η κεφαλή της λίστας προς απομάκρυνση, χωρίς να εκτελούνται πρόσθετοι υπολογισμοί.

Το ζήτημα του αριθμού των αντικειμένων που πρέπει να αφαιρούνται από την cache έχει απαντηθεί με δύο τρόπους. Για πολιτικές εφαρμογής με βάση την ζήτηση, μια λύση είναι να διακόπτεται η αφαίρεση αντικειμένων όταν ο ελεύθερος χώρος είναι ίσος ή υπερβαίνει το μέγεθος του αιτηθέντος αντικειμένου. Για πολιτικές περιοδικής εφαρμογής, μια λύση είναι η αφαίρεση αντικειμένων έως ότου ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο.

6.4 Μεροληπτικές πολιτικές αντικατάστασης

Οι παραδοσιακές πολιτικές αντικατάστασης περιεχομένου μπορούν να τροποποιηθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να «μεροληπτούν» υπέρ ορισμένων αντικείμενων και εις βάρος άλλων. Η μορφή που μπορεί να λάβει αυτή η μεροληψία στις μεροληπτικές πολιτικές αντικατάστασης εξαρτάται από τις ανάγκες κάθε φόρα του διαχειριστή της cache ή των πελατών του, είτε προμηθευτών περιεχομένου είτε καταναλωτών του. Υπάρχουν δύο δυνατοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να επέλθει μια τέτοια τροποποίηση στις υπάρχουσες πολιτικές αντικατάστασης. Ο πρώτος τρόπος αναφέρεται στην ενσωμάτωση στον αλγόριθμο χαρακτηριστικών που έχουν σχέση γενικά με το «κόστος» ενός αντικείμενου περιεχομένου, είτε είναι κόστος μεταφοράς ή καθυστέρηση ανάκτησης. Ο δεύτερος τρόπος στηρίζεται στην εισαγωγή στο σύστημα των αποτιμήσεων για το περιεχόμενο είτε των προμηθευτών ή των καταναλωτών του. Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετηθούν οι αλγόριθμοι της πρώτης κατηγορίας, ενώ προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη τις αποτιμήσεις της αξίας του περιεχομένου θα παρουσιασθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι μεροληπτικοί αλγόριθμοι αντικατάστασης της πρώτης κατηγορίας συσχετίζουν ένα κατάλληλο δικτυακό κόστος (*network cost*) με κάθε αντικείμενο, προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος που επιφέρει μια συγκεκριμένη ροή αιτήσεων περιεχομένου. Εάν, για παράδειγμα, ένας οργανισμός που λειτουργεί μια cache πρέπει να πληρώσει για ορισμένες δικτυακές συνδέσεις περισσότερο από ότι για άλλες, τότε ο αλγόριθμος αντικατάστασης μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να ευνοεί τα «ακριβά» έγγραφα (εκείνα που μεταφέρονται στις ακριβές γραμμές) εις βάρος των φτηνών εγγράφων. Εάν είναι γνωστό ότι ορισμένες δικτυακές διαδρομές είναι βαριά συμφορημένες σε σχέση με άλλες, ο αλγόριθμος τότε

μπορεί να διατηρήσει στην cache για περισσότερο χρόνο τα έγγραφα που πρέπει να ταξιδέψουν σε συμφορημένες διαδρομές. Αλλιώς, η cache μπορεί να μειώσει την συνεισφορά της στον φόρτο των δρομολογητών του δικτύου δίνοντας προτεραιότητα αποθήκευσης σε αντικείμενα τα οποία ταξιδεύουν περισσότερα δικτυακά βήματα (hops).

6.4.1 Παραδείγματα μεροληπτικών πολιτικών αντικατάστασης

Έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία ([5]) αρκετοί αλγόριθμοι που αντιμετωπίζουν τα ζητήματα του δικτυακού κόστους και της καθυστέρησης, όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως. Μια αντιπροσωπευτική λίστα παρουσιάζεται παρακάτω:

- **Lowest-Latency-First** [46]: Προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την μέση καθυστέρηση αφαιρώντας πρώτο το αντικείμενο από την cache με τον χαμηλότερη χρονική καθυστέρηση ανάκτησης.
- **Hybrid** [46]: Υβριδική παραλλαγή της LFU που στοχεύει στην μείωση της συνολικής καθυστέρησης. Για κάθε αντικείμενο υπολογίζεται η τιμή μιας συνάρτησης που είναι σχεδιασμένη να συλλάβει την χρησιμότητα διατήρησης ενός δεδομένου αντικειμένου στην cache σε όρους καθυστέρησης (latency). Απομακρύνεται κάθε φορά το αντικείμενο με την μικρότερη τιμή της συνάρτησης. Η συνάρτηση για ένα αντικείμενο p αρχικά ευρισκόμενο στον πηγαίο εξυπηρετητή s εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους: c_s , ο χρόνος για σύνδεση με τον εξυπηρετητή s , b_s το εύρος ζώνης για τον εξυπηρετητή s , n_p ο αριθμός αναφορών στο p από την στιγμή που εισήχθηκε στην cache και z_p το μέγεθος (σε bytes) του αντικειμένου p . Η συνάρτηση ορίζεται ως:

$$\frac{\left(c_s + \frac{W_b}{b_s}\right)(n_p)^{W_n}}{z_p}$$

όπου W_b και W_n είναι σταθερές. Οι εκτιμήσεις για τα c_s και b_s βασίζονται στους χρόνους για την ανάκτηση των αντικειμένων από τους εξυπηρετητές s στο πρόσφατο παρελθόν.

- **Lowest Relative Value (LRV)** [47]: Περιλαμβάνει το κόστος και το μέγεθος ενός αντικειμένου στον υπολογισμό μιας τιμής που εκτιμά την χρησιμότητα διατήρησης ενός αντικειμένου στην cache. Ο υπολογισμός της τιμής βασίζεται σε εκτεταμένη εμπειρική ανάλυση δεδομένων προσπέλασης του παρελθόντος. Για ένα

δοθέν i , έστω P_i η πιθανότητα ένα αντικείμενο να ζητηθεί $i+1$ φορές δεδομένου ότι έχει αιτηθεί i φορές. Το P_i εκτιμάται λαμβάνοντας τον λόγο D_{i+1} / D_i , όπου D_i είναι ο συνολικός αριθμός αντικειμένων που έχουν αιτηθεί τουλάχιστον i φορές ως την στιγμή αυτή του υπολογισμού. Το $P_i(s)$ περιορίζει την μέτρηση μόνο για αντικείμενα μεγέθους s . Έστω $1-D(t)$ η πιθανότητα μια σελίδα να αιτηθεί ξανά σαν συνάρτηση του χρόνου t (σε δευτερόλεπτα) από την τελευταία αίτηση. Το $D(t)$ εκτιμάται ως:

$$D(t) = .035 \log(t+1) + .45(1 - e^{-\frac{t}{2e^6}}).$$

Τότε για ένα συγκεκριμένο αντικείμενο d μεγέθους s και κόστους c , εάν η τελευταία αίτηση για αυτό ήταν η i 'στη, και η τελευταία αίτηση έγινε t δευτερόλεπτα πριν, τότε η αξία του d στην LRV υπολογίζεται ως:

$$V(i, t, s) = \begin{cases} P_i(s)(1 - D(t)) * c / s & \text{εάν } i = 1 \\ P_i(1 - D(t)) * c / s & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Ο αλγόριθμος απομακρύνει το αντικείμενο με την χαμηλότερη τιμή. Έτσι η LRV λαμβάνει υπ' όψιν την χρονική γειννίαση των αιτήσεων, το κόστος και το μέγεθος ενός αντικειμένου.

- *Greedy-Dual-Size* [5]: Ο Greedy-Dual-Size αλγόριθμος είναι μια επέκταση του αρχικού Greedy-Dual αλγορίθμου, που αποτελεί μια γενίκευση της πολιτικής LRU. Ο Greedy-Dual υποθέτει ότι όλα τα αντικείμενα σε μια cache έχουν το ίδιο μέγεθος, αλλά επιφέρουν διαφορετικό κόστος για την ανάκληση τους από τον πηγαίο εξυπηρετητή. Ο αλγόριθμος συσχετίζει μια τιμή, H , με κάθε αποθηκευμένο αντικείμενο p . Αρχικά όταν ένα αντικείμενο εισάγεται στην cache, η τιμή H τίθεται στο κόστος μεταφοράς του αντικειμένου στην cache (το κόστος είναι πάντα μη-αρνητικό). Όταν πρέπει να γίνει μια αντικατάσταση, απομακρύνεται το αντικείμενο με την χαμηλότερη τιμή H , min_H , και όλα τα άλλα αντικείμενα μειώνουν τις τιμές H κατά min_H . Εάν ένα αντικείμενο αιτηθεί, τότε επαναφέρεται η τιμή H στο κόστος μεταφοράς του στην cache. Έτσι, οι τιμές H των πρόσφατα αιτηθέντων αντικειμένων διατηρούν ένα μεγάλο μέρος του αρχικού κόστους από εκείνες των αντικειμένων που δεν έχουν αιτηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μειώνοντας τις τιμές H με την πάροδο του χρόνου και επανορθώνοντας τις με κάθε αίτηση, ο

αλγόριθμος συνδυάζει τις παραμέτρους της χρονικής γειτνίασης των αιτήσεων και του κόστους.

Για την ενσωμάτωση των διαφορετικών μεγεθών των αντικειμένων στον αλγόριθμο, αυτός επεκτείνεται θέτοντας την τιμή H ως $cost/size$ σε κάθε αίτηση στο αντικείμενο, όπου $cost$ είναι το κόστος ανάκτησης του αντικειμένου και $size$ το μέγεθος του σε bytes. Η επεκταμένη έκδοση αυτή του αλγόριθμου καλείται Greedy-Dual-Size. Ο ορισμός του κόστους εξαρτάται από το στόχο του αλγόριθμου αντικατάστασης. Έτσι το κόστος τίθεται στη μονάδα εάν στόχος είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού επιτυχών προσβάσεων (hit rate), στην χρονική καθυστέρηση ανάκτησης εάν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης καθυστέρησης, ή στο δικτυακό κόστος, εάν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.

Πλεονεκτήματα του Greedy-Dual-Size είναι ότι συνδυάζει τις διαστάσεις της χρονικής γειτνίασης των αιτήσεων, του κόστους και του μεγέθους με έναν ενοποιημένο τρόπο χωρίς χρήση συναρτήσεων στάθμισης ή παραμέτρων. Είναι επομένως απλός στην υλοποίηση και εξυπηρετεί μια ποικιλία στόχων απόδοσης. Κάθε φορά όμως μπορεί να βελτιστοποιεί μια μετρική απόδοσης.

6.4.2 Σύγκριση των πολιτικών αντικατάστασης

Έρευνες [6] με την χρήση πραγματικών δεδομένων αιτήσεων (web traces) πληρεξούσιων caches έχουν προκρίνει ως βέλτιστες πολιτικές αντικατάστασης τις LRU, Size, Hybrid και LRV. Ένα μειονέκτημα των Hybrid και LRV είναι η βαριά παραμετροποίησή τους, που γεννά αμφιβολίες για την απόδοσή τους σε διαφορετικές ροές αιτήσεων προσπέλασης (access streams). Ένα ακόμα ζήτημα σχετικό με τους δύο τελευταίους αλγόριθμους είναι ότι υιοθετούν σταθερές οι οποίες ίσως πρέπει να ρυθμίζονται κάθε φορά ανάλογα με τα πρότυπα των ροών αιτήσεων.

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΤΟΥ CACHING

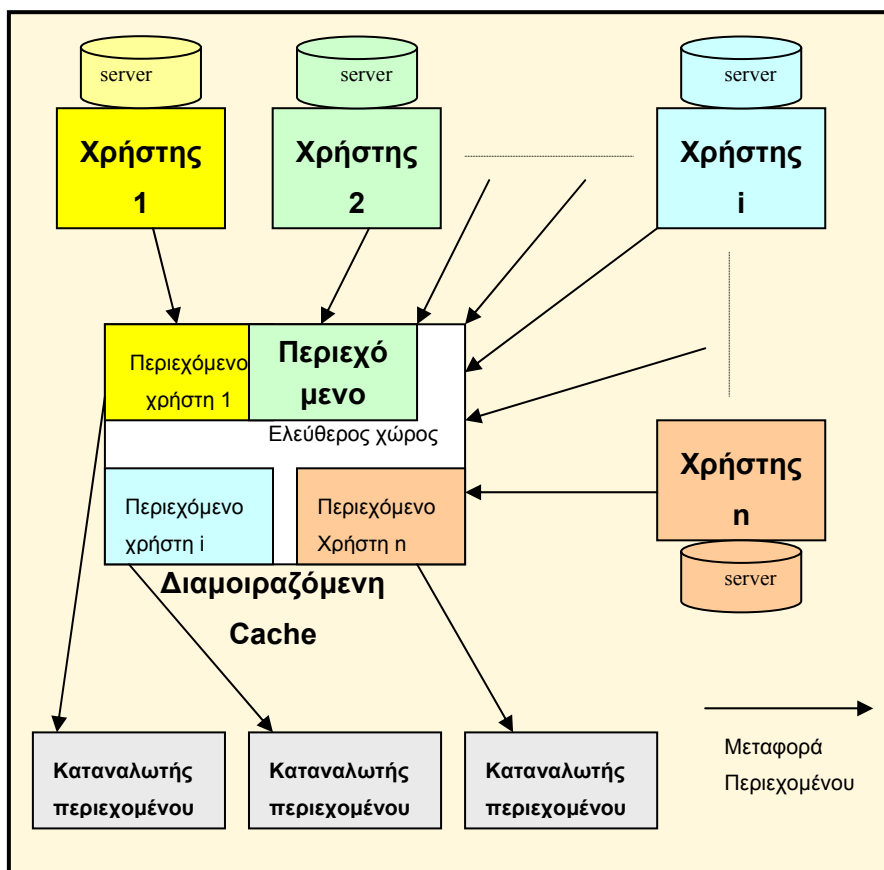
7.1 Μοντέλο Μορφοποίησης του προβλήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τις οικονομικές διαστάσεις που λαμβάνει το πρόβλημα της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου μιας cache. Μολονότι στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε εκτενής αναφορά στα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου που αποτελούνται από μια συλλογή caches, λόγω της πολυπλοκότητας και της σύνθεσης του προβλήματος, θα περιορισθούμε στην περίπτωση μιας μοναδικής ανεξάρτητης cache που δεν ανήκει σε κάποιο ιεραρχικό-συνεργατικό σχήμα.

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, υπάρχουν τρία επίπεδα caches στο Διαδίκτυο. Στο πρώτο επίπεδο περιλαμβάνονται οι ενσωματωμένες caches στο πρόγραμμα επισκόπησης των τελικών χρηστών, οι οποίες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την αποθήκευση του περιεχομένου κάθε ανεξάρτητου χρήστη. Σε αντίθεση όμως με αυτές τις «ατομικές» caches, οι caches ανωτέρου επιπέδου, που είναι εγκατεστημένες σε τοπικά δίκτυα οργανισμών ή στα δίκτυα των ISP, αποτελούν ένα κοινό διαμοιραζόμενο πόρο μεταξύ πολλών χρηστών.

Ο αποθηκευτικός χώρος μιας διαμοιραζόμενης cache μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα δικτυακός πόρος ο οποίος βρίσκεται σε σπανιότητα. Αφενός η προσφορά του είναι περιορισμένη και αφετέρου η ζήτηση για αυτόν, δηλαδή οι αιτήσεις για περιεχόμενο στο Διαδίκτυο, είναι πολλαπλάσια. Όπως συμβαίνει και σε άλλα δικτυακά στοιχεία σε ώρες αιχμής, όπως είναι το εύρος ζώνης ή οι ουρές αναμονής για επεξεργασία στους δρομολογητές, οι καταναλωτές αυτών των πόρων ανταγωνίζονται μεταξύ τους ποιος θα καταναλώσει μεγαλύτερη ποσότητα. Εν προκειμένω οι χρήστες μιας cache ανταγωνίζονται για το ποιος θα τοποθετήσει περισσότερο δικό του περιεχόμενο στον αποθηκευτικό χώρο της cache ώστε να αντλήσει μεγαλύτερη χρησιμότητα.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται μια γραφική απεικόνιση του προβλήματος της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου μιας διαμοιραζόμενης cache στους διάφορους προμηθευτές περιεχομένου:



Εικόνα 11: Κατανομή αποθηκευτικού χώρου cache

Παρακάτω δίνεται ένα μοντέλο μορφοποίησης του προβλήματος που εξετάζουμε. Υπάρχει μια αγορά, όπου το αγαθό που διαπραγματεύεται είναι ο αποθηκευτικός χώρος μιας διαμοιραζόμενης cache. Ο παραγωγός στο σύστημα αυτής της αγοράς είναι ο ιδιοκτήτης της cache, που διαχειρίζεται την λειτουργία της και είναι υπεύθυνος για την κατανομή του αποθηκευτικού χώρου της στους πελάτες-χρήστες του συστήματος. Ο παραγωγός θα αναφέρεται στην συνέχεια ως πάροχος της υπηρεσίας caching (Caching Service Provider) CSP.

Στο σύστημα μπορούν να αναγνωριστούν δύο κύριοι τύποι πρακτόρων (agents) ή χρηστών της υπηρεσίας caching: οι *προμηθευτές περιεχομένου* (content providers) CP και οι *πελάτες* (clients) C. Και οι δύο δρουν ως συγκεντρωτικές οντότητες της αξίας που αποκομίζουν οι τελικοί χρήστες, που είναι οι καταναλωτές του περιεχομένου. Οι πελάτες αναπαριστούν τους οργανισμούς ή παροχείς υπηρεσιών δικτύου (ISPs) οι οποίοι θέλουν να αγοράσουν χώρο στις caches για την αποθήκευση δημοφιλούς περιεχομένου σύμφωνα με τις προτιμήσεις των δικών τους τελικών χρηστών. Στην περίπτωση βέβαια που η cache ανήκει σε έναν ISP, τότε τον ρόλο του πελάτη αναλαμβάνουν άμεσα οι τελικοί χρήστες. Οι προμηθευτές περιεχομένου ενδιαφέρονται

για την προώθηση του περιεχομένου τους στην cache προκειμένου να μειώσουν αφενός το φόρτο των εξυπηρετητών τους και την κατανάλωση εξερχόμενου εύρους ζώνης και αφετέρου την καθυστέρηση που υφίστανται οι καταναλωτές του περιεχομένου τους.

Αυτοί οι μεσάζοντες λειτουργούν με σκοπό την μεγιστοποίηση της δικής τους χρησιμότητας που απολαμβάνουν από την κατανάλωση της υπηρεσίας caching. Η χρησιμότητά τους όμως είναι άμεσα συνδεδεμένη με την χρησιμότητα των δικών τους χρηστών, εξασφαλίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο ότι το περιεχόμενο με την υψηλότερη ζήτηση θα βρίσκεται ανά πάσα στιγμή στην cache.

Οι χρήστες της υπηρεσίας caching αντλούν χρησιμότητα από την υπηρεσία caching για κάθε επιτυχή πρόσβαση (*hit*) στην cache. Το βραχυπρόθεσμο όφελος των προμηθευτών περιεχομένου αποτελείται από τις αποταμιεύσεις λόγω μειωμένων απαιτήσεων εύρους ζώνης και από την ταχύτερη παράδοση του περιεχομένου. Σε μακροπρόθεσμη κλίμακα πρέπει να συνυπολογισθούν και οι μειωμένες λειτουργικές δαπάνες, ως αποτέλεσμα των μειωμένων απαιτήσεων υποδομής του δικτυακού τόπου. Οι πελάτες από την άλλη πλευρά αντλούν χρησιμότητα για κάθε hit στην cache καθώς πραγματοποιούν εξοικονόμηση εύρους ζώνης, μη χρειάζοντας να προσπελάσουν τον πηγαίο εξυπηρετητή που κατά κανόνα είναι πιο μακριά από την cache. Επίσης παραδίδουν ταχύτερα το περιεχόμενο στους τελικούς χρήστες τους, προσφέροντάς τους καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, που είναι απαραίτητο προκειμένου να αντιμετωπίσουν τον οξύ ανταγωνισμό που επικρατεί στην αγορά των ISPs.

Για τις ανάγκες της παρουσίασης αυτού του κεφαλαίου θα θεωρήσουμε τους προμηθευτές περιεχομένου ως μοναδικούς χρήστες μιας διαμοιραζόμενης cache, οι οποίοι ενδιαφέρονται να τοποθετήσουν δικό τους περιεχόμενο στον αποθηκευτικό χώρο της. Μια ανάλυση για την περίπτωση των πελατών θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο. Κάνουμε επίσης την υπόθεση εργασίας ότι δεν υπάρχουν επικαλύψεις περιεχομένου ανάμεσα στους διαφορετικούς προμηθευτές του. Αυτό συνεπάγεται ότι hits στην cache για ένα συγκεκριμένο προμηθευτή πραγματοποιούνται μόνο για περιεχόμενο που έχει τοποθετήσει ο ίδιος στον δικό του χώρο. Δεν μπορεί να εκμεταλλευθεί δηλαδή οποιεσδήποτε εξωτερικότητες δικτύου (*network externalities*) από την ύπαρξη κοινού περιεχομένου στον χώρο κάποιου άλλου προμηθευτή.

Έστω ότι υπάρχουν N χρήστες, $N = \{1, \dots, n\}$. Η χρησιμότητα U που αντλεί ο i προμηθευτής περιεχομένου από την κατανάλωση x μονάδων αποθηκευτικού χώρου, δηλαδή από την αποθήκευση περιεχομένου μεγέθους x μονάδων σε αυτόν, είναι:

$$U_i(x) = hits(x) * αξία_ανά_hit = hits(x) * (\eta + B) \quad (1),$$

όπου $hits(x)$ είναι ο αναμενόμενος αριθμός επιτυχιών για τον χώρο x που νοικιάζει ο χρήστης για την τοποθέτηση περιεχομένου του, η είναι το όφελος από την ταχύτερη παράδοση του περιεχομένου στον τελικό χρήστη και B η εξοικονόμηση εύρους ζώνης από την μη παράδοση περιεχομένου από τον πηγαίο εξυπηρετητή του. Αξίζει να παρατηρηθεί εδώ ότι ενώ το B είναι ένα αντικειμενικά μετρήσιμο μέγεθος, λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες τιμές εύρους ζώνης, το η είναι ένα υποκειμενικό μέγεθος που περιλαμβάνει προβλέψεις για αυξημένα έσοδα μέσω διαφημίσεων, καλύτερης προώθησης προϊόντων κτλ.

Το πρόβλημα του καταναλωτή είναι η επιλογή των μονάδων που θα ενοικιάσει ώστε να μεγιστοποιήσει το καθαρό του όφελος (net benefit) ή πλεόνασμά του (consumer surplus) CS_i , αφού αφαιρεθούν από την χρησιμότητα που αποκομίζει οποιεσδήποτε χρεώσεις του για την εκμετάλλευση του αποθηκευτικού χώρου από τα αντικείμενα του. Αν p είναι η τιμή ενοικίασης ανά μονάδα αποθηκευτικού χώρου, τότε το πλεόνασμα του καταναλωτή, δηλαδή του προμηθευτή περιεχομένου είναι:

$$CS_i = \max_x [U_i(x) - p * x] = \max_x [hits(x) * (\eta + B) - p * x] \quad (2).$$

Ο παραγωγός από την άλλη πλευρά, ο πάροχος της υπηρεσίας δηλαδή, θεωρητικά προσφέρει τον αποθηκευτικό χώρο της cache έναντι κάποιας χρέωσης ανά μονάδα, προκειμένου να ισοφαρίσει το κόστος από την παροχή της υπηρεσίας και να εξασφαλίσει κάποιο κέρδος. Το πρόβλημα που πρέπει να επιλύσει ο παραγωγός είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης κέρδους του μέσω της επιλογής της κατάλληλης τιμής p , εφόσον η προσφερόμενη ποσότητα είναι καθορισμένη και ίση με τον χώρο της cache. Συμβολικά:

$$\max_p \pi = \max_p [\text{πρόσοδος} - \text{κόστος}] = \max_p [p * x - c(x)] \quad (3)$$

Έχοντας σαν στόχο την οικονομική *αποδοτικότητα* (efficiency) του συστήματος, αποσκοπούμε στην μεγιστοποίηση της *κοινωνικής ευημερίας* (social welfare) SW , η οποία ισοδυναμεί με την συνολική χρησιμότητα που αντλείται από την υπηρεσία μείον το κόστος παροχής της.

$$SW = \sum_{i \in N} U_i(x^i) - c(x) \quad (4)$$

Στον τύπο (4) U_i είναι η χρησιμότητα που αποκομίζει ο i χρήστης από την εννοκίαση x^i μονάδων αποθηκευτικού χώρου, ενώ $c(x)$ είναι το κόστος του παραγωγού για την προσφορά $x = x^1 + \dots + x^n$ μονάδων χώρου. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το κόστος παροχής της υπηρεσίας είναι αμελητέο και μπορεί να παραλειφθεί. Η εγκατάσταση της cache έχει ένα αρχικό σταθερό κόστος, η μετέπειτα λειτουργία της όμως για την παροχή απλών υπηρεσιών caching δεν επιφέρει κάποιο επιπλέον μεταβλητό κόστος. Ο τύπος (4) απλοποιείται τότε:

$$SW = \sum_{i \in N} U_i(x^i) \quad (5)$$

Άρα στόχος κατά τον σχεδιασμό μιας υπηρεσίας caching εάν επιδιώκουμε μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμότητας που απολαμβάνουν οι χρήστες από την κατανάλωση της υπηρεσίας.

7.2 Ανάγκη για χρήση οικονομικών μηχανισμών

Δεδομένου ότι ο αποθηκευτικός χώρος στις διαμοιραζόμενες caches είναι ένας πόρος σε σπανιότητα, είναι λογικό να ληφθούν υπόψη οικονομικές αρχές και προοπτικές στο πρόβλημα της κατανομής του. Έχοντας επομένως ως στόχο την μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας, η επίλυση του προβλήματος της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου πρέπει να παρέχει αυξημένη συνολική αξία στους χρήστες του συστήματος. Λόγω διαφορών στην χωρητικότητα των πηγαίων εξυπηρετητών περιεχομένου, στο διαθέσιμο εξωτερικό εύρος ζώνης καθώς και στη ζήτηση του περιεχομένου από τους τελικούς χρήστες, μερικοί προμηθευτές περιεχομένου είναι λογικό να έχουν μεγαλύτερη ανάγκη τις υπηρεσίες caching από ό,τι άλλοι και να είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν περισσότερο, να τις αποτιμούν δηλαδή σε μεγαλύτερο βαθμό. Για την αύξηση της συνολικής χρησιμότητας, η cache πρέπει να παραδίδει στους χρήστες που αποτιμούν περισσότερο την υπηρεσία καλύτερη ποιότητα, με την μορφή περισσότερων επιτυχιών (hits).

Ωστόσο, η πλειοψηφία των caches στο Διαδίκτυο παρέχουν μόνο υπηρεσίες «βέλτιστης προσπάθειας» (best-effort), υπό την έννοια ότι δεν λαμβάνουν υπόψη πιθανές διαφοροποιήσεις στον βαθμό αποτίμησης της υπηρεσίας caching από τους

χρήστες του συστήματος, ούτε παρέχουν οποιουδήποτε είδους εγγυήσεις για την απόδοση της υπηρεσίας που προσφέρουν.

Οι παραδοσιακές πολιτικές αντικατάστασης του περιεχομένου μιας cache στηρίζονται σε ορισμένα αντικειμενικά κριτήρια, όπως είναι ο αριθμός αναφορών ενός αντιγράφου, για να επιλέξουν τα αντικείμενα που θα αφαιρεθούν από την cache. Αντιμετωπίζουν επομένως όλες τις αιτήσεις για αντικείμενα περιεχομένου με έναν ομοιόμορφο τρόπο. Σκοπός τους είναι η αύξηση του συνολικού βαθμού επιτυχιών (hit rate) της cache, χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη τυχόν διαφορές στην αποτίμηση της υπηρεσίας από τους χρήστες της, οι οποίες έχουν επίπτωση στην συνολική χρησιμότητα που αποκομίζεται.

Ένα δεύτερο πρόβλημα των παραδοσιακών πολιτικών αντικατάστασης αναφέρεται στην μειωμένη ικανότητά τους να προβλέπουν τη μελλοντική ζήτηση για αντικείμενα περιεχομένου, προκειμένου να λάβουν πρόνοια ούτως ώστε τα αντικείμενα με μεγαλύτερη αξία να παραμείνουν μεγαλύτερο διάστημα στην cache ώστε να ικανοποιήσουν τις μελλοντικές αιτήσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι οι αλγόριθμοι τους στηρίζονται στις ροές αιτήσεων του παρελθόντος προκειμένου να υλοποιήσουν την λίστα προτεραιότητας για απομάκρυνση των αντικειμένων από την cache. Από την φύση τους τέτοιες πολιτικές παρουσιάζουν δυσκολίες στην πρόβλεψη μεταβολών στις προτιμήσεις των χρηστών.

Δύο δυνατές βελτιώσεις στην ποιότητα υπηρεσίας που παρέχει το caching προκύπτουν μέσα από την ενσωμάτωση των αποτιμήσεων των χρηστών μέσα στο σύστημα κατανομής του αποθηκευτικού χώρου. Οι χρήστες πρώτον μπορούν να μεταδίδουν στην cache χρήσιμη πληροφορία σχετικά με την διαφοροποίηση των προτιμήσεών τους όσον αφορά την αντιγραφή και αποθήκευση αντικειμένων στην cache. Δεύτερον, μπορούν να μεταδίδουν πληροφορία πρόβλεψης όσον αφορά την μελλοντική ζήτηση αντικειμένων.

Η πληροφορία αυτή μπορεί να αναφέρεται είτε στην αναμενόμενη μελλοντική συχνότητα χρήσης του αντικειμένου, που την γνωρίζει μόνο ο ιδιοκτήτης του, είτε στην αποτίμηση (valuation) του αντικειμένου για τον ιδιοκτήτη του, η οποία αντικατοπτρίζει συγκεντρωτικά την χρησιμότητα που θα έχει αυτό το αντικείμενο στους τελικούς χρήστες-καταναλωτές του. Για παράδειγμα πριν την κυκλοφορία ενός αντικειμένου στο Διαδίκτυο που αναμένεται να έχει υψηλή δημοτικότητα άρα και ζήτηση, ο πηγαίος

εξυπηρετητής μπορεί να ζητήσει την προληπτική προώθηση του προς μια cache, ώστε να αποφευχθεί ο κατακλυσμός του από αιτήσεις, να μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος ανάκτησης για τους τελικούς χρήστες, όπως επίσης και η συνολική κατανάλωση εύρους ζώνης δικτύου.

Η χρήση οικονομικών μηχανισμών για την κατανομή του χώρου που λαμβάνουν υπόψη τις των αποτιμήσεων των χρηστών παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές πολιτικές αντικατάστασης περιεχομένου:

- Οι πόροι της cache μπορούν να κατανεμηθούν αποδοτικά έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η αθροιστική αξία που παρέχεται στους χρήστες του δικτύου.
- Αποκέντρωση των αποφάσεων κατανομής του χώρου μιας cache. Οι εξυπηρετητές μπορούν να υλοποιήσουν σύνθετες συναρτήσεις ή να κάνουν χρήση μεγάλων ιστορικών χρήσης για να προβλέψουν την μελλοντική δημοτικότητα του περιεχομένου, ή και για να υπολογίσουν την αξία ανά αίτηση περιεχομένου που λαμβάνουν όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην cache. Οι συγκεντρωτικές παραδοσιακές πολιτικές LFU, LRU είναι απλές, αλλά όχι βέλτιστες προβλέψεις των μελλοντικών αιτήσεων
- Τα ιστορικά προσβάσεων δεν χρειάζεται να βρίσκονται στις caches αλλά μπορούν να διατηρούνται στους εξυπηρετητές οι οποίοι μεταδίδουν την σχετική πληροφορία στην cache στην μορφή αξίας ανά αντικείμενο περιεχομένου που εξυπηρετείται από την cache.
- Δίνεται επίσης η δυνατότητα σε ένα προμηθευτή περιεχομένου να υπολογίσει την αξία που έχει ένα αντικείμενο για αυτόν ad-hoc και ανεξάρτητα από το ιστορικό πρόσβασής του ή άλλους δείκτες της μελλοντικής δημοτικότητάς του. Παραδείγματος χάριν μπορεί να θέλει να κάνει υψηλή προσφορά για ένα αντικείμενο με χαμηλό πληθυσμό πελατών και δημοτικότητα, εάν οι συγκεκριμένοι πελάτες του είναι απαιτητικοί και το αποτιμούν υψηλά. Γενικά, ένα προμηθευτής περιεχομένου μπορεί να εισάγει πληροφορία στο σύστημα της αγοράς μη διαθέσιμη εκ των προτέρων στο διαχειριστή της cache.

7.3 Μηχανισμοί Κινήτρων στην κατανομή του χώρου

Όπως έχει αναλυθεί ως τώρα, στην περίπτωση που θεωρούμε μια ανεξάρτητη cache, η χρησιμότητα για τους χρήστες του συστήματος μεγιστοποιείται όταν στην

cache αποθηκεύονται τα πιο συχνά αιτούμενα αντικείμενα περιεχομένου με την υψηλότερη για τους χρήστες χρησιμότητα. Ο μόνος τρόπος όμως για να εισαχθούν οι αποτιμήσεις της χρησιμότητας των χρηστών στο σύστημα είναι να τις παρέχουν οι ίδιοι. Από την στιγμή όμως που οι χρήστες (προμηθευτές περιεχομένου) γενικά επιδιώκουν το προσωπικό τους συμφέρον, και οι αποτιμήσεις τους επηρεάζουν τις προτεραιότητες αφαίρεσης περιεχομένου από την cache, είναι λογικό να υποθεθεί ότι θα προσπαθήσουν για λόγους στρατηγικής να δηλώσουν ψευδείς, υψηλότερες από τις αληθινές αξίες ώστε να επηρεάσουν την απόδοση της cache προς όφελός τους. Απαιτείται επομένως να τους δοθούν τα απαραίτητα οικονομικά κίνητρα προκειμένου να είναι στο συμφέρον τους να προμηθεύουν το σύστημα με ορθή πληροφορία σχετική με την αποτίμηση της υπηρεσίας και την πρόβλεψη της ζήτησης του περιεχομένου τους. Χρειάζονται επομένως κατάλληλοι μηχανισμοί κινήτρων για την εξαγωγή των ειλικρινών αποτιμήσεων από τους χρήστες. [49]

Τα κίνητρα γενικά παρέχονται μέσω της λεγόμενης *πολιτικής της υπηρεσίας* (service policy), η οποία καθορίζει τι είδους υπηρεσία παρέχεται στον χρήστη και το χρηματικό πόσο που πρέπει να πληρώσει ο χρήστης για την υπηρεσία, ανάλογα με τις δηλώσεις της αποτίμησής του. Σχεδιάζοντας την παραδιδόμενη υπηρεσία έτσι ώστε να ποικίλει ανάλογα με την πληροφορία αποτίμησης και πρόβλεψης που παρέχει ο χρήστης, οι χρήστες μπορούν να εξαναγκασθούν ώστε να αποκαλύπτουν ειλικρινή πληροφορία.

Η αύξηση της συνολικής χρησιμότητας που αποκομίζουν οι χρήστες, αντί του συνολικού βαθμού επιτυχιών, μέσω της ενσωμάτωσης των αποτιμήσεων των χρηστών, μπορεί να πραγματοποιηθεί ακολουθώντας τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες έχουν υιοθετηθεί από τον χώρο των δικτύων και της μετάδοσης δεδομένων. Καθεμιά από αυτές τις προσεγγίσεις παρέχει και ένα μηχανισμό κινήτρων με σκοπό την αποκάλυψη των ειλικρινών αποτιμήσεων των χρηστών.

Η πρώτη αναφέρεται στην τοποθέτηση βαρών στα αντικείμενα περιεχομένου ανάλογα με την αποτίμηση του χρήστη, με παράλληλη τροποποίηση της πολιτικής αντικατάστασης περιεχομένου. Σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι αντικείμενα με μεγαλύτερο βάρος, άρα και χρησιμότητα, να παραμένουν μεγαλύτερο διάστημα στην cache εις βάρος των άλλων αντικειμένων. Εάν οι χρήστες χρεώνονται ανάλογα με τις δηλωμένες αποτιμήσεις τους, τότε αναμένεται ότι θα δηλώσουν τις αληθινές αξίες της υπηρεσίας για αυτούς και θα αποθαρρυνθούν από το να δηλώσουν «φουσκωμένα»

βάρη, ώστε να έχουν κάποιο θετικό πλεόνασμα από την κατανάλωση της υπηρεσίας. Από την άλλη πλευρά, δεδομένου ότι οι προμηθευτές περιεχομένου γνωρίζουν πως η παραμονή του περιεχομένου στην cache βρίσκεται σε ευθεία σχέση με την αποτίμηση της χρησιμότητάς τους, έχουν ένα κίνητρο για να αποκαλύψουν τιμές οι οποίες προσεγγίζουν τις αληθινές αποτιμήσεις τους.

Μια δεύτερη προσέγγιση μηχανισμού κινήτρων αναφέρεται στην κατανομή του αποθηκευτικού χώρου με διενέργεια δημοπρασίας τύπου VCG [32], όπου γίνεται αποκάλυψη των αποτιμήσεων των χρηστών διαμέσου των προσφορών που κάνουν για τον αποθηκευτικό χώρο. Ως γνωστόν σε μια δημοπρασία VCG δεύτερης τιμής ο νικητής χρεώνεται με την δεύτερη υψηλότερη προσφορά, οπότε η προσωπική του προσφορά-αποτίμηση δεν επηρεάζει άμεσα το ποσό που θα πληρώσει σε περίπτωση νίκης του. Καθορίζει μονάχα εάν θα κερδίσει ή όχι. Σε μια τέτοια περίπτωση αποδεικνύεται ότι κυρίαρχη στρατηγική για έναν παίκτη είναι να δηλώσει σαν προσφορά την αληθινή του αποτίμηση για το αγαθό προς πώληση. Σύμφωνα με την γενίκευση του [32] ένας προμηθευτής περιεχομένου χρεώνεται για κάθε εξυπηρέτηση ενός αντικειμένου του από την cache ποσό ίσο με την ανακοινωμένη αποτίμηση του αντικειμένου που απομακρύνθηκε πιο πρόσφατα από την cache. Πληρώνει δηλαδή το κόστος της μη παρουσίας στην cache του αντικειμένου που είχε την ελάχιστη από τα αποθηκευμένα συνεισφορά στην συγκεντρωτική αξία.

Τέλος, η τρίτη προσέγγιση αναφέρεται στην ανάπτυξη μηχανισμών παροχής διαφοροποιημένης ποιότητας υπηρεσίας (quality-of-service QoS). Η διαφοροποίηση ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να επιτευχθεί μέσω του χωρισμού του περιεχομένου σε κλάσεις ανάλογα με την αξία που έχει για τους χρήστες και της διάθεσης μεγαλύτερου μέρους του αποθηκευτικού χώρου στην κλάση με την υψηλότερη αποτίμηση. Με την διάθεση περισσότερου χώρου στους χρήστες με μεγάλη αποτίμηση αναμένεται ότι θα αυξηθούν οι επιτυχείς προσβάσεις (hits) στην cache για το περιεχόμενό τους. Η χρησιμότητα που αντλούν οι χρήστες από την υπηρεσία εξαρτάται άμεσα από τα hits για το περιεχόμενό τους, όπως και ο αντίστοιχος βαθμός επιτυχιών (hit-rate). Άρα το αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό, να αυξηθεί η συνολική χρησιμότητα από την κατανάλωση της υπηρεσίας. Παράλληλα με την υιοθέτηση ενός κατάλληλου συστήματος τιμών που συνοδεύει τον μηχανισμό διαφοροποιημένης υπηρεσίας, δίνεται το κίνητρο στους χρήστες να επιλέξουν την κλάση που τους ωθεί στην μεγιστοποίηση της χρησιμότητάς τους.

7.4 Ανασκόπηση οικονομικών μηχανισμών στα Δίκτυα

Στο πεδίο των δικτύων και της μετάδοσης δεδομένων έχουν προταθεί και υλοποιηθεί διάφοροι μηχανισμοί κινήτρων με σκοπό την αποκάλυψη των αληθινών αποτιμήσεων των χρηστών και την μεγιστοποίηση της συνολικής χρησιμότητας που αποκομίζεται. Μεταξύ αυτών είναι η επιβολή ενός συστήματος τιμών από μια κεντρική διαχειριστική οντότητα, όπου οι χρήστες ανάλογα με την συνάρτηση χρησιμότητάς τους επιλέγουν την ποσότητα των πόρων που θα καταναλώσουν, η διενέργεια δημοπρασιών για την κατανομή των δικτυακών πόρων, και τέλος η παροχή διαφορετικών εκδόσεων υπηρεσίας (diffserv), όπου οι χρήστες επιλέγουν εκτός από την ποσότητα και την κλάση υπηρεσίας που ταιριάζει στο δικό τους προφίλ κίνησης δεδομένων.

7.4.1 Σύστημα τιμών

Η *χρέωση* (charge) ενός πελάτη για την χρήση μιας δικτυακής υπηρεσίας, π.χ. της μετάδοσης δεδομένων, υπολογίζεται μέσω μιας ειδικής συνάρτησης, της *ταρίφας* (tariff). Η ταρίφα μπορεί να αποτελείται από μια σταθερά συνιστώσα μόνο, οπότε αναφερόμαστε στην περίπτωση της *πάγιας τιμολόγησης* (flat rate pricing), ή/και από ένα μεταβλητό συστατικό εξαρτώμενο από το μέγεθος χρήσης της υπηρεσίας, οπότε αναφερόμαστε στην περίπτωση της *τιμολόγησης βασιζόμενης στην χρήση* (usage-based pricing) [42],[52]. Η πάγια τιμολόγηση αναφέρεται στην περίπτωση όπου η συνολική χρέωση του πελάτη προσδιορίζεται πριν την χρήση της υπηρεσίας και είναι ανεξάρτητη της πραγματικής κατανάλωσης πόρων. Η πάγια τιμή συνήθως αντανακλά κάποια ιστορικά μέσα επίπεδα κατανάλωσης και κόστους. Η πάγια τιμολόγηση χρησιμοποιείται ευρέως επειδή είναι εύκολα υλοποιήσιμη (δεν απαιτούνται μηχανισμοί μέτρησης κατανάλωσης και χρέωσης), και επίσης επειδή οι χρήστες προτιμούν χρεώσεις οι οποίες είναι εύκολα προβλέψιμες (predictable), γνωρίζουν δηλαδή εκ των προτέρων το χρηματικό ποσό που θα πληρώσουν.

Ωστόσο, η πάγια τιμολόγηση έχει αρκετά μειονεκτήματα. Γενικά τείνει να παράγει υψηλό κοινωνικό κόστος εξαιτίας της σπατάλης των πόρων που επιφέρει. Η πάγια τιμολόγηση δεν προσφέρει κανένα κίνητρο στους χρήστες να καταναλώσουν λιγότερο από το μέγιστο επιτρεπόμενο από το συμβόλαιό τους ποσό, και έτσι οδηγεί σε κοινωνική σπατάλη (social waste). Επιπλέον οι χρήστες με μεγάλη κατανάλωση επιδοτούνται από τους χρήστες με μικρότερη κατανάλωση, ενώ το πλεόνασμα των

χρηστών είναι μικρότερο από το βέλτιστο (εκτός για τους χρήστες με την υψηλότερη κατανάλωση).

Μια εναλλακτική της πάγιας τιμολόγηση των δικτυακών υπηρεσιών είναι η χρέωση των χρηστών αναλογικά με το μέγεθος της χρήσης της υπηρεσίας που κάνουν. Η χρέωση μπορεί να βασίζεται στη διάρκεια χρήσης της υπηρεσίας ή στην ποσότητα των δεδομένων που εξυπηρετούνται. Προσθέτοντας στην ταρίφα μια συνιστώσα σχετική με την χρήση, προκύπτει μια χρέωση που αντανακλά ακριβέστερα την πραγματική κατανάλωση πόρων από την χρήση της υπηρεσίας. Αυτός ο τύπος της χρέωσης μπορεί να παρέχει το κίνητρο στον καταναλωτή της υπηρεσίας να μεταβάλλει το πρότυπο χρήσης του δικτύου με έναν τρόπο που ωφελεί την οικονομική αποδοτικότητα. Συνοψίζοντας, εάν δεν υπάρχει συνιστώσα χρήσης στην χρέωση της υπηρεσίας, τότε οι πελάτες δεν έχουν κίνητρο για να είναι συντηρητικοί στην κατανάλωση πόρων. Έτσι, όμως ωθούνται σε σπατάλη πόρων και πρότυπα συμπεριφοράς που μειώνουν την συνολική αποδοτικότητα, καθώς η αύξηση του κόστους λόγω της σπατάλης υπερβαίνει την αύξηση της χρησιμότητας από την κατανάλωση αυξημένων ποσοτήτων υπηρεσίας.

7.4.2 Δημοπρασίες

Οι δημοπρασίες (auctions) γενικά χρησιμοποιούνται για την κατανομή πόρων που βρίσκονται σε σπανιότητα, η αξία των οποίων δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, ή κάθε χρήστης έχει την δική του προσωπική αποτίμηση. Μια καλά σχεδιασμένη δημοπρασία με ενσωματωμένους μηχανισμούς κινήτρων έχει αποτέλεσμα την αποδοτική κατανομή των πόρων, δηλαδή οι πόροι εκχωρούνται στους χρήστες που τους αποτιμούν περισσότερο, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική χρησιμότητα άρα και η κοινωνική ευημερία από την κατανάλωσή τους. Στην περίπτωση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων οι δημοπρασίες αποτελούν έναν τρόπο για την αποκέντρωση της απόφασης κατανομής των πόρων και μάλιστα αποδεικνύονται να είναι πιο αποτελεσματικές από ένα σύστημα τιμών όσον αφορά στο επίπεδο χρησιμοποίησης των πόρων [51], σε περιπτώσεις συμφόρησης.

Υπάρχουν πολλές προτάσεις [32],[51],[53],[54] για χρήση μηχανισμών δημοπρασίας στην κατανομή δικτυακών πόρων όπως είναι το εύρος ζώνης. Μια από αυτές αναφέρεται στην εφαρμογή της γενικευμένη δημοπρασίας Vickrey [32] για την δημιουργία μιας «έξυπνης αγοράς» [53], όπου η τιμή για την μετάδοση ενός πακέτου

στο δίκτυο μεταβάλλεται σε μια πολύ σύντομη κλίμακα χρόνου (π.χ. ανά λεπτό), αντανακλώντας τον τρέχοντα βαθμό συμφόρησης του δικτύου. Η επικεφαλίδα κάθε πακέτου περιέχει ένα πεδίο προσφοράς (bid). Το πακέτο γίνεται αποδεκτό εάν η προσφορά υπερβαίνει το τρέχον οριακό κόστος μετάδοσης. Ο χρήστης δεν πληρώνει την δική του προσφορά αλλά μόνο την χαμηλότερη τιμή εκκαθάρισης της αγοράς. Έτσι, κάθε χρήστης που αποτιμά τα πακέτα του υψηλότερα από αυτήν την τιμή ισορροπίας λαμβάνει ένα πλεόνασμα από την αγορά της υπηρεσίας μεταφοράς πακέτων. Και πιο σημαντικά, σε αυτό το είδος της δημοπρασίας δεύτερης τιμής (Vickrey) η βέλτιστη στρατηγική για τον χρήστη είναι να κάνει προσφορά την αληθινή του αποτίμηση της υπηρεσίας. Οποιαδήποτε ψευδής δήλωση της αξίας του θα τον φέρει σε μειονεκτική θέση.

7.4.3 Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες

Η αρχιτεκτονική των διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services) [42], [50], [51] ξεκίνησε από το πεδίο της μετάδοσης δεδομένων σαν μια προσπάθεια για την βελτίωση των υπάρχοντων μηχανισμών του Διαδικτύου σε ότι αφορά την παροχή υπηρεσιών με διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Στο μοντέλο αυτό, ορίζεται ένας μικρός αριθμός κλάσεων κυκλοφορίας (traffic classes), π.χ. χρυσή, αργυρή και χάλκινη κλάση, που χαρακτηρίζει τα πακέτα που διακινούνται στο δίκτυο. Κάθε μια από αυτές τις κλάσεις εκφράζει τα διαφορετικά επίπεδα υπηρεσίας, σε βάση ανά πακέτο, που είναι διαθέσιμα μέσα στο δίκτυο. Για παράδειγμα οι δρομολογητές μπορεί να συντηρούν τρεις επίπεδα προτεραιότητας για εισερχόμενα πακέτα.

Το δίκτυο αποφασίζει τα διαφορετικά επίπεδα υπηρεσίας που θα υποστηρίζει και δημοσιεύει τιμές που αντανακλούν την ποιότητα της υπηρεσίας και την ζήτηση για αυτήν. Μέσα σε μια κλάση κάθε χρήστης απολαμβάνει την ίδια ποιότητα υπηρεσίας, αλλά οι υψηλότερες κλάσεις προσφέρουν καλύτερη υπηρεσία και γι' αυτό χρεώνονται υψηλότερα. Κατόπιν οι χρήστες πριν αποστείλουν τα δεδομένα τους για μετάδοση, καθορίζουν στο συμβόλαιο τους με το δίκτυο σε ποια κλάση ανήκουν αυτά ανά εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές και την μέση απόδοση κάθε κλάσης.

Το δίκτυο κατανέμει στατικά τους πόρους του ανά κλάση με βάση την ιστορική μέση συνολική κίνηση ανά κλάση έτσι ώστε η ποιότητα της υπηρεσίας για κάθε κλάση να βρίσκεται στο επιθυμητό επίπεδο. Η αρχιτεκτονική αυτή όμως δεν παρέχει αυστηρές εγγυήσεις απόδοσης, αλλά μόνο κατά προσέγγιση. Αυτό συμβαίνει επειδή το δίκτυο

χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα χρήσης με βάση το μέσο όρο και όχι την χειρότερη περίπτωση. Επιπλέον δεν υπάρχει πληροφορία σχετική με τον προορισμό της κίνησης των συμβολαίων. Συνεπώς, το δίκτυο πρέπει να κάνει προβλέψεις όσον αφορά τον τρόπο συνεισφοράς κάθε κλάσης στην συνολική κίνηση του δικτύου. Εάν μάλιστα, εγγραφούν περισσότεροι χρήστες από το αναμενόμενο στην κλάση υψηλής ποιότητας, για την οποία είχε δεσμευθεί αρχικά μια στατική ποσότητα πόρων, τότε μπορεί να παρατηρηθεί υπερφόρτωση σε αυτήν την κλάση ενώ οι κλάσεις χαμηλότερης ποιότητας μπορεί να προσφέρουν καλύτερη απόδοση.

Αυτές οι καταστάσεις μπορούν να αποφευχθούν βέβαια με την κατάλληλη τιμολόγηση των κλάσεων υπηρεσίας. Η διαχείριση του δικτύου είναι μια γενικά πολύπλοκη διαδικασία, καθώς μετά την κατασκευή των τιμών, πρέπει να εκτιμηθεί η ζήτηση για τις διάφορες κλάσεις, να προβλεφθεί ο προορισμός των πακέτων στο δίκτυο, και κατόπιν να γίνει η εκχώρηση των πόρων. Μάλιστα, επειδή η αρχιτεκτονική έχει σκοπό να παραμείνει απλή σε υλοποίηση, δεν προβλέπονται δυναμικοί μηχανισμοί ανάδρασης για την ανακατανομή των πόρων και την επίλυση προβλημάτων υπερφόρτωσης. Όσον αφορά στην διάσταση της οικονομική αποδοτικότητα του μηχανισμού, γενικά στην περίπτωση της διαφοροποίησης της υπηρεσίας και τεμαχισμού της αγοράς, η ύπαρξη πολλών εκδόσεων μιας υπηρεσίας βοηθά τους χρήστες της να εκφράσουν τις αληθινές τους ανάγκες και προτιμήσεις και αυξάνει το καθαρό τους όφελος (net benefit). [42]

7.5 Εφαρμογή των οικονομικών μηχανισμών στο caching

7.5.1 Στάθμιση των αντικειμένων περιεχομένου

Μια πρώτη προσέγγιση για την ενσωμάτωση των αποτιμήσεων των χρηστών για την υπηρεσία caching αναφέρεται στην τοποθέτηση βαρών στα αντικείμενα περιεχομένου ανάλογα με την αποτίμηση του χρήστη, με παράλληλη τροποποίηση της πολιτικής αντικατάστασης περιεχομένου. Σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι αντικείμενα με μεγαλύτερο βάρος, άρα και χρησιμότητα, να παραμένουν μεγαλύτερο διάστημα στην cache εις βάρος των άλλων αντικειμένων.

Ένα παράδειγμα υπηρεσίας caching που εφαρμόζει αυτό το μοντέλο παρουσιάζεται στα [30] και [31]. Προτείνεται μια νέα πολιτική αντικατάστασης περιεχομένου, παραλλαγή της κλασικής LFU, η πολιτική Ελάχιστης Συχνότητας Χρήσης με στάθμιση από τον εξυπηρετητή (server-weighted LFU swLFU). Η πολιτική

αυτή λαμβάνει υπόψη τις ετερογενείς αποτιμήσεις των επιτυχιών (hits) της cache από τους χρήστες (προμηθευτές περιεχομένου), σταθμίζοντας ανάλογα τους μετρητές συχνότητας αναφορών των αντικειμένων περιεχομένου. Οι χρήστες που τοποθετούν υψηλότερη αξία ανά επιτυχή πρόσβαση, λαμβάνουν κατά μέσο όρο υψηλότερο βαθμό επιτυχιών σε bytes. Ο αλγόριθμος αυτός επιπροσθέτως παρέχει αυξημένη αθροιστική αξία στους προμηθευτές περιεχομένου και υψηλότερη μέση κοινωνική ευημερία στο σύνολο των χρηστών σε σχέση με τις παραδοσιακές πολιτικές, καθώς τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα αντικείμενα με την υψηλότερη χρησιμότητα παραμένουν μεγαλύτερο διάστημα στην cache παρουσιάζοντας έτσι μεγαλύτερο βαθμό επιτυχιών.

Συγκεκριμένα, η πολιτική αυτή ορίζει ότι οι χρήστες (προμηθευτές περιεχομένου) αντιστοιχίζουν σε κάθε αντικείμενο περιεχομένου με URL u ένα βάρος W_u το οποίο αναπαριστά την αξία ανά byte που λαμβάνει ο χρήστης όταν το αντικείμενο u εξυπηρετείται από την cache. Τότε η συνολική αξία που λαμβάνει ο χρήστης είναι $W_u \times size(u)$, όπου $size(u)$ δηλώνει το μέγεθος του αντικειμένου σε bytes. Ισοδύναμα, σε περίπτωση αποτυχίας όπου το αντικείμενο δεν βρίσκεται στην cache, ο χρήστης υφίσταται ένα κόστος $W_u \times size(u)$. Τα βάρη W_u προμηθεύονται για κάθε αντικείμενο από τον προμηθευτή περιεχομένου στην cache και μπορούν να ενσωματωθούν στις επικεφαλίδες των αποκρίσεων HTTP προκαλώντας έτσι μικρή επιβάρυνση στην επικοινωνία εξυπηρετητή-cache. Σκοπός της παρούσας πολιτικής αντικατάστασης είναι η μεγιστοποίηση για όλες τις επιτυχείς προσβάσεις στην cache του μεγέθους

$$\sum_u W_u \times size(u)$$

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι πολιτικές αντικατάστασης του περιεχομένου μιας cache περιγράφονται σύμφωνα με τον ενσωματωμένο σε αυτές αλγόριθμο ταξινόμησης του περιεχομένου. Μια cache διατηρεί μια λίστα από URL ταξινομημένα σύμφωνα με κάποιο(-α) κλειδί(-ιά). Η πολιτική αντικατάστασης αφαιρεί από την cache τα αντικείμενα των οποίων τα URL βρίσκονται στην ουρά της λίστας. Στην περίπτωση της swLFU, το πρωτεύον κλειδί ταξινόμησης των αντικειμένων που καθορίζει την προτεραιότητα της απομάκρυνσης είναι το $N_u \times W_u$, όπου N_u είναι ο αριθμός των αναφορών για κάθε αποθηκευμένο URL u από την στιγμή που εισήχθηκε στην cache. Το δευτερεύον κλειδί ταξινόμησης (σε περίπτωση ισοβαθμιών) είναι ο χρόνος από την τελευταία πρόσβαση. Εάν $W_u = 1$ για όλα τα u , τότε η πολιτική ανάγεται στην κανονική LFU, ενώ εάν $W_u = 0$ για όλα τα u , τότε ανάγεται στην LRU.

Ταξινομώντας τα URL με βάση το μέγεθος $N_u \times W_u$, στην cache διατηρούνται τα αντικείμενα εκείνα που συνεισφέρουν περισσότερο στην αθροιστική αξία των χρηστών ανά μονάδα αποθηκευτικού χώρου:

$$\frac{\text{Συνεισφορά του } u \text{ στην αθροιστική αξία}}{\text{Μέγεθος Μονάδας}} = \frac{W_u \times \text{size}(u) \times N_u}{\text{size}(u)} = N_u \times W_u$$

Μια πιο ενδεικτική μετρική της απόδοσης της cache ως προς την αύξηση της κοινωνικής ευημερίας προτείνεται στα [30] και [31], ο *βαθμός επιτυχιών σε αξία* (Value Hit Rate) σε αντιδιαστολή προς τον *βαθμό επιτυχιών σε bytes* (Byte Hit Rate). Ο δεύτερος είναι ίσος με τον αριθμό των bytes που εξυπηρετούνται από την cache προς τον συνολικό αριθμό bytes περιεχομένου που αιτούνται, αγνοώντας όμως τυχόν ετερογενείς αποτιμήσεις των υπηρεσιών caching μεταξύ των χρηστών. Αντίθετα ο *βαθμός επιτυχιών σε αξία* υπολογίζεται ως ο λόγος της αξίας που τελικά αποκόμισαν οι χρήστες από την υπηρεσία caching προς την αξία που θα λάμβαναν εάν κάθε αίτηση περιεχομένου εξυπηρετείτο από την cache.

$$\text{ValuHitRate} = \frac{\text{Αξία αιτήσεων περιεχομένου που εξυπηρετήθηκαν από την cache}}{\text{Συνολική αξία αιτήσεων}}$$

$$\text{VHR} = \frac{\sum_{\text{hits}} W_u \times \text{size}_u}{\sum_{\text{requests}} W_u \times \text{size}_u}$$

Αυτή η μετρική απόδοσης αποτελεί στην ουσία μια κανονικοποιημένη μέτρηση της κοινωνικής ευημερίας και μια γενίκευση του βαθμού επιτυχιών σε bytes. Στην ειδική περίπτωση ομογενών αποτιμήσεων μεταξύ των χρηστών (όπου όλα τα βάρη $W_u = \kappa$, για κάποια σταθερά κ), ο βαθμός επιτυχιών σε αξία είναι ταυτόσημος με τον βαθμό επιτυχιών σε bytes.

Προσπαθώντας να ασκήσουμε κριτική στην πολιτική swLFU, θα λέγαμε ότι πάσχει σε δύο σημεία. Πρώτον, γίνονται κεντρικές υποθέσεις για το πρότυπο της μελλοντικής χρήσης του περιεχομένου. Οι χρήστες δεν αποστέλλουν στο σύστημα πληροφορία αναμενόμενης μελλοντικής ζήτησης του περιεχομένου τους, παρά μόνο τις αποτιμήσεις τους. Επιπλέον και κυριότερα, η πολιτική στηρίζεται στην καλή θέληση των χρηστών προκειμένου να είναι ειλικρινείς στις αποτιμήσεις τους, καθώς δεν παρέχει κατάλληλους μηχανισμούς κινήτρων. Μια βελτίωση της πολιτικής θα μπορούσε να προκύψει εάν οι προμηθευτές περιεχομένου χρεώνονταν για τις επιτυχίες

προσβάσεις στο περιεχόμενό τους ένα τμήμα της αξίας που δηλώνουν. Σε αυτήν την περίπτωση θα αποθαρρύνονταν από το να προμηθεύουν το σύστημα με ψευδείς «φουσκωμένες» αποτιμήσεις της υπηρεσίας, προκειμένου να παρατείνουν χρονικά την παραμονή του περιεχόμενου τους στην cache.

7.5.2 Caching με μηχανισμό αγοράς

Λόγω του περιορισμένου αποθηκευτικού χώρου μιας cache και της μεγάλης ζήτησης για τοποθέτηση περιεχομένου σε αυτόν, συνάγεται ότι πρόκειται για έναν πόρο σε σπανιότητα που πρέπει να τιμολογηθεί ανάλογα. Πρέπει επομένως να υπάρξει κάποια χρέωση των προμηθευτών περιεχομένου ούτως ώστε να γίνεται συνετή διαχείριση του χώρου και να αποθηκεύονται τα αντικείμενα με μεγαλύτερη αξία ώστε να μεγιστοποιείται η κοινωνική ευημερία. Μια πρόταση ([33], [34]) αφορά στην διεξαγωγή δημοπρασίας όπου ο αποθηκευτικός χώρος της cache δημοπρατείται στους προμηθευτές περιεχομένου. Χρησιμοποιώντας μια δημοπρασία, συλλέγεται πληροφορία απευθείας από τους προμηθευτές περιεχομένου, οι οποίοι αναμένεται να έχουν ακριβέστερη ιδέα για την αποτίμηση της αξίας της υπηρεσίας για αυτούς, καθώς και για τον αναμενόμενο αριθμό μελλοντικών αιτήσεων για τα αντικείμενα τους.

Το σύστημα caching που παρουσιάζεται μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα σε μεταβολές των προτιμήσεων των χρηστών επιτρέποντας περισσότερες και ταχύτερες αλλαγές στο περιεχόμενο της cache, από ότι μια παραδοσιακή πολιτική αντικατάστασης περιεχομένου. Επιπλέον οι αποφάσεις πρόβλεψης της ζήτησης στηρίζονται σε έναν αποκεντρωμένο μηχανισμό όπου οι χρήστες δίνουν πληροφορία για τις μελλοντικές αιτήσεις του περιεχομένου τους, σε μορφή προσφορών για την αξία του αποθηκευτικού χώρου. Τέλος, το μοντέλο περιλαμβάνει μια πολιτική υπηρεσίας βασισμένη σε μηχανισμό αγοράς για την παροχή των απαραίτητων κινήτρων στους χρήστες προκειμένου να είναι ειλικρινείς. Ο μηχανισμός αγοράς είναι σχεδιασμένος για την εκχώρηση σταθμίσεων στα αντικείμενα σύμφωνα με την αξία της αποθήκευσης των αντικειμένων για τους προμηθευτές τους και την αναμονή μεταβολών στην ζήτηση.

Το σύστημα υλοποιεί ένα μηχανισμό αγοράς που βασίζεται στην αξία που έχει ο αποθηκευτικός χώρος σε μια cache για τους χρήστες (προμηθευτές περιεχομένου). Οι χρήστες αγοράζουν πρόσβαση στον χώρο με καθορισμένες εγγυήσεις. Το σύστημα ακολουθεί το μοντέλο της ώθησης για την πλήρωση της cache. Παρέχεται η εγγύηση ότι τα αντικείμενα που κερδίζουν την δημοπρασία παραμένουν για ένα συγκεκριμένο

χρονικό διάστημα χωρίς να αντικατασταθούν. Οι προμηθευτές περιεχομένου αποκομίζουν κάποια χρησιμότητα όταν οι τελικοί χρήστες-πελάτες τους λαμβάνουν το περιεχόμενό τους από την cache αντί από τους πηγαίους εξυπηρετητές τους. Κάθε προμηθευτής περιεχομένου δηλώνει την αξία W_u που έχει γι' αυτόν μια επιτυχής πρόσβαση (hit) στην cache για κάθε αντικείμενό του με URL u μεγέθους S_u σε bytes. Όπως αναφέρθηκε όμως νωρίτερα, το μοντέλο κάνει χρήση όχι μόνο πληροφορίας αποτίμησης της υπηρεσίας αλλά και της αναμενόμενης μελλοντικής ζήτησης του περιεχομένου. Προκειμένου επομένως να υπολογισθεί η συνολική αξία για τον προμηθευτή περιεχομένου να υπάρχει το αντικείμενο u στην cache, πρέπει αυτός να προβλέψει τον αριθμό αιτήσεων (hits) H_u προς το αντικείμενό του για το χρονικό διάστημα παραμονής του στην cache εφόσον νικήσει στην δημοπρασία. Άρα, η συνολική αξία T_u της παρουσίας του αντικείμενου στην cache είναι:

$$T_u = W_u \times H_u.$$

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ο αριθμός των αιτήσεων H_u που αναμένεται να δεχθεί το αντικείμενο για όσο χρόνο βρίσκεται στην cache αποτελεί μια υποκειμενική προσωπική εκτίμηση του ιδιοκτήτη (private valuation). Κάνει μια υπόθεση δηλαδή για την επιχειρηματική αξία που θα αποκομίσει από την ενοικίαση του αποθηκευτικού του χώρου για το αντικείμενο u . Διατρέχει ένα ρίσκο δηλαδή να φανεί υπεραισιόδοξος για την μελλοντική ζήτηση του αντικειμένου και να υπερχρεωθεί (να έχει αρνητικό όφελος) εφόσον κερδίσει στην δημοπρασία. Για αυτό πρέπει να συμβουλευθεί το ιστορικό αιτήσεων του συγκεκριμένου αντικειμένου εφόσον αυτό υπάρχει, και δεν πρόκειται για νέο αντικείμενο.

Στην συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία της δημοπρασίας και προσδιορισμού των προσφορών. Περιοδικά (π.χ. κάθε 20 λεπτά) ο διαχειριστής της cache συλλέγει προσφορές από τους προμηθευτές περιεχομένου και διενεργεί μια δημοπρασία ομοιόμορφης τιμής (uniform price auction) για να προσδιορίσει τα αντικείμενα που θα δεχθεί για αποθήκευση στην περίοδο που ακολουθεί. Οι προμηθευτές περιεχομένου υποβάλλουν για κάθε αντικείμενο προσφορές της μορφής <αναγνωριστικό εξυπηρετητή, μέγεθος αντικειμένου (S_u), αξία ανά byte (B_u)>, όπου $B_u = T_u / S_u$. Δηλαδή προσφέρουν για ένα δεδομένο ποσό χώρου (ίσο με το μέγεθος του αντικειμένου της προσφοράς) τιμή ίση με την συνολική αξία T_u του αντικειμένου. Ο δημοπράτης κατόπιν ταξινομεί τις προσφορές σε φθίνουσα σειρά της αξίας ανά byte B_u . Οι n υψηλότερες προσφορές που μπορούν να χωρέσουν στον διαθέσιμο χώρο της cache δηλώνονται νικήτριες. Εάν η

cache έχει μια μη-μηδενική δεσμευτική τιμή εκκινήσεως (reservation price), ίση με το οριακό κόστος αποθήκευσης, μόνο οι προσφορές με αξία ανά byte υψηλότερη της τιμής εκκινήσεως εξυπηρετούνται.

Η cache κατόπιν γεμίζει ξεκινώντας από την κορυφή της ταξινομημένης λίστας των αντικειμένων περιεχομένου και προχωρώντας προς τα κάτω. Γεμίζοντας την cache σύμφωνα με την αξία ανά byte το αποτέλεσμα είναι η πλήρωση της cache στην ουσία σύμφωνα με το οριακό όφελος (marginal benefit) ενός αντικειμένου. Χρησιμοποιώντας αυτή την μετρική, τα αντικείμενα με το υψηλότερο οριακό όφελος τοποθετούνται στην cache, το οποίο σχεδόν εγγυάται μεγιστοποίηση της εκ των προτέρων ευημερίας (ex ante welfare) της cache. Αν ο υπολειπόμενος χώρος στην cache δεν επαρκεί για το επόμενο αντικείμενο στην λίστα τότε αυτό παραλείπεται και προστίθεται στην cache το αντικείμενο που ακολουθεί εφόσον υπάρχει και για αυτό επαρκής χώρος. Μια προσφορά ανακηρύσσεται νικήτρια εφόσον το αντικείμενο της προστίθεται στην cache.

Ως τιμή εκκαθάρισης (clearing price) – το χρηματικό ποσό που πρέπει να πληρώσει κάθε νικήτρια προσφορά στο τέλος της διαδικασίας - καθορίζεται η αξία T_u της υψηλότερης από τις ηττηθείσες προσφορές, του αντικείμενου δηλαδή που ήταν υψηλότερα στην λίστα ταξινόμησης από όσα δεν αποθηκεύθηκαν τελικά στην cache λόγω έλλειψης χώρου. Σε τελική ανάλυση, οι χρήστες χρεώνονται το κοινωνικό κόστος της μη αποθήκευσης στην cache του αντικείμενου με την υψηλότερη χαμένη προσφορά, ή αλλιώς το κοινωνικό όφελος που θα προέκυπτε αν δεν συμμετείχαν στην δημοπρασία. Χρεώνοντας μια ανεξάρτητη τιμή εκκαθάρισης, η δημοπρασία θεωρείται ανταγωνιστική. Η τιμή εκκαθάρισης υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητη από την προσφορά του κάθε εξυπηρετητή και για αυτό θεωρείται ότι είναι συμβατή ως προς την παροχή κινήτρων (incentive compatible). Η ανεξαρτησία αυτή είναι σημαντική για την διασφάλιση ειλικρινούς αποκάλυψης της πληροφορίας αποτίμησης των εξυπηρετητών για την παρεχόμενη υπηρεσία, έχοντας παρόμοια επίδραση όπως μια δημοπρασία δεύτερης-τιμής.

Όσο συχνότερα πραγματοποιούνται οι δημοπρασίες, τόσο ταχύτερα το περιεχόμενο της cache μπορεί να αλλάξει και να ανταποκρίνεται καλύτερα η cache στις μεταβολές της ζήτησης. Η συχνή περιοδικότητα στην αναπλήρωση της cache οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει τέλεια πληροφόρηση για τα πρότυπα μελλοντικής ζήτησης του περιεχομένου. Στην περίπτωση ύπαρξης ενός συγκεντρωτικού μηχανισμού με πλήρη γνώση των αιτήσεων και των αποτιμήσεων του περιεχομένου, το σύστημα θα μπορούσε

να φτάσει σε ένα υψηλότερο επίπεδο ευημερίας με την αντιμετάθεση αντικειμένων από την cache βάσει της ροής των αιτήσεων περιεχομένου σε ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Μια cache με τέλεια πρόβλεψη της ζήτησης περιεχομένου αναπαριστά ένα άνω όριο ως προς το πόσο καλά λειτουργεί μια cache.

Μετά το πέρας της δημοπρασίας, τα αντικείμενα των νικητριών προσφορών προωθούνται από τους ιδιοκτήτες τους στην cache. Από αυτό το χρονικό σημείο η cache είναι έτοιμη να αποδεχθεί αιτήσεις από τελικούς χρήστες για αντικείμενα περιεχομένου. Ο κενός χώρος της cache που δεν χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των αντικειμένων των νικητριών προσφορών μπορεί να χρησιμεύσει για την διατήρηση αντικειμένων που ζητούν οι πελάτες και δεν βρίσκονται ήδη στην cache. Ως κενός χώρος ορίζεται η διαφορά του συνολικού αποθηκευτικού χώρου μείον του συνολικού μεγέθους των αντικειμένων των νικητριών προσφορών. Όταν προκαλείται συμφόρηση στον κενό χώρο (η ζήτηση δηλαδή για χώρο είναι μεγαλύτερη από την προσφορά), τότε αυτός διαχειρίζεται με μια πολιτική αντικατάστασης τύπου LRU.

Το μέγιστο μέγεθος του κενού χώρου μεταβάλλεται σε κάθε περίοδο καθώς αλλάζει και το συνολικό μέγεθος των αντικειμένων των νικητριών προσφορών. Όταν επικρατεί συμφόρηση στην cache και το συνολικό μέγεθος των αντικειμένων των προσφορών είναι μεγαλύτερο από το συνολικό αποθηκευτικό χώρο της cache, ο κενός χώρος συρρικνώνεται σε ένα μη ικανοποιητικό μέγεθος. Όταν υπάρχει κενός χώρος στην cache τότε η τιμή εκκαθάρισης είναι μηδενική, καθώς δεν υπάρχει υψηλότερη χαμένη προσφορά αφού όλες οι προσφορές γίνονται αποδεκτές. Η μηδενική τιμή αντανακλά το γεγονός ότι ο αποθηκευτικός χώρος πλέον στην cache δεν αποτελεί έναν σπάνιο πόρο, καθώς η προσφορά υπερβαίνει την ζήτηση.

Ενώ στην πρώτη περίπτωση του μοντέλου ώθησης η caching υπηρεσία που προσφέρεται θεωρείται ότι έχει μια εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) για τον προμηθευτή περιεχομένου, το υπόλοιπο του πόρου χρησιμοποιείται για την παροχή μιας υπηρεσίας caching βέλτιστης προσπάθειας (best-effort). Αυτό βρίσκεται σε αναλογία με την μετάδοση δεδομένων σε δίκτυα ATM όπου υπάρχουν ροές κλάσεως CBR και VBR με εγγυημένα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας (πχ. ταχύτητας, καθυστέρησης, μεταβλητότητας κτλ), ενώ το υπόλοιπο εύρος ζώνης διατίθεται για ροές χαμηλότερης προτεραιότητας με ένα best-effort τρόπο.

7.5.3 Διαφοροποιημένες Υπηρεσίες Caching

Στόχος της διαφοροποίησης της ποιότητας στην περίπτωση του caching είναι η παροχή υψηλότερων βαθμών επιτυχίας για αντικείμενα που αποτιμούν την υπηρεσία περισσότερο, εξασφαλίζοντας παράλληλα χαρακτηριστικά που προσθέτουν αξία στην υπηρεσία, όπως είναι η ασφάλεια, η συνέπεια του περιεχομένου, η υποστήριξη δυναμικών σελίδων κτλ. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι επιπρόσθετα και ανεξάρτητα από τον βαθμό επιτυχίας που απολαμβάνει κάθε κλάση. Γενικά, οι διαστάσεις στις οποίες μπορεί να ποικίλει η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) προκειμένου να προσφερθεί μια ευρεία γκάμα διαφοροποιημένων υπηρεσιών caching απεικονίζονται περιληπτικά στον παρακάτω πίνακα. Στην στήλη του caching βέλτιστης προσπάθειας αναφέρεται η χειρότερη περίπτωση για κάθε δεδομένη διάσταση ποιότητας υπηρεσίας, ενώ στην στήλη του QoS caching αναφέρεται η καλύτερη περίπτωση. Για την παροχή μιας ολοκληρωμένης υπηρεσίας caching μπορεί να γίνει οποιοσδήποτε συνδυασμός ανάμεσα στις δύο στήλες.

	Διάσταση Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS)	Caching βέλτιστης προσπάθειας (best-effort)	QoS Caching (πέρα από βέλτιστη προσπάθεια)
1	Τοποθέτηση περιεχομένου	Έλκυση- Pull (καθοδηγούμενη από την ζήτηση)	Ώθηση- Push (Προληπτική μεταφορά περιεχομένου)
2	Αντικατάσταση περιεχομένου	LRU, LFU και παραλλαγές τους	Προτεραιότητες, Δέσμευση Χώρου
3	Συνέπεια περιεχομένου	TTL (Time To Live), if-Modified-Since (ασθενής έλεγχος)	Μηνύματα ακύρωσης (invalidation) (ισχυρός έλεγχος)
4	Τύποι περιεχομένου	Στατικό	Δυναμικό, Ροές
5	Accounting	Απλή Καταγραφή (Logging)	Δημιουργία Επιχειρηματικών Αναφορών
6	Ασφάλεια	Όχι	Ναι

Πίνακας 3 : Διαστάσεις ποικιλίας QoS caching

Στο [35] παρουσιάζεται ένα σύστημα τιμών και κατανομής πόρων μιας διαφοροποιημένης υπηρεσίας caching με πολλαπλά επίπεδα ποιότητας. Προμηθευτής της υπηρεσίας (παραγωγός) είναι ένας πάροχος πρόσβασης στο Διαδίκτυο (ISP) ενώ καταναλωτές είναι οι προμηθευτές περιεχομένου. Ο ISP στο μοντέλο αυτό παρέχει δύο κλάσεις υπηρεσιών – μια βασική υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best-effort) που είναι το είδος που παρέχεται ευρέως σήμερα, και μια προνομιακή (premium) υπηρεσία υψηλής ποιότητας. Κατ' αντιστοιχία με το μοντέλο diffserv της μετάδοσης πακέτων, έτσι και εδώ τα αντικείμενα περιεχομένου χαρακτηρίζονται από τους ιδιοκτήτες τους

έτσι ώστε να ανήκουν σε μια από τις δύο κλάσεις προτεραιότητας (priority lists). Η best-effort υπηρεσία απευθύνεται σε πελάτες με χαμηλή αποτίμηση για χαρακτηριστικά προστιθέμενης αξίας και για εγγυημένη απόδοση. Η υπηρεσία υψηλότερης ποιότητας εξασφαλίζεται διαμέσου της παροχής χαρακτηριστικών πρόσθετης αξίας, όπως αυτά αναφέρθηκαν, και μέσω της κατανομής μεγαλύτερου μεριδίου του αποθηκευτικού χώρου της cache για το προνομιούχο περιεχόμενο.

Ο αποθηκευτικός χώρος της cache είναι διαιρεμένος σε 2 περιοχές: μια μικρότερη σε μέγεθος $S_L = \alpha S$ για τους συνδρομητές της βασικής υπηρεσίας και μια μεγαλύτερη σε μέγεθος $S_H = (1-\alpha)S$ για τους συνδρομητές της υψηλής υπηρεσίας. Το α απεικονίζει δηλαδή το κλάσμα του χώρου που διατίθεται για την βασική υπηρεσία. Αυτή η διαφορετική κατανομή του χώρου επιτρέπει την παροχή υψηλότερου βαθμού επιτυχιών για τα προνομιούχα αντικείμενα περιεχομένου. Για κάθε περιοχή διατηρείται ξεχωριστή λίστα των αντικειμένων (ταξινομημένη είτε κατά την συχνότητα αναφορών ή το χρόνο τελευταίας πρόσβασης) για χρήση από την πολιτική αντικατάστασης περιεχομένου.

Το μοντέλο λειτουργίας της cache που υιοθετείται και για τις δύο κλάσεις περιεχομένου είναι αυτό της έλκυσης χωρίς να εφαρμόζεται επιπλέον κάποια εξελιγμένη/μεροληπτική πολιτική αντικατάστασης περιεχομένου. Ούτε επίσης προϋποθέτει προληπτική προώθηση περιεχομένου στην cache ή μόνιμη δέσμευση (reservation) χώρου. Το μοντέλο δεν υπόσχεται για την premium υπηρεσία 100% hit-rate, καθώς εκτός του ότι δεν υπάρχει προληπτική προώθηση, η προσφορά αποθηκευτικού χώρου είναι πάντοτε περιορισμένη σε σχέση με τη ζήτηση για περιεχόμενο. Εγγυάται μόνο ότι το premium περιεχόμενο απολαμβάνει υψηλότερο hit-rate και χρόνο παραμονής στην cache από το περιεχόμενο της βασικής υπηρεσίας μέσω της εκχώρησης μεγαλύτερου μεριδίου από τον αποθηκευτικό χώρο.

Όσον αφορά στην τιμολόγηση της υπηρεσίας, αυτή παρέχει ένα μέσο για την ευθυγράμμιση των κινήτρων του παρόχου της υπηρεσίας caching και των προμηθευτών περιεχομένου και επομένως για την επίτευξη των στόχων του QoS. Στο χώρο του caching στο Διαδίκτυο παρατηρούνται ορισμένες μοναδικές προκλήσεις όσον αφορά την χρέωση των υπηρεσιών προτεραιότητας. Πρώτον, οι αγοραστές της υπηρεσίας (οι προμηθευτές περιεχομένου) δεν είναι αυτοί που δημιουργούν τη ζήτησή της. Ενώ αποτελούν τους συνδρομητές της υπηρεσίας, οι τελικοί χρήστες, που δεν συμμετέχουν ενεργά στην διαδικασία της συνδρομής, είναι εκείνοι που παράγουν την ζήτηση, δηλ.

τον αριθμό των αντικειμένων που εξυπηρετούνται από την cache. Οι προμηθευτές περιεχομένου πρέπει να γνωρίζουν τις προτιμήσεις των πελατών τους για το περιεχόμενο, προκειμένου να λάβουν τις σωστές αποφάσεις σχετικά με τον αποθηκευτικό χώρο που θα ενοικιάσουν.

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που ο πάροχος της υπηρεσίας caching είναι ένας ISP, τότε αποκομίζει και αυτός πέρα από τον χρήστη μια θετική χρησιμότητα από την υπηρεσία caching. Η χρησιμότητα αυτή προκύπτει από τη μείωση των δαπανών εύρους ζώνης για την μεταφορά του περιεχομένου από τους πηγαίους εξυπηρετητές. Έτσι δίνονται κίνητρα στον πάροχο να προσφέρει εκπτώσεις στην υπηρεσία του. Υπάρχει επομένως μια ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ του πλεονάσματος του παρόχου της υπηρεσίας και του πλεονάσματος του καταναλωτή (του προμηθευτή περιεχομένου).

Η τιμολόγηση επίσης είναι στενά συσχετισμένη με την κατανομή των πόρων, δηλαδή του αποθηκευτικού χώρου. Η τιμή που μπορεί να χρεώσει ο πάροχος της υπηρεσίας εξαρτάται μερικώς από το ύψος του βαθμού επιτυχιών (hit rate) που μπορεί να εγγυηθεί για κάθε κλάση υπηρεσίας, το οποίο με την σειρά του προσδιορίζεται από την απόφαση κατανομής του χώρου στις διάφορες κλάσεις. Όσο μεγαλύτερος ο διατεθειμένος χώρος σε μια κλάση, τόσο μεγαλύτερη και η πιθανότητα να βρίσκεται το αιτούμενο αντικείμενο στην cache και να αυξηθεί ο βαθμός επιτυχιών. Η βέλτιστη απόφαση κατανομής του χώρου εξαρτάται από το προφίλ της κίνησης στις διάφορες κλάσεις υπηρεσίας, το οποίο με την σειρά του προσδιορίζεται από την τιμολόγηση της υπηρεσίας.

Στο μοντέλο διαφοροποιημένων υπηρεσιών που παρουσιάζεται, η χρέωση γίνεται ανά παράδοση αντικειμένου από την cache και όχι ανάλογα με το χρόνο παραμονής του. Ωστόσο εφόσον εφαρμόζεται κάποια πολιτική αντικατάστασης περιεχομένου, προκειμένου ένα αντικείμενο να διατηρηθεί μεγαλύτερο διάστημα στην cache πρέπει να έχει πολλές αναφορές (υψηλό βαθμό επιτυχιών), αλλιώς θα απομακρυνθεί. Άρα και θα έχει και υψηλότερη χρέωση οπότε εμμέσως χρεώνεται η διάρκεια παραμονής του. Αποτελεί επομένως κίνητρο για το δημοφιλές περιεχόμενο να χαρακτηρίζεται ως premium καθώς το υψηλό hit-rate θα εγγυάται και μεγαλύτερη παραμονή στην cache. Περιεχόμενο μη δημοφιλές ακόμα και αν χαρακτηριστεί ως premium, αν δεν έχει πολλές αναφορές τότε θα απομακρυνθεί σύντομα, ενώ θα χρεωθεί υψηλότερα και για κάθε hit. Άρα παρέχεται κίνητρο για εισαγωγή του στην βασική κλάση.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο:

Σύμβολο	Επεξήγηση
q	Ποιότητα των μη σχετικών με βαθμό επιτυχίας χαρακτηριστικών προστιθέμενης αξίας, όπως ασφάλεια, διατήρηση συνέπειας, δημιουργία επιχειρηματικών αναφορών κτλ.
θ	Το βάρος(αξία) που τοποθετεί ένας προμηθευτής περιεχομένου στην ποιότητα q . Είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο διάστημα $[0, 1]$
λ	Ρυθμός αφίξεων στην cache. Το λ είναι μη-φθίνουσα συνάρτηση του αριθμού των πελατών του κατόχου της cache.
N	Ο συνολικός αριθμός διακριτών αντικειμένων περιεχομένου στο σύστημα.
R	Ποσοστό αιτήσεων από την συνολική ζήτηση για ένα αντικείμενο. Άρα λR είναι ο ρυθμός αφίξεων για ένα αντικείμενο και $\sum_{All\ objects} R = 1$
$H(S)$	Βαθμός επιτυχιών (hit rate) για μια cache μεγέθους S . Αυξάνεται μονοτονικά με το S .
$H(S,R)$	Βαθμός επιτυχιών για ένα αντικείμενο με σχετική ζήτηση R σε μια cache μεγέθους S .
Thc	Συνολικός αριθμός αιτήσεων (Total Hit Count) που εξυπηρετήθηκαν από μια cache για ένα αντικείμενο με σχετική ζήτηση R . [$Thc = \lambda R \times H(S,R)$]
B	Μέσο κόστος εύρους ζώνης για την επεξεργασία μιας αίτησης αντικειμένου από τον εξυπηρετητή του προμηθευτή περιεχομένου. [$B = \text{Κόστος εύρους ζώνης/byte} \times \text{Μέσο μέγεθος (σε bytes) ενός αντικειμένου}$]
B_{ISP}	Μέσο κόστος εύρους ζώνης του ISP για την ανάκτηση ενός αντικειμένου από τον πηγαίο εξυπηρετητή.
η	Όφελος του προμηθευτή περιεχομένου από την ταχύτερη παράδοση ενός αντικειμένου σε έναν τελικό χρήστη. Μπορεί να εκφραστεί με την μορφή αυξημένων πωλήσεων, διαφημιστικών εσόδων.
P	Τιμή που χρεώνεται από τον ISP για την παράδοση ενός αντικειμένου από την cache.
U	Αθροιστικό πλεόνασμα (surplus) του προμηθευτή περιεχομένου από το caching ενός αντικειμένου. Περιλαμβάνει αξία πρόσθετων παροχών, εξοικονόμηση δαπανών εύρους ζώνης και όφελος από ταχύτερη παράδοση περιεχομένου.
π	Συνάρτηση κέρδους του ISP.

Πίνακας 4 : Παράμετροι μοντέλου διαφοροποιημένης υπηρεσίας caching

Προχωρώντας στην οικονομική διάσταση του προβλήματος, τόσο ο παραγωγός (πάροχος αποθηκευτικού χώρου) όσο και ο καταναλωτής (προμηθευτής περιεχομένου) έχει ο καθένας το δικό του πρόβλημα προς επίλυση. Ο καταναλωτής πρέπει να επιλέξει την κλάση της υπηρεσίας και το περιεχόμενο που θα αποθηκεύσει για να μεγιστοποιήσει το όφελός του. Ο παραγωγός πρέπει να επιλέξει τις τιμές που θα δημοσιεύσει καθώς και την κατανομή του χώρου στις διάφορες κλάσεις της υπηρεσίας προκειμένου να μεγιστοποιήσει το κέρδος του από την παροχή της υπηρεσίας.

Πρόβλημα καταναλωτή

Ο προμηθευτής περιεχομένου έχει περιεχόμενο το οποίο αιτείται από τελικούς χρήστες. Ο ISP είναι ο αγωγός μέσω του οποίου παραδίδεται το περιεχόμενο. Ο καταναλωτής της υπηρεσίας λαμβάνει αποφάσεις στο μοντέλο, κάνει δηλαδή επιλογή κλάσης ανά αντικείμενο περιεχομένου. Αυτό αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα, καθώς διαφορετικά αποτιμούνται τα διάφορα αντικείμενα, ακόμα και για τον ίδιο προμηθευτή. Επιπλέον κάθε αντικείμενο μπορεί να έχει τις δικές του απαιτήσεις ασφάλειας ή διατήρησης της συνέπειάς του.

Η χρησιμότητα που αντλεί ο προμηθευτής περιεχομένου από την κατανάλωση της υπηρεσίας caching μπορεί να διακριθεί σε δύο συνιστώσες: στο όφελος που βασίζεται στο βαθμό επιτυχών προσβάσεων στην cache και στο ανεξάρτητο από το βαθμό επιτυχιών όφελος. Το πρώτο αναπαριστά το όφελος άμεσα συνδεδεμένο με την υπηρεσία του caching, δηλαδή τις οικονομίες εύρους ζώνης (B) και το όφελος από την ταχύτερη παράδοση του περιεχομένου (η) στους τελικούς χρήστες. Αυτά τα οφέλη αποκομίζονται κάθε φορά που ένα αντικείμενο εξυπηρετείται από την cache. Ενώ το B είναι ένα αντικειμενικό και γενικά μετρήσιμο μέγεθος, το η είναι περισσότερο υποκειμενικό και αναφέρεται στην αποτίμηση του προμηθευτή περιεχομένου για το caching και πώς μπορεί να εξάγει επιχειρηματική αξία από αυτό. Η δεύτερη συνιστώσα αναπαριστά όφελος αντλούμενο από χαρακτηριστικά πρόσθετης αξίας όπως είναι υποστήριξη για caching δυναμικού περιεχομένου, ασφάλεια, δημιουργία επιχειρηματικών αναφορών κτλ. Η χρησιμότητα U του καταναλωτή είναι:

$$U = \text{όφελος από caching περιεχομένου} + \text{όφελος από χαρακτηριστικά πρόσθετης αξίας}$$

Μια υπόθεση εργασίας που γίνεται είναι ότι δεν υπάρχει επικάλυψη περιεχομένου μεταξύ διαφορετικών προμηθευτών του. Στην αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε να υπολογισθούν και οι οικονομίες εξωτερικότητας (externalities) από την εξυπηρέτηση αιτήσεων για περιεχόμενο ενός προμηθευτή από τα αποθηκευμένα αντίγραφα στον χώρο άλλου προμηθευτή.

Το πρόβλημα που πρέπει να λύσει ο καταναλωτής-προμηθευτής περιεχομένου είναι η επιλογή της κατάλληλης κλάσης υπηρεσίας caching για κάθε αντικείμενο περιεχομένου περιεχόμενο, ή αλλιώς η αποχή του από την αγορά, με σκοπό να μεγιστοποιήσει το πλεόνασμά (surplus) του. Χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό του πίνακα παραμέτρων και συμβολίζοντας την ποιότητα των χαρακτηριστικών πρόσθετης

αξίας της βασικής και της υψηλής υπηρεσίας ως q_L και q_H αντίστοιχα, προκύπτει η συνάρτηση χρησιμότητας του προμηθευτή περιεχομένου ανά κλάση υπηρεσίας i , για ένα αντικείμενο περιεχομένου n :

$$U_n(i) = \begin{cases} (TotalHitCount) \times (\eta + B) + \theta \times q_i = \lambda R \times H(S_i, R) \times (\eta + B) + \theta \times q_i & i \in \{L, H\} \\ 0 & i = \emptyset \end{cases}$$

όπου L αντιστοιχεί στην χαμηλή υπηρεσία, H στην υψηλή υπηρεσία ενώ \emptyset δηλώνει αποχή από την αγορά.

Επίσης, λR είναι ο συνολικός αριθμός των αιτήσεων για ένα αντικείμενο περιεχομένου και $H(S_i, R)$ είναι ο βαθμός επιτυχιών που απολαμβάνει αυτό ανάλογα με την κλάση υπηρεσίας στην οποία έχει καταταχθεί. Οπότε $\lambda R \times H(S_i, R)$ είναι ο αριθμός των αιτήσεων που εξυπηρετήθηκαν από τον αποθηκευτικό χώρο της αντίστοιχης κλάσης. Η συνολική χρησιμότητα που αποκομίζει επομένως ο προμηθευτής περιεχομένου για N αντικείμενα είναι:

$$\sum_{n \in N} U_n(i)$$

Έστω P_L η τιμή που χρεώνει ο ISP για κάθε αίτηση αντικειμένου της βασικής κλάσης που εξυπηρετείται από την cache, και P_H η αντίστοιχη τιμή για την υψηλότερη κλάση. Τότε το συνολικό πλεόνασμα του προμηθευτή περιεχομένου για όλα τα αντικείμενα του και από τις δύο κλάσεις υπηρεσιών είναι:

$$CS = \text{Συνολικό όφελος} - \text{Συνολική χρέωση} =$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{n \in N} [U_n(i) - P_i \times (\text{αριθμός αιτήσεων που εξυπηρετήθηκαν από το χώρο της κλάσης } i)] \\ &= \sum_{n \in N} [U_n(i) - P_i \times \lambda R \times H(S_i, R)] \quad , i \in \{L, H\} \end{aligned}$$

Συμβολικά το πρόβλημα του καταναλωτή είναι:

$$\max_i CS = \max_i \left[\sum_{n \in N} [U_n(i) - P_i \times \lambda R \times H(S_i, R)] \right]$$

Πρόβλημα Παραγωγού

Το πρόβλημα που πρέπει να επιλύσει ο παραγωγός στη συγκεκριμένη αγορά είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους του μέσω της κατάλληλης επιλογής των τιμών P_H , P_L και της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου στις δύο κλάσεις υπηρεσιών. Οι τελικοί χρήστες συνήθως γίνονται συνδρομητές σε έναν ISP για να αποκτήσουν

πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Άρα ένας ISP έχει μονοπωλιακή δύναμη όσον αφορά τους πελάτες του καθώς είναι ο μοναδικός δυνατός αγωγός για σύνδεση ενός προμηθευτή περιεχομένου με τους τελικούς χρήστες-πελάτες του. Επομένως εξετάζεται ένα μονοπωλιακό τιμολογιακό μοντέλο.

Το κέρδος του παρόχου της υπηρεσίας δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των αντικειμένων σε κάθε κλάση υπηρεσίας, αλλά και από την κατανομή των αιτήσεων για τα αντικείμενα στις διάφορες κλάσεις. Επίσης η κατανομή των αιτήσεων στις κλάσεις υπηρεσίας εξαρτάται με την σειρά της από την απόφαση τιμολόγησης του παρόχου, καθώς οι τιμές επηρεάζουν την απόφαση της συνδρομής για τους καταναλωτές στις δύο υπηρεσίες

Το αναμενόμενο κέρδος του ISP αποτελείται από τις προσόδους από την χρέωση των δυο κλάσεων υπηρεσίας και από τις αποταμιεύσεις εύρους ζώνης λόγω εξυπηρέτησης των τελικών χρηστών από την cache. Θεωρούμε ότι εφόσον η cache είναι εγκατεστημένη και λειτουργεί, το οριακό κόστος εξυπηρέτησης μιας αίτησης είναι αμελητέο.

π = πρόσδοδος από την χρέωση των δύο κλάσεων υπηρεσίας + αποταμιεύσεις εύρους ζώνης – σταθερό κόστος πρόσθετων παροχών

$$\pi = (\text{hits για αντικείμενα υψηλής υπηρεσίας}) \times [P_H + B_{ISP}] + (\text{hits για αντικείμενα βασικής υπηρεσίας}) \times [P_L + B_{ISP}] - C(q_H)$$

Από το σύνολο των αιτήσεων για τα αντικείμενα κάθε κλάσης υπηρεσίας, ένα μέρος εξυπηρετείται επιτυχώς από την cache. Για κάθε αντικείμενο που παραδίδεται από την cache ο ISP εισπράττει ένα αντίτιμο από τον προμηθευτή περιεχομένου και παράλληλά πραγματοποιεί αποταμιεύσεις από την μη χρήση εύρους ζώνης για την ανάκτηση του περιεχομένου (B_{ISP}) από τον πηγαίο εξυπηρετητή. Το κόστος $C(q_H)$ αναφέρεται στο σταθερό κόστος παροχής των χαρακτηριστικών προστιθέμενης αξίας, το οποίο αυξάνεται μονότονα ως προς την ποιότητα των υπηρεσιών q_H . Π.χ. για την υποστήριξη caching δυναμικού περιεχομένου απαιτείται ο πληρεξούσιος εξυπηρετητής του ISP να έχει την τεχνολογική ευφυΐα για να κατανοεί πρωτόκολλα και γλώσσες, όπως η ESI.

Το πρόβλημα επομένως του ISP είναι συμβολικά $\max_{P_H, P_L, \alpha} \pi(P_H, P_L, \alpha)$. Για την επίλυση του προβλήματος της τιμολόγησης θεωρείται αρχικά ως εξωγενής κα σταθερή

παράμετρος το α , η κατανομή δηλαδή του αποθηκευτικού χώρου στις δύο κλάσεις υπηρεσίας. Λαμβάνοντας έτσι τις συνθήκες πρώτης τάξεως τόσο για P_H όσο και για P_L προκύπτουν οι βέλτιστες τιμές τις οποίες πρέπει να χρεώσει ο ISP (Για περισσότερες λεπτομέρειες ανάλυσης ο αναγνώστης μπορεί να προστρέξει στο [35]):

$$P_i^* = \frac{q_i}{\text{αριθμός hits στον χώρο } i \text{ της cache}} + \left(\frac{\eta + B - B_{ISP}}{2} \right), \quad i \in \{L, H\}$$

Οι τιμές που χρεώνονται μεταβάλλονται γραμμικά ως προς την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας. Ο ISP χρεώνει τον προμηθευτή περιεχομένου ένα μέρος από το πλεόνασμά του που προέρχεται από την ταχύτερη παράδοση του περιεχομένου και τις αποταμιεύσεις εύρους ζώνης ($\eta + B$), και του επιστρέφει πίσω ένα μέρος από το δικό του πλεόνασμα αποταμίευσης δαπανών εύρους ζώνης (B_{ISP}), το οποίο αφαιρείται στον παραπάνω τύπο. Επίσης ο ISP χρεώνει τον προμηθευτή περιεχομένου για την ποιότητα των παροχών προστιθέμενης αξίας. Εφόσον πρόκειται για ένα αθροιστικό όφελος και η τιμολόγηση γίνεται ανά παράδοση αντικειμένου περιεχομένου από την cache, η ανά αντικείμενο τιμή διαιρείται με τον αριθμό των επιτυχών προσβάσεων του αντικειμένου στο χώρο της cache που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη κλάση.

Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η υπηρεσία χαμηλής ποιότητας είναι μια best-effort υπηρεσία και επομένως ο όρος q_L δηλώνει την έλλειψη ενός συνεπούς και αξιόπιστου QoS. Είναι άρα δυνατό για ένα ISP να θεωρεί βέλτιστο να παρέχει την best-effort υπηρεσία δωρεάν, όπως συμβαίνει και τώρα. Αυτό συμβαίνει επειδή αφενός οι δαπάνες για εύρος ζώνης που αποταμιεύει λόγω του caching ο ISP και αφαιρούνται από την τιμή που χρεώνει είναι αρκετά υψηλές, και αφετέρου η ποιότητα της best-effort υπηρεσίας είναι αρκετά χαμηλή με μηδαμινό κόστος παροχής της. Αυτή η στρατηγική της δωρεάν παροχής της best-effort υπηρεσίας μπορεί να εξακολουθεί να είναι βέλτιστη ακόμα και όταν προσφέρεται μια προνομιακή υπηρεσία.

Τέλος, δύο παρατηρήσεις που πρέπει να γίνουν είναι σχετικές με το πώς μπορεί ο μηχανισμός να παρέχει κίνητρο στους καταναλωτές να επιλέγουν την κλάση που τους ταιριάζει. Αφενός, η διαφορά μεταξύ της συνολικής τιμής που χρεώνεται ένας προμηθευτής περιεχομένου και του οφέλους που λαμβάνει από το αυξημένο βαθμό επιτυχιών πρέπει να είναι μεγαλύτερη για το premium περιεχόμενο από ότι για το περιεχόμενο της βασικής υπηρεσίας. Έτσι, οι προμηθευτές με χαμηλή αποτίμηση των πρόσθετων παροχών της υπηρεσίας δεν θα είναι πρόθυμοι να πληρώσουν την

υψηλότερη τιμή της premium υπηρεσίας και θα αυτό-επιλεγούν (self-select) την βασική υπηρεσία. Αφετέρου, η διαφορά της ποιότητας των πρόσθετων παροχών μεταξύ των δύο κλάσεων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να καλύπτει την διαφορά (Συνολική Χρέωση – Οφέλη από Hit-Rate) και οι καταναλωτές με υψηλή αποτίμηση των πρόσθετων παροχών να επιλέγουν την premium υπηρεσία. Προς αυτήν την κατεύθυνση, μπορεί να μειωθεί και άλλο η ποιότητα της χαμηλής υπηρεσίας εισάγοντας τεχνητές καθυστερήσεις στην εξυπηρέτηση των αιτήσεων για αντικείμενα περιεχομένου της χαμηλής υπηρεσίας.

7.5.4 Επέκταση μοντέλου διαφοροποιημένων υπηρεσιών

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο της ανασκόπησης των οικονομικών μηχανισμών στην μετάδοση δεδομένων, ένα από τα μειονεκτήματα των διαφοροποιημένων υπηρεσιών είναι ότι η κατανομή των πόρων γίνεται στατικά στην αρχή σύμφωνα με την μέση ιστορική κατανάλωση και προβλέψεις για την μελλοντική ζήτηση ανά κλάση. Επιπλέον, καθώς διαμοιράζονται ένα κοινό πόρο η ποιότητα υπηρεσίας της κάθε κλάσης εξαρτάται από την σχετική ζήτηση που υπάρχει για την κάθε μία. Εάν δηλαδή εγγραφούν περισσότεροι χρήστες από το αναμενόμενο στην κλάση υψηλής ποιότητας και λιγότεροι στις χαμηλότερες, τότε μπορεί να παρατηρηθεί υπερφόρτωση σε την υψηλή κλάση ενώ οι κλάσεις χαμηλότερης ποιότητας μπορεί να προσφέρουν καλύτερη απόδοση.

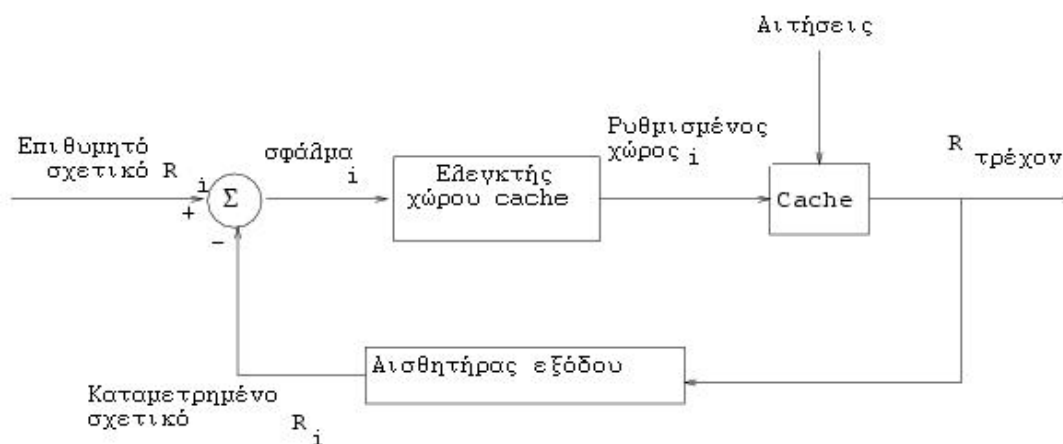
Έτσι και στο μοντέλο που παρουσιάστηκε νωρίτερα, η κατανομή του αποθηκευτικού χώρου ανάμεσα στις δύο κλάσεις υπηρεσίας πραγματοποιείται στατικά στην αρχή, ενώ ο βαθμός επιτυχιών που εξασφαλίζεται για κάθε κλάση εξαρτάται από την πραγματική ζήτηση για κάθε κλάση σε σχέση με την προβλεπόμενη. Εάν παρατηρηθεί συμφόρηση στο χώρο του premium περιεχομένου και όχι στον αντίστοιχο του περιεχομένου της βασικής κλάσης, (εάν δηλαδή δηλωθούν περισσότερα αντικείμενα από το αναμενόμενο ως υψηλής κλάσης σε σύγκριση με αυτά της βασικής) τότε η ποιότητα υπηρεσίας της χαμηλής κλάσης, δηλαδή ο βαθμός επιτυχιών που απολαμβάνουν τα αντικείμενα της, ενδέχεται να είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη της premium κλάσης. Απαιτείται επομένως κάποια αντίδραση από το σύστημα για την αναπροσαρμογή της κατανομής του πόρου.

Η ανάγκη για την ύπαρξη ενός *μηχανισμού ανάδρασης* (feedback-based mechanism) που να τροποποιεί την κατανομή του αποθηκευτικού χώρου της cache

μεταξύ των κλάσεων περιεχομένου ανάλογα με την ζήτηση για αυτές σκιαγραφείται στο [55]. Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι απαραίτητο να εγγυάται έναν απόλυτο βαθμό επιτυχιών για κάθε κλάση περιεχομένου (π.χ. 70% για την υψηλή κλάση και 20% για την βασική κλάση). Αντιθέτως, μπορεί να ορίζει ένα σχετικό βαθμό επιτυχιών μεταξύ των κλάσεων (π.χ. ο βαθμός επιτυχιών της υψηλής κλάσης να είναι τριπλάσιο από αυτό της βασικής), υιοθετώντας το μοντέλο των *σχετικά διαφοροποιημένων υπηρεσιών* (relative differentiated services model). Μια τέτοια προσέγγιση είναι πιο ευέλικτη και εφικτή προς υλοποίηση.

Μια αρχιτεκτονική διαφοροποίησης της απόδοσης της υπηρεσίας caching πρέπει να ξεχωρίζει την πολιτική (policy) από τον μηχανισμό διαφοροποίησης. Ενώ η πολιτική περιγράφει πώς σχετίζεται ο βαθμός επιτυχιών των διάφορων κλάσεων μεταξύ τους, ο μηχανισμός διαφοροποίησης της απόδοσης φροντίζει για την επιβολή αυτής της σχέσης. Πιο αναλυτικά, η πολιτική του συστήματος καθορίζει την επιθυμητή κατάσταση του συστήματος, δηλ. την σχέση μεταξύ των βαθμών επιτυχίας των διαφόρων κλάσεων. Ο μηχανισμός κατόπιν ελέγχει ανά τακτικά χρονικά διαστήματα εάν υπάρχει απόκλιση μεταξύ της απόδοσης του συστήματος και της επιθυμητής κατάστασης και επεμβαίνει αναπροσαρμόζοντας την κατανομή του αποθηκευτικού χώρου μέσω της πολιτικής αντικατάστασης περιεχομένου, η οποία αφαιρεί περισσότερα αντικείμενα από την περιοχή της κλάσης της οποίας θα ελαττωθεί το ποσοστό χώρου.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένας τέτοιος μηχανισμός ανάδρασης, ο οποίος ελέγχει την απόδοση μιας κλάσης περιεχομένου. Ένας παρόμοιος βρόγχος (loop) ανάδρασης απαιτείται για κάθε μία κλάση.



Εικόνα 12: Μηχανισμός ανάδρασης στο caching

Ακολουθεί ένα παράδειγμα που διασαφηνίζει την λειτουργία του παραπάνω μηχανισμού ανάδρασης. Η πολιτική διαφοροποίησης της υπηρεσίας caching προσδιορίζει δυναμικά το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης για την κλάση υπό εξέταση. Έστω ότι υπάρχουν n κλάσεις περιεχομένου στο σύστημα και έστω ότι ο μέσος καταμετρημένος βαθμός επιτυχιών για την κλάση περιεχομένου i είναι H_i . Η πολιτική διαφοροποίησης καθορίζει ότι οι βαθμοί επιτυχιών των διαφορετικών κλάσεων πρέπει να συσχετίζονται σύμφωνα με τον τύπο $H_1 : H_2 : \dots : H_n = C_1 : C_2 : \dots : C_n$, όπου C_i είναι η σταθερά αναλογίας ή αλλιώς το βάρος της κλάσης i . Ο σχετικός καταμετρημένος βαθμός επιτυχιών R_i της κλάσης περιεχομένου i ορίζεται ως $R_i = H_i / (H_1 + H_2 + \dots + H_n)$. Προσδιορίζει δηλαδή πώς αποδίδει η κλάση σχετικά ως προς τις άλλες κλάσεις. Το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης για την κλάση i θα έπρεπε σύμφωνα με τα παραπάνω να είναι ίσο με $R_{i \text{ επιθυμητό}} = C_i / (C_1 + C_2 + \dots + C_n)$. Η διαφορά $R_{i \text{ επιθυμητό}} - R_i$ καλείται σφάλμα απόδοσης (performance error) e_i της κλάσης i . Το μοντέλο έχει την ιδιότητα ότι το αθροιστικό σφάλμα απόδοσης του συστήματος είναι πάντοτε μηδενικό καθώς:

$$\sum_{1 \leq i \leq n} e_i = \sum_{1 \leq i \leq n} (R_{i \text{ επιθυμητό}} - R_i) = \frac{\sum_{1 \leq i \leq n} C_i}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} - \frac{\sum_{1 \leq i \leq n} H_i}{H_1 + H_2 + \dots + H_n} = 1 - 1 = 0$$

Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την ανάπτυξη αλγόριθμων κατανομής πόρων στους οποίους οι πόροι της μιας κλάσης ρυθμίζονται ευρετικά και ανεξάρτητα από τις ρυθμίσεις των άλλων κλάσεων, ενώ το συνολικό ποσό των εκχωρηθέντων πόρων παραμένει πάντοτε σταθερό και ίσο με τον συνολικό μέγεθος της cache.

Σε κάθε κλάση περιεχομένου i εκχωρείται ένα διαφορετικό ποσό αποθηκευτικού χώρου s_i , τέτοιο ώστε $\sum_i s_i$ να είναι ίσο με το συνολικό μέγεθος της cache. Ο στόχος είναι η επίτευξη της επιθυμητής διαφοροποίησης του ρυθμού επιτυχιών, να μειωθεί δηλαδή το σφάλμα απόδοσης e_i στο 0 για κάθε κλάση περιεχομένου. Ένα μηδενικό σφάλμα σημαίνει ότι οι ρυθμοί επιτυχιών των διαφορετικών κλάσεων σχετίζονται αναλογικά σύμφωνα με την προδιαγραφή $C_1 : C_2 : \dots : C_n$. Το σφάλμα e_i μειώνεται στο μηδέν μέσω της προσαρμογής της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου από τον ελεγκτή του χώρου της cache, αυξάνοντας ή μειώνοντας τον αποθηκευτικό χώρο ανάλογα με το εάν το σφάλμα είναι θετικό ή αρνητικό. Θετικό σφάλμα σημαίνει ότι ο τρέχων βαθμός επιτυχιών είναι χαμηλότερος από τον επιθυμητό, άρα πρέπει να αυξηθεί ο αποθηκευτικός χώρος που έχει εκχωρηθεί στην κλάση, ενώ το αντίστροφο ισχύει στην περίπτωση του αρνητικού σφάλματος.

Η καθορισμένη από την πολιτική υπηρεσίας διαφοροποίηση επιτυγχάνεται μέσω ενός ευρετικού αλγορίθμου κατανομής του χώρου της cache, ο οποίος ρυθμίζει το ποσό του αποθηκευτικού χώρου που έχει εκχωρηθεί σε κάθε κλάση βασιζόμενος στην διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής απόδοσης. Σε κάθε διάστημα δειγματοληψίας k , καταμετράται το σφάλμα απόδοσης $e_i[k]$ και πραγματοποιείται μια διόρθωση του χώρου $\delta s_i[k]$, για την εκτέλεση της οποίας είναι υπεύθυνη η πολιτική αντικατάστασης που εφαρμόζεται στην cache. Για τον υπολογισμό της διόρθωσης $\delta s_i[k]$ στην κατανομή του χώρου, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση $f(e_i)$ όπου $f(0)=0$ (καμία διόρθωση αν δεν υπάρχει σφάλμα). Στο k διάστημα η ευρετική μέθοδος υπολογίζει:

$$\forall i : \delta s_i[k] = f(e_i[k])$$

Η κατανομή του χώρου κατόπιν ρυθμίζεται:

$$\forall i : s_i[k] = s_i[k-1] + \delta s_i[k]$$

Εάν η υπολογισμένη διόρθωση $\delta s_i[k]$ είναι θετική, τότε ο εκχωρηθείς χώρος στην κλάση i αυξάνεται κατά $|\delta s_i[k]|$. Αλλιώς μειώνεται κατά το ίδιο ποσό. Η διόρθωση αυτή της κατανομής του αποθηκευτικού χώρου επηρεάζει τον βαθμό επιτυχιών της κάθε κλάσης περιεχομένου, έτσι ώστε να ισχύσει η προδιαγραφή της σχετικής ποιότητας $H_1 : H_2 : \dots : H_n = C_1 : C_2 : \dots : C_n$ στο επόμενο διάστημα δειγματοληψίας.

8° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Πρόβλημα των πελατών

Για τις ανάγκες της ανάλυσης του προηγούμενου κεφαλαίου, ως μοναδικοί χρήστες της υπηρεσίας caching θεωρήθηκαν οι *προμηθευτές περιεχομένου*. Στην πραγματικότητα όμως, εκτός από τους προμηθευτές περιεχομένου, υπάρχει, όπως αναφέρθηκε ήδη, και ένας δεύτερος τύπος χρήστη που είναι διατεθειμένος να αγοράσει χώρο στην cache, οι *πελάτες* (clients) της cache. Οι πελάτες αντιπροσωπεύουν τους οργανισμούς ή τους παρόχους πρόσβασης στο Διαδίκτυο που θέλουν να δεσμεύσουν χώρο σε μια cache για την αποθήκευση δημοφιλούς περιεχομένου σύμφωνα με τις προτιμήσεις των δικών τους τελικών χρηστών. Επομένως, οι πελάτες, όπως και οι προμηθευτές περιεχομένου, δρουν ως συγκεντρωτικές οντότητες της αξίας που αποκομίζουν οι τελικοί χρήστες, που είναι οι καταναλωτές του περιεχομένου.

Οι πελάτες, βέβαια, έχουν ένα τελείως διαφορετικό πρόβλημα απόφασης να λύσουν από ότι οι προμηθευτές περιεχομένου [33]. Και πάλι σκοπός του πελάτη ως καταναλωτή της υπηρεσίας caching είναι η μεγιστοποίηση του καθαρού οφέλους του (της διαφοράς της χρησιμότητας μείον της συνολικής χρέωσης), επιλέγοντας την ποσότητα αποθηκευτικού χώρου που θα ενοικιάσει και το περιεχόμενο που θα αντιγράψει. Η απόφαση ενός πελάτη, όμως, είναι πιο σύνθετη από ότι αυτή ενός προμηθευτή περιεχομένου, καθώς το κίνητρο ενός πελάτη να δεσμεύσει χώρο στην cache είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ομοιογένεια του περιεχομένου που προωθείται από άλλους πελάτες σε αυτή.

Το πρόβλημα αυτό προκαλείται από την δημόσια καλή φύση (public good nature) της cache. Αυτό το χαρακτηριστικό σημαίνει ότι οποιοσδήποτε μπορεί να «καταναλώσει» από την cache χωρίς άλλοι καταναλωτές να χάνουν αξία από την δική τους «κατανάλωση». Παράλληλα η cache είναι μη-αποκλειστική, δηλαδή όλες οι αιτήσεις εξυπηρετούνται. Αυτές οι προοπτικές μπορεί να κινητοποιήσουν ένα συγκεκριμένο πελάτη να αγοράσει πολύ λίγο χώρο στην cache εάν γνώριζε ότι άλλοι πελάτες θα αποθήκευαν περιεχόμενο που θα ζητούσαν οι χρήστες του. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως επίδραση του «ελεύθερου καβαλάρη» (free rider effect). Στην περίπτωση των προμηθευτών περιεχομένου, η υπόθεση εργασίας ήταν ότι η τομή των

συνόλων του περιεχομένου κάθε προμηθευτή είναι το κενό σύνολο, δηλαδή δεν υπάρχουν επικαλύψεις στο περιεχόμενο των διαφορετικών προμηθευτών ώστε να υπάρξει εκμετάλλευση των οικονομιών *εξωτερικότητας* (externalities). Τώρα όμως, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι οικονομίες εξωτερικότητας κατά τον υπολογισμό της συνάρτησης της χρησιμότητας του πελάτη από την ύπαρξη χρήσιμου για αυτόν περιεχόμενο σε χώρο της cache που δεν ελέγχει ο ίδιος.

Εάν οι προτιμήσεις των πελατών ήταν πλήρως ετερογενείς, δεν υπήρχαν δηλαδή πελάτες που αιτούσαν το ίδιο αντικείμενο, και στην αγορά παρέχονταν τα κατάλληλα οικονομικά κίνητρα, τότε μπορεί να υποτεθεί ότι οι προσφορές τους για την αγορά χώρου θα αντανακλούσαν τις προσωπικές τους αξίες για τα αντικείμενα περιεχομένου. Εάν όμως πολλοί πελάτες έχουν χρήστες που ζητούν το ίδιο αντικείμενο τότε η απόφαση τους να κάνουν προσφορά για χώρο για το συγκεκριμένο αντικείμενο, πρέπει να συνυπολογίσει και την περίπτωση που άλλοι πελάτες θα αγόραζαν χώρο για αυτό το αντικείμενο. Μα άλλα λόγια, η απόφαση πρέπει να λάβει υπόψη και το όφελος από τον μη έλεγχο μέρους της cache.

Έστω Q_c ο αριθμός μονάδων αποθηκευτικού χώρου που νοικιάζει (καταναλώνει) ένας πελάτης, ενώ το συνολικό μέγεθος της cache είναι Q_t μονάδες. Ο πελάτης αποτιμά ότι κάθε εξυπηρέτηση αίτησης τελικού χρήστη από την cache, δηλαδή κάθε επιτυχής πρόσβαση για περιεχόμενο, έχει αξία για αυτόν V , είτε προέρχεται από τον δικό του χώρο είτε από το χώρο άλλου πελάτη. Από τον χώρο Q_c που έχει νοικιάσει στην cache ο πελάτης αναμένει ότι θα εξυπηρετηθούν $H_c(Q_c)$ αιτήσεις τελικών χρηστών του, ενώ από τον υπόλοιπο $Q_t - Q_c$ χώρο που ελέγχεται (νοικιάζεται) από άλλους πελάτες προβλέπει ότι θα εξυπηρετηθούν $H_o(Q_t - Q_c)$ αιτήσεις περιεχομένου. Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω συμβολισμό, η συνάρτηση χρησιμότητας του πελάτη είναι:

$$U(Q_c) = [H_c(Q_c) + H_o(Q_t - Q_c)] \times V$$

Αν επίσης p είναι η τιμή που χρεώνεται μια μονάδα αποθηκευτικού χώρου, Τυπικά, οι πελάτες θα προσπαθούσαν να μεγιστοποιήσουν την απόφαση, όπου CS το πλεόνασμά τους:

$$\underset{Q_c}{Max} CS = U(Q_c) - p \times Q_c = [[H_c(Q_c) + H_o(Q_t - Q_c)] \times V] - p \times Q_c$$

Συμπερασματικά, είναι ανάγκη στο μέλλον να εφαρμοσθούν τα κατάλληλα κίνητρα και μηχανισμοί, προκειμένου να αποφεύγεται το φαινόμενο του «ελεύθερου καβαλάρη», με εκμετάλλευση του χώρου που έχει νοικιάσει κάποιος άλλος χρήστης. Αυτό οδηγεί όπως αναφέρθηκε στην αποκάλυψη χαμηλότερων από το αληθινό αποτιμήσεων των πελατών, σε περίπτωση υλοποίησης π.χ. κάποιου μηχανισμού αγοράς. Στο [55] γίνεται μια πρόταση για την αντιμετώπιση του προβλήματος του επικαλυπτόμενου περιεχομένου μεταξύ διαφορετικών πελατών ή ακόμα και κλάσεων περιεχομένου. Η πρόταση αυτή έγκειται στην άρνηση εξυπηρέτησης των αιτήσεων περιεχομένου εάν τα αντικείμενα βρίσκονται μεν αντιγραμμένα στην cache αλλά στο χώρο άλλου πελάτη ή κλάσης περιεχομένου.

Σκοπός της πρότασης είναι η διατήρηση της διαφοροποίησης ποιότητας των κλάσεων υπηρεσίας, ή αλλιώς η προμήθεια των πελατών με κίνητρα να είναι ειλικρινείς στις αποτιμήσεις τους και να μην εκμεταλλούνται την πιθανότητα ομοιογένειας των αιτήσεων τους με αυτές άλλων πελατών. Βέβαια, αυτή η πρόταση συνεπάγεται την εισαγωγή στο σύστημα πρόσθετου μηχανισμού άρα και κόστους. Από την άλλη πλευρά οδηγεί σε μείωση της συνολικής χρησιμότητας των τελικών χρηστών, αφού δεν εξυπηρετούνται από την cache μολονότι είναι δυνατόν, άρα και της κοινωνικής ευημερίας.

Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει μελλοντική εργασία προς τον τομέα σύζευξης των δύο μοντέλων, το ένα του προμηθευτή περιεχομένου και το άλλο του πελάτη, ίσως μέσα από ένα μηχανισμό αγοράς με εκτέλεση δημοπρασιών όπου συμμετέχουν και οι δύο τύποι χρηστών. Μια τέτοια προέκταση θα οδηγούσε στην μοντελοποίηση των συνθηκών μιας πιο ρεαλιστικής αγοράς.

8.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Οι προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, τόσο αυτή που στηρίζεται στην ύπαρξη ενός μηχανισμού αγοράς με εκτέλεση δημοπρασιών, όσο και εκείνη που βασίζεται σε ένα κεντρικά σχεδιασμένο σύστημα τιμών για την παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών, είναι περιοριστικές σε ό,τι αφορά την διαχείριση του χώρου μιας cache μόνο. Δεν αναφέρονται δηλαδή καθόλου στην περίπτωση ενός συνόλου από γεωγραφικά κατανομημένες caches, ούτε υπεισέρχεται στα μοντέλα τους ο παράγοντας του γεωγραφικού χώρου που μπορεί να είναι τοποθετημένη η cache.

Τα ΔΔΠ από την πλευρά τους είναι παγκόσμιες συλλογές από συνεργαζόμενες caches που λειτουργούν υπό την επίβλεψη μιας κεντρικής οντότητας. Επεκτείνοντας το μοντέλα τιμολόγησης και κατανομής πόρων του προηγούμενου κεφαλαίου στο πλαίσιο των ΔΔΠ, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η παρουσία ενός δικτύου από caches αντί ενός μόνου αποθηκευτικού κόμβου. Το γεγονός ότι αυτές οι caches δεν είναι ανεξάρτητες αλλά συνεργάζονται μεταξύ τους δημιουργεί ένα νέο σύνολο ζητημάτων σχετικά με τα μοντέλα τιμολόγησης και κατανομής πόρων.

Πρώτον, σε μια τέτοια περίπτωση η διάκριση των κλάσεων της υπηρεσίας caching ως προς την παρεχόμενη ποιότητα (δηλαδή τον βαθμό επιτυχιών) μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο με βάση την κατανομή του χώρου της cache στις διάφορες κλάσεις, αλλά ακόμα και με βάση την ίδια την cache στην οποία αντιγράφεται το περιεχόμενο. Μπορεί δηλαδή να γίνει διάκριση της ποιότητας ανάμεσα στις caches, ανάλογα με την γεωγραφική τους τοποθεσία και την απόσταση από τους χρήστες (η οποία επηρεάζει τον χρόνο απόκρισης άρα και την ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει ο χρήστης), τις επεξεργαστικές τους δυνατότητες, τον συνολικό αποθηκευτικό τους χώρο κ.α.. Εκτός από την διαφοροποίηση του περιεχομένου σε κλάσεις προχωράμε δηλαδή και στην διαφοροποίηση των caches ενός ιεραρχικού-συνεργατικού συστήματος ή ενός ΔΔΠ σε διαφορετικές κλάσεις π.χ. παροχή gold cache για αποθήκευση περιεχομένου υψηλής δημοτικότητας (χρησιμότητας) και προτεραιότητας, ενώ για την εξυπηρέτηση αντικειμένων χαμηλότερης κλάσης παρέχονται silver και bronze caches.

Με την ύπαρξη πολλών caches, διαφορετικής ποιότητας η καθεμιά, είναι δυνατόν να έχουμε διαφορετική χρέωση των χρηστών της υπηρεσίας, π.χ. των προμηθευτών περιεχομένου. Για παράδειγμα, ένας προμηθευτής περιεχομένου με έδρα την Αγγλία μπορεί να προτιμήσει για αντιγραφή του περιεχομένου του μια cache στην Βουλγαρία αντί της Ελλάδας για εξυπηρέτηση των πελατών του στην Βαλκανική, εάν η πρώτη είναι φθηνότερη και οι χαμηλότερες προδιαγραφές ποιότητας της εξακολουθούν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του. Μπορεί επίσης να κάνει συνδυασμό των caches ανάλογα με την χρησιμότητα των ατομικών αντικειμένων περιεχομένου και της δημοτικότητας τους στους τελικούς χρήστες.

Ένα δεύτερο ανοικτό ζήτημα αφορά στην σχεδίαση μηχανισμών για την κατανομή του επεξεργαστικού φόρτου μεταξύ συνεργαζόμενων caches στην περίπτωση που διαχειρίζονται από ξεχωριστές οικονομικές οντότητες [49]. Γενικά οι caches έχουν περιορισμένους πόρους (εύρους ζώνης και αποθηκευτικού χώρου) και υφίστανται κάποιο

κόστος για την αποθήκευση ενός αντικειμένου ή την εξυπηρέτηση μιας αίτησης τελικού χρήστη. Εάν οι caches δεν αποζημιώνονται για αυτό το κόστος, έχουν ένα κίνητρο να μην αποθηκεύουν αντικείμενα (δηλώνοντας υψηλό κόστος) και να «εκμεταλλεύονται» τις συνεργαζόμενες caches για να προωθούν τις αιτήσεις περιεχομένου που δέχονται οι ίδιες, αποφεύγοντας έτσι να αναλάβουν το βάρος των λειτουργικών δαπανών. Από την άλλη πλευρά, εάν οι caches δέχονται πληρωμές για την εξυπηρέτηση αιτήσεων, θα μπορούσαν να εισέλθουν σε έναν άτυπο «ανταγωνισμό» μεταξύ τους για να εξυπηρετούν τα αντικείμενα με την υψηλότερη αξία. Σε αυτήν την περίπτωση, θα κατέληγαν στην αναπαραγωγή του ίδιου περιεχομένου σε όλες τις caches, ενώ αρκετά σημαντικά αντικείμενα χαμηλότερης αξίας θα παρέμεναν «εκτός υπηρεσίας» (δεν θα αποθηκεύονταν καθόλου), οδηγώντας έτσι σε απόδοση χαμηλότερη από την βέλτιστη. Απαιτείται επομένως από το σύστημα να παρέχει στις caches κίνητρα σχεδιασμένα έτσι ώστε να τις αναγκάζει να δηλώνουν το αληθινό λειτουργικό τους κόστος.

8.3 Επίλογος

Ανακεφαλαιώνοντας, στην παρούσα εργασία εξετάστηκε γενικά το ζήτημα της διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο, και ειδικότερα η υπηρεσία της αντιγραφής και αποθήκευσης δημοφιλούς περιεχομένου (caching) κοντά στον τελικό χρήστη. Η υπηρεσία αυτή μπορεί είτε να παρέχεται αφίλοκερδώς από ανεξάρτητες caches που τις λειτουργούν ιδιωτικοί οργανισμοί ή εταιρείες πρόσβασης στο δίκτυο, είτε κατόπιν χρέωσης από Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου.

Ιδιαίτερη βαρύτητα, μετά την ανάλυση των τεχνικών και επιχειρηματικών λεπτομερειών, δόθηκε στο πρόβλημα της αποδοτικής κατανομής του αποθηκευτικού χώρου των caches, με παράλληλη ανάπτυξη ενός οικονομικού μοντέλου της αγοράς της δικτυακής υπηρεσίας caching. Προκειμένου να προκύψει μεγιστοποίηση της συνολικής χρησιμότητας από την χρήση της υπηρεσίας και της κοινωνικής ευημερίας, που είναι το ζητούμενο, πρέπει όπως δείχθηκε να αποθηκεύεται στις caches το πλέον «δημοφιλές» περιεχόμενο, αυτό με την μεγαλύτερη αποτίμηση δηλαδή από τους χρήστες. Γεννήθηκαν επομένως ερωτήματα σχετικά με τους μηχανισμούς κινήτρων που πρέπει να υλοποιηθούν προκειμένου οι χρήστες να προμηθεύουν το σύστημα με τις ειλικρινείς αποτιμήσεις τους για την αξία της υπηρεσίας. Σε αντίθετη περίπτωση, καθώς επιδιώκουν το προσωπικό τους συμφέρον, τείνουν να προβαίνουν σε ψευδείς δηλώσεις οι οποίες μεγιστοποιούν το προσωπικό τους όφελος εις βάρος του κοινωνικού.

Παρουσιάσθηκαν κατόπιν μηχανισμοί οι οποίοι προσπαθούν να δώσουν λύση στο πρόβλημα της παροχής κινήτρων. Ο πρώτος μηχανισμός αφορά στην υλοποίηση μιας μεροληπτικής πολιτικής αντικατάστασης του περιεχομένου μιας cache. Στηρίζεται στην αποτίμηση της χρησιμότητας των προμηθευτών περιεχομένου σχετικά με το caching ενός αντικειμένου. Με την πολιτική αυτή παραμένουν στην cache τα πιο δημοφιλή και συχνότερα αιτούμενα αντικείμενα που έχουν την υψηλότερη κιάλας χρησιμότητα. Αδυναμία της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι στηρίζεται στην καλή θέληση των χρηστών για αποκάλυψη της αληθινής αποτίμησής τους.

Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται στην υλοποίηση μιας δημοπρασίας για την αγορά αποθηκευτικού χώρου μιας cache από προμηθευτές περιεχομένου. Η δημοπρασία είναι ομοιόμορφης τιμής τύπου VCG (δεύτερης τιμής) παρέχοντας έτσι το κίνητρο στους χρήστες να κάνουν προσφορές στηριζόμενοι στις ειλικρινείς αποτιμήσεις τους. Τέλος, ο τρίτος μηχανισμός εφαρμόζει στο χώρο του caching το μοντέλο των διαφοροποιημένων υπηρεσιών. Σε αυτόν, με ανισομερή κατανομή του χώρου μεταξύ των κλάσεων περιεχομένου επιτυγχάνεται η παροχή της υπηρεσίας με πολλαπλά επίπεδα ποιότητας σε όρους βαθμού επιτυχιών (hit-rate) που απολαμβάνει η κάθε κλάση. Επισημάνθηκε επίσης η ανάγκη για την ύπαρξη ενός μηχανισμού ανάδρασης που να προσαρμόζει τακτικά την κατανομή του χώρου, προκειμένου να διατηρείται η διαφοροποίηση της ποιότητας σε περιπτώσεις μονομερούς συμφόρησης κάποιων κλάσεων. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος τιμών από τον πάροχο της υπηρεσίας, δείχθηκε ότι δίνεται το κίνητρο στους χρήστες να αποκαλύπτουν εμμέσως την αποτίμησή τους επιλέγοντας την κλάση υπηρεσίας που τους μεγιστοποιεί την χρησιμότητα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α. ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΑΚΡΟΥ (EDGE SERVICES)

A.1 Εισαγωγή

Η εμφάνιση των δικτύων διανομής περιεχομένου δεν επιταχύνει μόνο την απόδοση της διαδικασίας παράδοσης περιεχομένου στο Διαδίκτυο και σε εταιρικά δίκτυα, αλλά επιτρέπει επίσης την παράδοση νέων εξειδικευμένων υπηρεσιών άκρου που παράγουν έσοδα για τους παροχείς τους [11], [36]. Τέτοιες υπηρεσίες μπορούν να ποικίλλουν από την ελαφριά τροποποίηση του περιεχομένου πριν την παράδοση ώστε να ταιριάζει με τις ανάγκες του προφίλ ενός ανεξάρτητου πελάτη, μέχρι την εισαγωγή τοπικών διαφημίσεων μέσα στο περιεχόμενο.

A.2 Ορισμός άκρου δικτύου

Το *άκρο του δικτύου* – περικλείοντας πρωτεύοντες και δευτερεύοντες (caches) αποθηκευτικούς χώρους – είναι ένα σημείο το οποίο βρίσκεται κάπου στο μονοπάτι που συνδέει τον εξυπηρετητή όπου αιτείται το περιεχόμενο και τον χρήστη που αιτεί πρόσβαση σε αυτό. Τα άκρα μπορούν επομένως να υπάρχουν είτε σε δημόσια δικτυακή υποδομή ή σε εταιρικά ΔΔΠ. Μερικά πιθανά μέρη στα όποια μπορεί να εντοπισθούν τα άκρα που αποθηκεύουν, αντιγράφουν περιεχόμενο, ανακατευθύνουν αιτήσεις, και τροποποιούν περιεχόμενο και υπηρεσίες είναι τα ακόλουθα:

1. Το σημείο παρουσίας (PoP) στο δίκτυο πρόσβασης ενός φορέα παροχής υπηρεσιών.
2. Ένας ασύρματος σταθμός βάσης.
3. Ένας διαχειρίσιμος κόμβος ΔΔΠ πίσω από ένα εταιρικό firewall.
4. Ένα εταιρικό κέντρο δεδομένων.
5. Ένας εταιρικός πληρεξούσιος εξυπηρετητής.

A.3 Σχέση ΔΔΠ και Υπηρεσιών άκρου

Οι υπηρεσίες άκρου εκμεταλλεύονται τα συστατικά της υποδομής των ΔΔΠ και επικαλύπτονται σε κάποιο βαθμό με τις υπηρεσίες των ΔΔΠ. Για παράδειγμα, το μοντέλο παράδοσης περιεχομένου Ιστού προωθεί περιεχόμενο από έναν πηγαίο

εξυπηρετητή προς πολλούς καταναμημένους εξυπηρετητές οι οποίοι βρίσκονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον τελικό χρήστη. Άρα η παράδοση περιεχομένου είναι μια υπηρεσία άκρου. Επιπροσθέτως οι υπηρεσίες άκρου μπορούν να εκμεταλλευθούν τις ίδιες τεχνολογίες με τις υπηρεσίες των ΔΔΠ για την παροχή γεωγραφικά προσαρμοσμένων υπηρεσιών, όπως αποστολή διαφημίσεων, οι οποίες είναι προσπελάσιμες ένα δικτυακό βήμα μακριά από τον χρήστη, και δεν προέρχονται απαραίτητα από κάποιον απομακρυσμένο πηγαίο εξυπηρετητή.

A.4 Παραδείγματα Υπηρεσιών άκρου

Αυτές οι υπηρεσίες άκρου μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν προσφορά αποθηκευτικού χώρου, προστασία από ιομορφικό λογισμικό, και υπηρεσίες ασφάλειας. Οι υπηρεσίες άκρου μπορούν να επεκταθούν για ασύρματα δίκτυα για την παροχή υπηρεσιών βασισμένων στην τοποθεσία του χρήστη (location-based services).

Οι πρώτιστες υπηρεσίες και λειτουργίες που παραδίδονται από το άκρο περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Ανακατεύθυνση χρήστη και εγκαθίδρυση σύνδεσης
- Διαδικασίες αυθεντικοποίησης και εξουσιοδότησης σε απομακρυσμένα συστήματα.
- Διαχείριση εύρους ζώνης, ταξινόμηση κίνησης, και παραχώρηση προτεραιοτήτων στα πακέτα των χρηστών.
- Caching
- Εξισορρόπηση φόρτου
- Μεταγλώττιση περιεχομένου
- Ανασηματισμός περιεχομένου για παρουσίαση σε διαφορετικές συσκευές και συνδέσεις διαφορετικών ταχυτήτων.
- Εντοπισμός και αντιμετώπιση ιομορφικού λογισμικού πριν το προσβληθέν περιεχόμενο παραδοθεί στον τελικό χρήστη.
- Γεωγραφικά προσαρμοσμένες υπηρεσίες όπως εισαγωγή διαφημίσεων στο περιεχόμενο

A.5 Επωφελούμενοι από τις υπηρεσίες άκρου

Από τις υπηρεσίες άκρου προκύπτουν ωφελημένες διάφορες ομάδες συμφερόντων, είτε βρίσκονται από την πλευρά των προμηθευτών ή των καταναλωτών:

- ***Προμηθευτές περιεχομένου:*** Οι υπηρεσίες άκρου επιτρέπουν στους προμηθευτές περιεχομένου να κατευθύνουν γεωγραφικά προσαρμοσμένο ή ακόμα και εξατομικευμένο περιεχόμενο προς τους χρήστες. Με την δυνατότητα άμεσης στόχευσης με προσαρμοσμένο περιεχόμενο άρα και πιο ελκυστικό στους τελικούς χρήστες δημιουργούνται οι βάσεις και για αυξημένες προσόδους.
- ***Φορείς παροχής πρόσβασης στο Διαδίκτυο:*** Οι παροχείς δικτυακών υπηρεσιών επίσης αποκτούν μια ευκαιρία για προσθήκη νέων ροών εσόδων πωλώντας δυνατότητες παροχής γεωγραφικά προσαρμοσμένου περιεχομένου προς τους προμηθευτές περιεχομένου ή στους συνδρομητές που έχουν στην βάση τους. Οι παροχείς πρόσβασης έχουν την δυνατότητα να συνεργαστούν με προμηθευτές αποθηκευτικού χώρου, ιομορφικής προστασίας για την υλοποίηση προσαρμοσμένων υπηρεσιών, ή μπορούν να αναπτύξουν τις δικές τους υπηρεσίες άκρου. Αυτό συμβαίνει επειδή κατέχουν στις βάσεις δεδομένων τους τις πολύτιμες πληροφορίες για το προφίλ των συνδρομητών τους. Επιπλέον έχουν την δυνατότητα να πωλήσουν διαφημιστικό χώρο σε εμπόρους που θέλουν να στοχεύουν σε τοπικούς χρήστες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το περιεχόμενο μετατρέπεται στο άκρο για την προσθήκη των κατάλληλων διαφημιστικών μηνυμάτων.
- ***Καταναλωτές:*** Οι συνδρομητές του δημόσιου Διαδικτύου μπορούν να αρχίσουν να απολαμβάνουν υπηρεσίες που πριν ήταν προσφερόμενες μόνο σε εταιρικούς πελάτες. Για παράδειγμα, μπορούν να λάβουν υπηρεσίες δικτυακού backup, αποθήκευσης και ιομορφικής προστασίας από τους τοπικούς φορείς παροχής πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Επίσης μέσω γεωγραφικά προσαρμοσμένου διαφημιστικού και άλλου περιεχομένου, μπορούν να αποκτήσουν άμεση πρόσβαση σε πληροφορία που αναφέρεται στην καθημερινή τους ζωή, όπως διαφημίσεις τοπικών εταιρειών, προγράμματα τοπικών θεάτρων, τοπικές εκδηλώσεις και άλλο περιεχόμενο διαρρυθμισμένο κατάλληλα προς κάθε άτομο.

A.6 Εξελιγμένες υπηρεσίες *caching* δυναμικού περιεχομένου

Απαραίτητη τεχνολογική προϋπόθεση για την παροχή υπηρεσιών άκρου είναι η ανάπτυξη της κατάλληλης τεχνολογίας στους κόμβους επεξεργασίας στο άκρο του δικτύου, έτσι ώστε να αποκτήσουν την απαραίτητη ευφυΐα για την παραγωγή σελίδων δυναμικού περιεχομένου.

A.6.1 Προκλήσεις Δημιουργίας Δυναμικού Περιεχομένου

Οι προμηθευτές περιεχομένου στο Διαδίκτυο αντιμετωπίζουν δύο κύρια ζητήματα που χρήζουν επίλυση [12]:

1. Την βελτίωση της εμπειρίας της επίσκεψης ενός χρήστη στο δικτυακό τρόπο και της αποτελεσματικότητάς του. (*Site Experience & Effectiveness*). Προς αυτό τον τομέα υιοθετείται η προσφορά δυναμικού περιεχομένου, εξατομικευμένων υπηρεσιών, γίνεται προσπάθεια για αύξηση των ταχυτήτων download κτλ
2. Τη δομή του κόστους του δικτυακού τόπου, που περιλαμβάνει επενδύσεις για την υποστήριξη κλιμάκωσης του τόπου, αξιοπιστίας, απόδοσης, κτλ.

Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές των δικτυακών τόπων προϋποθέτουν την χρήση της ίδιας υποδομής για της δημιουργία και την παράδοση του περιεχομένου στους χρήστες. Όσον αφορά τις στατικές σελίδες και στατικό περιεχόμενο αυτή η αρχιτεκτονική αποδίδει ικανοποιητικά. Η δημιουργία όμως δυναμικού περιεχομένου επιβαρύνει σημαντικά την υποδομή ενός δικτυακού τόπου. Η παραγωγή δυναμικού περιεχομένου τυπικά επιφέρει:

1. Δικτυακή επιβάρυνση, καθώς οι αιτήσεις των χρηστών αποστέλλονται σε κατάλληλες ενότητες λογισμικού για την εξυπηρέτηση αυτών των αιτήσεων.
2. Επεξεργαστική επιβάρυνση, καθώς αυτές οι ενότητες προσδιορίζουν τα δεδομένα που πρέπει να ανακληθούν και παρουσιασθούν.
3. Πολλαπλές αναγνώσεις και εγγραφές στους σκληρούς δίσκους, καθώς οι ενότητες λογισμικού κάνουν επερωτήσεις στην βάση δεδομένων.

Τα δεδομένα που συναρμολογήθηκαν πρέπει κατόπιν να παραδοθούν και να παρουσιασθούν στο πρόγραμμα επισκόπησης του χρήστη. Χρειάζεται επομένως ένας τρόπος για τον διαχωρισμό της διαδικασίας παράδοσης περιεχομένου από την δημιουργία του. Η Edge Side Includes (ESI) [14] είναι μια απλή γλώσσα σήμανσης για

την αναγνώριση *τεμαχίων περιεχομένου* (content fragments), κατατεμημένων δηλαδή στοιχείων των ιστοσελίδων, τα οποία μπορούν να συναρμολογηθούν δυναμικά στο άκρο του δικτύου, από εξυπηρετητές που έχουν την τεχνολογική ευφυΐα για να κατανοήσουν την γλώσσα.

A.6.2 Edge Side Includes (ESI)

Το Edge Side Includes (ESI) [12], [14] αποτελεί μια λύση για τα προβλήματα απόδοσης που περικλείει η αποθήκευση (caching) περιεχομένου επιταχύνοντας την εκτέλεση δυναμικών εφαρμογών στον Ιστό ορίζοντας μια απλή γλώσσα σήμανσης (mark-up language) για την περιγραφή των αποθηκεύσιμων (cacheable) και μη-αποθηκεύσιμων (non-cacheable) συστατικών μιας ιστοσελίδας, τα οποία μπορούν να συγκεντρωθούν, συναρμολογηθούν και παραδοθούν από το άκρο του δικτύου. Το ESI καθορίζει επίσης ένα πρωτόκολλο ακύρωσης περιεχομένου για την διάφανη διαχείριση του περιεχόμενου επιτρέποντας στους πηγαίους εξυπηρετητές και τα συστήματα διαχείρισης περιεχομένου να υποδεικνύουν στους εξυπηρετητές του άκρου ότι πρέπει να ενημερωθεί το αποθηκευμένο περιεχόμενο.

Ο καθορισμός του ESI δημοσιεύθηκε σαν σημείωση (Note) του World Wide Web Consortium (W3C) τον Αύγουστο του 2001 [14]. Περιλαμβάνει στην ουσία τέσσερις (4) περιοχές προσδιορισμών:

1. Τον καθορισμό της γλώσσας ESI 1.0, βασισμένης στην XML.
2. Το ESI πρωτόκολλο ακύρωσης, το οποίο παρέχει μεθόδους για την ακύρωση λήξη των δεδομένων στο άκρο από τον πηγαίο εξυπηρετητή.
3. Τον καθορισμό της αρχιτεκτονικής που καθορίζει την χρήση ενδιάμεσων HTTP για τον έλεγχο του περιεχομένου.
4. Την JESI (Java ESI) Βιβλιοθήκη Ετικετών, για την διευκόλυνση χρήσης των ετικετών ESI μέσα σε μια εφαρμογή γραμμένη σε JSP (Java Server Page).

Σύμφωνα με το έγγραφο καθορισμού της γλώσσας ESI 1.0 [3], η ESI είναι μια γλώσσα σήμανσης βασισμένη στην XML η οποία παρέχει τα μέσα για την συναρμολόγηση πόρων σε πελάτες του πρωτοκόλλου HTTP. Είναι σχεδιασμένη για την εκμετάλλευση εργαλείων πελατών, όπως είναι οι caches, με σκοπό την βελτίωση της αντιλαμβανόμενης από τον τελικό χρήστη απόδοσης, την μείωση της επεξεργαστικής επιβάρυνσης στον πηγαίο εξυπηρετητή και την αύξηση της διαθεσιμότητας των πόρων.

Η γλώσσα ESI επιτρέπει την δυναμική συναρμολόγηση περιεχομένου στο άκρο του δικτύου, είτε αυτό βρίσκεται μέσα σε ένα Δίκτυο Διανομής Περιεχομένου, στο πρόγραμμα πλοήγησης του τελικού χρήστη ή σε έναν πληρεξούσιο εξυπηρετητή ακριβώς δίπλα από τον πηγαίο εξυπηρετητή περιεχομένου.

Η ικανότητα συναρμολόγησης δυναμικών σελίδων από ανεξάρτητα τεμάχια σελίδας σημαίνει ότι μόνο μη-αποθηκεύσιμα ή ληγμένα τεμάχια χρειάζεται να ανακτηθούν από τον πηγαίο εξυπηρετητή περιεχομένου, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ανάγκη για ανάκτηση πλήρων σελίδων καθώς και τον φόρτο στην υποδομή δημιουργίας περιεχομένου των δικτυακών τόπων.

Με την χρήση του ESI προκύπτουν τα ακόλουθα οφέλη για τους προμηθευτές περιεχομένου:

- Γίνεται δυνατή η ανάπτυξη δυναμικών εφαρμογών στον Ιστό, οι οποίες συναρμολογούνται στο άκρο του κέντρου δεδομένων ή στο άκρο του Διαδικτύου για βελτιωμένη απόδοση.
- Η συγκέντρωση και συναρμολόγηση του περιεχομένου στους εξυπηρετητές του άκρου μειώνει δραματικά το κόστος της απαιτούμενης υποδομής για την παράδοση γρήγορων, αξιόπιστων και ανεκτικών σε σφάλματα εφαρμογών.

A.6.3 Χαρακτηριστικά Λειτουργίας ESI

Το ESI επιτρέπει στις ιστοσελίδες να διασπασθούν σε τεμάχια διαφορετικού προφίλ αποθηκευσιμότητας (cacheability) το καθένα. Αυτά τα τεμάχια διατηρούνται ως ξεχωριστά στοιχεία στην τοπική cache του εξυπηρετητή της εφαρμογής ή / και στο δίκτυο διανομής περιεχομένου. Τα ESI τεμάχια σελίδων συναρμολογούνται σε HTML σελίδες όταν αιτούνται από τελικούς χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι περισσότερο δυναμικό περιεχόμενο μπορεί να αποθηκευθεί, μετά συναρμολογηθεί και παραδοθεί από το άκρο του δικτύου όταν αιτηθεί. Επιπλέον η συναρμολόγηση των σελίδων μπορεί να γίνει υπό συνθήκες, βάσει της πληροφορίας που παρέχεται από τις επικεφαλίδες των HTTP αιτήσεων ή από cookies των χρηστών, διευκολύνοντας έτσι την προσφορά εξατομικευμένου περιεχομένου.

Η βασική δομή που χρησιμοποιείται από έναν προμηθευτή περιεχομένου για την δημιουργία δυναμικού περιεχομένου στο ESI είναι μια σελίδα πρότυπο(template) που περιέχει τεμάχια HTML κώδικα. Το πρότυπο αποτελείται από κοινά στοιχεία όπως το

λογότυπο, η μπάρα πλοήγησης. Τα τεμάχια HTML κώδικα αναπαριστούν τις δυναμικές ενότητες της σελίδας. Το πρότυπο είναι το αρχείο που συσχετίζεται με το URL που αιτεί ο χρήστης. Είναι υποσημειωμένο με χρήση της ESI η όποια δίνει οδηγίες στον cache εξυπηρετητή ή το δίκτυο διανομής για την ανάκτηση και συμπερίληψη των τεμαχίων HTML. Τα τεμάχια είναι και αυτά με την σειρά τους αρχεία υποσημειωμένα με κώδικα HTML και ESI τα οποία περιέχουν κείμενο ή και άλλα αντικείμενα. Κάθε τεμάχιο τυγχάνει μεταχείρισης σαν ξεχωριστό αντικείμενο έχοντας το δικό του προφίλ αποθήκευσης και πρόσβασης.

Για παράδειγμα, ένα πρότυπο μπορεί να αποθηκευθεί για αρκετές μέρες ενώ κάποια τεμάχια του όπως διαφημίσεις ή τιμές χρηματιστηρίου μόνο για ορισμένα λεπτά ή δευτερόλεπτα ή ακόμα και να δηλωθούν ως μη-αποθηκεύσιμα τελείως, όπως το υπόλοιπο λογαριασμού ενός καταθέτη, οπότε κάθε φορά που αιτούνται δημιουργούνται δυναμικά και ανακτώνται από τον πηγαίο εξυπηρετητή.

Φυσικά τα αποθηκευμένα πρότυπα και τεμάχια μπορούν να τύχουν κοινής πρόσβασης από πολλαπλούς χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι για ένα μεγάλο ποσοστό αιτήσεων ολόκληρη η σελίδα μπορεί να συναρμολογηθεί με την χρήση κοινών συστατικών και να παραδοθεί από το άκρο του δικτύου. Το ESI επίσης αποφεύγει την ανάγκη ανανέωσης ολόκληρης της σελίδας όταν ενημερωθεί κάποιο ανεξάρτητο τεμάχιο της. Ανακτάται από τον πηγαίο εξυπηρετητή μόνο το αλλαγμένο στοιχείο και η υπόλοιπη σελίδα παραδίδεται από τα αντίγραφα που υπάρχουν στα τοπικά caches.

Το ESI παρέχει μια σειρά μεθόδων για τον χειρισμό της συνέπειας (consistency) των αποθηκευμένων αντικειμένων, όπως επίσης και τον ορισμό πολιτικών λήξης και ανανέωσης του περιεχομένου. Ως προς αυτόν τον τομέα, το ESI περιλαμβάνει τον καθορισμό ενός πρωτοκόλλου ακύρωσης περιεχομένου. Το πρωτόκολλο ακύρωσης χρησιμοποιείται από βάσεις δεδομένων, συστήματα διαχείρισης περιεχομένου κτλ. για την αποστολή HTTP μηνυμάτων ακύρωσης-λήξης προς τα τοπικά caches ή / και το δίκτυο διανομής. Το μήνυμα ακύρωσης ενημερώνει τον παραλήπτη του για την ενημέρωση των μεταδεδομένων που σχετίζονται με συγκεκριμένα αντικείμενα που βρίσκονται στους εξυπηρετητές άκρου.

A.6.4 Κύρια οφέλη ESI

Το ESI εξελίσσεται σε ένα ανοικτό πρότυπο, το οποίο θα επιτρέψει στους προμηθευτές περιεχομένου να εκμεταλλευθούν τα εργαλεία διαχείρισης περιεχομένου,

τους εξυπηρετητές εφαρμογής, τα δίκτυα διανομής περιεχομένου τα οποία αναμένεται υιοθετήσουν το ESI σαν μια κοινή γλώσσα για την δημιουργία και ταχεία και οικονομική παράδοση εφαρμογών στο Διαδίκτυο.

Το ESI επεκτείνει τα οφέλη απόδοσης και εξοικονόμησης πόρων από την χρήση υπηρεσιών διανομής περιεχομένου και caching για την υποστήριξη δυναμικών εφαρμογών [13]:

- Επιταχύνει την παράδοση περιεχομένου
- Μειώνει την απαιτούμενη υποδομή για δημιουργία και παράδοση περιεχομένου εξοικονομώντας πόρους για τους προμηθευτές περιεχομένου.
- Επιτρέπει στους προμηθευτές περιεχομένου να αναπτύσσουν μια φορά τις εφαρμογές τους και να επιλέξουν στον χρόνο υλοποίησης που πρέπει να συναρμολογηθεί η εφαρμογή – στον εξυπηρετητή εφαρμογών, την υποδομή περιεχομένου, το σύστημα διαχείρισης περιεχομένου ή το δίκτυο διανομής περιεχομένου μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα, τον χρόνο ανάπτυξης και τα κόστη ανάπτυξης.
- Επιτρέπει στους προμηθευτές περιεχομένου να αναπτύσσουν εφαρμογές συμβατές με το ESI ομοιόμορφα στους εξυπηρετητές τους και στα δίκτυα διανομής περιεχομένου, χωρίς να ξαναγράφουν τις εφαρμογές τους.

B. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΧΡΗΣΤΩΝ

B.1 Εισαγωγή

Τα κύρια προβλήματα που προκύπτουν από την προσέγγιση της διανομής του περιεχομένου μέσω ενός τρίτου φορέα, του διανομέα περιεχομένου, που λειτουργεί ένα ΔΔΠ, είναι δύο. Πρώτον, πού και πώς θα αναπαραχθεί το περιεχόμενο, και δεύτερον πώς θα εξασφαλισθεί ότι οι πελάτες-τελικοί χρήστες θα μπορέσουν να εντοπίσουν το αντιγραμμένο περιεχόμενο, χωρίς να απαιτείται η άμεση χειρωνακτική επέμβασή τους. Απάντηση στο πρώτο ερώτημα δίνουν οι *μηχανισμοί αναπαραγωγής αντικειμένων*, οι οποίοι παρουσιάστηκαν στο 6^ο κεφάλαιο. Το δεύτερο πρόβλημα αντιμετωπίζεται μέσω των *μηχανισμών ανακατεύθυνσης χρηστών* (client redirection mechanisms).

B.2 Απαιτήσεις μηχανισμών ανακατεύθυνσης χρηστών

Ένας αποδοτικός μηχανισμός ανακατεύθυνσης χρηστών πρέπει να επιτυγχάνει δύο στόχους [16]. Πρώτον, πρέπει να εξισορροπεί τον φόρτο όσο πιο ομοιόμορφα γίνεται μεταξύ των διαθέσιμων εξυπηρετητών. Δεύτερον, πρέπει να είναι εύκολος για ανάπτυξη στην πράξη. Αυτή η δεύτερη απαίτηση τείνει να αποδειχθεί η πιο αυστηρή από τις δύο, επειδή τυπικά προδιαθέτει ότι δεν μπορεί να γίνει καμία μεταβολή στο λογισμικό των πελατών. Το αιτιολογικό είναι ότι υπάρχει ήδη μια ευρεία βάση εγκατεστημένου λογισμικού και επομένως δεν είναι δυνατόν να εξαναγκασθεί ο κάθε τελικός χρήστης να εγκαταστήσει μια νέα έκδοση λογισμικού επισκόπησης προκειμένου να εκμεταλλευθεί τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού ανακατεύθυνσης. Αυτό υπονοεί ότι ο μηχανισμός ανακατεύθυνσης πρέπει να εισαχθεί με έναν διαφανή τρόπο κάπου μέσα στην υπάρχουσα αλυσίδα αίτησης-απόκρισης στο Διαδίκτυο. Το πλεονέκτημα τέτοιων μηχανισμών, όπως η ανακατεύθυνση βάσει του DNS (Domain Name System) που εφαρμόζεται από τα σύγχρονα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (ΔΔΠ) (Content Distribution Networks), είναι ότι τίθενται αμέσως στην διάθεση των όλων των πελατών. Το μειονέκτημα από την άλλη πλευρά αυτών των μεθόδων είναι δεν παρέχουν απαραίτητα πλήρη διαφάνεια προς τον χρήστη, ο οποίος ενδέχεται να υποστεί ακόμα και μια μείωση της απόδοσης.

B.3 Βασικές Μέθοδοι Επικοινωνίας Πελάτη-Ρέπλικας

Παρακάτω αναφέρονται σύντομα τα κυριότερα πρωτόκολλα και συστήματα επικοινωνίας μεταξύ πελάτη και ρέπλικας πηγαίων εξυπηρετητών Ιστού που έχουν εμφανισθεί στο Διαδίκτυο με χρονική κατάταξη από το παλαιότερο στο πιο πρόσφατο [4]. Η ιδανική κατάσταση είναι η ανακάλυψη μιας βέλτιστης ρέπλικας του πηγαίου εξυπηρετητή για επικοινωνία του πελάτη μαζί της. Η βελτιστότητα είναι μια απόφαση πολιτικής που βασίζεται στον παράγοντα της εγγύτητας της ρέπλικας προς τον πελάτη, αλλά μπορεί και να χρησιμοποιεί άλλα κριτήρια όπως το φόρτο εργασίας.

- *Σύνδεσμοι Πλοήγησης (Navigation Hyperlinks)*

Ο απλούστερος μηχανισμός επικοινωνίας πελάτη με ρέπλικα. Γίνεται χρήση συνδέσμων URI (Uniform Resource Identifier) ενσωματωμένων στις ιστοσελίδες που δείχνουν σε κάθε ρέπλικα του πηγαίου εξυπηρετητή. Ο τελικός χρήστης κατόπιν χειρωνακτικά επιλέγει τον σύνδεσμο της ρέπλικας που θεωρεί βέλτιστη για τον ίδιο και επιθυμεί να χρησιμοποιήσει. Πρόκειται για τον πιο αναπτυγμένο μηχανισμό επικοινωνίας πελάτη με ρέπλικα.

- *HTTP Ανακατεύθυνση Ρέπλικας*

Ένας απλός και κοινά χρησιμοποιημένος μηχανισμός σύνδεσης πελατών με ρέπλικες πηγαίων εξυπηρετητών είναι η χρήση της ανακατεύθυνσης HTTP. Οι πελάτες ανακατευθύνονται σε μια βέλτιστη ρέπλικα μέσω της χρήσης των κωδικών απόκρισης του πρωτοκόλλου HTTP, όπως 302 "Found", ή 307 "Temporary Redirect". Ο πελάτης συνάπτει επικοινωνία HTTP με μια από τις ρέπλικες του πηγαίου εξυπηρετητή. Κατόπιν η ρέπλικα με την οποία ήρθε αρχικά σε επαφή ο πελάτης μπορεί είτε να επιλέξει να αποδεχθεί την υπηρεσία ή να ανακατευθύνει ξανά τον πελάτη κάπου αλλού.

- *Ανακατεύθυνση DNS*

Το σύστημα Ονομάτων Περιοχής (DNS) παρέχει τον πλέον εξελιγμένο μηχανισμό επικοινωνίας μεταξύ πελάτη και ρέπλικας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των εξυπηρετητών του DNS οι οποίοι κατατάσσουν τις IP διευθύνσεις βασισμένοι σε πολιτικές ποιότητας υπηρεσίας. Όταν ένας πελάτης αναλύσει το όνομα ενός πηγαίου εξυπηρετητή, ο ενισχυμένος εξυπηρετητής DNS κατατάσσει τις διαθέσιμες

IP διευθύνσεις ξεκινώντας από την πλέον βέλτιστη ρέπλικα και καταλήγοντας στην λιγότερο βέλτιστη ρέπλικα.

Η ανακατεύθυνση βάσει του DNS (DNS Redirection) και η επαναγραφή του URL (URL Rewriting) είναι δύο από τις πλέον διαδεδομένες τεχνικές για την κατεύθυνση των αιτήσεων των χρηστών προς τον βέλτιστο εξυπηρετητή σε ένα κατακευθμισμένο δίκτυο εξυπηρετητών περιεχομένου.

B.4 Κριτήρια αντιστοίχισης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα ζήτημα πρωταρχικής σημασίας για ένα ΔΔΠ είναι η κατεύθυνση των αιτήσεων των χρηστών για κάποιο αντικείμενο που εξυπηρετείται από το ΔΔΠ προς ένα συγκεκριμένο εξυπηρετητή στο δίκτυο. Η κατεύθυνση αιτήσεων προς εξυπηρετητές περιεχομένου αναφέρεται ως αντιστοίχιση (mapping). Το σύστημα αυτό αντιστοίχισης αναλύει ένα όνομα υπολογιστή βασισμένο στην υπηρεσία που αιτήθηκε και την τοποθεσία του χρήστη, κάνοντας επίσης χρήση του DNS για εξισορρόπηση του φόρτου στους εξυπηρετητές.

Οι εξυπηρετητές ονομάτων επιλύουν ονόματα υπολογιστών σε αριθμητικές διευθύνσεις αντιστοιχίζοντας αιτήσεις σε έναν εξυπηρετητή κάνοντας χρήση μερικών ή όλων από τα παρακάτω κριτήρια [1]:

- *Τύπος υπηρεσίας που αιτήθηκε* (Service requested): Ο εξυπηρετητής πρέπει να είναι ικανός να ικανοποιήσει την απαίτηση. Ο εξυπηρετητής ονομάτων δεν πρέπει να κατευθύνει μια αίτηση για μια πολυμεσική ροή σε έναν εξυπηρετητή που χειρίζεται μόνο αιτήσεις HTTP.
- *Υγεία του εξυπηρετητή* (Server health): Ο εξυπηρετητής περιεχομένου πρέπει να λειτουργεί χωρίς σφάλματα.
- *Φορτίο εξυπηρετητή* (Server load): Ο εξυπηρετητής πρέπει να λειτουργεί κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο φόρτου ώστε να είναι διαθέσιμος για πρόσθετες αιτήσεις. Η μέτρηση του φόρτου τυπικά περιλαμβάνει το ποσοστό χρησιμοποίησης της ΚΜΕ, του δίσκου και του δικτύου του εξυπηρετητή.
- *Συνθήκες Δικτύου* (Network condition): Ο πελάτης πρέπει να προσεγγίσει τον εξυπηρετητή με ελάχιστες απώλειες πακέτων, και το κέντρο δεδομένων που φιλοξενεί τον εξυπηρετητή πρέπει να διαθέτει επαρκές εύρος ζώνης για να χειριστεί πρόσθετες αιτήσεις.

- *Τοποθεσία χρήστη* (Client location): Ο εξυπηρετητής πρέπει να βρίσκεται κοντά στον πελάτη σε όρους μέτρησης όπως ο χρόνος *round trip* του δικτύου.
- *Περιεχόμενο που αιτήθηκε* (Content requested): Ο εξυπηρετητής πρέπει να περιέχει το ζητούμενο περιεχόμενο, σύμφωνα με τους αλγόριθμους διατήρησης συγχρονισμού του φορέα του ΔΔΠ.

B.5 Ανακατεύθυνση βάσει Domain Name System (DNS)

Η κυριότερη δυσκολία στην δημιουργία ενός ΔΔΠ είναι η ανακατεύθυνση των χρηστών προς τους εξυπηρετητές περιεχομένου. Ιδανικά, θα έπρεπε να είναι μια πλήρως διάφανη διαδικασία προς τους τελικούς χρήστες ώστε να μην χρειάζονται αλλαγές στο λογισμικό του πελάτη. Τα σύγχρονα ΔΔΠ επιτυγχάνουν αυτόν τον στόχο μεταβάλλοντας κατάλληλη πληροφορία στο Σύστημα Ονομάτων Περιοχής (Domain Name System - DNS) ([15],[16],[17],[18]).

Πιο συγκεκριμένα, στην τεχνική της ανακατεύθυνσης βάσει DNS, ο ισχύων (authoritative) εξυπηρετητής ονομάτων του DNS, που κάνει αντιστοίχιση των ονομαστικών σε αριθμητικές διευθύνσεις, βρίσκεται υπό τον έλεγχο του ΔΔΠ. Η τεχνική ονομάζεται κατά αυτόν τον τρόπο επειδή όταν ο ισχύων εξυπηρετητής DNS του πηγαίου εξυπηρετητή λάβει μια αίτηση DNS από κάποιον πελάτη (στην ουσία από τον τοπικό DNS εξυπηρετητή του πελάτη), την ανακατευθύνει αναλύοντας την ονομαστική διεύθυνση του πηγαίου εξυπηρετητή στην IP διεύθυνση ενός εξυπηρετητή περιεχομένου του ΔΔΠ. Αυτή η ανάλυση πραγματοποιείται βάσει παραγόντων όπως είναι η διαθεσιμότητα πόρων και η κατάσταση του δικτύου. Όταν ο ισχύων DNS εξυπηρετητής αποκριθεί με την IP διεύθυνση περιλαμβάνει επίσης και έναν αριθμό που αναπαριστά τον χρόνο ζωής (Time-To-Live TTL) σε δευτερόλεπτα αυτής της ανάλυσης. Γενικά, η απάντηση έχει ένα μικρό χρόνο ζωής έτσι ώστε το ΔΔΠ να μπορεί να αλλάζει την ανάλυση των ονομαστικών διευθύνσεων σε αριθμητικές γρήγορα για να διευκολύνει την εξισορρόπηση του φορτίου ανάμεσα στους εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά συστήματα ΔΔΠ που χρησιμοποιούν την τεχνική της ανακατεύθυνσης βάσει DNS: το σύστημα της *πλήρους αναπαραγωγής* του περιεχομένου ενός δικτυακού τόπου (full site replication scheme), και το σύστημα της *μερικής αναπαραγωγής* του περιεχομένου ενός δικτυακού τόπου (partial site replication scheme). Στην πρώτη περίπτωση ακολουθείται ο μηχανισμός της *πλήρους*

ανακατεύθυνσης (full redirection) των χρηστών, ενώ στην δεύτερη περίπτωση ο μηχανισμός της *επιλεκτικής ανακατεύθυνσης* (selective redirection) των χρηστών [16, [17].

B.5.1 Πλήρους Ανακατεύθυνση

Στο σύστημα της *πλήρους αναπαραγωγής περιεχομένου δικτυακού τόπου* αντιγράφεται το σύνολο του περιεχομένου του δικτυακού τόπου από τον πηγαίο εξυπηρετητή στους κόμβους του ΔΔΠ. Κατά συνέπεια, ο πηγαίος εξυπηρετητής είναι κατά μεγάλο βαθμό κρυμμένος προς τον έξω κόσμο εκτός από το ΔΔΠ. Με την μέθοδο της πλήρους ανακατεύθυνσης ο διανομέας περιεχομένου έχει πλήρη έλεγχο στην αντιστοίχιση του DNS του πηγαίου εξυπηρετητή. Ο δικτυακός τόπος πηγής μετατρέπεται το αρχείο ζώνης DNS που είναι υπό την δική του διαχείριση, ώστε να αντικατοπτρίζει τον ισχύοντα εξυπηρετητή DNS που παρέχεται από τον φορέα του ΔΔΠ. Όλες οι αιτήσεις των πελατών προς τον πηγαίο εξυπηρετητή ανακατευθύνονται μέσω του DNS προς κάποιον εξυπηρετητή περιεχομένου του ΔΔΠ. Κατόπιν ο εξυπηρετητής του ΔΔΠ είτε παραδίδει το περιεχόμενο από τη δική του cache ή εάν δεν το κατέχει ή έχει λήξει το αντίγραφο προωθεί την αίτηση προς τον πηγαίο εξυπηρετητή. Αυτή η μέθοδος απαιτεί είτε ότι όλοι οι εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ έχουν αντιγραμμένο όλο το περιεχόμενο από τον πηγαίο εξυπηρετητή, ή ότι δρουν σαν υποκατάστατοι πληρεξούσιοι (surrogate proxies) για τον πηγαίο εξυπηρετητή.

Για να διευκρινισθεί ο τρόπος λειτουργίας του μηχανισμού της πλήρους ανακατεύθυνσης, παρουσιάζεται στην συνέχεια ένα κατατοπιστικό παράδειγμα. Το ΔΔΠ λαμβάνει τον έλεγχο της ανάλυσης DNS του εξυπηρετητή του προμηθευτή περιεχομένου, έστω `www.example.com`. Όταν ένας πελάτης κάνει αίτηση για ένα αντικείμενο από αυτόν τον εξυπηρετητή, πρώτα πρέπει να κάνει μια αναζήτηση (lookup) στο DNS για το όνομα `www.example.com` για να λάβει την αριθμητική IP διεύθυνση του εξυπηρετητή. Η πληροφορία στο σύστημα DNS για το όνομα `www.example.com` δείχνει τώρα σε έναν εξυπηρετητή ονομάτων (name-server) στο δίκτυο του ΔΔΠ. Όταν αυτός ο εξυπηρετητής λάβει την αίτηση αναζήτησης DNS από τον πελάτη, προσδιορίζει ποιος εξυπηρετητής περιεχομένου είναι ο βέλτιστος για να χειριστεί την αίτηση περιεχομένου και επιστρέφει την IP διεύθυνση αυτού του εξυπηρετητή ως την IP διεύθυνση του `www.example.com`. Όταν ο πελάτης λάβει την απόκριση του DNS, προσπαθεί να συνδεθεί με τον εξυπηρετητή περιεχομένου. Επειδή

ο εξυπηρετητής περιεχομένου του ΔΔΠ είναι κατά κανόνα εγγύτερα στον πελάτη από ότι ο πηγαίος εξυπηρετητής, ο πελάτης θα λάβει το αιτηθέν αντικείμενο πολύ γρηγορότερα.

Το κύριο όφελος από αυτό τον μηχανισμό είναι ότι όλες οι αιτήσεις των πελατών πάντοτε αποστέλλονται πρώτα στους εξυπηρετητές περιεχομένου και όχι στους πηγαίους εξυπηρετητές. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της πλήρους ανακατεύθυνσης είναι ότι προσαρμόζεται δυναμικά στην δημιουργία νέων «θερμών σημείων» (hot-spots) επειδή όλες οι αιτήσεις των πελατών ανακατευθύνονται σε γεωγραφικά διασκορπισμένους εξυπηρετητές περιεχομένου.

Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι κάθε εξυπηρετητής περιεχομένου πρέπει να είναι ικανός να χειριστεί όλες τις αιτήσεις περιεχομένου που προορίζονται για τον πηγαίο εξυπηρετητή του προμηθευτή περιεχομένου. Αυτό σημαίνει ότι είτε πρέπει κάθε εξυπηρετητής περιεχομένου να αναπαράγει πλήρως τα περιεχόμενα όλων των προμηθευτών περιεχομένου με τους οποίους έχει συμβόλαιο το ΔΔΠ, είτε ότι ο εξυπηρετητής περιεχομένου λειτουργεί ως surrogate proxy, οπότε και έρχεται σε επικοινωνία με τον πηγαίο εξυπηρετητή ή με άλλους εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ για να ανακτήσει το αντικείμενο.

B.5.2 Επιλεκτική Ανακατεύθυνση

Στο σύστημα της μερικής αναπαραγωγής περιεχομένου δικτυακού τόπου αντιγράφεται μόνο ένα υποσύνολο των αντικειμένων (κυρίως στατικά και μεγάλα σε μέγεθος αντικείμενα όπως εικόνες, γραφικά κτλ.) από τον πηγαίο εξυπηρετητή του προμηθευτή περιεχομένου στους εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ. Με την αντίστοιχη μέθοδο της επιλεκτικής ανακατεύθυνσης, τροποποιούνται οι αναφορές στα αντιγραμμένα αντικείμενα έτσι ώστε να δείχνουν προς έναν εξυπηρετητή περιεχομένου του ΔΔΠ. Πιο συγκεκριμένα, ο πηγαίος εξυπηρετητής μετατρέπει τα ενσωματωμένα στις ιστοσελίδες URLs των εξυπηρετούμενων από το ΔΔΠ αντικειμένων έτσι ώστε οι ονομαστικές διευθύνσεις των φιλοξενούντων (hosts) εξυπηρετητών να αναλύονται από τον εξυπηρετητή DNS του φορέα ΔΔΠ. Όταν ο πελάτης επομένως θέλει να ανακτήσει ένα αντιγραμμένο αντικείμενο, επιλύει το όνομα του υπολογιστή, που τον ανακατευθύνει σε έναν εξυπηρετητή περιεχομένου του ΔΔΠ. Με αυτήν την μέθοδο τα αντιγραμμένα αντικείμενα φαίνονται να είναι απλώς αντικείμενα τα οποία εξυπηρετούνται από έναν άλλο εξυπηρετητή. Το όνομα του φιλοξενούντος

εξυπηρετητή στο τροποποιημένο URL μπορεί να βρίσκεται στην ίδια περιοχή ονομάτων με το πηγαίο εξυπηρετητή ή σε διαφορετική περιοχή. Στην πρώτη περίπτωση απαιτείται όπως και στην *πλήρη αναπαραγωγή* μετατροπή και του αρχείου ζώνης DNS.

Ακολούθως δίνεται ένα παράδειγμα λειτουργίας του μηχανισμού της επιλεκτικής ανακατεύθυνσης των χρηστών. Ο πελάτης ανακτά την αρχική σελίδα από τον πηγαίο εξυπηρετητή `www.example.com`. Αυτή η σελίδα μπορεί να περιέχει αναφορές σε εικόνες, γραφικά ή άλλα αντικείμενα που έχουν αντιγραφεί στους εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ. Τα URL αυτών των αντικειμένων έχουν τροποποιηθεί, π.χ. το URL `http://www.example.com/title.gif` θα μπορούσε να έχει μετατραπεί σε `http://www.cdn.net/example/title.gif`. Από την πλευρά του πελάτη, η εικόνα αυτή φαίνεται σαν οποιαδήποτε κανονική εικόνα, μόνο που τώρα πρέπει να ανοίξει μια νέα σύνδεση με έναν νέο εξυπηρετητή. Όταν ανοίξει την σύνδεση αυτή, πρέπει να τελέσει μια αναζήτηση DNS για να λάβει την διεύθυνση IP. Αυτή η αναζήτηση γίνεται αντικείμενο επεξεργασίας όπως και στον προηγούμενο μηχανισμό. Ως αποτέλεσμα, ο πελάτης ανακατευθύνεται προς έναν κοντινό εξυπηρετητή περιεχομένου και ζητάει την εικόνα.

Το όφελος από τον μηχανισμό της επιλεκτικής ανακατεύθυνσης είναι ότι μόνο αντικείμενα τα οποία χρειάζεται λόγω μεγέθους να αναπαραχθούν τοποθετούνται στους εξυπηρετητές περιεχομένου, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις χωρητικότητας. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής όμως είναι ότι κάποια οντότητα πρέπει να αποφασίσει ποια αντικείμενα πρέπει να αντιγραφούν. Σε σύγχρονα δίκτυα διανομής περιεχομένου που χρησιμοποιούν επιλεκτική ανακατεύθυνση, ο φόρτος επιλογής των αντικειμένων που θα αντιγραφούν τοποθετείται στον προμηθευτή περιεχομένου. Επιπλέον, ένα σύστημα που χρησιμοποιεί επιλεκτική ανακατεύθυνση είναι βραδύτερο σαν ολότητα στην προσαρμογή σε «θερμά σημεία», τα οποία μπορεί να εμφανισθούν όταν κάποιο περιεχόμενο στον πηγαίο εξυπηρετητή γίνει ξαφνικά τρομακτικά δημοφιλές. Αυτό συμβαίνει επειδή το σύστημα πρέπει πρώτα να αναγνωρίσει τα «θερμά σημεία», να τροποποιήσει τις αναφορές στα νέα θερμά (πολύ δημοφιλή) αντικείμενα, και πιθανώς να τα αντιγράψει σε εξυπηρετητές περιεχομένου. Επίσης το κόστος ανοίγματος μιας νέας σύνδεσης σε έναν νέο εξυπηρετητή περιεχομένου δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Ένα επιπρόσθετο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι πελάτες που έχουν αποθηκευμένες παλιές αναφορές στα νέα θερμά αντικείμενα (π.χ. αποθηκεύοντας στην

ατομική cache του προγράμματος επισκόπησης την ιστοσελίδα που αναφέρεται στο θερμό αντικείμενο, έστω μια εικόνα) δεν θα ανακατευθύνονται στους εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ, αλλά αντιθέτως θα προσπελάζουν απ' ευθείας τον πηγαίο εξυπηρετητή αναιρώντας έτσι τα οφέλη από την χρήση του δικτύου διανομής περιεχομένου.

Μια αδυναμία που είναι κοινή και στους δύο μηχανισμούς ανακατεύθυνσης είναι ότι οι αποφάσεις ανακατεύθυνσης βασίζονται στην IP διεύθυνση της μηχανής που έστειλε την αίτηση αναζήτησης DNS. Τυπικά αυτή η μηχανή είναι ο εξυπηρετητής ονομάτων για τον πελάτη ο οποίος μπορεί να είναι ή όχι τοπολογικά κοντά στον πελάτη.

B.6 Επαναγραφή του URL

Μια δεύτερη τεχνική ανακατεύθυνσης των χρηστών που χρησιμοποιείται από ΔΔΠ είναι η επαναγραφή του URL, δια του οποίου ένας πηγαίος εξυπηρετητής ξαναγράφει τους συνδέσμους URL ως μέρος της διαδικασίας της δυναμικής δημιουργίας σελίδων, ώστε να ανακατευθύνει τους πελάτες του σε διαφορετικούς εξυπηρετητές περιεχομένου. Ο διανομέας περιεχομένου που λειτουργεί το ΔΔΠ εντοπίζει αντικείμενα στους δικτυακούς τόπους των πελατών, από την αντιγραφή των οποίων αναμένεται να προκύψει κέρδος, και τα προωθεί προς τους εξυπηρετητές περιεχομένου του ΔΔΠ. Κατά τον χρόνο πρόσβασης σε μια σελίδα, η σελίδα ξαναγράφεται δυναμικά με την IP διεύθυνση ενός από τους εξυπηρετητές περιεχομένου, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για DNS αναζήτηση, έτσι ώστε ο πελάτη να ανακτήσει άμεσα τα αντιγραμμένα αντικείμενα.

Δεν αποκλείεται και η περίπτωση συνδυασμού των δύο τεχνικών που αναλύθηκαν, όπου κατά την επαναγραφή του URL εντοπίζεται κάποιος συγκεκριμένος εξυπηρετητής του ΔΔΠ και χρησιμοποιείται η ονομαστική του διεύθυνση, και η οποία μπορεί να αναλυθεί στην IP διεύθυνση κάποιου άλλου εξυπηρετητή του ΔΔΠ.

B.7 Σύγκριση μεθόδων ανακατεύθυνσης

Στα [15], [18] παρουσιάζεται μια μελέτη του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές μέθοδοι ανακατεύθυνσης των χρηστών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα δίκτυα διανομής περιεχομένου (ΔΔΠ) επηρεάζουν την αντιλαμβανόμενη από τον χρήστη απόδοση της επισκόπησης κανονικών ιστοσελίδων. Με την χρήση τόσο

προσομοιώσεων όσο και πειραμάτων με αληθινούς εξυπηρετητές Ιστού αποδεικνύεται ότι οι μέθοδοι ανακατεύθυνσης που απαιτούν από τους πελάτες να ανακτούν διαφορετικά μέρη μιας ιστοσελίδας από διαφορετικούς εξυπηρετητές αποδίδουν μειωμένη απόδοση συγκριτικά με μεθόδους στις οποίες ο πελάτης προσπελάζει μόνο έναν εξυπηρετητή για όλα τα τμήματα μιας ιστοσελίδας. Αυτό σημαίνει ότι είναι αποδοτικότερο κατά την αναπαραγωγή και αντιγραφή ιστοσελίδων να γίνεται μεταχείριση ολόκληρης της ιστοσελίδας (κώδικας HTML και εικόνες, γραφικά κτλ) σαν μια και μόνη οντότητα. Προκρίνεται δηλαδή σαν βέλτιστος ο μηχανισμός της πλήρους αντιγραφής του περιεχομένου και αντίστοιχα ανακατεύθυνσης των χρηστών.

B.8 Location Data System (LDS) - Μια νέα προσέγγιση

Στο [16] προτείνεται μια νέα δικτυακή εφαρμογή, το Σύστημα Δεδομένων Τοποθεσίας (Location Data System – LDS) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αντιγράφων αντικειμένων στον Παγκόσμιο Ιστό. Το LDS επιτρέπει σε έναν τυχαίο υπολογιστή να αποκτήσει τις IP διευθύνσεις των εξυπηρετητών που διατηρούν ένα συγκεκριμένο URL. Το LDS παρέχει μια υπηρεσία παρόμοια με αυτή του DNS, μπορεί να υλοποιηθεί σαν επέκταση του DNS, απαιτώντας μικρές αλλαγές μόνο στους εξυπηρετητές ονομάτων περιοχής, και να αναπτυχθεί επαυξητικά. Όταν το LDS εφαρμοσθεί στην περίπτωση του caching αυξάνει σημαντικά τον αριθμό μηνυμάτων DNS, ενώ όταν εφαρμοσθεί σε πλήρως ή μερικώς αντιγραμμένους εξυπηρετητές η ποσότητα των μηνυμάτων DNS δεν αυξάνεται.

Η βασική υπηρεσία αντιστοίχισης που παρέχει το LDS είναι η ακόλουθη: Ο πελάτης έχει ένα URL, το στέλνει στο σύστημα LDS το οποίο επιστρέφει μια λίστα εξυπηρετητών αντικειμένων (πηγαίων εξυπηρετητών, αντιγραμμένων (replicated) εξυπηρετητών, εξυπηρετητών caching) που περιέχουν το αντικείμενο αυτό. Αντί ολόκληρου του URL, ο πελάτης μπορεί επίσης να προμηθεύσει μόνο με ένα πρόθεμα του URL το LDS, το οποίο κατόπιν επιστρέφει μια λίστα εξυπηρετητών αντικειμένων που περιέχουν URLs τα οποία ταιριάζουν στο πρόθεμα. Στην απλούστερη μορφή, το πρόθεμα είναι μόνο το όνομα του υπολογιστή που φιλοξενεί το αντικείμενο με το δοσμένο URL. Σε αυτήν την περίπτωση η υπηρεσία LDS είναι πανομοιότυπη με το σύστημα ονομάτων περιοχής (DNS), που λειτουργεί εδώ και 20 χρόνια στο Διαδίκτυο με αυτόν τον τρόπο.

Όσον αφορά τον σχεδιασμό της υπηρεσίας, το LDS χρησιμοποιεί όπως και το DNS μια ιεραρχία εξυπηρετητών για την υλοποίηση μιας κατακευματισμένης βάσης εγγραφών πόρων. Οι εξυπηρετητές LDS αναφέρονται ως εξυπηρετητές τοποθεσίας (location servers) κατ' αντιστοιχία με τους εξυπηρετητές ονομάτων (name servers) του DNS. Κάθε εγγραφή πόρου του LDS αντιστοιχίζει ένα URL σε έναν εξυπηρετητή αντικειμένων, με συσχετισμένη πληροφορία εγκυρότητας (φρεσκάδας) του αντιγράφου. Κάθε URL έχει ένα (ή περισσότερους) ισχύοντες (authoritative) εξυπηρετητές τοποθεσίας. Ο ισχύων εξυπηρετητής τοποθεσίας περιέχει μια λίστα από εγγραφές πόρων για το URL, η οποία είναι μια λίστα εξυπηρετητών αντικειμένων που περιέχουν το URL (μαζί με την πληροφορία εγκυρότητας). Άλλοι εξυπηρετητές τοποθεσίας μπορεί να περιέχουν αποθηκευμένα αντίγραφα της λίστας των εγγραφών πόρων. Στην βασική σχεδίαση της υπηρεσίας, οι υπολογιστές κάνουν επερωτήσεις στους εξυπηρετητές τοποθεσίας με έναν τρόπο σε πλήρη αναλογία με το πρωτόκολλο DNS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] John Dilley, Bruce Maggs et. Al. “Globally Distributed Content Delivery”. IEEE Internet Computing, vol. September-October 2002, pp 50-58.
- [2] Jorge Escorcía, Dipak Ghosal, and Dilip Sarkar. “A Novel Cache Distribution Heuristic Algorithm for a Mesh of Caches and Its Performance Evaluation”.
- [3] D. Wessels, K. Claffy. “Internet Cache Protocol (ICP), version 2”. RFC 2186. National Laboratory for Applied Network Research / UCSD, September 1997.
- [4] I. Cooper, I. Melve, G. Tomlinson. “Internet Web Replication and Caching Taxonomy”. RFC3040. Network Working Group, January 2001.
- [5] Pei Cao, Sandy Irani. “Cost-Aware WWW Proxy Caching Algorithms”. Proceedings of the USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems Monterey, California, December 1997.
- [6] Williams, Stephen, et al. “Removal Policies in Network Caches for World-Wide Web Documents”. *In Proceedings of ACM SIGCOMM '96 1996 pp.293-305.*
- Gilda Raczkowski. “Content Delivery & Distribution”. White Paper. Worldcom.
- [7] Kopf David. “Will Content Delivery Networks Lead Enterprises Down A Rabbit Hole?”. Business Communications Review, vol. October 2000 pp. 16-19
- [8] Cisco Systems. “Cisco Web Network Services for Content Distribution and Delivery”. White Paper. 2000
- [9] Verma D., Calo S., Amiri K. “Policy-Based Management of Content Distribution Networks”. IEEE Network, Vol. March/April 2002, pp. 34-39
- [10] Karbhari P., Rabinovich M., Xiao Z., Douglass F. “ACDN: a Content Delivery Network for Applications”. AT&T Labs Research. *ACM SIGMOD '2002 June 4-6, Madison, WI, USA.*
- [11] Stardust.com Inc. “Content Networking and Edge Services: Leveraging the Internet for Profit”. White Paper. September 2001. [URL: <http://www.stardust.com>]
- [12] Edge Side Includes (ESI) Overview
[URL: http://www.edge-delivery.com/esi_overview.pdf]

- [13] MacVittie Lori. “Emerging ESI- Lower Costs, Better Performance”. *Network Computing*, vol. 1/7/2002, pp 62-64
- [14] ESI Language Specification 1.0, W3C Note 04 August 2001
[URL: <http://www.w3.org/TR/esi-lang>]
- [15] Krishnamurthy B., Wills C, Zhang Y. “On The Use And Performance Of Content Distribution Networks”. *ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop 2001*.
- [16] J. Kangasharju. “Distribution de l’information sur Internet (Internet Content Distribution)”. *Thèse De Doctorat, L’université De Nice, Sophia Antipolis, 2002*.
- [17] J. Kangasharju, J. Roberts, K. W. Ross. “Locating Copies of Objects Using the Domain Name System”. In *Proc. 4th Web Caching Workshop, San Diego, CA, March 1999*.
- [18] J. Kangasharju, J. Roberts, K. W. Ross, “Performance Evaluation Of Redirection Schemes”. In *Content Distribution Networks, 5th International Web Caching and Content Delivery Workshop*.
- [19] J. Kangasharju, J. Roberts, K. W. Ross. “Object Replication Strategies in Content Distribution Networks”. In *Proceedings of WCW’01, Web Caching and Content Distribution Workshop, Boston, MA, June 2001*.
- [20] Magnus Karlsson et al. “A Framework for Evaluating Replica Placement Algorithms”. *Internet Systems and Storage Laboratory, HP Laboratories Palo Alto. HPL-2002-219. August 2002*.
- [21] Magnus Karlsson, Mallik Mahalingam. “Do We Need Replica Placement Algorithms in Content Delivery Networks?”. In *Proc. Of the International Workshop on Web Content Caching and Distribution (WCW)*, August, 2002.
- [22] A. Bar-Noy, R. Bar-Yehuda, A. Freund, J. Naor, B. Schieber. “A Unified Approach to Approximating Resource Allocation and Scheduling”.
- [23] R. Cohen, L. Katzir, D. Raz. “Scheduling Algorithms for a Cache Pre-Filling Content Distribution Network”. *IEEE INFOCOM 2002*
- [24] Rappa Michael. “Business Models On The Web - Managing the digital enterprise”
[URL: <http://digitalenterprise.org/models/models.html>]

-
- [25] Wetzel Rebecca. “CDN Business Models - Not All Cast from the Same Mold”. *Business Communications Review* vol. April 2001.
- [URL: <http://www.bcr.com>]
- [26] Wetzel Rebecca. “CDN Business Models - The Drama Continues”. *Business Communications Review* vol. April 2002.
- [27] HTRC Group, LLC. Report. “The Commercial-Grade Internet: Edge Systems and Services”. January 2002
- [28] Timmers Paul. “Business Models for Electronic Markets”. European Commission, Directorate-General III, April 1998
- [29] John Chung-I Chuang. “Economies of Scale in Information Dissemination over the Internet”. Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, November 1998.
- [30] Terence P. Kelly, Yee Man Chan, Sugih Jumin, Jeffrey MacKie-Mason. “Biased Replacement Policies for Web Caches: Differential Quality-of-Service and Aggregate User Value”. In *Fourth International Web Caching Workshop*, San Diego, California, April 1999.
- [31] Terence P. Kelly, Sugih Jumin, Jeffrey MacKie-Mason. “Variable QoS from Shared Web Caches: User-Centered Design and Value-Sensitive Replacement”. In MIT Workshop on Internet Service Quality Economics, Cambridge, MA, USA, December 1999.
- [32] Hal Varian and Jeffrey K. MacKie-Mason. “Generalized vickrey auctions”. Technical report, Dept. of Economics, University of Michigan, July 1994.
- [33] Yee Man Chan, Jeffrey K. MacKie-Mason, Jonathan Womer, and Sugih Jamin. “One size doesn’t fit all: Improving network QoS through preference-driven Web caching”. In *Second Berlin Internet Economics Workshop*, May 1999.
- [34] Yee Man Chan, Jonathan Womer, Sugih Jamin, Jeffrey K. MacKie-Mason. “The Case for Market-based Push Caching”.
- [35] Kartik Hosanagar, Ramayya Krishnan, John Chuang, Vidyanand Choudhary. “Pricing and Resource Allocation in Caching Services with Multiple Levels of QoS.” Working Draft.

- [36] R. T. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, L. Masinter, P. Leach, and T. Berners-Lee. "RFC 2616: Hypertext Transfer Protocol _ HTTP/1.1", June 1999.
- [37] Brian D. Davison. "A Web Caching Primer". IEEE Internet Computing, July • August 2001, p.p 38-45
- [38] G. Barish and K. Obraczka. "World Wide Web Caching: Trends and Techniques" IEEE Comm. Internet Technology Series, vol.38,no. 5,May 2000, pp. 178–184.
- [39] J. Wang. "A Survey of Web Caching Schemes for the Internet," ACM Computer Comm. Rev., vol. 29, no. 5, Oct. 1999, pp. 36-46.
- [40] Caching Tutorial for Web Authors and Webmasters
URL : [http://www.web-caching.com/mnot_tutorial/intro.html]
- [41] Akamai Inc.
[URL]: [<http://www.akamai.com>]
- [42] C. Courcoubetis and R. Weber. "Pricing Communication Networks". To be print.
- [43] M3I (Market Managed Multi-service Internet). Deliverable 7.1: ISP Business Model Report.2002.
- [44] Γάκης Κωνσταντίνος, Οικονομίδης Δημήτριος. «Akamai Technologies, Inc.: Ανάλυση του επιχειρηματικού μοντέλου». Εργασία στο μάθημα «Οικονομικά και επιχειρηματικά θέματα στις τηλεπικοινωνίες». Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών 2002
- [45] Speedera Inc.
[URL]: [<http://www.speedera.com>]
- [46] R. Wooster and M. Abrams. "Proxy Caching the Estimates Page Load Delays". In the 6th International World Wide Web Conference, April 7-11, 1997, Santa Clara, CA.
- [47] P. Lorenzetti, L. Rizzo and L. Vicisano. "Replacement Policies for a Proxy Cache."
- [48] T. H Cormen, C. E. Leiserson, and R. L. Rivest. "Introduction to Algorithms". The MIT Press, 1990.
- [49] Joan Feigenbaum, Scott Shenker. " Distributed Algorithmic Mechanism Design: Recent Results and Future Directions". Dial-M'02, September 28, 2002, Atlanta, Georgia, USA.
- [50] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss. An architecture for differentiated services. In IETF RFC 2475, December 1998.

- [51] Peter Reichl, Burkhard Stiller, Simon Leinen. "Pricing Models for Internet Services." CATI (Charging and Accounting Technology for the Internet) Deliverable. March 1999.
- [52] M3I (Market Managed Multi-service Internet). Deliverable 16. Internet Economics Part I: Current Trends. 2002.
- [53] MacKie-Mason, J.: Varian, H.: Pricing the Internet. 1994.
- [54] Lazar, A.; Semret, N.: Auctions for Network Resource Sharing. CTR Tech. Report. Columbia University New York, Febr. 1997.
- [55] Ying Lu, Saxena A., Abdelzaher F. "Differentiated caching Services; A Control-Theoretical Approach"
- [56] I. Cidon, S. Kuten, and R. Soffer. "Optimal allocation of electronic content". *In Proceedings of IEE Infocom*, Anchorage, AK, April 22-26, 2001.
- [57] B. Li, M. J. Golin, G. F. Italiano, X. Deng, and K. Sohraby. "On the optimal placement of web proxies in the internet". *In Proceedings of the IEEE Infocom 1999*, pages 1282-1290, NY, USA, March 1999.
- [58] P. Krishnan, D. Raz, and Y. Shavitt. "The cache location problem." *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(5):568-582, October 2000.
- [59] L. Qiu, V. N. Padmanabhan, and G. M. Voelker. On the placement of web server replicas. *In Proceedings of IEEE Infocom*, Anchorage, AK, April 22-26, 2001.
- [60] Content Bridge. <http://www.content-bridge.com>.
- [61] Content Alliance. <http://www.content-peering.org>.