

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ
ΚΙΝΗΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΠΟΡΩΝ ΣΕ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΜΟΤΙΜΩΝ ΟΝΤΟΤΗΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2006

Συμβουλευτική επιτροπή

Πρόεδρος

Κώστας Κουρκουμπέτης, Καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Μέλη

Γεώργιος Δουκίδης, Καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Γεώργιος Κ. Πολύζος, Καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Εξεταστική επιτροπή

Γεώργιος Δουκίδης, Καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κώστας Κουρκουμπέτης, Καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Πάνος Κωνσταντόπουλος, Καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Γεώργιος Κ. Πολύζος, Καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ιωάννης Σταυραράκης, Καθηγητής, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Γεώργιος Δ. Σταμούλης, Αναπληρωτής καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Βασίλειος Βασσάλος, Επίκουρος καθηγητής, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Σε όσους προσφέρουν χωρίς ανταλλάγματα

Ευχαριστίες

Υπάρχουν πολλοί άνθρωποι χωρίς τους οποίους δεν θα είχα ολοκληρώσει ποτέ τη διατριβή αυτή. Κατ' αρχάς είναι ο καθηγητής μου και επόπτης μου Κώστας Κουρκουμπέτης. Νιώθω πραγματικά πολύ περήφανος που έχω δεχθεί τη συνεχή και εμπνευσμένη καθοδήγηση του επί δώδεκα έτη. Μετά από τόσο χρόνο, συνεχίζει να με διδάσκει, όχι μόνο πώς να κάνω έρευνα στην επιστήμη των υπολογιστών, αλλά και πώς να αντιμετωπίζω τις πιο σημαντικές προκλήσεις στη ζωή και πώς να γίνω καλύτερος άνθρωπος. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν λόγια για να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου.

Στη συνέχεια είναι όλοι οι συνεργάτες μας και κυρίως ο Καθηγητής Robin Mason (Πανεπιστήμιο του Southampton), ο Καθηγητής Richard Weber (Πανεπιστήμιο του Cambridge), και ο Ben Strulo (BT exact) οι οποίοι μου προσέφεραν ανεκτίμητη βοήθεια.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Γεώργιο Πολύζο και Γεώργιο Σταμούλη για την άμεση συνεισφορά τους αλλά και για τη δημιουργία (μαζί με τον Καθηγητή Κώστα Κουρκουμπέτη και όλους τους συναδέλφους μου) ενός πολύ φιλικού και παραγωγικού εργασιακού περιβάλλοντος στο ερευνητικό μας εργαστήριο. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές Γεώργιο Δουκίδη, Πάνο Κωνσταντόπουλο, και Βασίλειο Βασσάλο, από το Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών και τον Ιωάννη Σταυρακάκη από το Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο της Αθήνας που μου έκαναν την τιμή να είναι μέλη της επταμελούς επιτροπής της διατριβής μου, όπως και την Μάρθα Σιδέρη από το Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών για τη σημαντική βοήθεια και την εμπιστοσύνη της.

Πολλές ευχαριστίες επίσης σε όλους τους συμμετέχοντες στο ευρωπαϊκό έργο MMAPPS, στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκε (και χρηματοδοτήθηκε) το μεγαλύτερο τμήμα της διατριβής αυτής, και στους συναδέλφους μου Ηλία Ευσταθίου, Αθανάσιο Παπαϊωάννου, Μάνο Δραμιτινό, Σέργιο Σούρσο, και Μαρίνα Μπιτσάκη οι οποίοι συνεισέφεραν σημαντικά με τα επικριτικά τους σχόλια και τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις μας.

Τέλος, δεν θα είχα καταφέρει τίποτα χωρίς την οικογένεια μου και τους κοντινούς μου

φίλους που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της επίπονης αυτής προσπάθειας με την υπομονή τους και την ανιδιοτελή τους αγάπη.

Περίληψη

Οι προσωπικοί υπολογιστές και οι κινητές συσκευές έχουν σήμερα σημαντικές δυνατότητες, συνδέονται μεταξύ τους μέσω δικτύων υψηλών ταχυτήτων ή και άμεσα (σχηματίζοντας δυναμικά δίκτυα) και έτσι παρέχουν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη εξελιγμένων καταναμημένων εφαρμογών, τις λεγόμενες εφαρμογές ομότιμων οντοτήτων ή διομότιμες εφαρμογές (peer-to-peer —p2p— applications), με σκοπό την εκμετάλλευση της τεράστιας ποσότητας αχρησιμοποίητων πόρων στα άκρα του δικτύου. Ο διαμοιρασμός αρχείων, η εφαρμογή που συνετέλεσε καθοριστικά για την έξαρση του ενδιαφέροντος για τις διομότιμες εφαρμογές, είναι ακόμα η πιο δημοφιλής και η μόνη που χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα. Ωστόσο, πολλές άλλες προτείνονται και βρίσκονται υπό σχεδιασμό με σκοπό την εκμετάλλευση πόρων διαφορετικών τύπων όπως η υπολογιστική ισχύς, η μνήμη, το εύρος ζώνης, και άλλους. Μία θεμελιώδης διαφορά των διομότιμων εφαρμογών σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καταναμημένα συστήματα είναι το γεγονός ότι οι διάφορες αποφάσεις των μεμονομένων ομότιμων οντοτήτων του συστήματος βασίζονται στο προσωπικό τους όφελος και το γεγονός αυτό οδηγεί εν γένει σε μη αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα, η ορθολογική συμπεριφορά ενός ομότιμου χρήστη θα ήταν να συμμετάσχει στο σύστημα χωρίς να συνεισφέρει τους δικούς του πόρους ακολουθώντας τη λεγόμενη στρατηγική της “ανέξοδης συμμετοχής” (free riding), η οποία θα μπορούσε να έχει καταστροφικά αποτελέσματα σε ό,τι αφορά την αποδοτικότητα του συστήματος.

Έτσι, κατάλληλα κίνητρα θα πρέπει να δοθούν στους χρήστες ώστε να λειτουργούν με σκοπό τη βελτιστοποίηση της συνολικής αποδοτικότητας. Υπάρχουν όμως μεγάλες ερευνητικές προκλήσεις που θα πρέπει πρώτα να αντιμετωπιστούν, και σε ό,τι αφορά την οικονομική μοντελοποίηση του συστήματος αλλά και την υλοποίησή του, οι οποίες έχουν προσελκύσει τελευταία πολλούς ερευνητές από όλες τις σχετικές περιοχές της επιστήμης των υπολογιστών και των οικονομικών. Στη διατριβή αυτή προσδιόρισαμε και κατηγοριοποιήσαμε τις πιο σημαντικές έννοιες και ερευνητικά ερωτήματα σύμφωνα με τρέχουσα πρακτική και την ερευνητική

δραστηριότητα και επιλέξαμε να εστιάσουμε στη μελέτη του προβλήματος της παροχής περιεχομένου σε διομότιμα συστήματα διαμοιρασμού αρχείων. Η διαθεσιμότητα περιεχομένου, ως πόρος, δεν καταναλώνεται αφού η αντιγραφή ενός αρχείου δεν επηρεάζει την περαιτέρω διαθεσιμότητα του και έτσι έχει το βασικό χαρακτηριστικό αυτού που ονομάζεται στα οικονομικά “αγαθό κοινής ωφέλειας” (public good). Μοντελοποιούμε λοιπόν την παροχή περιεχομένου ως ένα πρόβλημα αυτόνομης παροχής ενός αγαθού κοινής ωφέλειας (private provision of a public good) και δείχνουμε ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση θα μπορούσε να είναι κατάλληλη και για άλλες ενδιαφέρουσες διομότιμες εφαρμογές. Τρία χαρακτηριστικά των διομότιμων συστημάτων που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάλυση μας είναι τα εξής: το μεγάλο πλήθος των συμμετεχόντων, ο υψηλός βαθμός ετερογένειας, και οι σημαντικοί περιορισμοί και απαιτήσεις της υλοποίησης εξαιτίας του πλήρως κατανεμημένου και επισφαλούς περιβάλλοντος. Το τελευταίο μάλιστα είναι και αυτό που προσδίδει νέο ενδιαφέρον σε αυτό το κλασικό, και ιδιαίτερα δύσκολο, πρόβλημα στη βιβλιογραφία της οικονομικής επιστήμης.

Το μεγάλο μέγεθος του συστήματος μειώνει, εν γένει, τα κίνητρα των χρηστών να συνεισφέρουν την απαιτούμενη ποσότητα πόρων για την παροχή ενός αγαθού κοινής ωφέλειας επειδή στην περίπτωση αυτή ο κάθε χρήστης νιώθει ότι παίζει μικρότερο ρόλο στην κατασκευή του και έτσι επιλέγει να συνεισφέρει ο ίδιος όσο το δυνατόν λιγότερους πόρους. Ωστόσο, όταν είναι δυνατός ο αποκλεισμός κάποιων συμμετεχόντων, όπως προκύπτει από πρόσφατα σημαντικά ασυμπτωτικά αποτελέσματα (δείτε το [30] και τις αναφορές που περιλαμβάνονται σε αυτό), ένας μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς, ο οποίος απαιτεί από όλους τους συμμετέχοντες να προσφέρουν την ίδια —προκαθορισμένη— ποσότητα πόρων, επιτυγχάνει τιμή κοινωνικής ευημερίας που απέχει $O(1/n)$ από αυτή που είναι δυνατό να επιτευχθεί από τον θεωρητικά βέλτιστο μηχανισμό για το ίδιο πρόβλημα. Καταδεικνύουμε τις πολύ ελκυστικές ιδιότητες του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς στα πλαίσια του μοντέλου μας συγκριτικά με άλλους εναλλακτικούς μηχανισμούς και συζητάμε ορισμένα θεωρητικά θέματα πρακτικού ενδιαφέροντος όπως η σημασία της ετερογένειας στη δημοτικότητα των αρχείων, οι συνθήκες που απαιτούνται ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος, και πιθανούς τρόπους για τον υπολογισμό παραμέτρων του που είχαμε αρχικά υποθέσει ότι είναι γνωστοί. Η απόδοση του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς, ωστόσο, μειώνεται όσο περισσότερο ετερογενείς είναι οι προτιμήσεις των χρηστών. Συνεπώς, η κατηγοριοποίηση τους σε διαφορετικές ομάδες θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη. Έτσι, μελετούμε υπό ποιές υποθέσεις θα μπορούσε κανείς να εκμεταλλευτεί την επιπλέον αυτή διαθέσιμη πληροφορία και τα κίνητρα που χρειάζεται να δοθούν στους χρήστες ώστε είτε να συμφωνήσουν να έχουν

διαφορετική αντιμετώπιση είτε να δηλώνουν την κατηγορία στην οποία πραγματικά ανήκουν όταν αυτό δεν μπορεί να διαπιστωθεί βάσει αντικειμενικών χαρακτηριστικών.

Επιπλέον, το πλήρως κατανεμημένο και επισφαλές περιβάλλον των διομήτιμων συστημάτων καθιστά ακόμα και έναν τόσο απλό μηχανισμό (όπως είναι ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς) πολύ δύσκολο να επιβληθεί στην πράξη καθώς απαιτείται κάποιου είδους μέτρηση και καταγραφή της συνεισφοράς των χρηστών στο χρόνο, λειτουργία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να υλοποιηθεί στο πλαίσιο αυτό. Για να ξεπεράσουμε το εμπόδιο αυτό, προτείνουμε έναν μηχανισμό επιβολής χωρίς χρήση μνήμης ο οποίος εξασφαλίζει ότι οι ομότιμοι χρήστες συνεισφέρουν στο σύστημα σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα περιεχομένου ενόσω καταναλώνουν πόρους προς όφελός τους, επιβάλλοντας έναν προκαθορισμένο (όχι πολύ υψηλό) ρυθμό αναφόρτωσης δεδομένων για όλους τους χρήστες. Παρουσιάζουμε τις βασικές απαιτήσεις για την υλοποίηση της απαραίτητης λειτουργικότητας και ορίζουμε ένα κατάλληλο οικονομικό μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό, το κόστος σχετίζεται άμεσα με το χρόνο που ο κάθε χρήστης αναγκάζεται να μείνει συνδεδεμένος προσφέροντας τους πόρους του στους υπολοίπους. Στη συνέχεια αξιολογούμε την επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού ως προς την οικονομική αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται, η οποία για ορισμένες τιμές των παραμέτρων του συστήματος μπορεί να είναι συγκρίσιμη με τη βέλτιστη. Επιπρόσθετα, το μοντέλο αυτό παρέχει τις προϋποθέσεις για να συγκρίνουμε τον μηχανισμό μας με άλλους μηχανισμούς που παρέχουν κίνητρα για συνεισφορά θέτοντας περιορισμούς στην κατανάλωση πόρων, όπως ο δημοφιλής στη βιβλιογραφία κανόνας που απαιτεί τον ισοσκελισμό των αναφορτώσεων (uploads) και των καταφορτώσεων (downloads) που πραγματοποιούνται από τον κάθε ομότιμο χρήστη. Δείχνουμε λοιπόν ότι καθώς στον προτεινόμενο μηχανισμό μπορούμε να ρυθμίσουμε κατάλληλα την κρίσιμη παράμετρο του (το χρόνο που απαιτείται να παραμένουν οι χρήστες συνδεδεμένοι για κάθε καταφόρτωση) οδηγούμαστε σε αυξημένη αποδοτικότητα σε σύγκριση με αυτή που επιτυγχάνεται από τον κανόνα που εξισώνει τις αναφορτώσεις και τις καταφορτώσεις ανά χρήστη. Επιπλέον, η ελαστικότητα του μηχανισμού μας σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη αναλογία αναφορτώσεων και καταφορτώσεων ανά χρήστη εξασφαλίζει μεγαλύτερη σταθερότητα για το σύστημα.

Κατασκευάζουμε επίσης δύο ενδιαφέροντα οικονομικά μοντέλα τα οποία εστιάζουν σε διαφορετικές όψεις ενός διομήτιμου συστήματος διαμοιρασμού αρχείων. Πρώτον, προτείνουμε ένα πιο λεπτομερές οικονομικό μοντέλο το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος αναφόρτωσης στο κόστος διαμοιρασμού αρχείων. Στα πλαίσια του μοντέλου αυτού, εισάγουμε μία γενική κατηγορία ανταποδοτικών κανόνων για την επιβολή μίας επιθυμητής σχέσης ανάμεσα στην κατανάλωση και τη συνεισφορά πόρων και καταδεικνύουμε τις δυσκολίες που προκύπτουν

εξαιτίας αυτής της πιο λεπτομερούς μοντελοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, δείχνουμε ότι μία γραμμική τέτοια σχέση θα μπορούσε να μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα του συστήματος αλλά για τον υπολογισμό των συντελεστών της θα χρειαζόμασταν πλήρη πληροφόρηση σε ό,τι αφορά τον τύπο των χρηστών και, πιο σημαντικά, οι συντελεστές αυτοί θα έπρεπε να είναι εν γένει διαφορετικοί για τον κάθε χρήστη. Δυστυχώς, η βέλτιστη ομοιόμορφη πολιτική με ελλιπή πληροφόρηση δεν είναι γνωστή και δεν είναι δυνατόν να αξιολογήσουμε τη συμπεριφορά του απλού μας κανόνα στο όριο βασισμένοι στην πληροφορία της κατανομής των τύπων των χρηστών όπως κάναμε στην περίπτωση του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς. Δεύτερον, περιγράφουμε ένα ενδιαφέρον παίγνιο διανομής περιεχομένου σχετικό με το διαμοιρασμό αντικειμένων σε μία διομότιμη κοινότητα των οποίων η απόκτηση επιφέρει σημαντικό κόστος και ορίζουμε ένα κατάλληλο μοντέλο αγοράς για διανομή περιεχομένου το οποίο οδηγεί σε χρήσιμα αναλυτικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιούμε το μοντέλο αυτό για να μελετήσουμε υπό ποιές συνθήκες συγκεκριμένα προνόμια, και τι είδους, θα πρέπει να εκχωρηθούν στους χρήστες που επιλέγουν να αποκτήσουν και να μοιραστούν αντικείμενα υψηλού κόστους ώστε να είναι επωφελές για αυτούς να το κάνουν.

Ολοκληρώνοντας τη διατριβή αυτή, κάναμε κάποιες πρώτες προσπάθειες να εφαρμόσουμε τμήματα των αποτελεσμάτων μας σε διαφορετικές διομότιμες εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, προτείνουμε ένα μοντέλο αγαθών κοινής ωφέλειας για την περίπτωση ενός υπολογιστικού πλέγματος για ερευνητικούς σκοπούς (scientific grid) και εξετάζουμε την πιθανότητα υλοποίησης ενός μηχανισμού επιβολής συνεισφοράς κατά την κατανάλωση για την προώθηση πακέτων σε αυθόρμητα δίκτυα (ad-hoc networks).

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	iii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο	1
1.2 Διατύπωση του προβλήματος	5
1.3 Συνεισφορά	10
1.4 Περιεχόμενα διατριβής και δημοσιεύσεις	16
2 Τα οικονομικά των διομότιμων συστημάτων	19
2.1 Σημαντικά χαρακτηριστικά των διομότιμων συστημάτων	19
2.1.1 Στοιχεία αγαθού κοινής ωφέλειας	19
2.1.2 Πολύπλοκη μοντελοποίηση κόστους	20
2.1.3 Ετερογένεια	23
2.1.4 Μεγάλο πλήθος συμμετεχόντων	23
2.1.5 Ιδιαίτερα δυναμικό περιβάλλον	24
2.1.6 Φθηνά ψευδώνυμα	24
2.1.7 Κατανεμημένη υλοποίηση	24
2.1.8 Ορθολογισμός ή αλτρουϊσμός;	25
2.2 Ορισμός της αποδοτικότητας	26
2.3 Μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας	27
2.3.1 Η ανάγκη για ρύθμιση	27
2.3.2 Ελλιπής πληροφόρηση	28
2.4 Μοντελοποίηση	29
2.4.1 Οικονομική προσέγγιση	29
2.4.2 Παίγνια	31
2.4.3 Μοντέλα ελεύθερης αγοράς	32
2.5 Μηχανισμοί επιβολής	32
2.5.1 Καταγραφή του ιστορικού του χρήστη	32
2.5.2 Ο ρόλος της ταυτότητας του χρήστη	34

2.5.3	Εικονικό συνάλλαγμα	36
2.5.4	Μηχανισμοί επιβολής χωρίς χρήση μνήμης	36
3	Αυτόνομη παροχή αγαθών κοινής ωφέλειας	39
3.1	Ένα μοντέλο κοινού αγαθού χωρίς αποκλεισμούς	39
3.2	Αποκλεισμοί και ο ρόλος του πλήθους των συμμετεχόντων	43
3.3	Ασυμπτωτικά βέλτιστοι μηχανισμοί	47
3.4	Εφαρμογές	48
3.4.1	Διαθεσιμότητα περιεχομένου	48
3.4.2	Διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης	49
3.4.3	Υπολογιστικό πλέγμα	50
4	Διαθεσιμότητα περιεχομένου	53
4.1	Ένα μοντέλο αγαθών κοινής ωφέλειας για το διαμοιρασμό αρχείων	53
4.1.1	Η συνάρτηση $Q(F)$	55
4.2	Η μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας	57
4.3	Τιμολόγηση Lindahl	58
4.4	Ελλιπής πληροφόρηση	59
4.5	Σύγκριση οικονομικών κινήτρων	60
4.5.1	Μηχανισμοί κινήτρων	64
4.5.2	Σύγκριση	69
4.6	Ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς	72
4.6.1	Σχηματισμός ομάδων	73
4.6.2	Ετερογενής δημοτικότητα αρχείων	84
4.6.3	Σταθερότητα	85
4.6.4	Υπολογισμός παραμέτρων του συστήματος	86
4.6.5	Θέματα υλοποίησης	87
4.7	Περίληψη	88
5	Ένας μηχανισμός επιβολής χωρίς μνήμη	91
5.1	Εισαγωγή	91
5.2	Ο μηχανισμός επιβολής	92
5.2.1	Ομότιμοι χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων	93
5.2.2	Έλεγχος της εγκυρότητας των αρχείων	95
5.2.3	Ρύθμιση παραμέτρων	96
5.3	Θέματα κινήτρων	97
5.3.1	Διαμοιρασμός μη έγκυρων αρχείων	97
5.3.2	Άρνηση παροχής υπηρεσιών	98
5.3.3	Κίνητρα για επιβολή	99

5.4	Οικονομική μοντελοποίηση	100
5.4.1	Βέλτιστη αποδοτικότητα	101
5.4.2	Ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς	102
5.4.3	Ο μηχανισμός προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης δεδομένων	103
5.4.4	Σταθερότητα	107
5.4.5	Αξιολόγηση	109
5.4.6	Η αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων	111
5.5	Αποτελεσματικότητα των μηχανισμών συνεισφοράς κατά την κατανάλωση	113
5.5.1	Η περίπτωση της προώθησης πακέτων σε αυθόρμητα δίκτυα	115
5.6	Περίληψη και μελλοντική εργασία	116
6	Πιο γενικές συναρτήσεις κόστους	119
6.1	Αρνητικές εξωτερικότητες	119
6.1.1	Κόστος αναφόρτωσης	119
6.1.2	Συμφόρηση	121
6.2	Ένα εναλλακτικό μοντέλο για παροχή πόρων σε διομότιμα συστήματα	122
6.3	Τιμές Lindahl	124
6.3.1	Βέλτιστες τιμές	124
6.3.2	Προσεγγιστικά βέλτιστες ομοιόμορφες τιμές	125
6.4	Ανταποδοτικοί κανόνες	126
6.4.1	Βέλτιστοι κανόνες	126
6.4.2	Προσεγγιστικά βέλτιστοι ομοιόμορφοι κανόνες	128
6.4.3	Ευρετικοί κανόνες	131
6.4.4	Ένα αριθμητικό παράδειγμα	132
6.4.5	Σταθερότητα με χρήση κανόνων	133
6.4.6	Ένα μοντέλο με ποιότητα υπηρεσίας	135
6.5	Περίληψη και συζήτηση	137
7	Ένα μοντέλο αγοράς	139
7.1	Εισαγωγή	139
7.2	Ένα απλό μοντέλο αγοράς για διομότιμη διανομή περιεχομένου	141
7.2.1	Υπολογισμός της κοινωνικής ευημερίας και του αναμενόμενου κέρδους	144
7.3	Συζήτηση και μελλοντική εργασία	149
8	Επίλογος	151
8.1	Περίληψη	151
8.2	Μελλοντική εργασία	154
	Βιβλιογραφία	164

Ορολογία

166

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο

Οι σημαντικές και συχνά υπερβολικές δυνατότητες των συμβατικών προσωπικών υπολογιστών ως προς τη μνήμη και την υπολογιστική ισχύ, και η εξάπλωση των ευρυζωνικών συνδέσεων τα τελευταία χρόνια, έχουν δημιουργήσει τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη συστημάτων **ομότιμων οντοτήτων** ή αλλιώς **διομότιμα** συστήματα (peer-to-peer —p2p— systems). Δηλαδή, συστήματα που αποτελούνται από υπολογιστές με συγκρίσιμες δυνατότητες και πανομοιότυπους ρόλους (για αυτό οι χρήστες τους ονομάζονται ομότιμοι) και συνήθως διακοπτόμενη συνδεσιμότητα, οι οποίοι σχηματίζουν ένα υπερκείμενο δίκτυο (overlay network) με σκοπό την αξιοποίηση των αχρησιμοποίητων πόρων τους (μνήμη, υπολογιστική ισχύ, εύρος ζώνης δικτύου πρόσβασης) και/ή τον διαμοιρασμό του διαθέσιμου περιεχομένου ή της ανθρώπινης παρουσίας.

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι το Διαδίκτυο είχε εξαρχής σχεδιαστεί ως ένα σύστημα ομότιμων υπολογιστών και το USENET, μία πλήρως κατανεμημένη εφαρμογή ανταλλαγής πληροφοριών και ειδήσεων, η οποία είναι ενεργή από το 1979, θεωρείται πρόγονος των σημερινών εφαρμογών ομότιμων οντοτήτων. Παρόλα αυτά, στη συνέχεια κυριάρχησε το μοντέλο πελάτη/εξυπηρετητή κατά το οποίο εκατομμύρια πελάτες ζητούν υπηρεσίες (κυρίως σχετικές με την ανάκτηση και καταφόρτωση περιεχομένου) από ένα περιορισμένο πλήθος εξυπηρετητών. Η αύξηση των δυνατοτήτων των προσωπικών υπολογιστών και του διαθέσιμου εύρους ζώνης, η αλματώδης ανάπτυξη του Διαδικτύου, η κωδικοποίηση mp3, η οποία κατέστησε δυνατή την αντιγραφή πολυμεσικού περιεχομένου μέσω του Διαδικτύου, και μία δημοφιλής εφαρμογή (ο διομότιμος διαμοιρασμός αρχείων), άλλαξαν δραστικά το μοντέλο αυτό και ήταν πιθανώς οι

βασικοί λόγοι για την έξαρση του ενδιαφέροντος για τα διομότιμα συστήματα που ξεκίνησε με την εφαρμογή Napster¹ γύρω στο 2000 και μέχρι σήμερα παραμένει στο κέντρο της προσοχής εκατομμυρίων χρηστών του Διαδικτύου, της βιομηχανίας, και της ερευνητικής κοινότητας.

Έτσι, πολυάριθμες διαφορετικές εφαρμογές διαμοιρασμού αρχείων συνεχίζουν να αναπτύσσονται και πολλά πρωτότυπα διομότιμα συστήματα προτείνονται και μελετούνται σε βάθος με σκοπό να καταστήσουν δυνατό το διαμοιρασμό όλων των πιθανώς αχρησιμοποίητων πόρων των χρηστών. Τα πιο σημαντικά είναι τα υπολογιστικά πλέγματα (grid computing), τα συστήματα διατήρησης δεδομένων (data preservation), και τα αυθόρμητα δίκτυα (ad-hoc networks). Αν και όλα τα συστήματα αυτά έχουν προσελκύσει το αξιοσημείωτο και συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας δεν έχουν ακόμα εφαρμοστεί στην πράξη, τουλάχιστον σε ευρεία κλίμακα. Ο βασικός λόγος είναι ότι πολλά θεμελιώδη ερευνητικά ερωτήματα παραμένουν ακόμα ανοιχτά. Η παροχή κινήτρων για συνεισφορά πόρων και η κατανεμημένη υλοποίηση αποτελούν τις πιο σημαντικές ερευνητικές προκλήσεις στην περιοχή αυτή.

Σε ό,τι αφορά την κατανεμημένη υλοποίηση, αν και δεν αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση, η πλήρης αυτονομία από κεντρικούς εξυπηρετητές θεωρείται ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των διομότιμων συστημάτων και συχνά χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την αξιολόγηση μιας προσέγγισης: όσο λιγότερη είναι η εξάρτηση από κεντρικές οντότητες τόσο πιο κοντά στο ιδανικό τοποθετείται. Για την περίπτωση του διαμοιρασμού αρχείων, η ανάγκη αυτή προέκυψε λόγω των έντονων νομικών μαχών της Ένωσης Δισκογραφικών Εταιριών Αμερικής (Recording Industry Association of America –RIAA) για την πάταξη της πειρατίας η οποία λαμβάνει χώρα στις περισσότερες εφαρμογές αυτού του είδους. Η εφαρμογή Napster έκλεισε ακριβώς εξαιτίας της εξάρτησης της από έναν κεντρικό εξυπηρετητή ο οποίος λειτουργούσε ως ευρετήριο περιεχομένου. Και αν και ήταν ένα διομότιμο σύστημα σε επίπεδο εφαρμογής (οι χρήστες του λειτουργούσαν και ως πελάτες και ως εξυπηρετητές περιεχομένου) θεωρείται μία “υβριδική” διομότιμη εφαρμογή. Αντίθετα, η εφαρμογή Gnutella ανήκει στις πρώτες “καθαρόαιμες” διομότιμες εφαρμογές καθώς υλοποιεί όλη την βασική λειτουργικότητα για την ανταλλαγή αρχείων μεταξύ ομότιμων χρηστών με πλήρως κατανεμημένο τρόπο και για το λόγο αυτό συνεχίζει να επιβιώνει. Αποτελεί έτσι μία ζωντανή απόδειξη για την πεποίθηση ότι η υλοποίηση ενός καθαρόαιμου διομότιμου συστήματος είναι ένας εφικτός στόχος.

Ωστόσο, παρατηρείστε ότι η πλήρης αποκεντροποίηση μειώνει σημαντικά την αποδοτικό-

¹ Το Napster ήταν η πρώτη διομότιμη εφαρμογή διαμοιρασμού αρχείων, η οποία, το 2000, έβαλε τη σπίθα για την επανάσταση που επακολούθησε, και η οποία στην αποκορύφωση της δημοτικότητας της είχε από 40 μέχρι και 80 εκατομμύρια συνδρομητές ενώ πάνω από 5 εκατομμύρια χρήστες ήταν συνδεδεμένοι ταυτόχρονα κατά μέσο όρο.

τητα ορισμένων λειτουργιών του συστήματος (για παράδειγμα, η αναζήτηση περιεχομένου στο Napster ήταν πολύ πιο αποτελεσματική και φιλική προς το χρήστη συγκριτικά με το Gnutella) και στην πράξη πολλά διομήτιμα συστήματα βασίζονται στην ύπαρξη ομότιμων οντοτήτων αυξημένων υποχρεώσεων (super peers) για την αντιμετώπιση αδυναμιών αυτού του είδους. Η αυτονομία από κεντρικούς εξυπηρετητές είναι παρόλα αυτά επιθυμητή επειδή, εκτός της προστασίας από τους νομικούς κινδύνους, συνεισφέρει στη δραματική βελτίωση της επεκτασιμότητας του συστήματος και ίσως πιο σημαντικά παρέχει τη δυνατότητα στις κοινότητες που σχηματίζονται να είναι αυτοδιαχειριζόμενες (η προστασία των προσωπικών δεδομένων και η ανεξαρτησία από εταιρίες που επιζητούν το κέρδος είναι πολύ συχνά θέμα απόλυτης προτεραιότητας στις διομήτιμες κοινότητες) αλλά και να μπορούν να δημιουργούνται και να αναπτύσσονται χωρίς την ανάγκη επενδύσεων σε υποδομές. Η ιδιότητα αυτή των πλήρως κατανεμημένων διομήτιμων συστημάτων δημιουργεί ένα ιδανικό περιβάλλον πειραματισμού για νέες επαναστατικές διομήτιμες εφαρμογές το οποίο παρέχει ένα ιδιαίτερα εύφορο έδαφος για την έμπνευση και τη δημιουργικότητα της μεγάλης και δραστήριας κοινότητας των προγραμματιστών του Διαδικτύου. Έτσι, ένα σημαντικό μέρος της έρευνας για τα διομήτιμα συστήματα εστιάζει στα τεχνικά προβλήματα που σχετίζονται με την πλήρη αποκεντροποίηση όλης της απαραίτητης λειτουργικότητας. Η αναζήτηση υπηρεσιών [75], διάφορα θέματα ασφάλειας [18], και η συλλογή και διαχείριση πληροφοριών χρήσης [92][48] είναι μερικά από τα πιο ενδιαφέροντα ερευνητικά θέματα στην περιοχή αυτή.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός διομήτιμου συστήματος όμως είναι το γεγονός ότι παράγεται ένα συλλογικό αποτέλεσμα από μικρές και δυναμικής φύσης συνεισφορές ενός μεγάλου πλήθους ιδιοτελών και μεμονομένων οντοτήτων. Αυτό μπορεί εύκολα να το διαπιστώσει κανείς σε περιπτώσεις όπου οι συμμετέχοντες απλά τοποθετούν τους πόρους τους σε μία κοινή δεξαμενή, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του SETI@home, μία ακόμα πρωτοποριακή υβριδική διομήτιμη εφαρμογή, η οποία αξιοποιεί την αχρησιμοποίητη υπολογιστική ισχύ των προσωπικών υπολογιστών των χρηστών του Διαδικτύου πραγματοποιώντας κατανεμημένους υπολογισμούς σε αναζήτηση εξωγήινης νοημοσύνης (Search for Extraterrestrial Intelligence—SETI)². Το ίδιο όμως ισχύει και όταν ο διαμοιρασμός των πόρων συνίσταται στην ανταλλαγή πόρων μεταξύ δύο ή περισσότερων ομότιμων χρηστών. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του διαμοιρασμού αρχείων, το συλλογικό αποτέλεσμα που προκύπτει μέσω της ανταλλαγής

² Παρατηρείστε ότι η ύπαρξη ενός κεντρικού συστήματος για το διαμοιρασμό των διεργασιών στους διαφορετικούς υπολογιστές και το γεγονός ότι όλοι οι συμμετέχοντες λειτουργούν μόνο ως εξυπηρετητές του μοναδικού αυτού πελάτη είναι ο λόγος που το SETI@home δεν θεωρείται ένα καθαρόαιμο διομήτιμο σύστημα.

πολυμεσικού περιεχομένου μεταξύ χρηστών είναι η συνολική διαθεσιμότητα περιεχομένου που επιτυγχάνεται. Δηλαδή, η πιθανότητα με την οποία ένας χρήστης που συμμετέχει σε ένα τέτοιο σύστημα θα καταφέρει να βρει (και καταφορτώσει) ένα συγκεκριμένο αντικείμενο, αδιαφορώντας φυσικά για το ποιός θα είναι ο χρήστης που θα του το προσφέρει στην πράξη.

Έτσι, η επιτυχία ενός διομήτιμου συστήματος και κατ' επέκταση η αξία που δημιουργεί στον κάθε χρήστη εξαρτάται άμεσα από την έκταση των συνεισφορών των υπολοίπων χρηστών. Αυτό σημαίνει ότι το ποσό των πόρων που ο κάθε ομήτιμος χρήστης αποφασίζει να συνεισφέρει επηρεάζει θετικά τη χρησιμότητα των υπολοίπων χρησιμοποιώντας την ορολογία των οικονομικών θα λέγαμε ότι υπάρχουν **θετικές εξωτερικότητες** (positive externalities)³ σε ένα τέτοιο σύστημα. Γιατί όμως οι χρήστες να συνεισφέρουν τους πόρους τους; Χωρίς την ύπαρξη σαφών κινήτρων (και των κατάλληλων μηχανισμών για την επιβολή τους), και όταν το κόστος της συνεισφοράς δεν είναι πραγματικά μηδενικό, η ορθολογική στρατηγική όλων των χρηστών θα ήταν να επιλέξουν να *συμμετάσχουν χωρίς να συνεισφέρουν δικούς τους πόρους* με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους συμμετοχής τους και την εκμετάλλευση των συνεισφορών των υπολοίπων. Το σημείο ισορροπίας στην ακραία αυτή περίπτωση θα ήταν η κατάρρευση του συστήματος.

Από την πρώτη επίσημη επισήμανση του φαινομένου αυτού της “*ανέξοδης συμμετοχής*” (free riding) στο Gnutella [1], σημαντικό κομμάτι της έρευνας έχει εστιάσει στους μηχανισμούς κινήτρων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να εξαλείψουν ή να περιορίσουν την ωφελμιστική συμπεριφορά στα συστήματα ομήτιμων οντοτήτων. Παρατηρείστε ότι το παραπάνω είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα στις ανθρώπινες κοινωνίες και έχει μελετηθεί σε βάθος από οικονομολόγους και κοινωνιολόγους τον τελευταίο αιώνα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όμως των διομήτιμων συστημάτων και πιο συγκεκριμένα το πολύ μεγάλο μέγεθος τους, η ανομοιογένεια των συμμετεχόντων, η δυναμική φύση του συστήματος, και οι περιορισμοί στην υλοποίηση μηχανισμών κινήτρων, είναι μερικές από τις αιτίες για τη δημιουργία μιας καινούργιας ερευνητικής περιοχής με το προφανές όνομα “*οικονομικά των διομήτιμων συστημάτων*” (p2p economics), η οποία έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον ενός συνεχώς αυξανόμενου πλήθους ερευνητών από όλες τις σχετικές ερευνητικές περιοχές (την επιστήμη των υπολογιστών, τα οικονομικά, την κοινωνιολογία, και άλλες).

Αν και τα θεωρητικά προβλήματα που προκύπτουν είναι πολύ ενδιαφέροντα καθαυτά, μία

³ Στη θεωρία των οικονομικών, υπάρχουν εξωτερικότητες σε ένα σύστημα όταν οι αποφάσεις ενός χρήστη επηρεάζουν άμεσα τη χρησιμότητα και το κόστος κάποιου άλλου. Η μόλυνση είναι ένα κλασικό παράδειγμα αρνητικών εξωτερικοτήτων και η παροχή αγαθών κοινής ωφέλειας ένα κλασικό παράδειγμα θετικών εξωτερικοτήτων.

πρακτική οικονομική προσέγγιση για την αντιμετώπιση του φαινομένου της ανέξοδης συμμετοχής στα διομήτιμα συστήματα δεν θα έπρεπε να αγνοήσει τους περιορισμούς που προκύπτουν σε ό,τι αφορά την υλοποίηση της λειτουργικότητας καταγραφής και διαχείρισης του ιστορικού των χρηστών (accounting) και την επιβολή οποιουδήποτε μηχανισμού κινήτρων, κυρίως εξαιτίας του καταναμημένου και επισφαλούς περιβάλλοντος των διομήτιμων συστημάτων. Πιστεύουμε ότι τα ερευνητικά αυτά ερωτήματα θα γίνονται όλο και πιο κρίσιμα όσο περισσότεροι χρήστες συνδέονται στο Διαδίκτυο και όσο τα εκατομμύρια των κινητών συσκευών (τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, κλπ), οι αισθητήρες ανίχνευσης και τα δημόσια και ιδιωτικά ασύρματα σημεία πρόσβασης θα αρχίσουν να σχηματίζουν ένα πολύ περίπλοκο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον όπου η αυτόνομη επικοινωνία και η αυτοδιαχείριση θα αποτελούν αναγκαία προϋπόθεση για την επιβίωση του.

1.2 Διατύπωση του προβλήματος

Στη διατριβή αυτή, σκοπός μας είναι να σχεδιάσουμε οικονομικά αποδοτικούς και υλοποιήσιμους μηχανισμούς κινήτρων για την παροχή πόρων σε διομήτιμα συστήματα. Το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας μας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εφαρμογής διαμοιρασμού αρχείων με έμφαση στη διαθεσιμότητα του περιεχομένου ως το βασικό αγαθό που παρέχεται σε ένα τέτοιο σύστημα.

Η λεπτομερής μοντελοποίηση των οικονομικών συναλλαγών που λαμβάνουν χώρα σε ένα διομήτιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων είναι γενικά ένα πολύ περίπλοκο πρόβλημα. Ο βασικός λόγος είναι ότι οι συμμετέχοντες θα πρέπει να συνεισφέρουν διαφορετικά είδη πόρων (εύρος ζώνης, μνήμη, υπολογιστικό ισχύ, περιεχόμενο), η παροχή των οποίων είναι δυνατόν να επιφέρει επιπρόσθετους παράγοντες κόστους όπως νομικούς κινδύνους και χρόνο παραμονής στο σύστημα. Επιπλέον, η χρησιμότητα των χρηστών εξαρτάται, εκτός από την κατανάλωση πόρων, και από απροσδιόριστους παράγοντες όπως αλτρουϊστικά κίνητρα, συλλογικό πνεύμα, και άλλα. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό να κάνει κανείς τις απαραίτητες αφαιρέσεις και απλοποιήσεις αν επιθυμεί να κατασκευάσει οικονομικά μοντέλα τα οποία να έχουν νόημα και ταυτόχρονα να μπορούν να αναλυθούν μαθηματικά.

Σε ό,τι αφορά τη δημιουργία ενός οικονομικά αποδοτικού συστήματος, το οποίο επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας, εκτός από την πολυπλοκότητα της μοντελοποίησης, ένα επιπλέον σημαντικό εμπόδιο αποτελεί η απουσία πληροφόρησης σχετικά με τους τύπους και τις προτιμήσεις των μεμονωμένων χρηστών, η οποία είναι απαραίτητη για

τον υπολογισμό της βέλτιστης κατανομής πόρων και κόστους. Θα δούμε ότι οι βέλτιστοι μηχανισμοί απαιτούν πλήρη πληροφόρηση και σε πολλές περιπτώσεις προσωποποιημένες τιμές ή κανόνες, γεγονός που καθιστά απαραίτητο το συμβιβασμό κατά τη σχεδίαση μιας ρεαλιστικής προσέγγισης.

Εκτός όμως από αυτό το πραγματικά δύσκολο οικονομικό πρόβλημα παροχής και κατανομής πόρων, ο σχεδιαστής ενός διομήτιμου συστήματος έχει να αντιμετωπίσει επιπλέον την απουσία έμπιστου λογισμικού⁴ ή κεντρικών οντοτήτων οι οποίες να μπορούν να επιβλέπουν και να αποθηκεύουν πληροφορίες για τις συναλλαγές των χρηστών. Έτσι η εξασφάλιση ότι οι συμμετέχοντες συνεισφέρουν και καταναλώνουν την ποσότητα των πόρων που ορίζεται από το σχετικό οικονομικό μοντέλο αποτελεί μία σημαντική πρόκληση για τη σχεδίαση του συστήματος. Ένα σημαντικό μέρος της ερευνητικής βιβλιογραφίας για τα οικονομικά των διομήτιμων συστημάτων στηρίζεται στην αρχή ότι όλοι οι χρήστες θα πρέπει να λαμβάνουν από το σύστημα ίση (ή ανάλογη) ποσότητα πόρων με αυτή που προσφέρουν σε επίπεδο παροχής υπηρεσιών (δηλ. την μεταφορά ενός συγκεκριμένου αρχείου) και μελετά τα θεωρητικά και πρακτικά ζητήματα που σχετίζονται με την διαχείριση της πληροφορίας χρήσης και παροχής των πόρων από τους συμμετέχοντες με σκοπό την επιβολή των αντίστοιχων μηχανισμών κινήτρων σε ένα πλήρως κατανομημένο και επισφαλές περιβάλλον (π.χ. [48, 54, 61] μεταξύ άλλων). Οι πιο σημαντικές επιθέσεις που θα πρέπει να αντιμετωπίσει ένα ρεαλιστικό σύστημα στα πλαίσια αυτά είναι το “ξέπλυμα κακής φήμης” (whitewashing) και η “εικονική συναλλαγή” (false trading) —βλ. Ενότητα 2.5.2.

Το BitTorrent [26] είναι ένα παράδειγμα μιας πραγματικής εφαρμογής που υλοποιεί ένα ανταποδοτικό μηχανισμό κινήτρων της μορφής αυτής, χωρίς όμως να βασίζεται σε πληροφορία σχετική με τις συναλλαγές των χρηστών στο παρελθόν: ομότιμοι χρήστες που καταφορτώνουν ταυτόχρονα ένα (μεγάλο) αρχείο από μία πηγή ανταλλάσσουν “επί τόπου” διαφορετικά τμήματα του ίδιου αρχείου μειώνοντας το χρόνο καταφόρτωσης για όλους. Επειδή ο μηχανισμός κινήτρων αυτός δεν βασίζεται στην μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της συμπεριφοράς των χρηστών, είναι απλός στην υλοποίηση και σε μεγάλο βαθμό ανθεκτικός στις παραπάνω επιθέσεις. Ωστόσο, δεδομένου ότι είναι σχεδιασμένος να δίνει κίνητρα για το διαμοιρασμό εύρους ζώνης, εφαρμογές διαμοιρασμού αρχείων που βασίζονται στην τεχνολογία αυτή δεν επιτυγχάνουν απαραίτητα ικανοποιητική διαθεσιμότητα περιεχομένου. Ειδικά όσο αυξάνεται

⁴η εφαρμογή Kazaa είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μίας πραγματικής εφαρμογής που προσπάθησε να υλοποιήσει έναν ανταποδοτικό μηχανισμό κινήτρων, παρέχοντας προτεραιότητα σε χρήστες που συνεισφέρουν περισσότερο περιεχόμενο συγκριτικά με αυτό που καταναλώνουν, το οποίο απέτυχε εξαιτίας μίας παρανόμης, τροποποιημένης, έκδοσης του λογισμικού της —<http://www.k-lite.tk/>.

το εύρος ζώνης πρόσβασης και αποφεύγεται όλο και περισσότερο η χρέωση με βάση τη χρήση από τους παροχείς δικτυακών υπηρεσιών, ο χρόνος καταφόρτωσης μειώνεται σημαντικά και, μελλοντικά, επιπλέον κίνητρα θα πρέπει ίσως να δίνονται στους χρήστες ώστε να παραμένουν συνδεδεμένοι στο σύστημα και να διαμοιράζονται τα αρχεία τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι εφαρμογές που βασίζονται στην τεχνολογία BitTorrent συνήθως παρέχουν ένα σχετικά μικρό πλήθος από πολύ δημοφιλή (και συχνά πολύ μεγάλα) αρχεία.

Πρόσφατα άρθρα στον τύπο (με αφετηρία ένα άρθρο του Chris Anderson⁵) τονίζουν τη σημασία που έχει το μεγάλο εκείνο τμήμα του περιεχομένου του οποίου τα μεμονωμένα αντικείμενα δεν είναι δημοφιλή, αλλά που όλα μαζί αποτελούν την πλειοψηφία του συνόλου των αιτήσεων, με αποτέλεσμα να δημιουργούν πολλές φορές αθροιστικά μεγαλύτερη αξία από τα δημοφιλή αντικείμενα. Η διαθεσιμότητα του τμήματος αυτού του περιεχομένου σε ένα διομοτίμο σύστημα απαιτεί διαφορετικού είδους κίνητρα από αυτά που συνήθως μελετούνται στη βιβλιογραφία των οικονομικών των διομοτίμων συστημάτων και εφαρμόζονται από δημοφιλείς εφαρμογές (όπως το BitTorrent).

Αντίθετα, το Direct Connect⁶ είναι μία άλλη διομοτίμη εφαρμογή διαμοιρασμού αρχείων, η οποία βασίζεται κυρίως σε κεντρικό έλεγχο για να επιβάλλει κανόνες ελάχιστης συνεισφοράς διαγράφοντας χρήστες που δεν συμμορφώνονται, με βάση την IP διεύθυνσή τους. Οι περισσότεροι από τους κανόνες αυτούς καθορίζουν ένα ελάχιστο συνολικό μέγεθος αρχείων περιεχομένου που οφείλει να διαμοιράζεται ο κάθε χρήστης χωρίς κανένα περιορισμό στο πλήθος των αρχείων που δικαιούται να καταφορτώσει και έτσι δίνουν άμεση προτεραιότητα στη διαθεσιμότητα περιεχομένου. Είναι μάλιστα αξιοσημείωτο το ότι οι συμμετέχοντες στο δίκτυο της εφαρμογής Direct Connect έχουν συνήθως ευρυζωνικές συνδέσεις πρόσβασης και πολύ μεγάλες δυνατότητες σε αποθηκευτικό χώρο και η εφαρμογή δεν παρέχει καμία υπηρεσία αποδοτικής διανομής περιεχομένου, όπως για παράδειγμα η πολύ δημοφιλής τεχνολογία κατανεμημένης καταφόρτωσης (swarming). Έτσι, το BitTorrent και το Direct Connect αποτελούν παραδείγματα των δύο ακραίων τάσεων στο λογισμικό διαμοιρασμού αρχείων, το οποίο εκτείνεται σε γενικές γραμμές από λογισμικό που δίνει έμφαση κυρίως στη διανομή του περιεχομένου (όπως το BitTorrent) και από λογισμικό που δίνει έμφαση κυρίως στη διαθεσιμότητα του περιεχομένου (όπως το Direct Connect).

Ορίζουμε τη διαθεσιμότητα περιεχομένου ως το συνολικό πλήθος διαφορετικών αρχείων

⁵<http://www.wired.com/wired/archive/12.10/tail.html>

⁶Κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διατριβής αυτής η επίσημη ιστοσελίδα του Direct Connect βγήκε εκτός λειτουργίας εξαιτίας των νομικών απειλών της RIAA —βλ. http://en.wikipedia.org/wiki/NeoModus_Direct_Connect.

που είναι διαθέσιμα σε ένα διομότιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων στη μονάδα του χρόνου. Έτσι, η συνεισφορά του κάθε ομότιμου χρήστη όσον αφορά τη διαθεσιμότητα περιεχομένου συνίσταται στο πλήθος των αρχείων που είναι αποθηκευμένα στον υπολογιστή του και στο χρόνο που μένει συνδεδεμένος στο σύστημα. Πιστεύουμε ότι ο χρόνος αυτός (η διαθεσιμότητα του χρήστη) αποτελεί κρίσιμο συστατικό της συνεισφοράς αυτής, ειδικά όσο περισσότεροι χρήστες αποθηκεύουν όλο και περισσότερο περιεχόμενο στους υπολογιστές τους για προσωπική χρήση και το εύρος ζώνης πρόσβασης γίνεται όλο και πιο φθηνό και σε περίσσεια. Στο μεγαλύτερο μέρος της εργασίας μας λοιπόν υποθέτουμε ότι το κόστος αναφόρτωσης είναι αμελητέο. Επιπλέον, επιλέγουμε να επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας σε περιεχόμενο για το οποίο η πιθανότητα να αναζητηθεί είναι μικρή αλλά η συνολική αξία από την ικανοποίηση τέτοιων αιτήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή για τα δημοφιλή αντικείμενα, κυρίως επειδή το συνολικό πλήθος τους είναι πολύ μεγαλύτερο όπως ήδη αναφέρθηκε, αλλά και επειδή εν γένει είναι πιο δύσκολο να βρει κανείς μη δημοφιλή ή σπάνια αντικείμενα πολλές φορές ακόμα και αν επιθυμεί να πληρώσει για αυτά. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα ασχοληθούμε με φαινόμενα συμφόρησης⁷. Με βάση τις υποθέσεις αυτές η διαθεσιμότητα περιεχομένου είναι ένα αγαθό κοινής ωφέλειας (public good): η αντιγραφή ενός αρχείου από έναν χρήστη δεν εμποδίζει κάποιον άλλον ομότιμο χρήστη να το αντιγράψει, αλλά η συνεισφορά αρχείων στην κοινή δεξαμενή δημιουργεί κόστος.

Η σχεδίαση των μηχανισμών κινήτρων που απαιτούνται ώστε ένα τέτοιο σύστημα να αντιμετωπίσει το φαινόμενο της ανέξοδης συμμετοχής και να λειτουργήσει σε αποδεκτά επίπεδα αποδοτικότητας προϋποθέτει την απάντηση πολύ ενδιαφέροντων ερευνητικών ερωτημάτων σχετικών και με την οικονομική μοντελοποίηση του προβλήματος αλλά και την υλοποίηση του συστήματος. Ο πρώτος μας στόχος είναι να διατυπώσουμε ένα απλό αλλά εκφραστικό οικονομικό μοντέλο ενός διομότιμου συστήματος διαμοιρασμού αρχείων και να ορίσουμε την έννοια της οικονομικής αποδοτικότητας στο πλαίσιο αυτό. Για να τον επιτύχουμε θα πρέπει πρώτα να προσδιορίσουμε ποιές είναι οι πιο σχετικές έννοιες από την θεωρία των οικονομικών και να εξετάσουμε τα υπάρχοντα αποτελέσματα αξιολογώντας το κατά πόσο μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση μας.

Ο γενικότερος αντικειμενικός σκοπός του θεωρητικού αυτού τμήματος της διατριβής αυτής είναι να επινοήσουμε κατάλληλους μηχανισμούς κινήτρων, οι οποίοι θα οδηγούσαν το σύστημα

⁷ Παρατηρείστε ότι η υπόθεση μας αυτή συνεχίζει να ισχύει ακόμα και με την ύπαρξη δημοφιλών αντικειμένων όταν αρκετά αντίγραφα τους είναι διαθέσιμα ώστε το καθένα από αυτά να έχει ζήτηση αντίστοιχη με ένα μη δημοφιλές αντικείμενο.

σε ένα αποδοτικό σημείο ισορροπίας, όπως αυτό καθορίζεται από το μοντέλο μας, υπό διαφορετικές υποθέσεις για σημαντικές παραμέτρους του συστήματος και περιορισμούς ως προς την διαθέσιμη πληροφορία. Θα εστιάσουμε στη διαθεσιμότητα του περιεχομένου, προσεγγίζοντας την παροχή πόρων σε ένα διομότιμο σύστημα ως ένα πρόβλημα αυτόνομης παροχής αγαθών κοινής ωφέλειας (private provision of a public good). Επιθυμούμε όμως να εξετάσουμε και την περίπτωση όπου το κόστος αναφόρτωσης και συμφόρησης δεν είναι αμελητέο κατασκευάζοντας και αναλύοντας διαφορετικά οικονομικά μοντέλα. Τέλος, θα μελετήσουμε υπό ποιές προϋποθέσεις μπορούν να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα —και με ποιούς συγκεκριμένους μηχανισμούς— για την απόκτηση για πρώτη φορά και περαιτέρω διάθεση αντικειμένων μεγάλης αξίας σε μία κοινότητα ομότιμων χρηστών.

Ο τελικός μας στόχος είναι να σχεδιάσουμε ένα σύστημα που υλοποιεί τους μηχανισμούς κινήτρων που θα προκύψουν από την θεωρητική μας εργασία το οποίο να μην απαιτεί την καταγραφή και διαχείριση του ιστορικού των χρηστών και/ή την ικανότητα μόνιμης διαγραφής τους από την κοινότητα, ακολουθώντας τις αρχές υλοποίησης του BitTorrent και αποφεύγοντας έτσι τις σημαντικές δυσκολίες που προκύπτουν όσον αφορά την υλοποίηση ενός αξιόπιστου συστήματος διαχείρισης της πληροφορίας χρήσης στο πλήρως κατανεμημένο περιβάλλον των διομότιμων συστημάτων. Επιθυμούμε τέλος να προσδιορίσουμε ποιά τμήματα των λύσεων που προτείνουμε έχουν γενικότερη αξία και να εξετάσουμε υπό ποιές προϋποθέσεις και σε ποιό βαθμό θα μπορούσαν να αποτελέσουν λύση (ή τμήμα λύσης) για την παροχή πόρων σε διαφορετικές διομότιμες εφαρμογές όπως το υπολογιστικό πλέγμα (grid computing) ή τα αυθόρμητα δίκτυα (ad-hoc networks).

Έτσι, τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που μελετούμε στη διατριβή αυτή περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Ποιά είναι τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά των διομότιμων συστημάτων όσον αφορά την οικονομική μοντελοποίηση και τη σχεδίαση μηχανισμών κινήτρων για την αποδοτική παροχή πόρων;
- Ποιό είναι το απλούστερο οικονομικό μοντέλο που εκφράζει την έννοια της διαθεσιμότητας περιεχομένου στα διομότιμα συστήματα διαμοιρασμού; Σε ποιό βαθμό παρόμοια μοντέλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή κινήτρων σε διαφορετικά διομότιμα συστήματα;
- Ποιοί είναι οι αντισταθμιστικοί παράγοντες που προκύπτουν εξαιτίας των περιορισμών

της κατανεμημένης υλοποίησης και της διαθεσιμότητας της πληροφορίας για τον τύπο των χρηστών σε μία πραγματική διομότιμη εφαρμογή;

- Ποιές είναι οι συνέπειες της πιθανής αρνητικής επίδρασης των αιτήσεων για περιεχόμενο εξαιτίας του κόστους αναφόρτωσης και/ή της συμφόρησης; Σε ποίο βαθμό μπορούμε να αντιμετωπίσουμε την επιπρόσθετη πολυπλοκότητα στην οικονομική μοντελοποίηση του προβλήματος;
- Τι είδους αγορές θα πρέπει να δημιουργηθούν ώστε αντικείμενα μεγάλης αξίας να είναι εφικτό να εισαχθούν σε μία διομότιμη κοινότητα;
- Μπορούμε να σχεδιάσουμε ρεαλιστικά υλοποιήσιμους μηχανισμούς κινήτρων που να μπορούν να εξαλείψουν ή τουλάχιστον να περιορίσουν το φαινόμενο της ανέξοδης συμμετοχής και να οδηγήσουν το σύστημα κοντά στο βέλτιστο σημείο ισορροπίας, σύμφωνα με τη θεωρία; Με βάση ποιές υποθέσεις;

1.3 Συνεισφορά

Προσπαθήσαμε να απαντήσουμε στα παραπάνω ερωτήματα στη σειρά που παρατεθήκανε. Δηλαδή, ακολουθήσαμε μία από πάνω προς τα κάτω προσέγγιση προσπαθώντας πρώτα να μοντελοποιήσουμε και να αναλύσουμε την παροχή πόρων σε ένα διομότιμο σύστημα και να σχεδιάσουμε τους βέλτιστους μηχανισμούς κινήτρων με σκοπό τη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας ενός συστήματος διαμοιρασμού αρχείων και στη συνέχεια εξερευνήσαμε τρόπους για την επιβολή των μηχανισμών αυτών (ή καλές προσεγγίσεις αυτών) σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον. Το γεγονός ότι αναζητούμε ρεαλιστικές (υλοποιήσιμες) προσεγγίσεις, μας ανάγκασε να αποφύγουμε τη χρήση τιμολόγησης και πληρωμών και να περιοριστούμε στη σχεδίαση πρακτικών κανόνων οι οποίοι να ελέγχουν άμεσα την κατανάλωση και/ή την παροχή πόρων⁸.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διαθεσιμότητα του περιεχομένου είναι ένα αγαθό κοινής ωφέλειας. Έτσι, το πρόβλημα μας μοιάζει με ένα κλάσσικο πρόβλημα της οικονομικής επιστήμης: την αυτόνομη παροχή ενός αγαθού κοινής ωφέλειας. Σύμφωνα με την θεωρία των οικονομικών (βλ. [91]), η ύπαρξη εξωτερικοτήτων (externalities) στο πρόβλημα αυτό καθιστά μη αποδοτικές τις προσεγγίσεις που βασίζονται στη δημιουργία ελεύθερων αγορών (είτε με πραγματικό είτε με εικονικό συνάλλαγμα) για τον έλεγχο ενός διομότιμου συστήματος και έτσι κάποιου είδους ρύθμισης απαιτείται ώστε το σύστημα να οδηγηθεί σε αποδοτικά σημεία ισορροπίας,

⁸Οι τιμές χρησιμοποιούνται μόνο για συγκριτικούς σκοπούς.

αυτά στα οποία μεγιστοποιείται η κοινωνική ευημερία. Στην περίπτωση αυτή, η μεγαλύτερη πρόκληση που έχει να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής του συστήματος είναι η μη διαθεσιμότητα της πληροφορίας για τους τύπους των χρηστών η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό μίας οικονομικά αποδοτικής παροχής και κατανομής πόρων.

Ωστόσο, από την πρόσφατη ασυμπτωτική ανάλυση ορισμένων οικονομικών μοντέλων για αγαθά κοινής ωφέλειας (βλ. [30] και τις σχετικές αναφορές που περιέχονται σε αυτό) προκύπτει το εξής σημαντικό αποτέλεσμα: υπό συνθήκες ελλιπούς πληροφόρησης (όταν μόνο η κατανομή των τύπων των χρηστών και το πλήθος τους είναι γνωστά στον σχεδιαστή του συστήματος) και όταν ο στόχος μας είναι η μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας, ένας μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς μπορεί να είναι ασυμπτωτικά βέλτιστος όσο το πλήθος των συμμετεχόντων, n , τείνει στο άπειρο. Μάλιστα, μπορούμε να υπολογίσουμε την απαιτούμενη συνεισφορά λύνοντας ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ένας τέτοιος απλός μηχανισμός εξαλείφει το φαινόμενο της ανέξοδης συμμετοχής, χαρακτηρίζεται από συμβατότητα κινήτρων σε ό,τι αφορά τις επιλογές των χρηστών, και επιτυγχάνει τιμή κοινωνικής ευημερίας που απέχει $O(1/n)$ από αυτή που επιτυγχάνεται από τον θεωρητικά βέλτιστο μηχανισμό για το ίδιο πρόβλημα. Προσαρμόζουμε τα οικονομικά μοντέλα αυτά για την περίπτωση του διομότιμου διαμοιρασμού αρχείων και δείχνουμε στα πλαίσια ενός αριθμητικού παραδείγματος τις ιδιαίτερα ελκυστικές ιδιότητες του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς, ο οποίος απαιτεί από κάθε συμμετέχοντα να διαμοιράζεται ένα συγκεκριμένο πλήθος αρχείων στη μονάδα του χρόνου. Το αποτέλεσμα αυτό σημαίνει ότι δεν είναι απαραίτητο να συλλέξουμε μεγάλα ποσά πληροφορίας και/ή να αναλωθούμε σε πολύπλοκους υπολογισμούς για να δημιουργήσουμε τα σωστά κίνητρα σε ένα μεγάλο σύστημα ομότιμων χρηστών.

Έτσι, εστιάζουμε στον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς και αναλύουμε μερικά ενδιαφέροντα θεωρητικά ζητήματα που σχετίζονται με την υλοποίηση του σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα, μελετούμε σε βάθος τη δυνατότητα σχηματισμού διαφορετικών υπό-ομάδων όταν οι ομότιμοι χρήστες ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες (όπως για παράδειγμα χρήστες που έχουν ευρυζωνική πρόσβαση και άλλους που έχουν απλή τηλεφωνική σύνδεση). Η ανάλυση αυτή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς σύμφωνα με μετρήσεις τα διομότιμα συστήματα αποτελούνται πράγματι από χρήστες με ιδιαίτερα ετερογενείς δυνατότητες και συμπεριφορά. Στη διατριβή αυτή ερευνούμε πώς θα μπορούσε κανείς να εκμεταλλευτεί την επιπλέον αυτή πληροφορία ώστε να βελτιώσει την αποδοτικότητα του συστήματος. Προσδιορίζουμε υπό ποιές προϋποθέσεις οι χρήστες θα συμφωνούσαν να συμμετέχουν δηλώνοντας την πραγματική κατηγορία στην οποία ανήκουν και τότε δεν θα είχαν το κίνητρο να το κάνουν

αυτό ή ακόμα και να προτιμήσουν να σχηματίσουν τη δική τους απομονωμένη ομάδα, αναλύοντας τα αντισταθμιστικά οφέλη των διαφορετικών προσεγγίσεων. Επεκτείνουμε επίσης το οικονομικό μας μοντέλο ώστε να λαμβάνει υπόψη του τη δημοτικότητα των αρχείων και συζητάμε τις ιδιότητες των σημείων ισορροπίας που προκύπτουν. Επιπλέον, μελετάμε την εξέλιξη του συστήματος προς το σημείο ισορροπίας στα πρώτα του βήματα, όπου και ο σχεδιαστής του συστήματος και οι χρήστες ακόμα μαθαίνουν τις παραμέτρους του συστήματος. Τέλος, αναλύουμε το παίγνιο που προκύπτει όταν οι χρήστες γνωρίζουν ότι ένας μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, αλλά η κατανομή των τύπων τους δεν είναι γνωστή στον σχεδιαστή του συστήματος.

Μελετάμε επίσης την περίπτωση που η χρήση του συστήματος επιφέρει κόστος στους υπόλοιπους συμμετέχοντες (αρνητικές εξωτερικότητες). Για να το κάνουμε αυτό, διατυπώνουμε ένα γενικότερο οικονομικό μοντέλο στο οποίο συμπεριλαμβάνουμε το κόστος αναφόρτωσης στο συνολικό κόστος διαμοιρασμού αρχείων. Στο μοντέλο αυτό, κάθε ομότιμος χρήστης χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους: την παράμετρο χρησιμότητας (πόσο πολύτιμο είναι το σύστημα για αυτόν) και τον ρυθμό αιτήσεων του για περιεχόμενο. Αντίθετα, στο βασικό μας μοντέλο, έχοντας υποθέσει ότι η αντιγραφή ενός αρχείου προκαλεί αμελητέο κόστος στον χρήστη που το προσφέρει, οι χρήστες χαρακτηρίζονται μόνο από την παράμετρο χρησιμότητάς τους. Προτείνουμε στη συνέχεια μία γενική κατηγορία κανόνων ανταποδοτικότητας (reciprocity rules), οι οποίοι επιβάλλουν μία επιθυμητή σχέση ανάμεσα στην κατανάλωση (ελέγχοντας το ρυθμό αιτήσεων ο οποίος προκαλεί κόστος) και την συνεισφορά πόρων (παρέχοντας κίνητρο για συνεισφορά η οποία δημιουργεί όφελος), και υπολογίζουμε τους βέλτιστους συντελεστές τους (και τις αντίστοιχες βέλτιστες τιμές) στα πλαίσια του μοντέλου μας. Δείχνουμε ότι ένας γραμμικός τέτοιος κανόνας μπορεί να μεγιστοποιήσει την κοινωνική ευημερία, αλλά για τον υπολογισμό των συντελεστών του απαιτείται πλήρης πληροφόρηση και αυτοί θα πρέπει να είναι εν γένει προσωποποιημένοι (διαφορετικοί για κάθε χρήστη)⁹. Συνεπώς, πρέπει κανείς να συμβιβαστεί σε ό,τι αφορά την κοινωνική ευημερία εάν ένας κοινός κανόνας για όλους τους χρήστες είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί, όπως συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις. Δυστυχώς, η βέλτιστη ομοιόμορφη πολιτική με ελλιπή πληροφόρηση δεν είναι γνωστή και δεν είναι δυνατόν να αξιολογήσουμε τη συμπεριφορά του απλού μας κανόνα στο όριο βασισμένοι στην πληροφορία της κατανομής των τύπων των χρηστών όπως κάναμε στην περίπτωση του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς. Συνεπώς, μονό απλοί ευρηστικοί

⁹αντίθετα με τις τιμές στην περίπτωση των οποίων μπορούμε για μεγάλα συστήματα να υπολογίσουμε μία ενιαία τιμή που θα τα οδηγούσε στο βέλτιστο σημείο αποδοτικότητας.

κανόνες θα μπορούσαν να εξεταστούν στην περίπτωση αυτή, οι οποίοι αν και θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στην πράξη για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος έχουν περιορισμένο θεωρητικό ενδιαφέρον. Τέλος, επεκτείνουμε το μοντέλο μας ώστε να συμπεριλαμβάνει την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται από τους χρήστες στα πλαίσια μίας πρωτότυπης διομότιμης εφαρμογής για το διαμοιρασμό ασύρματης πρόσβασης και υπολογίζουμε και πάλι τις βέλτιστες τιμές και κανόνες.

Ολοκληρώνουμε το θεωρητικό τμήμα της εργασίας μας αντιμετωπίζοντας ένα διαφορετικό πρόβλημα: την παροχή κινήτρων για την εισαγωγή αντικειμένων μεγάλης αξίας σε μία διομότιμη κοινότητα. Διατυπώνουμε ένα μοντέλο το οποίο θεωρεί τους διομότιμους χρήστες ανεξάρτητες οικονομικές οντότητες που πουλάνε και αγοράζουν περιεχόμενο. Εξερευνούμε τις βασικές οικονομικές ιδιότητες της αγοράς που σχηματίζεται και τα αντίστοιχα αντισταθμιστικά οφέλη όσον αφορά τη διανομή του περιεχομένου. Αρχικά, υποθέτουμε ότι κανένας ομότιμος χρήστης δεν έχει το περιεχόμενο, και ότι υπάρχει ένα σημαντικό αρχικό κόστος για να το φέρει κάποιος στο εσωτερικό της διομότιμης κοινότητας. Η διαπραγματευτική δύναμη και συνεπώς η τιμή που μπορεί να ορισθεί από έναν χρήστη που έχει το περιεχόμενο εξαρτάται από το κόστος για την μεταφορά του προς τον πελάτη, την αξία του, και το πλήθος των διαφορετικών χρηστών που προσφέρουν το ίδιο αντικείμενο. Αναλύουμε τη σημασία παραμέτρων όπως το μέγιστο πλήθος ανταγωνιστικών προσφορών που επιτρέπει το σύστημα, η δημοτικότητα του περιεχομένου, η αξία που προσφέρει στους χρήστες, και το κόστος μεταφοράς, λαμβάνοντας υπ' όψη το ρίσκο του πρώτου χρήστη που θα αποφασίσει να πληρώσει το αρχικό μεγάλο κόστος ενός αντικειμένου. Είναι φανερό ότι η παντελής έλλειψη ελέγχου της διαθέσιμης πληροφορίας μπορεί να είναι καταστροφική σε ορισμένες περιπτώσεις όπου το αρχικό κόστος είναι σημαντικό. Σκοπός του μοντέλου μας είναι να επιβεβαιώσει την εκτίμηση αυτή αλλά και να μας βοηθήσει να διατυπώσουμε ορισμένα ενδιαφέροντα ποσοτικά αποτελέσματα.

Αν και το βασικό κίνητρο της διατριβής αυτής ήταν η μελέτη των δύσκολων θεωρητικών ζητημάτων που σχετίζονται με την παροχή πόρων σε διομότιμα συστήματα, ο τελικός μας στόχος είναι να προτείνουμε μηχανισμούς κινήτρων οι οποίοι να έχουν ενδιαφέρουσες οικονομικές ιδιότητες αλλά και να μπορούν να επιβληθούν σε ένα ρεαλιστικό διομότιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων έτσι ώστε να αποτελούν πιθανές πρακτικές λύσεις του προβλήματος της ανέξοδης συμμετοχής.

Έτσι, εξερευνούμε τρόπους ώστε να μπορέσουμε να υλοποιήσουμε οικονομικούς μηχανισμούς κινήτρων σε ένα διομότιμο σύστημα χωρίς μνήμη, το οποίο δηλαδή να μην έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει και να διαχειρίζεται το ιστορικό των χρηστών αλλά να βασίζεται

μόνο στο χρόνο που οι χρήστες καταναλώνουν πόρους για να εξασφαλίσει ότι θα προσφέρουν τους απαραίτητους πόρους, σύμφωνα με το αντίστοιχο οικονομικό μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς, απαιτούμε κάθε χρήστη να διαμοιράζεται ένα συγκεκριμένο πλήθος αρχείων της επιλογής του, ανεξάρτητα από το ρυθμό αιτήσεων (και τον δικό του και των υπολοίπων χρηστών). Σημειώστε ότι η ανεξαρτησία του μηχανισμού μας από τον ρυθμό αιτήσεων οφείλεται στο γεγονός ότι εστιάζουμε στη διαθεσιμότητα του περιεχομένου αντί για την αποδοτική διανομή του, και ότι έχουμε θεωρήσει ότι το κόστος αναφόρτωσης είναι αμελητέο συγκριτικά με το κόστος διαμοιρασμού¹⁰. Θα πρέπει όμως να δώσουμε κίνητρα στους χρήστες να παραμένουν στο σύστημα παρέχοντας περιεχόμενο, και όχι απλά να το έχουν κάνει κάποια στιγμή στο παρελθόν. Όπως έχει ήδη αναφερθεί αυτό πιστεύουμε ότι θα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της συνεισφοράς ενός χρήστη σε μελλοντικά διομήτιμα συστήματα.

Προτείνουμε συνεπώς τον ακόλουθο μηχανισμό κινήτρων “συνεισφοράς κατά την κατανάλωση” ο οποίος επιβάλλεται από τους ομότιμους χρήστες που παρέχουν υπηρεσίες (αναφορώνουν ένα αρχείο), οι οποίοι

1. ελέγχουν ότι ο χρήστης που καταφορτώνει ένα αρχείο διαμοιράζεται και ο ίδιος ένα προκαθορισμένο πλήθος νόμιμων αρχείων και
2. χρησιμοποιούν μία προκαθορισμένη (όχι πολύ υψηλή) ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ώστε να εξασφαλίσουν ότι τα αρχεία αυτά θα είναι διαθέσιμα στο σύστημα για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα.

Παρατηρήστε ότι ο μηχανισμός αυτός δεν επιβάλλει την ίδια συνεισφορά για όλους τους διομήτιμους χρήστες, όπως ιδανικά θα θέλαμε. Ο λόγος είναι ότι η τελική συνεισφορά ενός χρήστη εξαρτάται από το ρυθμό αιτήσεων του, αφού είναι μόνο κατά τη διάρκεια της αντιγραφής ενός αρχείου που αναγκάζεται να συνεισφέρει (γεγονός που όπως θα δούμε στην Ενότητα 5.4.5 υπό κάποιες προϋποθέσεις μπορεί να είναι και προς όφελος του συστήματος). Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένα σημαντικά θέματα υλοποίησης και κινήτρων που προκύπτουν στο πλαίσιο αυτό (π.χ. η εξασφάλιση ότι τα διαμοιραζόμενα αρχεία είναι νόμιμα, η ανάγκη για την ύπαρξη ομότιμων χρηστών αυξημένων υποχρεώσεων ώστε να αποφεύγεται η ανάγκη για δημιουργία κυκλικών

¹⁰ Παρατηρήστε ότι αυτό ισχύει ακόμα περισσότερο επειδή σύμφωνα με τις απαιτήσεις του μηχανισμού μας το κόστος αναφόρτωσης επιβάλλεται στους χρήστες μόνο ενώσω καταναλώνουν πόρους για τον εαυτό τους. Και οι [47] δείχνουν ότι σε πολλές ρεαλιστικές περιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που θεωρούμε στην διατριβή αυτή, δίνοντας προτεραιότητας στα TCP ACK πακέτα καθιστά το κόστος αναφόρτωσης αμελητέο κατά τη διάρκεια παράλληλης καταφόρτωσης.

αιτήσεων, κ.ά.). Ωστόσο, πιστεύουμε ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός αποτελεί έναν ικανοποιητικό συμβιβασμό ανάμεσα στην οικονομική αποδοτικότητα και την ρεαλιστική υλοποίηση και θα μπορούσε να οδηγήσει σε ενδιαφέρουσες και πρακτικές λύσεις για την παροχή κινήτρων ως προς τη διαθεσιμότητα περιεχομένου σε διομότιμα συστήματα.

Στη διατριβή αυτή περιγράφουμε τη λειτουργικότητα που χρειάζεται να υλοποιηθεί για την επιβολή του προτεινόμενου μηχανισμού και συζητάμε τα επιπλέον θέματα κινήτρων που προκύπτουν στο πλαίσιο αυτό, προτείνοντας μερικές πρακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση τους. Ορίζουμε επίσης και αναλύουμε ένα κατάλληλο οικονομικό μοντέλο με ενδιαφέρουσες ιδιότητες, με σκοπό να κατασκευάσουμε ένα θεωρητικό πλαίσιο για τη μελέτη και αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προτεινόμενου μηχανισμού αλλά και να προσφέρουμε χρήσιμα στοιχεία για την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του: το πλήθος των αρχείων που οφείλουν να διαμοιράζονται οι χρήστες και, κυρίως, την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων που θα χρησιμοποιείται από όλους τους χρήστες στο σύστημα. Τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι η απόδοση του ως προς την οικονομική αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται, για ορισμένες τιμές των παραμέτρων του συστήματος, μπορεί να είναι συγκρίσιμη με τη βέλτιστη. Επιπλέον, το μοντέλο αυτό παρέχει τις προϋποθέσεις για να συγκρίνουμε τον προτεινόμενο μηχανισμό με διαφορετικούς μηχανισμούς που παρέχουν κίνητρα για συνεισφορά θέτοντας περιορισμούς στην κατανάλωση πόρων όπως ο δημοφιλής στη βιβλιογραφία κανόνας που απαιτεί τον ισοσκελισμό αναφορτώσεων και καταφορτώσεων που πραγματοποιούνται από τον κάθε ομότιμο χρήστη. Δείχνουμε ότι το γεγονός ότι στα πλαίσια του προτεινόμενου μηχανισμού μπορούμε να ρυθμίσουμε κατάλληλα την κρίσιμη παράμετρο του (τον χρόνο που απαιτείται να παραμένουν συνεδεδεμένοι οι χρήστες για κάθε καταφόρτωση) οδηγεί σε αυξημένη αποδοτικότητα σε σύγκριση με αυτή που επιτυγχάνεται από τον κανόνα που εξισώνει τις αναφορτώσεις με τις καταφορτώσεις ανά χρήστη. Επιπλέον, η ελαστικότητα του μηχανισμού μας σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη αναλογία μεταξύ αναφορτώσεων και καταφορτώσεων ανά χρήστη εξασφαλίζει μεγαλύτερη σταθερότητα για το σύστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό για την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μηχανισμού, δεδομένων των μειωμένων απαιτήσεων για την υλοποίηση του.

Ολοκληρώνοντας τη διατριβή αυτή, κάναμε μερικές πρώτες προσπάθειες να εξετάσουμε την εφαρμογή των αποτελεσμάτων μας σε διαφορετικά διομότιμα συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, προτείνουμε ένα οικονομικό μοντέλο αγαθών κοινής ωφέλειας για την διομότιμη εφαρμογή πλέγματος για επιστημονικά πειράματα (scientific grids) και εξετάζουμε την δυνατότητα να υλοποιηθεί ένας μηχανισμός συνεισφοράς κατά την κατανάλωση για την παροχή κινήτρων στην

υπηρεσία της διομότιμης προώθησης πακέτων σε αυθόρμητα δίκτυα. Και τα δύο αποτελούν κομμάτι της τρέχουσας και μελλοντικής ερευνητικής μας εργασίας.

1.4 Περιεχόμενα διατριβής και δημοσιεύσεις

Παρουσιάζουμε στην ενότητα αυτή τα περιεχόμενα της διατριβής συνοψίζοντας ταυτόχρονα και τη συνεισφορά μας. Στο Κεφάλαιο 2, αναλύουμε τις πιο σημαντικές έννοιες που σχετίζονται με τη σχεδίαση μηχανισμών κινήτρων σε διομότιμα συστήματα και παρουσιάζουμε το μεγαλύτερο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας στην ερευνητική αυτή περιοχή προσδιορίζοντας ταυτόχρονα τη θέση της δικής μας εργασίας. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζουμε μερικά σημαντικά αποτελέσματα από την οικονομική θεωρία των αγαθών κοινής ωφέλειας και επιχειρηματολογούμε ως προς την εφαρμοσιμότητα τους για την δημιουργία κατάλληλων κινήτρων παροχής πόρων σε διάφορα διομότιμα συστήματα όπως ο διαμοιρασμός αρχείων, το υπολογιστικό πλέγμα, και ο διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης. Στο Κεφάλαιο 4, διατυπώνουμε ένα οικονομικό μοντέλο για τον διομότιμο διαμοιρασμό αρχείων εστιάζοντας στη διαθεσιμότητα περιεχομένου και χρησιμοποιούμε ένα απλό παράδειγμα του μοντέλου μας ώστε να συγκρίνουμε την αποδοτικότητα διαφορετικών κινήτρων σε συνθήκες πλήρους και ελλιπούς πληροφόρησης καταδεικνύοντας τις ελκυστικές ιδιότητες του προτεινόμενου μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς· δείτε επίσης το [10]. Στη συνέχεια εστιάζουμε στις πολιτικές προκαθορισμένης συνεισφοράς και αναλύουμε μερικά θεωρητικά θέματα που σχετίζονται με την εφαρμογή του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς σε μία ρεαλιστική διομότιμη εφαρμογή, όπως τα πλεονεκτήματα του διαχωρισμού των χρηστών σε ομάδες και τα ζητήματα κινήτρων που προκύπτουν, την αντιμετώπιση της ετερογένειας του περιεχομένου ως προς τη δημοτικότητα του, την εξασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος, και τον υπολογισμό των τιμών σημαντικών παραμέτρων του που αρχικά είχαμε υποθέσει ότι είναι γνωστές· δείτε επίσης το [12]. Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζουμε και αναλύουμε σε βάθος τεχνικά και θεωρητικά ζητήματα για τη σχεδίαση μιας ρεαλιστικής εκδοχής του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς, η οποία δεν απαιτεί την ύπαρξη μνήμης για την καταγραφή και διαχείριση πληροφοριών χρήσης αλλά βασίζεται μόνο στο χρόνο που οι ομότιμοι χρήστες καταναλώνουν πόρους για να εξασφαλίσει ότι συνεισφέρουν όσο απαιτείται· δείτε επίσης το [11]. Στο Κεφάλαιο 6, προτείνουμε ένα πιο λεπτομερές οικονομικό μοντέλο το οποίο συμπεριλαμβάνει και το κόστος αναφόρτωσης ενός αρχείου στο κόστος διαμοιρασμού αρχείων. Εισάγουμε μία γενική κατηγορία ανταποδοτικών κανόνων που συνδέουν την κατανάλωση με τη συνεισφορά οι οποίοι θα μπορούσαν να χρη-

σιμοποιηθούν αντί τιμών για τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας και υπολογίζουμε τις βέλτιστες τιμές και κανόνες υπό διαφορετικές προϋποθέσεις σε ό,τι αφορά τη διαθέσιμη πληροφορία για τους τύπους των χρηστών. Εισάγουμε επίσης την έννοια της ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται από κάθε χρήστη στα πλαίσια μίας πρωτότυπης διομότιμης εφαρμογής για το διαμοιρασμό ασύρματης πρόσβασης και υπολογίζουμε και πάλι τις βέλτιστες τιμές και κανόνες (δείτε τα [8], [9]). Το σύνολο της εργασίας που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνεται στο [7]. Στο Κεφάλαιο 7, προτείνουμε ένα μοντέλο αγοράς για την περίπτωση που επιθυμούμε να δώσουμε τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες να αποκτήσουν περιεχόμενο μεγάλης αξίας από μία εξωτερική πηγή και να το διαθέσουν στην διομότιμη κοινότητα τους. Στα πλαίσια του μοντέλου αυτού αναλύουμε τα αντισταθμιστικά οφέλη που προκύπτουν ως προς την πληροφορία που είναι διαθέσιμη στους υποψήφιους αγοραστές· δείτε επίσης το [6]. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8, συνοψίζουμε τα αποτελέσματα μας και συζητάμε τις μελλοντικές προοπτικές της διατριβής αυτής.

Κεφάλαιο 2

Τα οικονομικά των διομότιμων συστημάτων

Στο κεφάλαιο αυτό προσδιορίζουμε τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των διομότιμων συστημάτων που καθιστούν το πρόβλημα της παροχής κινήτρων για τη συνεισφορά πόρων τόσο ενδιαφέρον. Εισάγουμε ορισμένες θεμελιώδεις αρχές και έννοιες από τη θεωρία των οικονομικών και τη σχεδίαση συστημάτων που παίζουν σημαντικό ρόλο στο πλαίσιο αυτό και καταδεικνύουμε τις αλληλοεξαρτήσεις τους. Ταξινομούμε επίσης τα διαφορετικά ερευνητικά ερωτήματα που προκύπτουν, και τη σχετική βιβλιογραφία, τοποθετώντας στη γενική εικόνα και τη δική μας συνεισφορά.

2.1 Σημαντικά χαρακτηριστικά των διομότιμων συστημάτων

2.1.1 Στοιχεία αγαθού κοινής ωφέλειας

Εκτός από την παροχή υπηρεσιών καθαυτή (π.χ. την μεταφορά ενός αρχείου), οι χρήστες που διαθέτουν τους πόρους τους σε ένα διομότιμο σύστημα συμμετέχουν στην παροχή ενός κοινού αγαθού (public good) όπως για παράδειγμα, τη διαθεσιμότητα περιεχομένου σε μία εφαρμογή διαμοιρασμού αρχείων. Έτσι, στα διομότιμα συστήματα, το πλήθος των χρηστών που συμμετέχουν επηρεάζει σημαντικά την αξία που κάθε ένας από αυτούς απολαμβάνει, καθώς το πλήθος αυτό καθορίζει το σύνολο των πόρων που είναι διαθέσιμοι. Με άλλα λόγια, προκύπτουν θετικές εξωτερικότητες, όπως λέγονται στα οικονομικά, από τις αποφάσεις των χρηστών σχετικά με το διαμοιρασμό των πόρων τους —ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό των

κοινών αγαθών.

Το κλασικό πρόβλημα με τα κοινά αγαθά είναι η δυνατότητα της *ανέξοδης συμμετοχής*. Όταν επιτρέπεται η ελεύθερη πρόσβαση και χρήση του συστήματος σε ορθολογικούς χρήστες (όπως συμβαίνει στις διομοτίμες εφαρμογές διαμοιρασμού αρχείων σήμερα), αυτοί δεν θα λάβουν υπόψη τους τα οφέλη που προκύπτουν για τους υπόλοιπους χρήστες από τη συνεισφορά τους. Έτσι, κάθε χρήστης έχει το κίνητρο να μειώσει τη συμμετοχή του κάτω από το αποδοτικό για το σύστημα επίπεδο, συνεχίζοντας να απολαμβάνει τη χρησιμότητα που προκύπτει από τις συνεισφορές των υπολοίπων. Αν και η ανέξοδη συμμετοχή είναι ένα θεμελιώδες και κρίσιμο ζήτημα στα προβλήματα παροχής πόρων, το οποίο μελετάται ουσιαστικά από τότε που δημιουργήθηκαν οι ανθρώπινες κοινωνίες (και υπάρχει τεράστια σχετική βιβλιογραφία), υπάρχουν ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά των διομοτίμων συστημάτων που προσθέτουν νέο ενδιαφέρον στο ερευνητικό αυτό ερώτημα, τα οποία αναλύουμε στη συνέχεια.

2.1.2 Πολύπλοκη μοντελοποίηση κόστους

Το γεγονός ότι υπάρχουν διαφορετικά είδη πόρων που ένας χρήστης θα πρέπει να συνεισφέρει κατά τη συμμετοχή του σε ένα διομοτίμο σύστημα, και σε διαφορετικά επίπεδα της απαραίτητης λειτουργικότητας, καθιστά τη μοντελοποίηση του κόστους ένα πολύ ενδιαφέρον και πολύπλοκο πρόβλημα. Έτσι, διαχωρίζουμε στη συνέχεια τη συνεισφορά πόρων στα διαφορετικά συστατικά της και αναλύουμε το αντίστοιχο κόστος που προκύπτει από το καθένα. Από την αναλυτική αυτή εικόνα θα κάνουμε στη συνέχεια τις απαραίτητες αφαιρέσεις ώστε να ορίσουμε ένα απλό και επιλύσιμο οικονομικό μοντέλο.

Αρχική συνεισφορά

Κατ' αρχάς, κάθε χρήστης “εισάγει” ένα αρχικό ποσό πόρων όταν συνδέεται σε μία διομοτίμη κοινότητα, την αρχική του συνεισφορά. Αυτή συνίσταται στις δυνατότητες του υπολογιστή ή της συσκευής του (μνήμη, υπολογιστική, ισχύς, και μπαταρία για την περίπτωση κινητών συσκευών), το εύρος ζώνης πρόσβασης, και το πλήθος των αρχείων περιεχομένου που είναι αποθηκευμένα στον σκληρό του δίσκο. Τα κόστη που σχετίζονται με κάθε έναν από τους παραπάνω πόρους έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και δεν είναι όλα το ίδιο σημαντικά για όλα τα είδη εφαρμογών.

Το κόστος για τη συνεισφορά ενός αρχικού ποσού περιεχομένου σχετίζεται με την απαραίτητη προσπάθεια για τη δημιουργία ή την απόκτηση του περιεχομένου έξω από το σύστημα

και την αντίστοιχη μνήμη για την αποθήκευση του. Σε αντίθεση με το κόστος για το υλικό και το εύρος ζώνης το οποίο οι χρήστες το πληρώνουν και για προσωπικό τους όφελος, αυτό είναι “καθαρό” κόστος καθώς οι χρήστες δεν έχουν προσωπικό όφελος από τον διαμοιρασμό του περιεχομένου τους. Παρατηρείστε όμως ότι ακόμα και αν ένας χρήστης δεν προσφέρει καθόλου αρχικό περιεχόμενο μπορεί να είναι χρήσιμος σε μία διομήτιμη κοινότητα αφού μπορεί να συνεισφέρει στη διανομή (και διαθεσιμότητα) του υπάρχοντος.

Διαθεσιμότητα του χρήστη

Η διαθεσιμότητα του χρήστη είναι επίσης μία σημαντική συνεισφορά σε μία διομήτιμη κοινότητα. Δηλαδή, ο χρόνος που μένει ο χρήστης συνδεδεμένος διαθέτοντας τους πόρους του (ικανοποιώντας τις αιτήσεις για υπηρεσία καθόλη τη διάρκεια του χρόνου αυτού). Αν και το κόστος παραμονής στο σύστημα σχετίζεται με το κόστος παροχής υπηρεσιών υπάρχουν κόστη που εξαρτώνται αποκλειστικά από το χρόνο που αποφασίζει ένας χρήστης (ή του επιβάλλεται από έναν μηχανισμό κινήτρων) να παραμείνει συνδεδεμένος είτε γιατί αυτό σημαίνει ότι καθυστερεί η ολοκλήρωση των δικών του αιτήσεων για υπηρεσία είτε γιατί αν ο ίδιος δεν έχει όφελος από το σύστημα συχνά θα επιθυμούσε να αποσυνδεθεί και να κλείσει τον υπολογιστή του.

Πιστεύουμε ότι, ειδικά για την περίπτωση των διομήτιμων εφαρμογών διαμοιρασμού αρχείων, όσο το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξάνεται και ο χρόνος καταφόρτωσης των αρχείων μειώνεται σημαντικά, η διαθεσιμότητα του χρήστη θα γίνει ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για την επιτυχία τους, και ειδικά για αυτές που παρέχουν αντικείμενα μεσαίου μεγέθους, όπως αρχεία μουσικής, φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης, κ.ά.

Παροχή υπηρεσιών

Κατά τη διάρκεια της παροχής υπηρεσιών λαμβάνει χώρα η πραγματική ανταλλαγή πόρων μεταξύ των χρηστών, η οποία συνήθως περιλαμβάνει ανταγωνιστικούς (rivalrous) αλλά ανανεώσιμους πόρους. Για παράδειγμα, στο διαμοιρασμό αρχείων ο πιο σημαντικός πόρος που καταναλώνεται κατά την αντιγραφή ενός αρχείου είναι το εύρος ζώνης το οποίο είναι πεπερασμένο και η κατανάλωση του μειώνει τη διαθέσιμη ποσότητα αλλά δεν μπορεί να διατηρηθεί. Έτσι, εκτός και αν ένας χρήστης πληρώνει την πρόσβαση στο Διαδίκτυο με βάση τη χρήση, το κόστος για τη διάθεση εύρους ζώνης για αναφόρτωση εξαρτάται από το κατά πόσο στερείται ο ίδιος το εύρος ζώνης αυτό για τις δικές του ανάγκες.

Τα περισσότερα διομότιμα συστήματα όμως επιδιώκουν να εκμεταλλευτούν ακριβώς τους αχρησιμοποίητους πόρους των χρηστών του Διαδικτύου. Έτσι, η ανάπτυξη της απαραίτητης τεχνολογίας, αυτής που θα εξασφαλίζει ότι μόνο οι πραγματικά αχρησιμοποίητοι πόροι θα διατεθούν για την παροχή υπηρεσιών, είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία των συστημάτων αυτών. Ωστόσο αυτό δεν είναι πάντα δυνατόν. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των ανθόρμητων δικτών η παροχή υπηρεσιών πάντα προκαλεί κόστος αφού περιλαμβάνει την κατανάλωση της πολύτιμης μπαταρίας. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση του διαμοιρασμού αρχείων όχι μόνο μπορεί κανείς να ελαχιστοποιήσει το κόστος της παροχής υπηρεσίας [47] αλλά και επιπλέον αυξάνει τη διαθεσιμότητα του περιεχομένου μέσω της αντιγραφής (μέχρι ενός σημείου βέβαια λόγω της πεπερασμένης μνήμης)¹. Αυτός ήταν και ο βασικός λόγος που ο Clark Shirky² επέκρινε συστήματα όπως το Mojo Nation (το οποίο επεδίωξε τη δημιουργία κατανεμημένων μηχανισμών αγοράς για την παροχή υπηρεσιών) προτείνοντας τη δημιουργία κινήτρων για την επένδυση σε πόρους όπως το εύρος ζώνης πρόσβασης, η μνήμη και η διαθεσιμότητα³. Στην εργασία μας ακολουθούμε την ίδια βασική αρχή προτείνοντας όμως διαφορετικό είδος κινήτρων.

Βασική λειτουργικότητα

Στα πλήρως κατανεμημένα διομότιμα συστήματα οι χρήστες είναι επιπλέον υπεύθυνοι για την υλοποίηση όλης της απαραίτητης βασικής λειτουργικότητας (συμπεριλαμβανομένης της επιβολής του μηχανισμού κινήτρων, αν υπάρχει). Ανάλογα με τις απαιτήσεις σε υπολογιστικούς και δικτυακούς πόρους το κόστος αυτό θα μπορούσε να είναι απαγορευτικό, όπως για παράδειγμα στις πρώτες εκδόσεις του Gnutella, το οποίο απαιτούσε την ανταλλαγή σημαντικού πλήθους μηνυμάτων για την υλοποίηση της αναζήτησης περιεχομένου με κατανεμημένο τρόπο. Στα σύγχρονα διομότιμα συστήματα το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την εκμετάλλευση της ύπαρξης χρηστών με σημαντικές δυνατότητες και πόρους και τα κατάλληλα κίνητρα για την υλοποίηση της λειτουργικότητας αυτής (δείτε επίσης την Ενότητα 5.2.1).

Αρνητικές εξωτερικότητες

Τέλος, το πλήθος των αιτήσεων για υπηρεσία που ικανοποιεί ένας χρήστης (και το αντίστοιχο κόστος) δεν εξαρτάται μόνο από την αρχική συνεισφορά και τη διαθεσιμότητά του

¹ Αυτό είναι ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των διομότιμων συστημάτων, το γεγονός δηλαδή ότι η κατανάλωση προκαλεί θετικές εξωτερικότητες.

² http://www.openp2p.com/pub/a/p2p/2000/12/01/shirky_freeloading.html

³ http://www.openp2p.com/pub/a/p2p/2001/01/18/shirky_umbrellas.html

αλλά και από το ρυθμό αιτήσεων και το μέγεθος του συστήματος. Επομένως, όταν το κόστος της παροχής υπηρεσίας είναι σημαντικό, ο ρυθμός αιτήσεων ενός χρήστη αυξάνει το συνολικό ρυθμό αιτήσεων στο σύστημα και έτσι το κόστος συμμετοχής όλων των υπόλοιπων χρηστών. Επιπλέον, όταν ο μέσος ρυθμός αιτήσεων είναι υψηλός, θα μπορούσε επίσης να δημιουργηθεί συμφόρηση, η οποία θα μείωνε την αξία της υπηρεσίας καθ'αυτής. Έτσι, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι εξωτερικότητες εκτός από θετικές, θα μπορούσαν να είναι επίσης αρνητικές. Στην περίπτωση αυτή, η μοντελοποίηση και η υλοποίηση των κατάλληλων μηχανισμών κινήτρων περιπλέκεται ακόμη περισσότερο (βλ. Κεφάλαιο 6).

2.1.3 Ετερογένεια

Οι δυνατότητες των χρηστών και η διαθεσιμότητα πόρων σε ορισμένα διομότιμα συστήματα διαφέρει κατά τρεις έως πέντε τάξεις μεγέθους [90][1]. Επομένως, ένας μηχανισμός κινήτρων που απαιτεί όλοι οι χρήστες να συνεισφέρουν την ίδια ποσότητα πόρων θα προκαλούσε δυσανάλογα κόστη σε χρήστες διαφορετικού τύπου και αν, επιπλέον, η κατανάλωση σχετίζεται με τη συνεισφορά, οι χρήστες με μικρές δυνατότητες δεν θα κατάφερναν πιθανώς να ανακτήσουν την ελάχιστη αξία που είναι απαραίτητη για αυτούς ώστε να συμμετέχουν. Στο [12] αντιμετωπίζουμε τέτοιου είδους προβλήματα και μελετάμε πότε είναι επωφελές να γίνεται διαχωρισμός των κανόνων συνεισφοράς για διαφορετικές κατηγορίες χρηστών και πώς θα πρέπει αυτοί να σχεδιαστούν ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος.

2.1.4 Μεγάλο πλήθος συμμετεχόντων

Οι διομότιμες εφαρμογές φιλοξενούν ήδη εκατομμύρια χρήστες και καθώς δείχνουν να είναι ιδιαίτερα επεκτάσιμες, θα μπορούσαν στο μέλλον να δημιουργήσουν τις προϋποθέσεις για τη δημιουργία μεγαλύτερων από ποτέ αυτόνομων ανθρώπινων κοινωνιών. Είναι ενδιαφέρον ότι ο ρόλος του μεγέθους του συστήματος έχει αντιφατικά αποτελέσματα στην παροχή πόρων. Εξαιτίας των θετικών εξωτερικοτήτων, η επιτυχία των διομότιμων συστημάτων είναι στενά συνδεδεμένη με το πλήθος των συμμετεχόντων τους: επειδή κάθε ένας από αυτούς συνεισφέρει μία σχετικά μικρή ποσότητα πόρων, μόνο όταν ένα πολύ μεγάλο πλήθος χρηστών συμμετέχει σε ένα σύστημα αυτό θα παρέχει σημαντική αξία. Παράλληλα, είναι ένα κλασικό αποτέλεσμα της θεωρίας των οικονομικών ότι η δύναμη των κινήτρων για τη συνεισφορά για την κατασκευή ενός κοινού αγαθού μειώνεται όσο αυξάνεται το πλήθος των συμμετεχόντων. Όταν όμως είναι δυνατός ο αποκλεισμός ορισμένων χρηστών το μεγάλο πλήθος τελικά βοηθάει. Ωστόσο, όταν

υπάρχουν αρνητικές εξωτερικότητες η συμμετοχή μεγάλου πλήθους χρηστών θα πρέπει να ακολουθείται από την κατάλληλη συνεισφορά των μεμονωμένων χρηστών και της ρύθμισης της κατανάλωσης πόρων. Αναλύουμε τα αντισταθμιστικά αυτά οφέλη σχετικά με το μέγεθος των διομήτιμων συστημάτων στα επόμενα κεφάλαια.

2.1.5 Ιδιαίτερα δυναμικό περιβάλλον

Σε ένα σύστημα πελάτη/εξυπηρετητή (client/server), οι πόροι που διατίθενται από τον κεντρικό εξυπηρετητή είναι σχετικά σταθεροί. Αντίθετα, οι πόροι ενός διομήτιμου συστήματος είναι διεσπαρμένοι στο δίκτυο των χρηστών και επομένως είναι εγγενώς πιο δυναμικοί, και ενδεχομένως συνεχώς μεταβαλλόμενοι καθώς οι χρήστες συνδέονται και αποσυνδέονται από το σύστημα.

Έτσι, ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των διομήτιμων συστημάτων σε σύγκριση με την κλασική θεωρία για τα κοινά αγαθά είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το αγαθό κατασκευάζεται *ενόσω (και επειδή) οι χρήστες το χρησιμοποιούν*. Άρα, η παροχή και διαθεσιμότητα των πόρων εξαρτάται σημαντικά από το χρόνο που οι χρήστες θα αποφασίζουν να παραμένουν συνδεδεμένοι. Το γεγονός αυτό μας έδωσε το κίνητρο να δώσουμε έμφαση σε αυτή την παράμετρο της συνεισφοράς ενός χρήστη, όπως συζητάμε στο Κεφάλαιο 5.

2.1.6 Φθηνά ψευδώνυμα

Οι περισσότερες διομήτιμες εφαρμογές επιτρέπουν στους χρήστες τους να δημιουργούν καινούργια ψευδώνυμα χωρίς καθόλου (ή με πολύ περιορισμένο) κόστος. Ωστόσο, αν και αυτό είναι σημαντικό για την ενθάρρυνση της συμμετοχής και προστατεύει τους χρήστες από νομικούς κινδύνους (ανάμεσα στα πολλά πλεονεκτήματα της ανωνυμίας), θέτει σημαντικά εμπόδια σε οποιοδήποτε μηχανισμό καταγραφής και διαχείρισης του ιστορικού χρήσης των χρηστών ο οποίος θα πρέπει να συσχετίσει την πληροφορία αυτή με την ταυτότητα του χρήστη (βλ. Ενότητα 2.5.2).

2.1.7 Κατανεμημένη υλοποίηση

Αν και δημιουργεί σημαντικές δυσκολίες στην υλοποίηση της βασικής λειτουργικότητας ενός διομήτιμου συστήματος, η κατανεμημένη υλοποίηση είναι επιθυμητή για πολλούς λόγους όπως η αυξημένη επεκτασιμότητα, η ανεξαρτησία και η δυνατότητα για αυτο-οργάνωση, η εύκολη ανάπτυξη, κ.ά. Το πρώτο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί σε ένα καθαρόαι-

μο διομήτιμο σύστημα είναι η αναζήτηση υπηρεσιών και για το οποίο έχει αφιερωθεί μεγάλο τμήμα της ερευνητικής δραστηριότητας στην περιοχή αυτή τα τελευταία χρόνια [75][35]. Η δεύτερη καθοριστική λειτουργικότητα που θα πρέπει να υλοποιηθεί με καταναμημένο τρόπο είναι η επιβολή ενός πιθανού μηχανισμού κινήτρων. Μάλιστα, η επιβολή μηχανισμών κινήτρων δημιουργεί πάντα ένα κόστος στους χρήστες (ανεξάρτητα από το πόσο καταναμημένα είναι η σχετική υλοποίηση): τουλάχιστον να ελέγξουν και να αναφέρουν το αποτέλεσμα των συναλλαγών στις οποίες συμμετέχουν. Φυσικά όμως η προσπάθεια που θα πρέπει να καταβληθεί από τους χρήστες είναι πολύ πιο σημαντική στην περίπτωση πλήρως καταναμημένων συστημάτων.

2.1.8 Ορθολογισμός ή αλτροϊσμός;

Μία ενδιαφέρουσα αντίφαση εμφανίζεται στα διομήτιμα συστήματα διαμοιρασμού αρχείων: ενώ οι μετρήσεις (και η θεωρία) υποδηλώνουν ότι η ανέξοδη συμμετοχή είναι η επικρατούσα στρατηγική, οι εφαρμογές διαμοιρασμού αρχείων είναι φανερά πολύ επιτυχημένες και είναι υπεύθυνες για εκατομμύρια αντιγραφές αρχείων καθημερινά. Ένας σημαντικός λόγος είναι ότι αρκετοί χρήστες συνεισφέρουν μεγάλο ποσό πόρων χωρίς κανένα ορθολογικό κίνητρο, αλτροϊστικά. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που ευνοεί την αλτροϊστική συμπεριφορά στα διομήτιμα συστήματα είναι το γεγονός ότι η συνεισφορά ενός χρήστη, αν και μη ορθολογική ενέργεια, ωφελεί τους υπόλοιπους χρήστες [5]. Η πιο σημαντική αιτία όμως για την αντίφαση αυτή είναι πιθανώς ο υψηλός βαθμός ετερογένειας των χρηστών όπως περιγράψαμε παραπάνω καθώς οι χρήστες με πολύ μεγάλες δυνατότητες και μικρό κόστος (π.χ. οι φοιτητές) γίνονται οικειοθελώς οι βασικοί προμηθευτές περιεχομένου μια και αυτό δεν τους κοστίζει πραγματικά. Παράλληλα όμως, είναι ίσως ακριβώς η ύπαρξη τόσο ισχυρών χρηστών που ευνοεί την ανέξοδη συμμετοχή από τους υπόλοιπους χρήστες και έτσι εξηγείται η αντίφαση (δείτε επίσης το [56]).

Ωστόσο, παρόλη την επιτυχία των διομήτιμων συστημάτων διαμοιρασμού αρχείων, παρατηρείστε ότι το περιεχόμενο που ανταλλάσσεται περιορίζεται σε αυτό που αρχικά συνεισφέρουν οι αλτροϊστικοί χρήστες και πιθανώς ένα μεγάλο ποσοστό αποδοτικότητας θυσιάζεται εξαιτίας της απουσίας κατάλληλων μηχανισμών κινήτρων. Επιπλέον, ο αλτροϊσμός θα ήταν πολύ περιορισμένος σε περιπτώσεις όπου το κόστος δεν είναι αμελητέο. Έτσι, ο αλτροϊσμός μπορεί να περιορίσει το πρόβλημα της ανέξοδης συμμετοχής μέχρι ενός σημείου και επομένως θα ήταν επωφελές να επινοηθούν επιπλέον κίνητρα, προσεκτικά επιλεγμένα και σεβόμενα την ετερογένεια των χρηστών .

2.2 Ορισμός της αποδοτικότητας

Όπως έχουμε ήδη εξηγήσει, έχουμε επιλέξει να επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στα ερευνητικά ερωτήματα σχετικά με το κοινό αγαθό που παράγεται ένα διομοτίμο σύστημα, εξετάζοντας και τη θεωρητική αλλά και την πρακτική πλευρά τους. Σύμφωνα με την ορολογία των οικονομικών έχουμε να λύσουμε ένα πρόβλημα αυτόνομης παροχής ενός κοινού αγαθού. Τα πιο δημοφιλή κριτήρια για την αξιολόγηση της παροχής ενός κοινού αγαθού είναι: 1) η μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας και 2) η δικαιοσύνη.

Η κοινωνική ευημερία ορίζεται στα οικονομικά ως το άθροισμα της χρησιμότητας των συμμετεχόντων σε ένα σύστημα από τη χρήση μίας ποσότητας πόρων μείον το κόστος για την παροχή τους. Η *συνάρτηση χρησιμότητας* (utility function) είναι μία αφηρημένη κατασκευή που μεταφράζει τους πόρους ή υπηρεσίες που καταναλώνονται σε ένα μέτρο ικανοποίησης, διαφορετικό για διαφορετικούς ανθρώπους. Θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί τη χρησιμότητα ενός χρήστη για μία συγκεκριμένη ποσότητα διαθέσιμων πόρων ως το χρηματικό ποσό που είναι διαθετιμένος να πληρώσει για αυτή ή απλά ως τη συνολική ικανοποίηση που λαμβάνει από την κατανάλωση του (συγκριτικά).

Η πληροφορία αυτή όμως είναι ιδιωτική και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί κάποιος να ζημιωθεί αν την αποκαλύψει. Για παράδειγμα, κατά τη μεγιστοποίηση την κοινωνικής ευημερίας οι χρήστες με υψηλότερη χρησιμότητα θα πρέπει να απολαύσουν μεγαλύτερη ποσότητα ενός πεπερασμένου αγαθού σε πρόβλημα κατανομής πόρων. Τότε όμως αυτοί με μικρότερη χρησιμότητα θα δηλώναν μεγαλύτερη τιμή για να ευνοηθούν όσο περισσότερο μπορούν. Αντίθετα, η προσέγγιση της δικαιοσύνης (ή ισότητας) αντιμετωπίζει όλους τους χρήστες ως όμοιους σε ό,τι αφορά τη χρησιμότητα και το κόστος τους και εφαρμόζει την κατανομή πόρων (ή ορίζει τους κανόνες συνεισφοράς) σύμφωνα με ένα κριτήριο δικαιοσύνης βασισμένο μόνο σε αντικειμενικά χαρακτηριστικά των χρηστών. Στην απλούστερη περίπτωση, κάθε χρήστης λαμβάνει (ή συνεισφέρει) ακριβώς την ίδια ποσότητα πόρων. Έτσι, στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει καμία εξάρτηση από την ειλικρίνεια των χρηστών.

Είναι εύκολο να δει κανείς, ωστόσο, τις σημαντικές απώλειες σε αποδοτικότητα που μπορεί να προκύψουν όταν εφαρμόζεται η προσέγγιση της ισότητας. Στην περίπτωση του διαμοιρασμού του κόστους στην πολυμετάδοση για παράδειγμα, μοιράζοντας εξίσου το κόστος μίας πολυμετάδοσης (π.χ. 10 μονάδες) ανάμεσα σε δύο χρήστες με χρησιμότητα 9 και 3 μονάδες αντίστοιχα, θα οδηγούσε στην αδυναμία τους να καλύψουν το κόστος παρόλο που η συνολική τους χρησιμότητα είναι μεγαλύτερη (δείτε επίσης το Κεφάλαιο 11 του [28]). Θα προσπαθήσου-

με συνεπώς να σχεδιάσουμε το σύστημα μας έτσι ώστε να μεγιστοποιεί την κοινωνική ευημερία παρέχοντας τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες να αποκαλύψουν την ιδιωτική τους πληροφορία και όταν θα αναφερόμαστε σε ένα αποδοτικό σημείο ισορροπίας ή ένα αποδοτικό σύστημα θα εννοούμε ένα σύστημα το οποίο έχει επιτύχει μέγιστα επίπεδα κοινωνικής ευημερίας.

2.3 Μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας

Η μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας, εξ' ορισμού, απαιτεί την κατάλληλη μοντελοποίηση της χρησιμότητας και του κόστους. Και η μοντελοποίηση αυτή είναι καθοριστική για το τελικό αποτέλεσμα. Ακόμα όμως και αν καταφέρουμε να κατασκευάσουμε ένα ρεαλιστικό οικονομικό μοντέλο υπάρχει όπως είδαμε ένα ακόμα σημαντικό εμπόδιο για να επιτύχουμε τον σκοπό μας: η συλλογή της ιδιωτικής πληροφορίας των χρηστών (οι συναρτήσεις κόστους και χρησιμότητάς τους).

2.3.1 Η ανάγκη για ρύθμιση

Το μεγάλο πλεονέκτημα των ανταγωνιστικών αγορών για ιδιωτικά αγαθά είναι ότι οι εταιρείες δεν χρειάζεται να ξέρουν τίποτα για τις προτιμήσεις των μεμονωμένων καταναλωτών. (Και οι καταναλωτές δεν χρειάζεται να ξέρουν τίποτα για το κόστος παραγωγής των εταιρειών). Το μόνο που χρειάζεται να ξέρουν οι εταιρείες —εκτός από το δικό τους κόστος παραγωγής— είναι η τιμή στην οποία μπορούν να πουλήσουν το αγαθό. Το μόνο που χρειάζεται να ξέρουν οι καταναλωτές —εκτός από τις δικές τους προτιμήσεις— είναι οι τιμές των διαθέσιμων αγαθών και υπηρεσιών. Σύμφωνα με τη θεωρία των οικονομικών (δείτε για παράδειγμα το [78]) η κατανομή των πόρων που προκύπτει από τον πλήρη ανταγωνισμό μεγιστοποιεί την κοινωνική ευημερία και κανένας χρήστης δεν έχει το κίνητρο να αλλάξει τη συμπεριφορά του. Και μάλιστα χωρίς να χρειάζεται να γίνει γνωστή οποιαδήποτε ιδιωτική πληροφορία.

Αυτό ωστόσο δεν ισχύει όταν υπάρχουν εξωτερικότητες (θετικές ή αρνητικές) όπως στην περίπτωση της παροχής πόρων σε ένα διομήσιμο σύστημα. Για παράδειγμα, ένας ορθολογικός χρήστης δεν θα λάβει υπόψη του το όφελος των υπόλοιπων χρηστών όταν αποφασίζει την ποσότητα πόρων που θα διαθέσει ούτε θα περιορίσει τα επίπεδα κατανάλωσης του ανάλογα με τις αρνητικές εξωτερικότητες που προκύπτουν λόγω συμφοράς ή του κόστους παροχής υπηρεσιών. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση των κοινών αγαθών απαιτείται η παρέμβαση του σχεδιαστή του συστήματος για να υλοποιηθεί μία αποδοτική κατανομή και παροχή πόρων.

Στην περίπτωση μας, ο ρυθμιστής είναι ο σχεδιαστής του λογισμικού του συστήματος ο

οποίος θα πρέπει να κωδικοποιήσει τον προτεινόμενο μηχανισμό κινήτρων στα πλαίσια ενός πρωτοκόλλου το οποίο θα επιβάλλει τους κανόνες που ορίζονται από τον μηχανισμό και θα αποτελεί μέρος του λογισμικού που θα πρέπει ο κάθε χρήστης να εκτελεί στον υπολογιστή του για να συνδεθεί στο σύστημα. Οι παράμετροι του πρωτοκόλλου θα πρέπει επίσης, ιδανικά, να ρυθμίζονται δυναμικά με βάση τις εκάστοτε τιμές ορισμένων σημαντικών χαρακτηριστικών του συστήματος (π.χ. το μέγεθος του) καθώς δεν θα είναι εύκολο για το σχεδιαστή να επεμβαίνει εκ των υστέρων για να διορθώνει τις τιμές των παραμέτρων του πρωτοκόλλου. Καθώς όμως το λογισμικό του διομήτιμου συστήματος δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο, οι κανόνες αυτοί θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως “προτεινόμενες” στρατηγικές, οι οποίες θα πρέπει να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε τουλάχιστον οι ορθολογικοί χρήστες να μην έχουν ισχυρό κίνητρο να τις αλλάξουν και οι κακόβουλοι να βλάψουν το σύστημα.

2.3.2 Ελλιπής πληροφόρηση

Η πιο σημαντική πρόκληση για το σχεδίαση ενός κατάλληλου μηχανισμού κινήτρων είναι η απαραίτητη πληροφορία ώστε να επιτύχει το πιο αποδοτικό αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί όμως να απαιτεί από τους χρήστες να αποκαλύψουν πληροφορία η οποία θα αυξήσει το κόστος τους. Επομένως οποιαδήποτε προσέγγιση θα πρέπει έχει την ιδιότητα που ονομάζουμε *συμμετατότητα κινήτρων*: οι χρήστες θα πρέπει να έχουν το κίνητρο, ενεργώντας ορθολογικά, να συμπεριφέρονται σύμφωνα με τους κανόνες του συστήματος ή να δηλώνουν με ειλικρίνεια όποια πληροφορία τους ζητείται.

Δυστυχώς, οι Myerson και Satterthwaite [80] δείχνουν ότι δεν είναι δυνατό να επιτύχει κανείς τη μέγιστη αποδοτικότητα όταν οι χρήστες καλούνται να αποκαλύψουν την ιδιωτική τους πληροφορία, η συμμετοχή είναι εθελοντική και επιθυμούμε να καλύψουμε το κόστος μόνο από τις συνεισφορές των χρηστών. Φυσικά, υπάρχει πάντα ένα μέγιστο επίπεδο αποδοτικότητας που θα μπορούσαμε να επιτύχουμε με τον βέλτιστο δυνατό μηχανισμό σύμφωνα με τους περιορισμούς μας. Αυτό το επίπεδο αποδοτικότητας ονομάζεται “δεύτερο καλύτερο” καθώς είναι το καλύτερο που μπορεί να κάνει ο σχεδιαστής του συστήματος υπό ελλιπή πληροφόρηση (όταν η χρησιμότητα, ή αλλιώς ο τύπος, των χρηστών δεν είναι γνωστή). Ωστόσο, αυτό που θεωρείται γνωστό στις περισσότερες περιπτώσεις για τον υπολογισμό του δεύτερου καλύτερου σημείου ισορροπίας είναι η κατανομή την οποία ακολουθούν οι τιμές των τύπων των χρηστών.

Ακόμα όμως και με την υπόθεση αυτή (ότι είναι γνωστή η κατανομή), ο υπολογισμός του δεύτερου καλύτερου μηχανισμού είναι πολύ περίπλοκος. Ευτυχώς, για το πρόβλημα της αυτό-

νομης παροχής ενός κοινού αγαθού (το οποίο όπως θα επιχειρηματολογήσουμε στη συνέχεια είναι μία ωραία αφαίρεση της συνεισφοράς ως προς τη διαθεσιμότητα περιεχομένου στα διομότιμα συστήματα διαμοιρασμού αρχείων) υπάρχουν πρόσφατα αποτελέσματα που υποδηλώνουν ότι όταν το πλήθος των χρηστών είναι μεγάλο (το οποίο ισχύει στα διομότιμα συστήματα) μπορούμε να επιτύχουμε ασυμπτωτικά το βέλτιστο σημείο ισορροπίας (σε απόσταση $O(1/n)$ από το δεύτερο καλύτερο) εφαρμόζοντας έναν πολύ απλό μηχανισμό. Θα αναλύσουμε σε βάθος το σημαντικό αυτό αποτέλεσμα στο επόμενο κεφάλαιο.

2.4 Μοντελοποίηση

Πριν σχεδιάσει και αξιολογήσει κανείς ένα μηχανισμό κινήτρων σε ό,τι αφορά την οικονομική του αποδοτικότητα θα πρέπει πρώτα να ορίσει το αντίστοιχο οικονομικό μοντέλο, τις συναρτήσεις κόστους και χρησιμότητας, να περιγράψει τη συμπεριφορά των χρηστών στο χρόνο, κλπ. Φανερά οι αποφάσεις στο στάδιο αυτό θα επηρεάσουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

2.4.1 Οικονομική προσέγγιση

Οι Golle et. al [52] ήταν οι πρώτοι που προσπαθήσαν να μοντελοποιήσουν τη χρησιμότητα και το κόστος που σχετίζονται με τη συμμετοχή σε ένα διομότιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία τους το καθαρό όφελος ενός χρήστη εξαρτάται από το πλήθος των καταφορτώσεων, τη διαθεσιμότητα του περιεχομένου, τη μνήμη και το εύρος ζώνης που καταναλώνει, το επίπεδο αλτρουϊσμού, και τις προτεινόμενες οικονομικές συναλλαγές. Σύμφωνα με τον προτεινόμενο μηχανισμό, στο τέλος κάθε περιόδου, ένας χρήστης χρεώνεται ένα ποσό ανάλογο της διαφοράς καταφορτώσεων/αναφορτώσεων που πραγματοποιήσε στο διάστημα αυτό, το οποίο θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε πραγματικό συνάλλαγμα ή όχι. Η βασική αδυναμία της προσέγγισης αυτής είναι το γεγονός ότι υποθέτει ότι υπάρχει μία κεντρική οντότητα η οποία έχει πλήρη πληροφόρηση για όλες τις συναλλαγές μεταξύ των χρηστών, το οποίο δεν είναι ρεαλιστικό για τα σύγχρονα διομότιμα συστήματα (η προσέγγιση αυτή είχε προταθεί στα πλαίσια της εφαρμογής Napster).

Οι Krishnan et. al. [68] εστιάζουν στα φαινόμενα συμφόρησης και μοντελοποιούν το καθαρό όφελος των χρηστών (υποθέτουν ότι είναι το ίδιο για όλους) ως την αξία από κάθε αντικείμενο περιεχομένου που είναι δυνατόν να καταφορτωθεί $v(k)$ (όπου η ποσότητα του διαθέσιμου περιεχομένου εξαρτάται από το πλήθος των χρηστών, k , που διαμοιράζονται τα αρχεία τους) και την πιθανότητα ότι ένας χρήστης μπορεί να καταφορτώσει περιεχόμενο από

το δίκτυο $f(n, k)$, η οποία είναι μία συνάρτηση της συμφόρησης, η οποία είναι αύξουσα ως προς το συνολικό πλήθος των χρηστών n και φθίνουσα ως προς το πλήθος των χρηστών k που διαμοιράζονται τα αρχεία τους. Η στρατηγική των χρηστών είναι δυαδική: είτε να συνεισφέρουν είτε όχι. Ο διαμοιρασμός επιφέρει ένα σταθερό κόστος c , και πάλι το ίδιο για όλους τους χρήστες. Από την ανάλυση του μοντέλου προκύπτει ότι για ορισμένες τιμές του κόστους υπάρχουν χρήστες που επιθυμούν να συνεισφέρουν διαμοιράζοντας τα αρχεία τους ακόμα και όταν υπάρχουν κάποιοι που δεν το κάνουν —για να μειώσουν τη συμφόρηση. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό είναι αρκετά απλό (καθώς υποθέτει ότι όλοι οι χρήστες έχουν τις ίδιες προτιμήσεις και δυαδική στρατηγική) και εστιάζει στα φαινόμενα συμφόρησης τα οποία πιστεύουμε ότι έχουν δευτερεύοντα ρόλο στο πρόβλημα της παροχής πόρων στα διομοτίμα συστήματα διαμοιρασμού αρχείων.

Οι Feldman et. al. [49] υποθέτουν ότι ο κάθε χρήστης i χαρακτηρίζεται από ένα επίπεδο γενναιοδωρίας (αλτρουισμού), τον τύπο του t_i , και αποφασίζει εάν θα συνεισφέρει ή θα συμμετέχει ανέξοδα ανάλογα με τη σχέση της γενναιοδωρίας του με το τρέχον κόστος συνεισφοράς στο σύστημα, το οποίο είναι το αντίστροφο του συνολικού ποσοστού x αυτών που συνεισφέρουν. Δείχνουν πώς τα επίπεδα της γενναιοδωρίας επηρεάζουν την αποδοτικότητα, όταν η κοινωνική ευημερία είναι μία κυρτή συνάρτηση του x . Επίσης, υποθέτοντας ότι η ανέξοδη συμμετοχή μπορεί να τιμωρηθεί μέσω της μείωσης του οφέλους ενός τέτοιου χρήστη κατά $(1 - p)$ (π.χ. αν η πιθανότητα μία αίτηση του για υπηρεσία να γίνει δεκτή είναι p), μοντελοποιούν ένα σύστημα με αφίξεις και αναχωρήσεις με σκοπό να υπολογίσουν το κόστος δημιουργίας νέας ταυτότητας και το μέγεθος της τιμωρίας ώστε το σύστημα να καταλήξει σε ένα αποδοτικό σημείο ισορροπίας. Σημειώστε ότι η εργασία αυτή (όπως και η [68]) δεν αντιμετωπίζει το ζήτημα της αποδοτικής παροχής πόρων καθώς απλώς ξεχωρίζει μεταξύ χρήστες που συνεισφέρουν ή όχι υποθέτοντας όλοι οι συνεργατικοί χρήστες διαθέτουν μία ικανοποιητική ποσότητα πόρων (ή διαφορετικά η κοινωνική ευημερία εξαρτάται μόνο από το πλήθος των συνεργατικών χρηστών).

Οι Buragohain et. al [17], αντίθετα, περιλαμβάνουν το ζήτημα της παροχής πόρων στο μοντέλο τους. Ορίζουν το κόστος του χρήστη i να είναι η ποσότητα μνήμης (για την αποθήκευση αρχείων περιεχομένου) και/ή το εύρος ζώνης που διατίθεται για την αντιγραφή τους, το οποίο συμβολίζεται ως d_i , και η χρησιμότητά του, u_i , το άθροισμα της συνεισφοράς των υπολοίπων χρηστών. Υποθέτοντας όπως στο [49] ότι το σύστημα μπορεί να επιβάλλει μία μείωση της αξίας ενός χρήστη κατά $(1 - p(d_i))$, όπου $p(d_i)$ η πιθανότητα μίας επιτυχούς αίτησης ως συνάρτηση της συνεισφοράς, σκοπός των συγγραφέων είναι να υπολογίσουν το σημείο ισορ-

ροπίας Nash δεδομένου του μηχανισμού αυτού και της συνάρτησης $p(\cdot)$. Για την περίπτωση δύο χρηστών δείχνουν ότι στο σημείο ισορροπίας η αποδοτικότητα μεγιστοποιείται. Για τη γενικότερη περίπτωση (αναλυτικά όταν όλοι οι χρήστες είναι ομοιόμορφοι και χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις όταν είναι διαφορετικού τύπου) απλά δείχνουν ότι το σύστημα οδηγείται σε ένα ικανοποιητικό σημείο ισορροπίας (διαφορετικό από αυτό όπου $d_i = 0, \forall i$) αλλά όχι απαραίτητα το βέλτιστο.

Το βασικό μοντέλο κοινού αγαθού για τη διαθεσιμότητα περιεχομένου, το οποίο παρουσιάζουμε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4, είναι παρόμοιο με αυτό του [17]. Εμείς, ωστόσο, ακολουθούμε μία προσέγγιση η οποία βασίζεται στη θεωρία της αυτόνομης παροχής ενός κοινού αγαθού και σκοπός είναι να καθορίσει συγκεκριμένους κανόνες συνεισφοράς τους με σκοπό τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας. Πιστεύουμε ότι υπάρχουν ορισμένοι παράμετροι του συστήματος (όπως το πλήθος αρχείων που θα πρέπει να διαθέτει ο κάθε χρήστης), οι οποίοι αν ρυθμιστούν κατάλληλα θα οδηγούσαν το σύστημα σε καλύτερο σημείο ισορροπίας. Φυσικά υπάρχουν και στην περίπτωση αυτή σημαντικές προκλήσεις σε ότι αφορά την επιβολή των κανόνων αυτών τις οποίες αντιμετωπίζουμε ανεξάρτητα (βλ. Κεφάλαιο 5).

2.4.2 Παίγνια

Ένα μεγάλο τμήμα της βιβλιογραφίας των οικονομικών των διομότιμων συστημάτων ακολουθεί μία διαφορετική προσέγγιση και μοντελοποιεί την παροχή και κατανομή πόρων στα διομότιμα συστήματα ως ένα παίγνιο (π.χ. [87] [48]) χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις πιθανά διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας και κόστους των διαφορετικών χρηστών, με σκοπό την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ τους με την πιο ευρεία σημασία της. Πιο συγκεκριμένα, προσπαθούν να επινοήσουν τρόπους για την επιβολή της λεγόμενης “tit for tat” στρατηγικής [13]⁴ στην περίπτωση όμως που δεν είναι πιθανό δύο συγκεκριμένοι χρήστες να συναντηθούν περισσότερες από μία φορές, οπότε και χρειάζεται κάποιου είδους καταγραφή του ιστορικού συνεργασίας του καθενός ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η λεγόμενη *έμμεση ανταποδοτικότητα* (indirect reciprocity) [82]. Στην πράξη μία τέτοια στρατηγική θα μπορούσε να οδηγήσει σε έναν κανόνα που προσπαθεί να εξισώσει τις καταφορτώσεις που πραγματοποιεί ένας χρήστης με τις αναφορτώσεις που έχει προσφέρει [48].

Αγνοώντας τα δύσκολα προβλήματα που προκύπτουν για την επιβολή της έμμεσης ανταποδοτικότητας, ένας τέτοιος μηχανισμός θα επιτύγχανε ένα ορισμένο επίπεδο διαθεσιμότητας

⁴κατά την οποία οι χρήστες πάντα συνεργάζονται με τον αντίπαλο στο πρώτο βήμα και στη συνέχεια ανταποδίδουν (reciprocate) την ίδια στρατηγική με αυτή που επέλεξε αυτός στο προηγούμενο

περιεχομένου το οποίο εν γένει θα εξαρτιόταν από τη ζήτηση για περιεχόμενο και τις στρατηγικές των χρηστών σε ό,τι αφορά το περιεχόμενο που θα επέλεγαν να διαθέσουν. Στη διατριβή αυτή προσπαθούμε να εκμεταλλευτούμε πιθανώς διαθέσιμη πληροφορία (όπως για παράδειγμα την κατανομή του τύπου των χρηστών και το πλήθος τους) ώστε να καθορίσουμε συγκεκριμένα επίπεδα παροχής πόρων και έτσι να αυξήσουμε την αποδοτικότητα του συστήματος ως προς τη διαθεσιμότητα περιεχομένου, σύμφωνα με ένα κατάλληλο οικονομικό μοντέλο.

2.4.3 Μοντέλα ελεύθερης αγοράς

Ορισμένοι ερευνητές οραματίζονται τα διομότιμα συστήματα ως κατανεμημένες αγορές αγοράς και πώλησης πόρων, όπου οι τιμές (σε μορφή πραγματικού ή εικονικού συναλλάγματος) καθορίζονται ελεύθερα από τους χρήστες που παρέχουν υπηρεσίες (σύμφωνα με την εικόνα που έχουν για τη ζήτηση, τη συμφόρηση, και άλλα πιθανά κριτήρια). Η αποτυχία όμως της εφαρμογής Mojo Nation και η θεωρία των εξωτερικοτήτων υποδηλώνουν ότι τέτοιες προσεγγίσεις θα ήταν κατάλληλες μόνο όταν το κόστος της παροχής υπηρεσίας είναι σημαντικό και οι αντίστοιχοι πόροι είναι ανταγωνιστικοί.

Επομένως, η ελεύθερη αγορά θα μπορούσε να είναι ένας κατάλληλος μηχανισμός για εφαρμογές που περιλαμβάνουν ανταγωνιστικούς ή καταναλώσιμους πόρους όπως τα αυθόρμητα δίκτυα [34] [57] και το υπολογιστικό πλέγμα [66]. Για τον διαμοιρασμό αρχείων υπάρχουν επίσης μερικές προσεγγίσεις που εστιάζουν στο κόστος παροχής υπηρεσιών και προτείνουν κατανεμημένες υλοποιήσεις μίας ελεύθερης αγοράς [92] [55]. Και εμείς προτείνουμε στην διατριβή αυτή ένα μοντέλο αγοράς για την διομότιμη διανομή περιεχομένου όταν ακριβώς αντικείμενα είναι επιθυμητό να εισαχθούν σε μία διομότιμη κοινότητα.

2.5 Μηχανισμοί επιβολής

2.5.1 Καταγραφή του ιστορικού του χρήστη

Τοπικοί λογαριασμοί

Ο απλούστερος μηχανισμός καταγραφής του ιστορικού των χρηστών είναι αυτός που εμπιστεύεται τους ίδιους τους χρήστες (μέσω του λογισμικού που εκτελείται τοπικά στον υπολογιστή τους) να καταγράφουν τις προσωπικές τους συναλλαγές. Στην καλύτερη περίπτωση, αυτή και μόνο η πληροφορία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να επιβάλλει την προβλεπόμενη συμπεριφορά. Αυτό όμως απαιτεί έμπιστο υλικό και λογισμικό, το οποίο δεν μπορεί κανείς να

το υποθέσει για τις διομότιμες υπηρεσίες, καθώς οι χρήστες έχουν το κίνητρο να αλλοιώσουν το λογισμικό προς όφελος τους (όπως συνέβη στην περίπτωση της εφαρμογής Kazaa).

Δημόσιοι λογαριασμοί

Μία εναλλακτική λύση θα ήταν να διατηρεί το ιστορικό του χρήστη μία τρίτη οντότητα. Για παράδειγμα, μπορούμε να καθορίσουμε έναν (ή μία ομάδα από) χρήστη(-ες) μέσω του μηχανισμού διευθυνσιοδότησης (DHT) να παίζει το ρόλο αυτό. Τότε, μετά από κάθε συναλλαγή μία υπογεγραμμένη ηλεκτρονική απόδειξη θα αποστέλλεται στους υπεύθυνους χρήστες για την καταγραφή της συγκεκριμένης συναλλαγής. Ένας παρόμοιος μηχανισμός προτείνεται στο [92], όπου το ιστορικό ενός χρήστη αντιστοιχεί σε μία ποσότητα από κουπόνια (tokens) τα οποία ονομάζονται “karma” και τα οποία μπορεί να αποκτήσει κανείς με κάθε παροχή υπηρεσίας, η αξία της οποίας (σε karma) καθορίζεται μέσω δημοπρασίας. Ακόμα όμως και αν υπάρχει μία κεντρική αξιόπιστη οντότητα για την αποθήκευση των ιστορικών αυτών, το σύστημα πάντα θα βασίζεται στους χρήστες να αναφέρουν το αποτέλεσμα των συναλλαγών, γεγονός το οποίο όπως συζητάμε στη συνέχεια καθιστά το σύστημα ευάλωτο σε σημαντικές επιθέσεις.

Μηχανισμοί διαμόρφωσης φήμης

Η φήμη θα μπορούσε να οριστεί [93] ως μία “περίληψη” της συμπεριφοράς ενός χρήστη στο παρελθόν, εκφράζοντας μία πιθανότητα για το αποτέλεσμα των μελλοντικών συναλλαγών με τον χρήστη αυτόν. Με άλλα λόγια αποτελεί μία ένδειξη για τον τύπο του: Είναι ειλικρινής ή όχι; Είναι αλτρουϊστής ή ορθολογικός; Ποιά είναι η ποιότητα της υπηρεσίας που παρέχει; Είναι αξιόπιστος; Ή ακόμα και πιο υποκειμενικά χαρακτηριστικά όπως οι προτιμήσεις του για διάφορα θέματα.

Οι επιχειρήσεις, οι οργανισμοί και οι άνθρωποι γενικότερα βασίζονται στη φήμη τους για να προσελκύσουν πελάτες, μέλη, φίλους. Στο Διαδίκτυο οι μηχανισμοί διαμόρφωσης φήμης έχουν πρόσφατα προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον ως ένας μηχανισμός για την προώθηση της εμπιστοσύνης και της συνεργασίας μεταξύ των χρηστών σε ηλεκτρονικές αγορές όπως το eBay ή ως ένα ισχυρό εργαλείο για την καθοδήγηση των καταναλωτών μέσω ανεξάρτητων αξιολογήσεων διάφορων προϊόντων και υπηρεσιών όπως το eOpinions (δείτε το [88] για μία σύντομη εισαγωγή και το [37] για την τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα). Ο θετικός ρόλος των μηχανισμών διαμόρφωσης φήμης στα συστήματα αυτά έχει δώσει το κίνητρο σε πολλούς ερευνητές να μελετήσουν την εφαρμογή τους για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της

ποιότητας υπηρεσιών στα διομότιμα συστήματα.

Στο πλαίσιο αυτό, η μεγαλύτερη πρόκληση που θα πρέπει να αντιμετωπίσει κανείς είναι η εγκυρότητα των αξιολογήσεων μέσω των οποίων διαμορφώνεται η φήμη των χρηστών. Για παράδειγμα, πολλοί υπάρχοντες μηχανισμοί (π.χ. [36] [59]) θεωρούν ότι όλες οι αξιολογήσεις έχουν την ίδια αξία. Εν γένει όμως οι χρήστες μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες ως προς την αξιοπιστία και την ποιότητα των αξιολογήσεων τους. Ο κλασικός τρόπος για να αντιμετωπίσει κανείς το ζήτημα της αξιοπιστίας (που είναι το πιο σημαντικό πρόβλημα όταν οι αξιολογήσεις είναι αντικειμενικές) είναι η τοποθέτηση διαφορετικού βάρους σε κάθε αξιολόγηση ανάλογα με την προσωπική ή συνολική εικόνα για έναν χρήστη ως αξιολογητή [62].

Συνεπώς, σε ένα τέτοιο σύστημα ο κάθε χρήστης χαρακτηρίζεται από μία τιμή για την ποιότητα των υπηρεσιών του (ή το επίπεδο της συνεισφοράς του) και μία τιμή για την αξιοπιστία του ως αξιολογητής. Για τη διαμόρφωση του δεύτερου είδους φήμης οι Παπαϊωάννου και Σταμούλης [84] προτείνουν την τιμωρία των χρηστών που διαφωνούν για το αποτέλεσμα μίας συναλλαγής (αφού με μεγάλη πιθανότητα ο ένας από τους δύο δεν είναι ειλικρινής) αναλογικά με τη φήμη τους μέχρι εκείνη τη στιγμή. Ωστόσο, τα προβλήματα που προκύπτουν από την ύπαρξη αναξιόπιστων χρηστών πολλαπλασιάζεται εξαιτίας της δυνατότητας ανέξοδης δημιουργίας ψευδώνυμου, τη λεγόμενη “επίθεση του σωσία” (σψβιλ ατταςκ), όπως συζητάμε στη συνέχεια.

2.5.2 Ο ρόλος της ταυτότητας του χρήστη

Η έννοια της ταυτότητας παίζει κεντρικό ρόλο για την υλοποίηση οποιουδήποτε μηχανισμού καταγραφής του ιστορικού των χρηστών. Ο λόγος είναι ότι στο κατανεμημένο και αναξιόπιστο περιβάλλον των διομότιμων συστημάτων υπάρχουν πολλές και σημαντικές επιθέσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Ξέπλυμα κακής φήμης

Κατ’ αρχάς, η δυνατότητα των χρηστών να δημιουργούν μία νέα ταυτότητα (ψευδώνυμο) με μικρό ή καθόλου κόστος τους επιτρέπει να “ξεπλύνουν” την κακή τους φήμη και έτσι να παρακάμψουν τον αντίστοιχο μηχανισμό κινήτρων. Έτσι, αν δεν είναι δυνατή η εξασφάλιση ισχυρών ψευδωνύμων [18] μπορεί να είναι απαραίτητο να επιβληθεί ένα ορισμένο κόστος στους νεοεισερχόμενους χρήστες αφού το σύστημα δεν μπορεί να ξεχωρίσει μεταξύ των πραγματικά

νέων χρηστών και αυτών που έχουν αλλάξει ψευδώνυμο με σκοπό να ξεπλύνουν την κακή τους φήμη [51].

Οι Feldman και Chuang [46] εξετάζουν την επίδραση της επίθεσης αυτής στη σταθερότητα των στρατηγικών ανταποδοτικότητας στο χρόνο. Όπως αναμενόταν, βρίσκουν ότι η σταθερότητα μειώνεται εξαιτίας της δυνατότητας δημιουργίας φθηνών ψευδώνυμων και μόνο με την επιβολή ενός αρκετά υψηλού κόστους κατά τη δημιουργία μίας νέας ταυτότητας μπορεί να οδηγηθεί ένα τέτοιο σύστημα σε σταθερό σημείο ισορροπίας.

Εικονική συναλλαγή

Το γεγονός ότι οι μηχανισμοί καταγραφής και διαχείρισης του ιστορικού χρήστη βασίζονται πάντα στις αναφορές των χρηστών για να συλλέξουν την απαραίτητη πληροφορία, τους κάνει ευάλωτους στην επίθεση της εικονικής συναλλαγής. Δηλαδή, οι χρήστες ισχυρίζονται ψευδώς ότι έχουν θετικά ή αρνητικά συναλλαγεί με άλλους. Στα συστήματα διαμόρφωσης φήμης αυτό μεταφράζεται στο να υψώνει κανείς ψευδώς τη φήμη κάποιου μη συνεργατικού χρήστη ή να βλάπτει τη φήμη κάποιου συνεργατικού. Επομένως, συστήματα που εμπιστεύονται άκριτα τις αξιολογήσεις των χρηστών (όπως το [92]) θα ήταν ευάλωτα στην επίθεση αυτή, η οποία θα μπορούσε να είναι καταστροφική όταν οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν πολλαπλές ταυτότητες όπως συζητάμε παρακάτω.

Η επίθεση του σωσία

Όταν ένας χρήστης μπορεί εύκολα να δημιουργήσει πολλαπλές ταυτότητες, είναι πιθανό να δημιουργήσει οσοδήποτε μεγάλες ομάδες εικονικών χρηστών [38] και έτσι να καταστήσει τις προαναφερθείσες επιθέσεις ακόμα πιο καταστροφικές για ένα σύστημα που βασίζεται στην καταγραφή της πληροφορίας χρήσης για να εξασφαλίσει ένα αποδοτικό επίπεδο λειτουργίας.

Σύμφωνα με το [22] μόνο ασυμμετρικές συναρτήσεις υπολογισμού της φήμης, οι οποίες υποθέτουν ότι κάποιοι συγκεκριμένοι χρήστες είναι αξιόπιστοι ή επιτρέπουν στους χρήστες να υπολογίζουν τη φήμη άλλων χρηστών σε σχέση με τους ίδιους (για παράδειγμα να εμπιστεύονται μόνο χρήστες που έχουν άμεσα ή έμμεσα συναλλαγεί μαζί τους στο παρελθόν), μπορούν να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία των αξιολογήσεων [48] [89] [40].

2.5.3 Εικονικό συνάλλαγμα

Αρκετοί ερευνητές [54] [73] [92] εξετάζουν την υλοποίηση ενός εικονικού συναλλάγματος στο κατανεμημένο περιβάλλον των διομότιμων συστημάτων ώστε να επιτρέψουν την αγοραπωλησία υπηρεσιών (π.χ. αρχείων περιεχομένου) μεταξύ των χρηστών —είτε με καθορισμένη τιμή (π.χ. 1 μονάδα απαιτείται για κάθε αναφόρτωση) είτε με τιμές που προκύπτουν από κλασικούς μηχανισμούς της αγοράς (π.χ. δημοπρασίες). Ωστόσο, το γεγονός ότι σε κάθε περίπτωση ένα αρχικό ποσό συναλλάγματος θα πρέπει να δίνεται δωρεάν στους νεοεισερχόμενους χρήστες καθιστούν απαραίτητη την υλοποίηση ισχυρών ψευδωνύμων γεγονός που πολύ πιθανόν να μειώνει το ποσοστό συμμετοχής στο σύστημα. Επίσης, κλασικά προβλήματα του πραγματικού συναλλάγματος όπως ο πληθωρισμός και η υποτίμηση θα πρέπει να αντιμετωπιστούν γεγονός που θα δημιουργούσε επιπλέον κόστος για τη διαχείριση του συστήματος.

Μία ιδιαίτερα ελκυστική προσέγγιση είναι να επιτρέπεται στους χρήστες να εκδίδουν το δικό τους συνάλλαγμα. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες γρήγορα θα συλλέγουν συνάλλαγμα από πολλές “τράπεζες” και έτσι για να ελέγχουν την αξιοπιστία τους θα πρέπει συχνά να τα εξαργυρώνουν στον εκδότη τους. Τότε όμως η αξιοπιστία του εκδότη θα παίζει καθοριστικό ρόλο. Αν είναι αξιόπιστος το συνάλλαγμα του θα μπορεί πιο εύκολα να επαναχρησιμοποιηθεί (για υπηρεσίες από τρίτους χρήστες) και έτσι η έννοια της φήμης είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση αυτή [79]. Οι Ευσταθίου, Φραγκούδης και Πολύζος [40] προτείνουν τη χρήση μίας ασυμμετρικής συνάρτησης διαμόρφωσης φήμης (δείτε την Ενότητα 2.5.2 παραπάνω) για να εξασφαλίσουν ότι το συνάλλαγμα αυτό έχει εκδοθεί από έναν αξιόπιστο χρήστη (κάποιον που έχει άμεσα ή έμμεσα προσφέρει υπηρεσίες στο παρελθόν) και έτσι χρησιμοποιεί μόνο τοπική πληροφορία για να εξασφαλίσει την εγκυρότητα του συναλλάγματος.

2.5.4 Μηχανισμοί επιβολής χωρίς χρήση μνήμης

Όταν δεν υπάρχει αξιόπιστη πληροφορία για το ιστορικό των χρηστών, τότε άλλοι άμεσοι (χωρίς χρήση μνήμης) μηχανισμοί θα πρέπει να σχεδιασθούν. Οι μηχανισμοί αυτού του είδους είναι πολύ ισχυροί σε ό,τι αφορά την επιβολή της ανταποδοτικότητας, υστερούν όμως σε ευελιξία αφού αναγκαστικά συσχετίζουν χρονικά τη συνεισφορά με την κατανάλωση.

Άμεση ανταλλαγή πόρων

Η άμεση ανταλλαγή πόρων είναι ο πιο εύκολος στην υλοποίηση μηχανισμός κινήτρων. Επιβάλλεται εξ’ ορισμού και δεν εξαρτάται καθόλου από τη χρήση μνήμης και ταυτοτήτων.

Η εφαρμογή BitTorrent [26] εφαρμόζει έναν τέτοιο μηχανισμό και είναι στην πράξη μία από τις πολύ λίγες πραγματικές διομότιμες εφαρμογές που καταφέρνουν να επιβάλλουν ένα συγκεκριμένο μηχανισμό κινήτρων σε καταναμετημένο περιβάλλον. Σημειώστε επίσης ότι η άμεση ανταλλαγή είναι ένας “φυσικός” μηχανισμός για τα συστήματα διατήρησης δεδομένων [27] και τη διομότιμη πολυμετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [25]. Ωστόσο, για την εφαρμογή διαμοιρασμού αρχείων, η φύση του μηχανισμού αυτού δεν εξασφαλίζει απαραίτητα ικανοποιητική διαθεσιμότητα περιεχομένου αλλά αποδοτική διανομή συγκεκριμένων δημοφιλών και συνήθως πολύ μεγάλων αντικειμένων.

Μία γενίκευση του μηχανισμού της άμεσης ανταλλαγής ώστε να συμπεριλαμβάνει κύκλους από παρεχόμενες υπηρεσίες μεταξύ n χρηστών προτείνεται στο [3]. Η προσέγγιση αυτή αν και μειώνει το πρόβλημα της απαίτησης για συμμετρική παροχή υπηρεσιών που έχει ο μηχανισμός της άμεσης ανταλλαγής συνεχίζει να απαιτεί κάποιο συγχρονισμό για τη δημιουργία των κύκλων αυτών καθώς και αυξημένη πολυπλοκότητα για τον εντοπισμό και διαχείριση τους. Ένας αντίστοιχος μηχανισμός προτείνεται επίσης για την περίπτωση ενός διομότιμου συστήματος διατήρησης δεδομένων [31].

Συνεισφορά κατά την κατανάλωση

Στο [11] προτείνουμε μία διαφορετική παραλλαγή του μηχανισμού άμεσης ανταλλαγής. Η ανταλλαγή πραγματοποιείται στην περίπτωση αυτή μεταξύ ενός χρήστη και του υπόλοιπου συστήματος ως σύνολο. Στην περίπτωση της διαθεσιμότητας περιεχομένου, ένας τρόπος για να υλοποιηθεί ένας τέτοιος μηχανισμός είναι η ρύθμιση του χρόνου που απαιτείται για την κατανάλωση πόρων (την καταφόρτωση ενός αρχείου) ώστε να μην είναι πολύ μικρός, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι ένα ελάχιστο πλήθος αρχείων διατίθονται στο διάστημα αυτό.

Πιστεύουμε ότι αυτή είναι μία πολύ ενδιαφέρουσα κατηγορία μηχανισμών χωρίς μνήμη, η οποία εκμεταλλεύεται την έννοια του κοινού αγαθού στα διομότιμα συστήματα και απαιτεί από έναν χρήστη να συνεισφέρει τους πόρους του σε οποιοδήποτε άλλο χρήστη ενώ καταναλώνει (και όχι απαραίτητα σε αυτόν από τον οποίο λαμβάνει υπηρεσία) και θα μπορούσε πιθανόν να εφαρμοστεί και σε άλλες διομότιμες εφαρμογές. Στην περίπτωση αυτή, ο μηχανισμός επιβολής, ο οποίος εκτελείται από τους χρήστες που παρέχουν μία υπηρεσία, θα πρέπει να διασφαλίζει την εγκυρότητα της συνεισφοράς. Συζητάμε όλα τα πρακτικά και θεωρητικά ζητήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μηχανισμού αυτού για τον διομότιμο διαμοιρασμό αρχείων στο Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 3

Αυτόνομη παροχή αγαθών κοινής ωφέλειας

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφουμε πιο αυστηρά τη συζήτηση μας για την αντιμετώπιση της παροχής πόρων σε ένα διομότιμο σύστημα ως ένα πρόβλημα αυτόνομης παροχής ενός κοινού αγαθού. Αρχικά εισάγουμε τον απαραίτητο συμβολισμό και παρουσιάζουμε τα πρόσφατα αποτελέσματα από τη θεωρία των οικονομικών εστιάζοντας στο ενδιαφέρον θεώρημα ότι ένα απλός μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς είναι ασυμπτωτικά βέλτιστος. Στη συνέχεια καταδεικνύουμε την εφαρμοσιμότητα του μοντέλου αυτού σε διαφορετικά είδη διομότιμων εφαρμογών ενώ στο επόμενο κεφάλαιο επικεντρώνουμε την προσοχή μας στη διαθεσιμότητα του περιεχομένου.

3.1 Ένα μοντέλο κοινού αγαθού χωρίς αποκλεισμούς

Θεωρήστε την κατάσταση όπου n χρήστες διαπραγματεύονται την παροχή ενός κοινού αγαθού. Το κόστος για Q μονάδες του αγαθού ισούται με $c(Q)$, όπου $c(\cdot)$ είναι μία συνεχής και αύξουσα συνάρτηση με $c(0) = 0$, και το κόστος αυτό θα πρέπει να καλυφθεί από τους ίδιους τους χρήστες (αυτόνομη παροχή). Αν η ποσότητα Q κατασκευαστεί, όλοι οι χρήστες είναι αυτόματα σε θέση να το απολαύσουν· δεν υπάρχει η δυνατότητα για αποκλεισμό ενός μεμονωμένου χρήστη ούτε πρόβλημα συμφοράς.

Αν Q είναι οι μονάδες του αγαθού και ο χρήστης i συνεισφέρει p_i μονάδες για την κάλυψη

του κόστους $c(Q)$, λαμβάνει καθαρό όφελος

$$\theta_i u(Q) - p_i, \quad (3.1)$$

όπου $u(\cdot)$ είναι μία συνεχής και μη φθίνουσα συνάρτηση, η ίδια για όλους τους χρήστες, με $u(0) = 0$.

Συμβολίζουμε με $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ το διάνυσμα των παραμέτρων χρησιμότητας (τους τύπους) των χρηστών, για τους οποίους υποθέτουμε ότι είναι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανεμημένα δείγματα μίας κατανομής στο διάστημα $[0, 1]$ με συνάρτηση κατανομής H και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας h . Η κατανομή αυτή, H , είναι γνωστή σε όλους τους χρήστες, αλλά η τιμή της θ_i είναι γνωστή μόνο στον χρήστη i .

Το ερώτημα είναι πόση ποσότητα Q του κοινού αγαθού θα πρέπει να κατασκευαστεί και τι συνεισφορές p_1, \dots, p_n , θα πρέπει να κάνουν οι χρήστες ώστε να καλυφθεί το κόστος $c(Q)$. Δηλαδή, ώστε η λύση να είναι εφικτή. Επιπλέον, όλοι οι χρήστες θα πρέπει να έχουν θετικό καθαρό όφελος από τη συμμετοχή τους, διαφορετικά θα αρνηθούν να συνεισφέρουν. Δηλαδή, θα πρέπει να δίνεται κίνητρο συμμετοχής στους χρήστες. Δεδομένων των περιορισμών αυτών, ο στόχος μας είναι να μεγιστοποιήσουμε την κοινωνική ευημερία: τη συνολική χρησιμότητα των χρηστών μείον το συνολικό κόστος. Αν οι πραγματικές τιμές του διανύσματος $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ είναι γνωστές στο σχεδιαστή του συστήματος, το πρόβλημα που θα πρέπει να λύσει είναι το εξής:

$$\max_{Q \geq 0} \sum_i \theta_i u(Q) - c(Q). \quad (3.2)$$

Η λύση του (3.2) ικανοποιεί τους παραπάνω περιορισμούς καθώς για οποιοδήποτε τιμή του Q^* για την οποία $\sum_i \theta_i u(Q^*) - c(Q^*) \geq 0$, μπορούμε να βρούμε p_i τέτοια ώστε $\sum_i p_i = c(Q^*)$ και $\theta_i u(Q^*) \leq p_i, \forall i$. Εφόσον αυτή είναι η μέγιστη τιμή κοινωνικής ευημερίας που θα μπορούσαμε να επιτύχουμε, δεδομένου του διανύσματος θ , θα αποκαλούμε τη λύση αυτή βέλτιστη.

Έτσι, το μόνο εμπόδιο για τη λύση του προβλήματος μας είναι η διαθεσιμότητα της απαραίτητης πληροφορίας: του διανύσματος θ . Και είναι εμπόδιο επειδή αυτή είναι ιδιωτική πληροφορία των χρηστών και ένας “μηχανισμός” απαιτείται ώστε να καταφέρει ο σχεδιαστής του συστήματος να την εκμαιεύσει. Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιαστής θα πρέπει πρώτα να αποφασίσει μία συνάρτηση κατανομής $Q(\cdot), p_1(\cdot), \dots, p_n(\cdot)$ η οποία καθορίζει πώς σχετίζεται η ποσότητα του αγαθού που θα παραχθεί και οι συνεισφορές των χρηστών με το διάνυσμα θ .

Αυστηρά, ένας μηχανισμός ορίζεται ως εξής:

1. Ο σχεδιαστής ανακοινώνει τις συναρτήσεις $Q(\cdot)$ και $p_i(\cdot)$.
2. Οι χρήστες, αφού παρατηρήσουν τις $Q(\cdot)$ και $p_i(\cdot)$, δηλώνουν μία τιμή για την παράμετρο χρησιμότητάς τους θ_i (όχι απαραίτητα την πραγματική).
3. Ο σχεδιαστής χτίζει το σύστημα με μέγεθος $Q(\boldsymbol{\theta})$ και ζητάει από τους χρήστες τις αντίστοιχες συνεισφορές $p_1(\boldsymbol{\theta}), \dots, p_n(\boldsymbol{\theta})$.
4. Οι χρήστες πληρώνουν τις συνεισφορές τους και το αγαθό κατασκευάζεται και διατίθεται ελεύθερα σε όλους τους χρήστες.

Εξαιτίας της αβεβαιότητας για τις παραμέτρους χρησιμότητας των χρηστών ο υλογισμός της βέλτιστης συνάρτησης κατανομής εξαρτάται από την κατανομή H . Επομένως, ο σχεδιαστής πρέπει να λύσει τώρα το πρόβλημα

$$\max_{Q(\cdot) \geq 0, p_1(\cdot), \dots, p_n(\cdot)} \mathbb{E} \left[\sum_i \theta_i u(Q) - c(Q) \right], \quad (3.3)$$

με τους ακόλουθους περιορισμούς.

Πρώτον, η κατανομή θα πρέπει να είναι $Q(\cdot)$ εφικτή. Δηλαδή,

$$c(Q(\boldsymbol{\theta})) \leq \sum_{i=1}^n p_i(\boldsymbol{\theta}) \quad (3.4)$$

για όλα τα $\boldsymbol{\theta} \in [0, 1]^n$. Ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει ότι το κόστος του κοινού αγαθού θα καλυφθεί πλήρως από τις μεμονωμένες συνεισφορές των συμμετεχόντων.

Δεύτερον, η κατανομή θα πρέπει να παρέχει *κίνητρο συμμετοχής*. Δηλαδή,

$$\mathbb{E}_{\theta_{-i}} [\theta_i u(Q(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})) - p_i(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})] \geq 0, \quad \forall \theta_i \quad (3.5)$$

για κάθε i και κάθε $\theta_i \in [0, 1]$. Ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει ότι όλοι οι χρήστες λαμβάνουν μία μη αρνητική αναμενόμενη χρησιμότητα με τη συμμετοχή τους· διαφορετικά θα αρνούσαν να συμμετέχουν.

Τέλος, η κατανομή θα πρέπει επίσης να παρέχει *κίνητρο ειλικρίνειας*. Δηλαδή,

$$\mathbb{E}_{\theta_{-i}} [\theta_i u(Q(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})) - p_i(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})] \geq \mathbb{E}_{\theta_{-i}} [\theta_i u(Q(\hat{\theta}_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})) - p_i(\hat{\theta}_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})] \quad (3.6)$$

για κάθε i και κάθε $\hat{\theta}_i$ και $\theta_i \in [0, 1]$, ώστε κανένας χρήστης να μην έχει το κίνητρο να δηλώσει διαφορετική παράμετρο χρησιμότητας $\hat{\theta}_i$ από την πραγματική του θ_i . Με άλλα λόγια, η χρησιμότητα που λαμβάνουν όλοι οι χρήστες όταν είναι ειλικρινείς θα πρέπει να είναι τουλάχιστον όση θα ήταν αν δεν είναι. Η γνωστή “αρχή της αποκάλυψης” (revelation principle) εγγυάται ότι ο περιορισμός (3.6) μας εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει κανένας μηχανισμός που να μην παρέχει το κίνητρο της ειλικρίνειας και να επιτυγχάνει μεγαλύτερη τιμή κοινωνικής ευημερίας από αυτή που μπορούμε να επιτύχουμε με τον περιορισμό αυτό.

Όταν όμως έχουμε ελλιπή πληροφόρηση για τις παραμέτρους χρησιμότητας των χρηστών (και επομένως η λύση μας θα πρέπει να περιοριστεί σύμφωνα με την (3.6)), δυστυχώς, σύμφωνα με το θεώρημα των Myerson και Satterthwaite [80], η μέση μέγιστη τιμή του (3.3) δεν μπορεί να επιτευχθεί καθώς οι περιορισμοί (3.6) και (3.4) θα είναι δεσμευτικοί. Στις περιπτώσεις αυτές, αν θέλουμε να επιτύχουμε το μέγιστο της (3.3) χωρίς περιορισμούς (τη βέλτιστη κοινωνική ευημερία), θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα εξωτερικής χρηματοδότησης του κοινού αγαθού ώστε να είναι εφικτή η παροχή του. Στην περίπτωση μας όμως αυτό δεν είναι δυνατόν αφού θεωρούμε ότι η παροχή του αγαθού είναι αυτόνομη.

Αυτό σημαίνει ότι αν επιθυμούμε να κατασκευάσουμε το κοινό αγαθό με αυτόνομη παροχή πόρων και με ελλιπή πληροφόρηση για τους τύπους των χρηστών θα πρέπει να συμβιβαστούμε με μία μη βέλτιστη λύση καθώς θα πρέπει να πληρώσουμε ένα “φόρο πληροφορίας” στους χρήστες για να αποκαλύψουν τις παραμέτρους χρησιμότητας τους, η οποία ονομάζεται “δεύτερη καλύτερη”. Ένα ενδιαφέρον ερώτημα είναι πόσο κοντά μπορεί να είναι η δεύτερη καλύτερη λύση στη βέλτιστη. Πριν όμως μελετήσουμε σε μεγαλύτερο βάθος τη σχέση μεταξύ δεύτερου καλύτερου και βέλτιστου δίνουμε έναν αυστηρό χαρακτηρισμό της δεύτερης καλύτερης λύσης.

Επιθυμούμε λοιπόν να μεγιστοποιήσουμε τη μέση κοινωνική ευημερία του συστήματος (το πρόβλημα βελτιστοποίησης (3.3)) αλλά με τους περιορισμούς που εκφράζονται από τις συνθήκες (3.4), (3.5) και (3.6). Μάλιστα, μπορεί να δείξει κανείς ότι ο ακόλουθος *εκ των υστέρων* περιορισμός είναι ισοδύναμος με τον *εκ των προτέρων* περιορισμό για κάλυψη του κόστους [32] και έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι διευκολύνει την ανάλυση:

$$\mathbb{E}[c(Q(\boldsymbol{\theta})) - \sum_{i=1}^n p_i(\boldsymbol{\theta})] \geq 0. \quad (3.7)$$

Μπορούμε επίσης να δείξουμε, δείτε το [76], ότι το πρόβλημα μας ισοδυναμεί με το να μεγι-

στοποικήσουμε το (3.11) με τον περιορισμό

$$E \left[\sum_i g_i(\theta_i) u(Q(\boldsymbol{\theta})) - c(Q(\boldsymbol{\theta})) \right] \geq 0, \quad (3.8)$$

όπου $h(\cdot)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της H , και

$$g(\theta_i) = \theta_i - \frac{(1 - H_i(\theta_i))}{h_i(\theta_i)}. \quad (3.9)$$

Σύμφωνα με την (3.8), το άθροισμα $\sum_i g_i(\theta_i) u(Q(\boldsymbol{\theta}))$ είναι η μέγιστη δυνατή συνεισφορά που μπορεί να ζητηθεί από τους χρήστες και έτσι ο φόρος πληροφορίας που χρειάζεται να τους δοθεί ώστε να αποκαλύψουν την ιδιωτική τους πληροφορία είναι $(\theta_i - g_i(\theta_i)) u(Q(\boldsymbol{\theta}))$.

Τότε η λύση του

$$Q(\boldsymbol{\theta}) \in \arg \max_Q \left[\sum_{i=1}^n \theta_i u(Q) - c(Q) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n g(\theta_i) u(Q) - c(Q) \right) \right], \quad (3.10)$$

για κάποια τιμή του πολλαπλασιαστή Lagrange, λ , δεν είναι μόνο απαραίτητη, αλλά και ικανή συνθήκη για να είναι μία κατανομή η δεύτερη καλύτερη: επίσης εξασφαλίζει ότι μία δεύτερη καλύτερη κατανομή υπάρχει (βλ. [76]).

Ωστόσο, οι υπολογισμοί που χρειάζονται για να υπολογίσει κανείς την κατανομή αυτή είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι και επιπλέον όσο το πλήθος των χρηστών αυξάνεται ο λόγος της δεύτερης καλύτερης αποδοτικότητας προς τη βέλτιστη τείνει στο μηδέν. Θα αναλύσουμε στη συνέχεια υπό ποιές υποθέσεις μπορεί κανείς να αντιμετωπίσει τα δύο αυτά εμπόδια.

3.2 Αποκλεισμοί και ο ρόλος του πλήθους των συμμετεχόντων

Επιστρέφουμε τώρα στο βασικό μας ερώτημα: πόσο κοντά στο βέλτιστο μπορεί να φτάσει ο δεύτερος καλύτερος μηχανισμός; Από το θεώρημα των Myerson-Satterthwaite (και από τη μορφή της εξίσωσης Lagrange), γνωρίζουμε ότι οποιοσδήποτε μηχανισμός θα αποφέρει συνολική κοινωνική ευημερία η οποία θα είναι αυστηρά μικρότερη από το βέλτιστο σημείο.

Τα αποτελέσματα των [77], [76] και [81], μαζί με την πιο γενική ανάλυση του [2], υποδηλώνουν ότι ένας χρήστης θα επιθυμήσει να συνεισφέρει μόνο στο βαθμό που η συνεισφορά του έχει σημαντική επιρροή στην κατασκευή του κοινού αγαθού. Η επιρροή είναι της τάξης

του $1/\sqrt{n}$. Διαισθητικά, θα πρέπει να είναι φθίνουσα ως προς το n : όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των χρηστών τόσο μικρότερη επιρροή θα έχει ο κάθε μεμονωμένος χρήστης στη συνολική ποσότητα αγαθού που θα κατασκευαστεί.

Επομένως, κάθε χρήστης είναι πρόθυμος να συνεισφέρει για την κάλυψη του κόστους μία ποσότητα της τάξης του $1/\sqrt{n}$ επί το όφελος που περιμένει να αποκομίσει από το σύστημα. Η συνολική συνεισφορά που μπορεί να αποσπασθεί από τους χρήστες είναι της τάξης του $n/\sqrt{n} = \sqrt{n}$ επί το μέσο όφελος ανά χρήστη από τη διαθεσιμότητα του περιεχομένου. Αντίθετα, η αποδοτική συνολική συνεισφορά είναι της τάξης του n επί το μέσο όφελος ανά χρήστη από τη διαθεσιμότητα του περιεχομένου. Άρα, καθώς $n \rightarrow \infty$, το συνολικό επίπεδο κοινωνικής ευημερίας που επιτυγχάνεται από τον δεύτερο καλύτερο μηχανισμό τείνει στο μηδέν ως ποσοστό του βέλτιστου.

Έτσι, όταν ένας χρήστης δεν αναμένει ότι η συμμετοχή του θα είναι καθοριστική, θα δηλώνει τον μικρότερο δυνατό τύπο για τον εαυτό του. Παρατηρήστε ότι ο μηχανισμός θα καταφέρει να αποσπάσει ορισμένες συνεισφορές από τους χρήστες και όσο αυξάνεται το πλήθος τους, θα αυξάνεται και η συνολική ποσότητα του αγαθού. Η απόσταση όμως μεταξύ της βέλτιστης αποδοτικότητας μεγάλωνει όσο αυξάνεται το πλήθος των συμμετεχόντων.

Μία απάντηση στο πρόβλημα αυτό είναι να μειώσουμε το κίνητρο των χρηστών με υψηλούς τύπους να μιμηθούν αυτούς με χαμηλούς τύπους. Ένας τρόπος να το καταφέρουμε αυτό είναι να αποκλείσουμε τους χρήστες με χαμηλούς τύπους με βάση τις δηλώσεις τους. Επομένως, αποκλείοντας χρήστες ο σχεδιαστής του μηχανισμού μπορεί να αποφύγει την ασυμπτωτικά πλήρη απώλεια οφέλους. Η βέλτιστη αποδοτικότητα δεν μπορεί να επιτευχθεί αλλά το όριο του λόγου της δεύτερης καλύτερης αποδοτικότητας προς τη βέλτιστη φράσσεται μακριά από το μηδέν.

Για να γίνει αυτό κατανοητό παρατηρήστε ότι σε κάθε μηχανισμό με αποκλεισμούς θα πρέπει να απαιτηθεί μία ελάχιστη συνεισφορά από όλους τους συμμετέχοντες: αυτούς των οποίων ο τύπος είναι αρκετά υψηλός. Έτσι, ο οριακός τύπος θα πρέπει να συνεισφέρει ακριβώς την αξία του, και οι υψηλότεροι τύποι θα επιθυμούν να συνεισφέρουν περισσότερο μόνο στο βαθμό που αυτό θα έχει σημαντική επιρροή στο συνολικό αγαθό που θα κατασκευαστεί. Ο σχεδιαστής, εκτός από την ποσότητα του κοινού αγαθού Q και τις συνεισφορές p_i αποφασίζει και για την τιμή της συνάρτησης αποκλεισμού $\pi_i(\theta)$, η οποία έχει τιμή 1 αν ο χρήστης i γίνεται δεκτός στο σύστημα και 0 αν όχι. Τότε ένας μηχανισμός ελάχιστης συνεισφοράς θα μπορούσε να οριστεί ως εξής:

Ορισμός 1 Ο μηχανισμός (Q, π, p) είναι ένας μηχανισμός ελάχιστης συνεισφοράς αν υπάρχει ένα $\bar{\theta}$ τέτοιο ώστε $\pi_i(\theta) = 1$ αν και μόνον αν $\theta_i \geq \bar{\theta}$ και $p_i(\theta) \geq \pi_i(\theta) \bar{\theta} f(\theta)$ για κάθε i και $\theta \in H^n$, όπου η $f(\cdot)$ εκφράζει το μέσο όφελος ανά χρήστη από τη διαθεσιμότητα περιεχομένου.

Επομένως, όταν εφαρμόζεται ένας τέτοιος μηχανισμός η συνολική αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται θα εξαρτάται τώρα από το πλήθος των χρηστών n (αντί για την \sqrt{n}) και έτσι η απώλεια σε αποδοτικότητα φράσσεται.

Επιπλέον, παρατηρείστε ότι σε μία μεγάλη οικονομία, ο μέσος χρήστης έχει μικρή επιρροή στην ποσότητα που κατασκευάζεται. Οι συνεισφορές λοιπόν από τους συμμετέχοντες χρήστες θα είναι σχεδόν ανεξάρτητες από τον τύπο τους και η επιπλέον απώλεια σε αποδοτικότητα, αν χρησιμοποιήσουμε μία καθορισμένη συνεισφορά για όλους τους χρήστες, είναι αμελητέα όταν το πλήθος τους είναι μεγάλο. Έτσι, ασυμπτωτικά, όλες οι συνεισφορές προέρχονται από ένα καθορισμένο “εισητήριο εισόδου” το οποίο θα πρέπει να πληρώσουν όσοι επιθυμούν να συμμετέχουν.

Στα πλαίσια του διομήτιμου διαμοιρασμού αρχείων ένας τέτοιος μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς είναι πολύ ελκυστικός καθώς όπως θα συζητήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο θα μπορούσε να μεταφραστεί σε ένα πολύ απλό σχήμα το οποίο απαιτεί από τους χρήστες να διαμοιράζονται ένα προκαθορισμένο πλήθος αρχείων στη μονάδα του χρόνου, το οποίο μπορεί να υπολογίζεται εκ των προτέρων με βάση την κατανομή των τύπων των χρηστών και το αναμενόμενο πλήθος τους. Ο μηχανισμός αυτός έχει δύο πλεονεκτήματα: έχει πολύ απλή μορφή και δεν συμπεριλαμβάνει τη χρήση τιμολόγησης και πληρωμών. Το δεύτερο είναι ιδιαίτερα ελκυστικό σε ένα μεγάλο καταναμημένο διομήτιμο σύστημα όπου η διαχείριση εικονικού συναλλάγματος δεν είναι εύκολο να υλοποιηθεί (βλ. Ενότητα 2.5.3). Ως προς την υλοποίηση είναι επίσης πολύ σημαντικό το γεγονός ότι δεν απαιτείται καμία επικοινωνία μεταξύ των χρηστών και του σχεδιαστή του συστήματος. Οι χρήστες ανακοινώνουν τον τύπο τους απλά αποφασίζοντας αν θα συμμετέχουν ή όχι με βάση τη δήλωση του σχεδιαστή για το αναμενόμενο πλήθος αρχείων που θα είναι διαθέσιμα (δείτε την Ενότητα 4.6.3 για ορισμένα ζητήματα σταθερότητας που προκύπτουν).

Ας ορίσουμε ξανά λοιπόν το πρόβλημα της σχεδίασης ενός μηχανισμού κάνοντας την υπόθεση ότι υπάρχει η δυνατότητα να αποκλείσουμε έναν χρήστη από τη χρήση του αγαθού. Δεδομένου ενός τέτοιου μηχανισμού κάθε χρήστης ανακοινώνει τον τύπο του θ_i . Ο μηχανισμός τότε ορίζει το $Q(\theta)$ και αποφασίζει ποιοι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αγαθό. Αν ο χρήστης i αποκλειστεί από τη χρήση του, τότε $\pi_i(\theta) = 0$. Στην αντίθετη περίπτωση $\pi_i(\theta) = 1$

και θα πρέπει να συνεισφέρει $p_i(\boldsymbol{\theta})$. Επομένως απλά ξαναγράφουμε τις (3.3), (3.7), (3.5), (3.6), συμπεριλαμβάνοντας τη συνάρτηση $\pi_i(\cdot)$. Το πρόβλημα της σχεδίασης ενός μηχανισμού είναι τώρα η μεγιστοποίηση της αναμενόμενης κοινωνικής ευημερίας:

$$\underset{\pi_1(\cdot), \dots, \pi_n(\cdot), Q(\cdot)}{\text{maximize}} E [\sum_i \pi_i(\boldsymbol{\theta}) \theta_i u(Q(\boldsymbol{\theta})) - c(Q(\boldsymbol{\theta}))] \quad (3.11)$$

με τον περιορισμό ότι οι αναμενόμενες συνεισφορές θα πρέπει να καλύπτουν το αναμενόμενο κόστος:

$$E [\sum_i \pi_i(\boldsymbol{\theta}) p_i(\boldsymbol{\theta}) - c(Q(\boldsymbol{\theta}))] \geq 0, \quad (3.12)$$

τον περιορισμό ότι κάθε χρήστης θα πρέπει να αναμένει να έχει θετικό καθαρό όφελος από τη συμμετοχή του:

$$E [\pi_i(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i}) \{ \theta_i u(Q(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})) - p_i(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i}) \}] \geq 0, \quad (3.13)$$

για κάθε i , και τον περιορισμό ότι κάθε χρήστης i μεγιστοποιεί το καθαρό του όφελος δηλώνοντας τον πραγματικό του τύπο θ_i και όχι κάποιον άλλο θ'_i :

$$\begin{aligned} & E [\pi_i(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i}) \{ \theta_i u(Q(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})) - p_i(\theta_i, \boldsymbol{\theta}_{-i}) \}] \\ & \geq E \left[\pi_i(\hat{\theta}_i, \boldsymbol{\theta}_{-i}) \left\{ \theta_i u(Q(\hat{\theta}_i, \boldsymbol{\theta}_{-i})) - p_i(\hat{\theta}_i, \boldsymbol{\theta}_{-i}) \right\} \right], \end{aligned} \quad (3.14)$$

για κάθε i και θ'_i .

Παρόμοια με την περίπτωση ενός κοινού αγαθού χωρίς αποκλεισμούς, μπορεί να δείξει κανείς, δείτε το [76], ότι το παραπάνω πρόβλημα αντιστοιχεί στο πρόβλημα μεγιστοποίησης της (3.11) με τον περιορισμό ότι

$$E \left[\sum_i \pi_i(\boldsymbol{\theta}) g_i(\theta_i) u(Q(\boldsymbol{\theta})) - c(Q(\boldsymbol{\theta})) \right] \geq 0, \quad (3.15)$$

όπου $h(\cdot)$ συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της H , και η $g(\cdot)$ είναι όπως στην (3.9).

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί επίσης με μεθόδους Lagrange (βλ. [30]). Δηλαδή, υπάρχει ένας μη αρνητικός αριθμός λ τέτοιος ώστε το πρόβλημα μας να ισοδυναμεί με τη λύση

του παρακάτω προβλήματος χωρίς περιορισμούς

$$\underset{\pi_1(\cdot), \dots, \pi_n(\cdot)}{\text{maximize}} E \left[\sum_i \pi_i(\boldsymbol{\theta}) (\theta_i + \lambda g(\theta_i)) u(Q(\boldsymbol{\theta})) - (1 + \lambda) c(Q(\boldsymbol{\theta})) \right]. \quad (3.16)$$

3.3 Ασυμπτωτικά βέλτιστοι μηχανισμοί

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πλήρης λύση του προβλήματος μας είναι, εν γένει, πολύπλοκη. Ωστόσο, οι Κουρκουμπέτης και Weber [30] δείχνουν ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το (3.17) παρακάτω για να προσεγγίσουμε τη λύση του (3.11) με τον περιορισμό (3.15). Τότε δείχνουν ότι όταν το n είναι μεγάλο υπάρχει ένας απλός μηχανισμός ο οποίος βασίζεται στη λύση ενός απλού προβλήματος βελτιστοποίησης και ο οποίος επιτυγχάνει κοινωνική ευημερία η οποία απέχει $O(1/n)$ από τη μέγιστη δυνατή (τη δεύτερη καλύτερη).

Πιο συγκεκριμένα, υποθέτοντας ότι $u(Q) = AQ^\alpha$ και $c(Q) = BQ^\beta$, όπου $A, B > 0$, $\delta > 0$, $0 < \alpha \leq 1, \beta \geq 1$, και $\alpha < \beta$, αποδεικνύεται στο [30] το ακόλουθο Θεώρημα¹.

Θεώρημα 1 Έστω P το πρόβλημα μεγιστοποίησης της (3.11) με τον περιορισμό (3.15), και βέλτιστη τιμή την Φ_n . Έστω Q^* και θ^* οι τιμές των μεταβλητών στο βέλτιστο σημείο του προβλήματος P^* , το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$\underset{\theta \in [0,1], Q \geq 0}{\text{maximize}} \left\{ nu(Q) \int_\theta^1 \eta h(\eta) d\eta - c(Q) \right\} \quad (3.17)$$

υπό τον περιορισμό

$$n[1 - H(\theta)]\theta u(Q) - c(Q) \geq 0. \quad (3.18)$$

Έστω Φ_n^* η βέλτιστη τιμή του προβλήματος αυτού. Υποθέστε ότι παίρνουμε ως λύση για το P τις συναρτήσεις $\pi_i(\theta) = 1\{\theta \geq \theta^*\}$ και $Q(\boldsymbol{\theta}) = Q^*$. Τότε η αναμενόμενη κοινωνική ευημερία που προκύπτει από το μηχανισμό αυτό είναι Φ_n^* , η οποία είναι ασυμπτωτικά η μέγιστη δυνατή καθώς ισχύει ότι $\Phi_n/\Phi_n^* \leq 1 + O(n^{-1})$.

Παρατηρείστε ότι όλοι οι χρήστες στους οποίους επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν το αγαθό συνεισφέρουν $f = \theta^* u(Q^*)$. Ο χρήστης i μπορεί να χρησιμοποιήσει το αγαθό αν και μόνο αν $\theta_i \geq \theta^*$. Αυτή η συνθήκη είναι η ίδια με την συνθήκη που απαιτεί το καθαρό του όφελος

¹ στο [30] το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύεται για μία πιο γενική συνάρτηση κόστους $c(n, Q)$. Επιπλέον υπό μία πιο ασθενή υπόθεση, ότι $A_1 Q^\alpha \leq u(Q) \leq A_2 Q^\alpha$, και $B_1 h(n) Q^\beta \leq c(Q) = B_2 h(n) Q^\beta$, όπου $A_1, A_2, B_1, B_2 > 0$, $0 < \alpha \leq 1, \beta \geq 1$, και $\alpha < \beta$, η απώλεια σε αποδοτικότητα φράσσεται ως εξής: $\Phi_n/\Phi_n^* \leq 1 + O(\sqrt{n})$.

να είναι μη αρνητικό, δηλαδή $\theta_i u(Q) - f \geq 0$. Το αναμενόμενο πλήθος χρηστών για τους οποίους αυτό ισχύει είναι $n(1 - H(\theta^*))$ και $Q = n(1 - H(\theta^*))f$. Αυτό σημαίνει ότι στην πράξη ο σχεδιαστής δεν χρειάζεται να επέμβει. Εφόσον η συνεισφορά f έχει οριστεί, τα βέλτιστα $\pi(\cdot)$ και Q προκύπτουν απλά ως αποτέλεσμα των ορθολογικών αποφάσεων των χρηστών για το αν θα συμμετέχουν ή όχι.

Ως ένα απλό αριθμητικό παράδειγμα, υποθέστε ότι $u(Q) = 0.6Q^{1/2}$, $c(Q) = Q$, και τα θ_i είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στο διάστημα $[0, 1]$, και έτσι $H(x) = x$. Η λύση των (3.17)–(3.18) είναι $\theta = 1/4$, $Q = 0.0126563n^2$ και η τιμή της κοινωνικής ευημερίας είναι $0.006328125n^2$. Τέλος, η προκαθορισμένη συνεισφορά είναι $0.016875n$. Μπορούμε να συγκρίνουμε τη λύση αυτή με τη βέλτιστη (χωρίς τους περιορισμούς για κίνητρο συμμετοχής και κίνητρο ειλικρίνειας) η οποία θα ήταν στην περίπτωση αυτή $0.01125n^2$, για $Q = 0.01125n^2$. Συνεπώς, η ανάγκη για την ικανοποίηση των περιορισμών οδηγεί σε μείωση της κοινωνικής ευημερίας κατά 43.75%, στο συγκεκριμένο αριθμητικό παράδειγμα.

3.4 Εφαρμογές

Θα περιγράψουμε τώρα μερικές ενδιαφέρουσες εφαρμογές των παραπάνω σημαντικών θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη σχεδίαση μηχανισμών κινήτρων για διομότιμα συστήματα των οποίων οι υπηρεσίες έχουν μία έννοια κοινού αγαθού όπως είναι ο διαμοιρασμός αρχείων, ο διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης (WLAN peering), και τα ερευνητικά υπολογιστικά πλέγματα (scientific grids). Ο διαμοιρασμός αρχείων, και πιο συγκεκριμένα η διαθεσιμότητα περιεχομένου, καλύπτεται σε λεπτομέρεια στο επόμενο κεφάλαιο και ο διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης στα [30] και [41]. Η μοντελοποίηση του υπολογιστικού πλέγματος ως ένα πρόβλημα παροχής ενός κοινού αγαθού είναι μία πρωτότυπη προσέγγιση που εισάγεται στη διατριβή αυτή αλλά καθώς η σε βάθος ανάλυση του μοντέλου έχει αφιερωθεί για μελλοντική εργασία δεν θα επεκταθούμε περισσότερο στα επόμενα κεφάλαια, και θα περιοριστούμε στην παρουσίαση των βασικών επιχειρημάτων που καθιστούν μία τέτοια προσέγγιση ρεαλιστική και ενδιαφέρουσα στην ενότητα αυτή.

3.4.1 Διαθεσιμότητα περιεχομένου

Στην περίπτωση των διομότιμων συστημάτων διαμοιρασμού αρχείων, όταν η αναφόρτωση δεν επιφέρει σημαντικό κόστος, έχουμε ήδη επιχειρηματολογήσει ότι η διαθεσιμότητα περιεχομένου είναι το βασικό αγαθό που παρέχεται και θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ως ένα

κοινό αγαθό: όλοι οι χρήστες οφελούνται από το συνολικό πλήθος των διαθέσιμων αρχείων ενώ το περιεχόμενο δεν καταναλώνεται με την αντιγραφή του. Έτσι, το Q αντιστοιχεί στο πλήθος των διαμοιραζομένων αρχείων στη μονάδα του χρόνου και η συνεισφορά του χρήστη i είναι το πλήθος αρχείων, f_i , που είναι αποθηκευμένα —και διαθέσιμα— στον προσωπικό του υπολογιστή επί το ποσοστό του χρόνου που παραμένει συνδεδεμένος (η διαθεσιμότητα του).

Μία από τις βασικές συνεισφορές της διατριβής αυτής είναι η προσαρμογή του οικονομικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα για την περίπτωση του διομότιμου διαμοιρασμού αρχείων και η σε βάθος ανάλυση των διάφορων θεωρητικών και πρακτικών ζητημάτων που προκύπτουν. Το τμήμα αυτό της εργασίας μας παρουσιάζεται στα επόμενα δύο κεφάλαια και δεν θα επεκταθούμε περισσότερο εδώ.

3.4.2 Διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης

Ο διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης (WLAN peering) [42] [29] είναι μία πρωτότυπη διομότιμη εφαρμογή η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι τα ασύρματα σημεία πρόσβασης παρέχουν μεγάλες ποσότητες εύρους ζώνης οι οποίες υποχρησιμοποιούνται συνήθως από τους ιδιοκτήτες τους όπως επίσης και η ευρυζωνική σύνδεση στο Διαδίκτυο που στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν στη διάθεση τους οι ιδιοκτήτες ασύρματων σημείων πρόσβασης. Έτσι, η δημιουργία μίας διομότιμης κοινότητας για τον διαμοιρασμό των ανεκμετάλλευτων πόρων τους, θα μπορούσαν να εξασφαλίσουν για όλους πρόσβαση στο Διαδίκτυο κατά τις μετακινήσεις τους.

Έτσι, στην περίπτωση αυτή το κοινό αγαθό Q είναι η συνολική κάλυψη που επιτυγχάνεται από τον διαμοιρασμό των ασύρματων σημείων πρόσβασης, η οποία θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί ως η πιθανότητα μίας επιτυχούς αίτησης για πρόσβασης στο Διαδίκτυο κατά τις μετακινήσεις ενός χρήστη. Παρατηρείστε ότι η παροχή υπηρεσίας (η σύνδεση επισκεπτών στο Διαδίκτυο μέσω ενός ασύρματου σημείου πρόσβασης) δεν μειώνει την κάλυψη του δικτύου, τη δυνατότητα δηλαδή και άλλων χρηστών να συνδεθούν στο ίδιο ασύρματο σημείο πρόσβασης, όταν δεν υπάρχει συμφόρηση.

Ένας τρόπος να μοντελοποιήσει κανείς τη συνεισφορά του χρήστη i (βλ. [30]), είναι να υποθέσει ότι ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης καλύπτει μία περιοχή A από τη συνολική έκταση B και ο χρήστης i αποδέχεται αιτήσεις για εξυπηρέτηση από επισκέπτες με πιθανότητα p_i . Τότε έχουμε ότι $Q = \sum_i^n p_i A/B$ και η ανάλυση είναι παρόμοια με την περίπτωση του διαμοιρασμού αρχείων.

3.4.3 Υπολογιστικό πλέγμα

Αν και οι ερευνητές προσεγγίζουν την παροχή πόρων στα υπολογιστικά πλέγματα (computing grids) ως μία ηλεκτρονική αγορά για υπολογιστικούς πόρους (είτε για λόγους αποδοτικότητας [66] είτε για οικονομική εκμετάλλευση [64]) υπάρχουν ορισμένες εφαρμογές για τις οποίες ένα μοντέλο κοινού αγαθού όπως αυτό που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό ίσως να ήταν πιο κατάλληλο. Πιο συγκεκριμένα, τα επιστημονικά πλέγματα (scientific grids) είναι μία ειδική περίπτωση μίας διομότιμης κοινότητας της οποίας οι συμμετέχοντες είναι μεγάλοι οργανισμοί όπως για παράδειγμα πανεπιστήμια, ερευνητικά εργαστήρια, κ.ά. οι οποίοι μοιράζονται τους υπολογιστικούς τους πόρους ώστε να μπορούν να εκτελούν εργασίες με τεράστιες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και/ή μνήμη (για προσωρινά δεδομένα) όπως πειράματα στις επιστήμες της βιολογίας, της φυσικής, της αστρονομίας, κ.ά. Σε ένα τέτοιο σύστημα, οι συμμετέχοντες οργανισμοί έχουν εν γένει συμμετρικούς ρόλους, καθώς προσφέρουν και καταναλώνουν υπολογιστικούς πόρους, και έχουν παρόμοιες, ή τουλάχιστον συγκρίσιμες, δυνατότητες. Δηλαδή, είναι ομότιμες οντότητες.

Το όφελος από το σχηματισμό ενός επιστημονικού πλέγματος είναι κυρίως χάρις στο μεγάλο ποσοστό πολυπλεξίας που μπορεί να επιτευχθεί καθώς η ζήτηση για υπολογιστικούς πόρους είναι εν γένει πολύ εκρηκτική. Δηλαδή, οι αιτήσεις για την εκτέλεση εργασιών είναι σχετικά αραιές στο χρόνο χωρίς καθορισμένη συχνότητα αλλά απαιτούν τεράστιες ποσότητες πόρων για την ολοκλήρωσή τους. Αυτό σημαίνει ότι εάν ένας οργανισμός βασιζόταν μόνο στους δικούς του πόρους για να ικανοποιήσει τη ζήτησή του θα έπρεπε να κάνει πολύ μεγάλες επενδύσεις σε πόρους, οι οποίοι θα ήταν χρήσιμοι μόνο στις περιόδους ζήτησης και επομένως θα υποχρησιμοποιούνταν το μεγαλύτερο διάστημα. Αν όμως δεν τοποθετηθούν οι κατάλληλοι μηχανισμοί κινήτρων, φανερά, η ορθολογική στρατηγική όλων των ομότιμων οργανισμών θα ήταν η ανέξοδη συμμετοχή. Δηλαδή, να μην επενδύσουν οι ίδιοι σε πόρους και να καταναλώνουν όσο περισσότερο είναι δυνατόν από τους διαθέσιμους πόρους. Τότε κανένας οργανισμός δεν θα συνεισφέρει πόρους και το σύστημα δεν θα μπορέσει να επιβιώσει.

Στα πλαίσια αυτά, έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι το άθροισμα των πόρων που συνεισφέρουν οι ομότιμες οντότητες σε ένα επιστημονικό πλέγμα, η συνολική χωρητικότητα του πλέγματος, παρουσιάζει στοιχεία ενός κοινού αγαθού, το οποίο υπό ένα δίκαιο σχήμα χρονοδρομολόγησης θα είναι διαθέσιμο σε όλους τους συμμετέχοντες για να εκτελούν ιδιαίτερα απαιτητικές σε υπολογιστικούς πόρους εργασίες. Και όσο μεγαλύτερη ποσότητα πόρων είναι διαθέσιμη τόσο μικρότερος θα είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών για όλους. Η

διαφορά από τα κλασικά μοντέλα κοινών αγαθών θα είναι ότι οι συμμετέχοντες δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το κοινό αυτό αγαθό όλοι μαζί ταυτόχρονα το οποίο μπορεί να μην είναι σημαντικό αν η χρήση των πόρων θα μπορούσε να χρονοπρογραμματιστεί με κάποιον μη επικαλυπτόμενο τρόπο.

Επομένως, μία ενδιαφέρουσα μαθηματική αφαίρεση ενός επιστημονικού πλέγματος είναι ένας εξυηρητητής με χωρητικότητα C , η οποία θα πρέπει να κατασκευαστεί από τους ίδιους τους πελάτες. Η καθυστέρηση που θα συναντούν οι πελάτες εξαρτάται φυσικά από το συνολικό ρυθμό αιτήσεων αλλά όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα τόσο μικρότερη θα είναι η καθυστέρηση για όλους. Αν ήταν λοιπόν οι ίδιοι υπεύθυνοι για την κατασκευή της χωρητικότητας C , ποιο ποσοστό του αντίστοιχου κόστους θα έπρεπε να αντιστοιχεί στον καθένα; Αυτό είναι ένα δύσκολο πρόβλημα παροχής πόρων, το οποίο σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις έχει επίσης ομοιότητες με την αυτόνομη παροχή ενός κοινού αγαθού.

Θεωρείστε λοιπόν ότι υπάρχουν n οργανισμοί ο καθένας συνεισφέροντας s_i ποσότητα μνήμης και c_i υπολογιστική ισχύ και ότι προορίζουν τους πόρους μόνο για χρήση στο επιστημονικό πλέγμα. Αν υποθέσουμε για απλότητα ότι έχουμε μία μεταβλητή για να εκφράσει τη συνολική ποσότητα πόρων που διαθέτει ο οργανισμός i , q_i , τότε η συνολική ποσότητα που θα είναι διαθέσιμη από το πλέγμα θα είναι Q , η οποία θα ισούται με $\sum_i q_i$. Υποθέστε επίσης το επιπλέον κόστος για την εκτέλεση εργασιών είναι μηδέν αλλά υπάρχει ένα κόστος, $c(q_i)$, για την αγορά τους. Για παράδειγμα, $c(q_i) = \alpha q_i$. Υποθέστε τέλος ότι και πάλι οι οργανισμοί διαφοροποιούνται μόνο από την παράμετρο χρησιμότητάς τους θ_i . Ο τελικός στόχος μας είναι η μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας

$$\max_{Q \geq 0} \sum_i \theta_i u(Q) - c(Q), \quad (3.19)$$

όπου $u(\cdot)$ είναι μία κοίλη συνάρτηση η οποία εκφράζει την αξία των οργανισμών (για τη μέση καθυστέρηση ανά εργασία) όσο το μέγεθος της υποδομής, Q , αυξάνεται.

Καθώς αυτό είναι στην πράξη το ίδιο μοντέλο με αυτό που αναλύσαμε παραπάνω, το βασικό αποτέλεσμα, ότι ένας μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς είναι ασυμπτωτικά βέλτιστος ισχύει και στην περίπτωση αυτή. Αυτό είναι σημαντικό γιατί υποδηλώνει ότι δεν χρειάζεται να έχουμε πληροφορία για τις παραμέτρους χρησιμότητας των οργανισμών ούτε να υλοποιήσουμε πολύπλοκους μηχανισμούς κινήτρων για να μπορέσουμε να επιτύχουμε ικανοποιητικά επίπεδα κοινωνικής ευημερίας στο σύστημα αυτό.

Σημειώστε ότι κατά το μοντέλο αυτό είναι η αρχική ποσότητα πόρων για την οποία επεν-

δύουν οι χρήστες που έχει σημασία και όχι η παροχή υπηρεσιών η οποία θεωρούμε ότι έχει αμελητέο κόστος από τη στιγμή που οι πόροι έχουν αγοραστεί και καθίστανται διαθέσιμοι. Και είναι ακριβώς ως προς αυτή τη διάσταση της συνεισφοράς τους που έχουν το κίνητρο να συμμετέχουν ανέξοδα: να αγοράσουν μία μικρή ποσότητα πόρων βασιζόμενοι στις επενδύσεις των υπολοίπων ώστε να μπορούν να εκτελούν γρήγορα και τις δικές τους εργασίες.

Κεφάλαιο 4

Διαθεσιμότητα περιεχομένου

Στο κεφάλαιο αυτό ορίζουμε ένα συγκεκριμένο μοντέλο κοινών αγαθών για τη διαθεσιμότητα περιεχομένου σε διομότιμα συστήματα διαμοιρασμού αρχείων. Περιγράφουμε τους πιθανούς μηχανισμούς κινήτρων με πλήρη και ελλιπή πληροφόρηση και, χρησιμοποιώντας ένα απλό παράδειγμα, συγκρίνουμε την αποδοτικότητα τους όσο μεγαλώνει το πλήθος των χρηστών καταδεικνύοντας τις ελκυστικές ιδιότητες του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς. Αναλύουμε επίσης μερικά ενδιαφέροντα θεωρητικά ζητήματα που θα προέκυπταν σε ένα ρεαλιστικό σύστημα το οποίο θα εφάρμοζε το μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς.

Η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό αποτελούν από κοινού εργασία με τους Robin Mason και Richard Weber (βλ. [10] και [12] αντίστοιχα).

4.1 Ένα μοντέλο αγαθών κοινής ωφέλειας για το διαμοιρασμό αρχείων

Εφαρμόζουμε τις ιδέες που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε ένα πρόβλημα διομότιμου διαμοιρασμού αρχείων ορίζοντας κατάλληλα τις συναρτήσεις $u(\cdot)$ και $c(\cdot)$. Υποθέστε ότι n ομότιμοι χρήστες προσφέρουν αρχεία περιεχομένου ο ένας στον άλλον. Υποθέστε επίσης ότι η χρησιμότητα του χρήστη i όταν το αναμενόμενο πλήθος διαφορετικών διαθέσιμων αρχείων στη μονάδα του χρόνου ισούται με Q , είναι $\theta_i u(Q)$, όπου η $u(\cdot)$ είναι κοίλη ως προς Q . Ο σχεδιαστής του συστήματος θα έπρεπε να αποφασίσει τη βέλτιστη ποσότητα περιεχομένου Q^* που θα πρέπει να διατεθεί και ποιο ποσοστό του κόστους $c(Q^*)$ θα πρέπει να συνεισφέρει ο κάθε χρήστης (ανάλογα με τον τύπο του θ_i). Τώρα είναι το πλήθος αρχείων, το οποίο συμβολίζουμε ως f_i (αντί για μία τιμή p_i) και το οποίο ορίζει τη συνεισφορά του χρήστη i .

Το καθαρό όφελος του χρήστη i δίνεται από την

$$b_i(Q(F)) = \theta_i u(Q(F)) - f_i, \quad (4.1)$$

όπου $\sum_i f_i = F$. Καθώς είναι το πλήθος των διαφορετικών αρχείων που έχει σημασία, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την πιθανότητα περισσότεροι από ένας χρήστες να διαμοιράζονται το ίδιο αρχείο. Έτσι, αν F είναι το συνολικό πλήθος αρχείων που συνεισφέρουν οι χρήστες, $F = \sum_i f_i$, υπάρχει εν γένει μία κοίλη συνάρτηση $Q(F)$ που μας δίνει το πλήθος των διαφορετικών αρχείων Q ως συνάρτηση του F . Συζητάμε τη μορφή και τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης αυτής στη συνέχεια.

Υποθέτουμε ότι η συνάρτηση χρησιμότητας $u(\cdot) \geq 0$ είναι συνεχώς διαφοροποιήσιμη, αύξουσα και αυστηρά κοίλη στο όρισμα της, και ότι είναι η ίδια για όλους τους χρήστες. Όπως στο μοντέλο κοινών αγαθών του προηγούμενου κεφαλαίου, οι χρήστες διαφέρουν ως προς την παράμετρο χρησιμότητάς τους θ_i (η τιμή της οποίας ακολουθεί την τυχαία κατανομή H με πυκνότητα πιθανότητας $h(\cdot)$) και έχουν όλοι την ίδια συνάρτηση κόστους για τον διαμοιρασμό αρχείων: γραμμική χωρίς σταθερό κόστος. Η υπόθεση αυτή δεν είναι καθοριστική για τα ποιοτικά αποτελέσματα που προκύπτουν.

Παρατηρείστε ότι προσπαθούμε να δώσουμε το κίνητρο στους χρήστες να παραμένουν στο σύστημα παρέχοντας οποιοδήποτε αρχείο, και όχι απλά να έχουν προσφέρει κάποια στιγμή στο παρελθόν, ανεξάρτητα από το ρυθμό αιτήσεων. Περιγράφουμε στο Κεφάλαιο 6 μερικά εναλλακτικά μοντέλα για περιπτώσεις όπου ο ρυθμός αιτήσεων προκαλεί κόστος και αναλύουμε σε βάθος ένα από αυτά: αυτό που λαμβάνει υπόψη του το κόστος της αναφόρτωσης.

Παρατηρείστε επίσης ότι οι χρήστες επιδεικνύουν κάποιο βαθμό αλτρουισμού καθώς οφελούνται και από την προσωπική τους συνεισφορά. Η υπόθεση αυτή είναι συμβατή με την παρατηρούμενη συμπεριφορά των χρηστών σε υπάρχοντα συστήματα διαμοιρασμού περιεχομένου, όπου οι περισσότεροι χρήστες συνεισφέρουν έστω κάποια (μικρή) ποσότητα περιεχομένου χωρίς την ύπαρξη σαφών κινήτρων. Ωστόσο, δεν ισχυριζόμαστε ότι έχουμε μοντελοποιήσει τον αλτρουισμό κατάλληλα. Απλώς σημειώνουμε ότι η απλοποίηση αυτή δεν είναι αβάσιμη.

Τέλος, για κάθε διάνυσμα θ ταξινομούμε τους χρήστες έτσι ώστε $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_n$ (θα το χρησιμοποιήσουμε αυτό για τον υπολογισμό κάποιων από τους προτεινόμενων μηχανισμών κινήτρων στην Ενότητα 4.5).

4.1.1 Η συνάρτηση $Q(F)$

Έστω ότι κάθε χρήστης προσφέρει το ίδιο πλήθος αρχείων, f , επιλέγοντάς τα τυχαία ανάμεσα σε ένα σύνολο από N αρχεία περιεχομένου, το μέγιστο δυνατό πλήθος διαφορετικών αρχείων που μπορεί να διατεθούν (χαλαρώνουμε την υπόθεση αυτή για ίση συνεισφορά αργότερα). Τότε το αναμενόμενο πλήθος διαφορετικών αρχείων που θα είναι διαθέσιμο είναι

$$Q = N(1 - (1 - f/N)^n),$$

και επομένως

$$f(Q) = N \left(1 - (1 - Q/N)^{1/n} \right).$$

Υποθέστε ότι το κόστος του κάθε χρήστη για την παροχή αρχείων είναι ανάλογο του πλήθους τους. Για απλότητα θεωρούμε ότι η σταθερά που εκφράζει την αναλογία αυτή ισούται με τη μονάδα (σημειώνοντας ότι θα μπορούσαμε πάντα να αλλάξουμε την κλίμακα της συνάρτησης χρησιμότητας). Συνεπώς, το συνολικό κόστος είναι $c(F) = F$, όπου $F = nf(Q)$, η οποία είναι μία αύξουσα κυρτή συνάρτηση ως προς Q . Επίσης, για οποιοδήποτε σταθερό Q , το κόστος nf αυξάνει γρήγορα ως προς n στο ασυμπτωτικό του $-N \log(1 - Q/N)$. Αυτό είναι μεγαλύτερο από το Q , το συνολικό κόστος αν δεν υπήρχαν αντίγραφα των ίδιων αρχείων. Σημειώστε ότι (βλ. Σχήμα 4.1) για ένα μεγάλο εύρος τιμών του Q το κόστος είναι σχεδόν γραμμικό ως προς Q , αλλά αυξάνει γρήγορα όσο το Q πλησιάζει στο N . Για παράδειγμα, για $n = 100$, βρίσκουμε ότι $nf(Q) = Q + 0.00005Q^2 + 3.32 \times 10^{-9}Q^3 + \dots$. Αυτό δικαιολογεί την προσέγγιση $c(F) = Q$ όταν ο λόγος Q/N δεν είναι κοντά στη μονάδα.

Στη συνέχεια αναλύουμε την περίπτωση όπου οι χρήστες διαμοιράζονται διαφορετικό πλήθος αρχείων. Υποθέστε ότι $n\rho_i$ από τους χρήστες μοιράζονται ο καθένας i αρχεία, επιλέγοντάς τα από ένα σύνολο $N = na$ αρχείων, $a > 0$. Έστω m ένα άνω φράγμα στο πλήθος αρχείων που ένας χρήστης μπορεί να διαμοιραστεί, και $\sum_k \rho_k = 1$. Το αναμενόμενο πλήθος διαφορετικών αρχείων που παρέχονται θα είναι

$$\begin{aligned} Q &= na \left[1 - \prod_{k=1}^m \left(1 - \frac{k}{na} \right)^{n\rho_k} \right] \\ &= na \left[1 - e^{-\sum_k k\rho_k/a} \right] + o(1). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Τώρα $F = n \sum_k k\rho_k$ είναι το συνολικό πλήθος αρχείων που προσφέρεται από τους χρήστες.

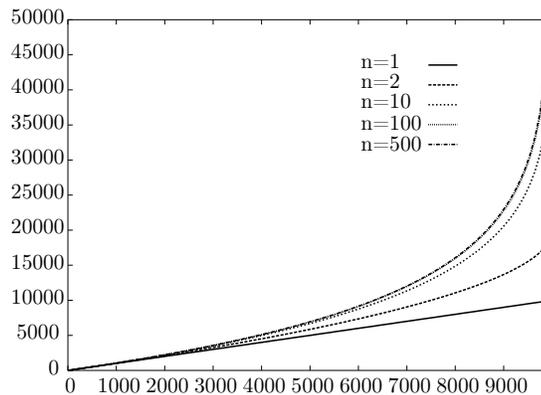
Επομένως μπορούμε ξανά να χρησιμοποιήσουμε την ίδια προσέγγιση όπως παραπάνω:

$$Q(F) = N \left(1 - e^{-F/N}\right). \quad (4.3)$$

Σημειώστε ότι καθώς η $Q(F)$ είναι κοίλη ως προς F , έχουμε ότι η $\bar{u}(F) = u(Q(F))$ είναι επίσης κοίλη ως προς F . Για ένα δεδομένο Q απαιτούμε

$$F(Q) = -N \log(1 - Q/N). \quad (4.4)$$

Φυσικά, όταν ο λόγος Q/N δεν είναι κοντά στη μονάδα, $F(Q) = Q(1 + \frac{1}{2}(Q/N) + o(Q/N))$, οπότε έχουμε πάλι ότι $c(F) \approx Q$. Κάνουμε την υπόθεση αυτή, η οποία δεν επηρεάζει τα



Σχήμα 4.1: $nf(Q)$ για $N = 10000$, $n = 1, 2, 10, 100, 500$

ποιοτικά αποτελέσματα που προκύπτουν, για λόγους απλότητας όπου κρίνεται απαραίτητο. Διαφορετικά, μπορούμε να συνθέσουμε τις συναρτήσεις $u(Q)$ και $Q(F)$ σε μία άλλη συνάρτηση χρησιμότητας όπου το κοινό αγαθό μας είναι το F (όπως κάνουμε στην Ενότητα 4.5 παρακάτω).

Και οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις οδηγούν σε μοντέλα που καλύπτονται από τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου. Πριν ασχοληθούμε με την περίπτωση της ελλιπούς πληροφόρησης δείχνουμε τη μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας και υπολογίζουμε τις τιμές Lindahl για την περίπτωση της πλήρους πληροφόρησης.

4.2 Η μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας

Είναι μία κλασική παρατήρηση στην οικονομική θεωρία ότι όταν υπάρχουν εξωτερικότητες, χωρίς την ύπαρξη συγκεκριμένων μηχανισμών κινήτρων το σημείο ισορροπίας του προτεινόμενου μοντέλου κοινών αγαθών θα είναι μη αποδοτικό (δείτε για παράδειγμα το [78]).

Η αιτία είναι ότι το πλήθος αρχείων f_i που ο κάθε χρήστης θα επιλέξει να διαμοιραστεί θα είναι αυτό που μεγιστοποιεί το προσωπικό του καθαρό όφελος αδιαφορώντας για τις θετικές εξωτερικότητες της επιλογής του (αύξηση του f_i θα προκαλούσε την αύξηση της ποσότητας Q και κατ' επέκταση το καθαρό όφελος όλων των υπολοίπων χρηστών). Στην ακραία περίπτωση όπου ο χρήστης i λαμβάνει μηδενικό όφελος από τα δικά του αρχεία f_i , κάθε χρήστης θα επέλεγε $f_i = 0$.

Είναι πολύ απλό να δείξουμε τη μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας. Κάθε χρήστης επιλέγει το πλήθος των αρχείων που θα διαμοιραστεί για να μεγιστοποιήσει το καθαρό όφελος του:

$$\max_{f_i \in \mathbb{R}} b_i(\theta_i, f_i, f_{-i}). \quad (4.5)$$

Αντίθετα, η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας απαιτεί κάθε χρήστης να επιλέξει το πλήθος των διαμοιραζομένων του αρχείων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συνολικού καθαρού οφέλους:

$$\max_{f_i \in \mathbb{R}} \sum_{j=1}^n b_j(\theta_j, f_j, f_{-j}). \quad (4.6)$$

Έστω f_i^* το πλήθος των αρχείων που διαμοιράζεται ο χρήστης i στο σημείο ισορροπίας στην περίπτωση αυτή. Τότε παρατηρείστε ότι το τελικό πλήθος διαφορετικών αρχείων Q^* , όπου $Q^* = Q(\sum_{i=1}^n f_i^*)$, θα είναι το ίδιο με τη λύση του (3.2). Δηλαδή, θα καταλήγαμε στη βέλτιστη παροχή πόρων όπως αυτή ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η διαφορά μεταξύ των δύο επιλογών του χρήστη i αναπαριστάται από τον όρο

$$E_i \equiv \sum_{j \neq i} b_j(\theta_j, f_j, f_{-j}). \quad (4.7)$$

Εφόσον ο E_i δεν εμφανίζεται στο πρόβλημα μεγιστοποίησης του χρήστη i (και αυτό ισχύει για όλα τα i), το σημείο ισορροπίας δεν θα είναι αποδοτικό. Αυτό μας οδηγεί στο ακόλουθο ερώτημα: ποιά πολιτική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να διορθώσουμε τη μη αποδοτικότητα του σημείου ισορροπίας;

4.3 Τιμολόγηση Lindahl

Η κλασική οικονομική προσέγγιση στο πρόβλημα των εξωτερικοτήτων είναι η θέσπιση τιμών που γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των προσωπικών και των κοινωνικών κινήτρων. Είναι πολύ απλό να δει κανείς ποιές τιμές απαιτούνται όταν η συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη i είναι συνεχώς διαφοροποιήσιμη ως προς f_i και f_{-i} . Από την προηγούμενη ενότητα, είναι φανερό ότι η σχετική τιμή για τον χρήστη i είναι

$$p_i \equiv \sum_{j \neq i} \frac{\partial b_j(\theta_j, f_j, f_{-j})}{\partial f_i} \quad (4.8)$$

έτσι ώστε ο χρήστης i να χρεώνεται p_i μονάδες για κάθε αρχείο που διαμοιράζεται. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το είδος των εξωτερικοτήτων. Στην περίπτωση μας θα ήταν θετική (δηλαδή, οι χρήστες αποζημιώνονται για τα αρχεία που διαμοιράζονται). Έτσι, η συνάρτηση καθαρού οφέλους του χρήστη i θα είναι τώρα $b_i(\theta_i, f_i, f_{-i}) + p_i f_i$. Η τιμή p_i είναι ακριβώς το συνολικό όφελος που επιφέρει ο χρήστης i σε όλους τους υπόλοιπους και είναι εύκολο να δει κανείς ότι χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές η αυτόνομη απόφαση του κάθε χρήστη στο σημείο ισορροπίας θα είναι να διαμοιραστεί f_i^* πλήθος αρχείων όπως αυτό υπολογίζεται από την εξίσωση (4.6).

Παρατηρείστε ότι οι τιμές που προκύπτουν δεν είναι ομοιόμορφες: γενικά, $p_i \neq p_j$ για $i \neq j$. Αυτό είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό των τιμών Lindahl όπως ονομάζονται· ορίζεται, ενδεχομένως, μία διαφορετική τιμή για κάθε χρήστη στο σύστημα. Στα συνηθισμένα ιδιωτικά αγαθά, όλοι οι χρήστες αντιμετωπίζουν την ίδια τιμή για το αγαθό· επιλέγουν τότε την ποσότητα που επιθυμούν να καταναλώσουν, και οι ποσότητες αυτές θα είναι εν γένει διαφορετικές για διαφορετικούς χρήστες. Στην περίπτωση ενός αγαθού κοινής ωφέλειας εμφανίζεται το αντίθετο φαινόμενο: όλοι οι χρήστες καταναλώνουν την ίδια ποσότητα του αγαθού, αλλά οι τιμές που αντιμετωπίζει ο κάθε χρήστης είναι διαφορετικές.

Έτσι, στην περίπτωση της διαθεσιμότητας περιεχομένου οι τιμές Lindahl απαιτούν να είναι πλήρως γνωστή η πληροφορία για τη χρησιμότητα των χρηστών και να υπολογίζονται διαφορετικές τιμές για διαφορετικούς χρήστες. Αντί για τιμές, θα μπορούσε κανείς να εξετάσει τη χρήση κανόνων του συστήματος οι οποίοι να επιβάλλουν άμεσα τις βέλτιστες επιλογές των χρηστών στο σημείο ισορροπίας σε ό,τι αφορά το πλήθος των διαμοιραζομένων αρχείων. Δηλαδή, κανόνες που να απαιτούν από τον κάθε χρήστη i να διαμοιραστεί f_i^* αρχείων αν επιθυμεί να συμμετάσχει στο σύστημα. Παρατηρείστε ότι οι κανόνες αυτοί θα πρέπει επίσης

να είναι προσωποποιημένοι και επίσης απαιτούν πλήρη πληροφόρηση για να υπολογιστούν.

4.4 Ελλιπής πληροφόρηση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξηγήσαμε τις δυσκολίες που προκύπτουν όταν η προσωπική πληροφορία των χρηστών (στην περίπτωση μας η παράμετρος χρησιμότητάς τους θ_i) δεν είναι γνωστή στον σχεδιαστή του συστήματος. Δείξαμε ωστόσο ότι, όταν η τυχαία κατανομή τους είναι γνωστή και όταν είναι δυνατό συγκεκριμένοι χρήστες να αποκλείονται από τη χρήση του συστήματος, η εφαρμογή ενός μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς ο οποίος ορίζει ένα ελάχιστο πλήθος αρχείων που θα πρέπει να διαμοιράζεται ο κάθε χρήστης για να συμμετάσχει θα οδηγούσε ασυμπτωτικά στη δεύτερη καλύτερη αποδοτικότητα (το καλύτερο που μπορούμε να επιτύχουμε υπό ελλιπή πληροφόρηση).

Με χρήση της συνάρτησης καθαρού οφέλους (4.1) αντί της (3.1), μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απευθείας τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε στην Ενότητα 3.3, αντικαθιστώντας την τιμή p_i με το πλήθος των αρχείων f_i που ο κάθε χρήστης θα πρέπει να διαμοιραστεί και ορίζοντας ως ποσότητα του κοινού αγαθού Q το σύνολο των μοναδικών αρχείων που είναι διαθέσιμα στο σύστημα (βλ. Ενότητα 4.1.1). Έτσι, χρησιμοποιώντας το Θεώρημα 1, για να επιτύχουμε να είμαστε $O(1/n)$ μακριά από το βέλτιστο (τη δεύτερη καλύτερη αποδοτικότητα) θα πρέπει να επιλέξουμε θ και F έτσι ώστε

$$\begin{aligned} & \underset{F, \theta}{\text{maximize}} \quad nu(Q(F)) \int_{\theta}^1 \eta h(\eta) d\eta - c(F) \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \quad (4.9) \\ & n[1 - H(\theta)]\theta u(Q(F)) - c(F) \geq 0. \end{aligned}$$

όπου F είναι το συνολικό πλήθος αρχείων που θα πρέπει να διαμοιραστούν ώστε να επιτευχθεί ένα σύνολο Q μοναδικών αρχείων.

Αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει μία πολύ απλή ερμηνεία. Θέτει δύο μεταβλητές: το σύνολο των μοναδικών διαθέσιμων αρχείων $Q^* = Q(F^*)$ (δηλαδή το όρισμα της συνάρτησης χρησιμότητας $u(\cdot)$) και τον τύπο του οριακού χρήστη, θ^* , ο οποίος είναι αδιάφορος για το εάν θα συμμετάσχει στο σύστημα ή όχι. Όλοι οι χρήστες που συμμετέχουν στο σύστημα απαιτείται να συνεισφέρουν $\theta^* u(Q)$ αρχεία (δηλαδή τη χρησιμότητα του οριακού χρήστη). Οι χρήστες με τύπο μεγαλύτερο από θ^* επιθυμούν να συμμετέχουν· αυτοί με $\theta < \theta^*$ όχι. Η συνολική ποσότητα αγαθού θα καλυφθεί από τις συνεισφορές των χρηστών που θα συμμετάσχουν, και

οι οποίοι θα είναι $n(1 - H(\theta^*))$ το πλήθος. Η μέση αξία του διαμοιρασμού αρχείου ανά χρήστη θα είναι $u(Q) \int_{\theta^*}^1 x dH$.

Επομένως, το (4.9) μεγιστοποιεί την αναμενόμενη κοινωνική ευημερία ως προς την επιλογή μίας πολιτικής προκαθορισμένης συνεισφοράς. Η βέλτιστη τέτοια πολιτική θα αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των δύο μεταβλητών F και θ^* . Επιπλέον, η συνεισφορά αυτή μπορεί να πληρωθεί “σε είδος”, αφού κάθε χρήστης που συμμετέχει στο σύστημα πληρώνει τη συνεισφορά του διαμοιράζοντας το ίδιο πλήθος αρχείων: $F/n(1 - H(\theta))$.

Αν και πολλά σημαντικά ζητήματα υλοποίησης σχετίζονται με την επιβολή ενός τέτοιου μηχανισμού κινήτρων, το αποτέλεσμα αυτό αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για τον ορισμό της οικονομικής αποδοτικότητας σε ένα διομότιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων καθώς και για τη σχεδίαση απλών και πρακτικών μηχανισμών για την παροχή των κατάλληλων κινήτρων συνεισφοράς. Έτσι λοιπόν, από έναν πιθανώς περίπλοκο μηχανισμό (ο οποίος απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς, ανταλλαγή μεγάλης ποσότητας πληροφορίας και πληρωμές μεταξύ των χρηστών) για να επιτευχθεί η δεύτερη καλύτερη αποδοτικότητα, το πρόβλημα έχει απλοποιηθεί στην απαίτηση κάθε χρήστη να συνεισφέρει ένα ελάχιστο πλήθος αρχείο για να γίνει δεκτός στο σύστημα (χωρίς να χρειάζεται να ανακοινώσει εκ των προτέρων τον τύπο του. Στην Ενότητα 4.6 συζητάμε τα πιο σημαντικά θεωρητικά και πρακτικά θέματα που προκύπτουν στο πλαίσιο αυτό και στο Κεφάλαιο 5 κάνουμε ένα βήμα παραπάνω προτείνοντας έναν μηχανισμό επιβολής χωρίς μνήμη ο οποίος επιτυγχάνει συγκρίσιμα επίπεδα αποδοτικότητας χωρίς όμως να απαιτεί πολύπλοκους μηχανισμούς συλλογής και διαχείρισης του ιστορικού χρήσης των χρηστών για να επιβληθεί.

Σημειώστε ότι υπάρχει επίσης η εναλλακτική προσέγγιση να χρησιμοποιήσει κανείς κανόνες συνεισφοράς βασισμένους στη μέση τιμή των βέλτιστων f_i με χρήση της πληροφορίας της τυχαίας κατανομής των τύπων των χρηστών. Στη συνέχεια διατυπώνουμε ένα απλό παράδειγμα για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε αριθμητικά όλους τους πιθανούς μηχανισμούς κινήτρων στα πλαίσια του προτεινόμενου μοντέλου και να καταδείξουμε τα ελκυστικά χαρακτηριστικά του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς.

4.5 Σύγκριση οικονομικών κινήτρων

Θα περιγράψουμε τώρα ένα συγκεκριμένο απλό μοντέλο διαμοιρασμού αρχείων για να κάνουμε πιο συγκεκριμένη την παραπάνω συζήτηση και να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις περιπτώσεις της πλήρους και της ελλιπούς πληροφόρησης. Κάθε χρήστης i αποφασίζει το

πλήθος αρχείων f_i που διαμοιράζεται. Θυμίζουμε ότι η συνάρτηση κατανομής H από την οποία παίρνει τιμές η παράμετρος θ_i έχει πεδίο τιμών το διάστημα $[0, 1]$. Το καθαρό όφελος του χρήστη i σε ένα διομότιμο σύστημα με n χρήστες και ένα διάνυσμα συνεισφορών $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)$ ισούται με

$$b_i(Q) = \theta_i u \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) - f_i. \quad (4.10)$$

Στο απλό μας παράδειγμα το όρισμα της συνάρτησης χρησιμότητας είναι το άθροισμα των τετραγωνικών ριζών του πλήθους αρχείων που διαμοιράζεται ο κάθε χρήστης. Δηλαδή, $Q(\mathbf{f}) = \sqrt{F}$. Όπως εξηγήσαμε στην Ενότητα 4.1.1, αυτό μοντελοποιεί την ύπαρξη αντιγράφων του ίδιου αρχείου: η συνεισφορά f_i αρχείων από τον χρήστη i συντελεί σε *χρήσιμη* ποσότητα περιεχομένου που είναι μικρότερη από f_i καθώς ορισμένα από τα αρχεία αυτά ίσως είναι ήδη διαθέσιμα από άλλους χρήστες. Και πάλι, η υπόθεση αυτή απλοποιεί τους υπολογισμούς χωρίς να είναι όμως καθοριστική.

Ο χρήστης i επιθυμεί να μεγιστοποιήσει το καθαρό του όφελος, $\max_{f_i} b_i(\mathbf{f})$, έχοντας ως δεδομένο το πλήθος των αρχείων που διαμοιράζονται οι υπόλοιποι χρήστες. Ένα σημείο ισορροπίας Nash χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα του πλήθους των διαμοιραζομένων αρχείων του κάθε χρήστη έτσι ώστε όλοι οι χρήστες να μεγιστοποιούν ταυτόχρονα, για το συγκεκριμένο διάνυσμα, το καθαρό τους όφελος. Η συνθήκη πρώτης παραγώγου για το πρόβλημα μεγιστοποίησης του χρήστη i είναι

$$\frac{\theta_i}{2\sqrt{f_i}} u' \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) - 1 \leq 0, \quad f_i \geq 0 \quad (4.11)$$

όπου η $u'(\cdot)$ συμβολίζει την παράγωγο της συνάρτησης χρησιμότητας.

Έστω ότι η επιλογή του χρήστη i στο σημείο ισορροπίας συμβολίζεται ως \hat{f}_i . Στο σημείο ισορροπίας μόνο οι χρήστες με αρκετά μεγάλα θ_i θα κάνουν αυστηρά θετική συνεισφορά. Έστω ότι το καθαρό όφελος του οριακού χρήστη, αυτού με το μικρότερο θ_i από αυτούς που κάνουν θετική συνεισφορά, συμβολίζεται ως θ_e όπου $e \in \{1, \dots, n\}$ και έστω $E \equiv \{e, \dots, n\}$. Για τους χρήστες που κάνουν θετική συνεισφορά, δηλαδή αυτούς με $i \in E$, η συνεισφορά τους

στο σημείο ισορροπίας θα είναι

$$\hat{f}_i = \left(\frac{\theta_i}{2} u' \left(\sum_{j=e}^n \sqrt{\hat{f}_j} \right) \right)^2. \quad (4.12)$$

Επομένως

$$\sum_{j=e}^n \sqrt{\hat{f}_j} = \frac{\Theta_e}{2} u' \left(\sum_{j=e}^n \sqrt{\hat{f}_j} \right) \quad (4.13)$$

όπου $\Theta_e \equiv \sum_{j=e}^n \theta_j$. Η εξίσωση (4.13) είναι μία έμμεση εξίσωση για τη μεταβλητή $\hat{Q} \equiv \sum_{j=e}^n \sqrt{\hat{f}_j}$. Λόγω της υπόθεσης μας ότι η $u(\cdot)$ είναι κοίλη, υπάρχει μία μοναδική λύση για την \hat{Q} (η οποία, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι εξαρτάται από την τιμή του Θ_e —επιστρέφουμε στο σημείο αυτό παρακάτω), και επομένως υπάρχει και μία μοναδική τιμή \hat{f} για το διάνυσμα των συνεισφορών στο σημείο ισορροπίας.

Τέλος, η ταυτότητα του οριακού χρήστη καθορίζεται από τη συνθήκη

$$\theta_e u(\hat{Q}) - \hat{f}_e = 0. \quad (4.14)$$

Λόγω περιορισμών των ακεραίων αριθμών, η συνθήκη αυτή μπορεί να μην ισχύει ακριβώς· αν δεν ισχύει, ο οριακός χρήστης ορίζεται ως ο τελευταίος χρήστης με μη αρνητικό καθαρό όφελος.

Ανακεφαλαιώνοντας, στο σημείο ισορροπίας Nash, $n - e$ από τους n χρήστες —αυτοί με τις μεγαλύτερες παραμέτρους χρησιμότητας— κάνουν αυστηρά θετικές συνεισφορές, σύμφωνα με την εξίσωση (4.12)· οι υπόλοιποι δεν προσφέρουν κανένα αρχείο. Το συνολικό πλήθος των διαθέσιμων αρχείων δίνεται από τη λύση της εξίσωσης (4.13).

Αντιπαραβάλλουμε στη συνέχεια τον χαρακτηρισμό του σημείου ισορροπίας Nash με τη λύση που προκύπτει όταν το σύστημα το ελέγχει ένας καλοπροαίρετος και πλήρως ενημερωμένος διαχειριστής ο οποίος επιλέγει τις συνεισφορές των χρηστών έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την κοινωνική ευημερία ως εξής:

$$\max_{\{f_1, \dots, f_n\}} \sum_{i=1}^n \left(\theta_i u \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) - f_i \right).$$

Η συνθήκη πρώτης παραγώγου για τον χρήστη i είναι

$$\frac{\theta_i}{2\sqrt{f_i}} u' \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) - 1 + \frac{\sum_{j \neq i} \theta_j}{2\sqrt{f_i}} u' \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) \leq 0 \quad f_i \geq 0. \quad (4.15)$$

Συμβολίζουμε το πλήθος αρχείων που προκύπτει f_i^* για $i \in \{1, \dots, n\}$. Σημειώστε ότι στη λύση αυτή, αν είναι βέλτιστο να συνεισφέρει αρχεία κάποιος χρήστης, τότε είναι βέλτιστο να συνεισφέρουν όλοι οι χρήστες (καθώς το οριακό κόστος και όφελος λόγω του διαμοιρασμού αρχείων είναι το ίδιο για όλους τους χρήστες).

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των εξισώσεων (4.11) και (4.15) είναι η παρουσία εξωτερικοτήτων στην τελευταία, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν ως εξής:

$$\frac{\sum_{j \neq i} \theta_j}{2\sqrt{f_i}} u' \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right)$$

για τον χρήστη i . Στην επόμενη ενότητα, αναλύουμε συγκεκριμένες προσεγγίσεις που εξασφαλίζουν ότι οι χρήστες λαμβάνουν υπόψη τους τις εξωτερικότητες αυτές όταν αποφασίζουν πόσα αρχεία θα διαμοιραστούν.

Η συνεισφορά του κάθε χρήστη είναι

$$f^* = \left(\frac{\Theta}{2} u'(Q^*) \right)^2 \quad (4.16)$$

όπου $\Theta \equiv \sum_{j=1}^n \theta_j$ και $Q^* \equiv n\sqrt{f^*}$. Αυτό μας δίνει μία έμμεση εξίσωση για το συνολικό πλήθος μοναδικών διαμοιραζομένων αρχείων στην περίπτωση αυτή:

$$Q^* = \frac{n\Theta}{2} u'(Q^*). \quad (4.17)$$

(Υπάρχει μία μοναδική λύση για την εξίσωση αυτή, λόγω της υπόθεσης μας ότι η $u(\cdot)$ είναι αυστηρά κοίλη.) Η σύγκριση της εξίσωσης (4.17) με την εξίσωση (4.13) δείχνει ότι $Q^* \geq \hat{Q}$, αφού $\Theta \geq \Theta_e$ και $n \geq 1$.

Ανακεφαλαιώνοντας, στο κοινωνικά βέλτιστο σημείο ισορροπίας, όπου όλοι οι χρήστες ενδιαφέρονται για το καθαρό όφελος των υπολοίπων στο σύστημα, κάθε χρήστης διαμοιράζεται f^* αρχεία, όπου $f^* \geq \max_i \hat{f}_i$. επομένως, το πλήθος αρχείων στο κοινωνικά βέλτιστο σημείο ισορροπίας είναι μεγαλύτερο από αυτό στο σημείο ισορροπίας Nash. Αυτό σημαίνει ότι το

συνολικό καθαρό όφελος στο κοινωνικά βέλτιστο σημείο ισορροπίας, το συμβολίζουμε ως S_{SO} ,

$$S_{SO} \equiv \sum_{i=1}^n \left(\theta_i u \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j^*} \right) - f_i^* \right)$$

είναι μεγαλύτερο από το συνολικό καθαρό όφελος στο σημείο ισορροπίας Nash, το συμβολίζουμε ως S_{NE} ,

$$S_{NE} \equiv \sum_{i=1}^n \left(\theta_i u \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{\hat{f}_j} \right) - \hat{f}_i \right)$$

δηλαδή, $S_{SO} \geq S_{NE}$. Εν συντομία, το σημείο ισορροπίας Nash είναι μη αποδοτικό.

4.5.1 Μηχανισμοί κινήτρων

Στην ενότητα αυτή, παράγουμε αναλυτικές εκφράσεις για διαφορετικούς μηχανισμούς κινήτρων οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να διορθώσουν το μη αποδοτικό σημείο ισορροπίας που προσδιορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ξεκινάμε με τον βέλτιστο μηχανισμό, όπου ο σχεδιαστής του συστήματος έχει πλήρη πληροφόρηση για τις παραμέτρους χρησιμότητας όλων των χρηστών και έχει τη δυνατότητα να εφαρμόσει διαφορετικά (προσωποποιημένα) κίνητρα για κάθε χρήστη. Στη συνέχεια θα αντιμετωπίσουμε όλο και λιγότερο ιδανικές συνθήκες, στις οποίες κίνητρα για συμμετοχή είναι απαραίτητο να δοθούν, η προσωποποίηση δεν είναι δυνατή, και τέλος η πληροφόρηση είναι ελλιπής.

Η βέλτιστη κοινωνική ευημερία

Η απλούστερη μέθοδος για να εξασφαλίσει κανείς τη μέγιστη αποδοτικότητα του διομήτιμου συστήματος είναι να απαιτήσει από τον κάθε χρήστη να διαμοιραστεί f^* αρχεία. Πιο συγκεκριμένα,

Μηχανισμός 1 (Βέλτιστος κανόνας) Κάθε χρήστης οφείλει να διαμοιράζεται f^* αρχεία, όπου f^* δίνεται από την (4.16).

Μία ισοδύναμη προσέγγιση είναι η χρήση τιμών για να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες (βλ. Ενότητα 4.3 παραπάνω). Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (4.11) και (4.15), είναι φανερό ότι η κατάλληλη τιμή για τον χρήστη i είναι

$$p_i \equiv \frac{\sum_{j \neq i} \theta_j}{2\sqrt{f^*}} u'(Q^*).$$

αντικαθιστώντας τις εκφράσεις για τα f^* και Q^* , η εξίσωση αυτή παίρνει την ακόλουθη πολύ απλή μορφή

$$p_i = \frac{\Theta_{-i}}{\Theta} \quad (4.18)$$

όπου $\Theta_{-i} \equiv \sum_{j \neq i} \theta_j$. Αυτό οδηγεί στον ακόλουθο μηχανισμό:

Μηχανισμός 2 (Βέλτιστες τιμές) Ο χρήστης i εισπράττει p_i μονάδες για κάθε αρχείο που διαμοιράζεται, όπου η τιμή p_i δίνεται από την εξίσωση (4.18).

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι βέλτιστοι μηχανισμοί εξαρτώνται από το διάνυσμα θ των παραμέτρων χρησιμότητας (απαιτούν πλήρη πληροφόρηση). Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι ο βέλτιστος κανόνας μπορεί να περιλαμβάνει ορισμένους χρήστες (αυτούς με τις μικρότερες παραμέτρους χρησιμότητας) οι οποίοι έχουν αρνητικό καθαρό όφελος συμμετέχοντας στο σύστημα. Αυτό εγείρει το θέμα του κατά πόσο είναι δυνατόν οι χρήστες αυτοί να εξαναγκαστούν να συμμετάσχουν στο σύστημα ή είναι απαραίτητο να τους δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα ώστε να συμμετάσχουν οικειοθελώς. Παρατηρήστε τέλος ότι ενώ η βέλτιστη τιμή είναι προσωποποιημένη (κάθε χρήστης δέχεται διαφορετική ανταμοιβή για το διαμοιρασμό ενός αρχείου) αυτό δεν ισχύει για τον βέλτιστο κανόνα. Σημειώστε όμως ότι η ομοιομορφία αυτή δεν ισχύει για τους βέλτιστους κανόνες με κίνητρα συμμετοχής όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Κανόνες πλήρους πληροφόρησης με κίνητρα συμμετοχής

Στην ενότητα αυτή, περιγράφουμε τους βέλτιστους κανόνες με πλήρη πληροφόρηση οι οποίοι όμως παρέχουν τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες να συμμετέχουν στο σύστημα. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζει τώρα ο σχεδιαστής του συστήματος είναι να επιλέξει τα επίπεδα συνεισφοράς ώστε να μεγιστοποιήσει το συνολικό καθαρό όφελος:

$$\max_{\{f_1, \dots, f_n\}} \sum_i \left(\theta_i u \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) - f_i \right)$$

υπό τους περιορισμούς ότι κάθε χρήστης θα πρέπει να λαμβάνει μη αρνητικό καθαρό όφελος:

$$\theta_i u \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) \geq f_i, \forall i. \quad (4.19)$$

Η εξίσωση Lagrange για το πρόβλημα μεγιστοποίησης αυτό είναι

$$L \equiv \sum_i \theta_i (1 + \lambda_i) u \left(\sum_{j=1}^n \sqrt{f_j} \right) - \sum_i (1 + \lambda_i) f_i. \quad (4.20)$$

Οι συνθήκες πρώτης παραγώγου είναι

$$\sqrt{f_i} = \frac{\sum_j \theta_j \rho_j u' \left(\sum_{l=1}^n \sqrt{f_l} \right)}{2\rho_i} \quad (4.21)$$

όπου $\rho_i \equiv 1 + \lambda_i$. Στις εξισώσεις αυτές οι συντελεστές λ_i είναι μη αρνητικοί. Είναι επίσης φθίνοντες για τον εξής λόγο: Για τους χρήστες i για τους οποίους ο περιορισμός συμμετοχής (4.19) είναι δεσμευτικός, θα έχουμε ότι $\lambda_i > 0$ και επίσης ότι $f_i = \theta_i u(\cdot)$. Συνδυάζοντας αυτό με την εξίσωση (4.21), παίρνουμε ότι το $\theta_i (1 + \lambda_i)^2$ θα πρέπει να είναι σταθερό. Εφόσον έχουμε υποθέσει ότι $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_n$, θα πρέπει να ισχύει ότι τα λ_i φθίνουν ως προς i .

Σύμφωνα με το παραπάνω οι βέλτιστοι κανόνες παίρνουν την εξής μορφή: για κάποιο κατώφλι k ,

$$\tilde{f}_i = \begin{cases} \theta_i u(\tilde{Q}) & i < k, \\ \theta_k u(\tilde{Q}) & i \geq k \end{cases} \quad (4.22)$$

όπου $\tilde{F} \equiv \sum_{j=1}^n \sqrt{\tilde{f}_j}$. Με δεδομένα αυτά τα επίπεδα συνεισφορών, το κατώφλι k μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε να μεγιστοποιεί το συνολικό καθαρό όφελος.

Επομένως έχουμε τον εξής μηχανισμό κινήτρων:

Μηχανισμός 3 (Κανόνες με κίνητρο συμμετοχής) Ο χρήστης i διαμοιράζεται \tilde{f}_i αρχεία, όπου το \tilde{f}_i δίνεται από την εξίσωση (4.22).

Ομοιόμορφες τιμές πλήρους πληροφόρησης

Υποθέστε τώρα ότι έχουμε πλήρη πληροφόρηση για τις παραμέτρους χρησιμότητας των χρηστών, αλλά δεν μπορούμε να προσωποποιήσουμε τον μηχανισμό κινήτρων. Στην περίπτωση αυτή, οι βέλτιστες τιμές και ο βέλτιστος κανόνας με κίνητρο συμμετοχής δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν. Ωστόσο, ο σχεδιαστής του συστήματος θα μπορούσε να υπολογίσει μία

ομοιόμορφη τιμή με πολλούς τρόπους. Εμείς θα εξετάσουμε την ακόλουθη:

$$p = 1 - \frac{\max\{\theta_1, \dots, \theta_n\}}{\Theta}, \quad (4.23)$$

δηλαδή την προσωποποιημένη βέλτιστη τιμή του χρήστη με την μεγαλύτερη παράμετρο χρησιμότητας. Η αριθμητική ανάλυση στην Ενότητα 4.5.2 επιβεβαιώνει ότι όλοι οι χρήστες επιθυμούν να συμμετέχουν δεδομένης της τιμής αυτής.

Μηχανισμός 4 (Ομοιόμορφη τιμή) Κάθε χρήστης λαμβάνει p μονάδες για κάθε διαμοιραζόμενο αρχείο, όπου η τιμή p δίνεται από την εξίσωση (4.23).

Μηχανισμοί ελλιπούς πληροφόρησης

Επιστρέφουμε τώρα στην περίπτωση όπου υπάρχει ελλιπής πληροφόρηση σχετικά με τις παραμέτρους χρησιμότητας των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται γνωστό το πλήθος των χρηστών n , η κατανομή από την οποία προκύπτουν οι παράμετροι χρησιμότητας τους και η μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας $u(\cdot)$. Μόνο ο χρήστης i όμως γνωρίζει την πραγματική τιμή της παραμέτρου χρησιμότητάς του θ_i .

Στην περίπτωση αυτή αποκλείονται όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί καθώς απαιτούν πλήρη πληροφόρηση. Πιο συγκεκριμένα, ο βέλτιστος κανόνας εξάρταται από το διάνυσμα θ , καθώς η τιμή του f^* εξαρτάται από το Θ (βλ. εξίσωση (4.16)). Αν εκφράσουμε την εξάρτηση αυτή γράφοντας $f^*(\Theta)$, τότε ένας μέσος κανόνας μπορεί να υπολογιστεί από την

$$\bar{f} \equiv \int \dots \int f^*(\Theta) dH^n(\theta), \quad (4.24)$$

όπου H^n είναι η συνάρτηση πιθανότητας του τυχαίου διανύσματος θ . Αν υποθέσουμε ότι για τη συνάρτηση χρησιμότητας $u(\cdot)$ ισχύει ότι $u(x) = x^\alpha$, όπου $\alpha \in (0, 1)$ τότε

$$f^*(\theta) = \left(\frac{\alpha\theta}{2} n^{\alpha-1} \right)^{\frac{2}{2-\alpha}},$$

και

$$\bar{f} \equiv \int \left(\frac{\alpha\theta}{2} n^{\alpha-1} \right)^{\frac{2}{2-\alpha}} dH^n(\theta),$$

το οποίο μπορεί να υπολογισθεί άμεσα θεωρώντας μία συγκεκριμένη συνάρτηση πιθανότητας H ή με χρήση προσομοιώσεων.

Μηχανισμός 5 (Μέσος κανόνας) Κάθε χρήστης διαθέτει \bar{f} αρχεία, όπου το \bar{f} δίνεται από την εξίσωση (4.24).

Φυσικά, κάποιοι χρήστες πιθανώς να έχουν αρνητικό καθαρό όφελος αν συνεισφέρουν \bar{f} αρχεία: επομένως υπό τον κανόνα αυτό, δεν θα συμμετείχαν στο σύστημα. Το γεγονός αυτό λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς για την αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται από τον συγκεκριμένο μηχανισμό στην Ενότητα 4.5.2 παρακάτω.

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε μία μέση τιμή:

$$\bar{p} \equiv \int \dots \int \frac{\Theta_{-i}}{\Theta} dH^n(\theta). \quad (4.25)$$

Μηχανισμός 6 (Μέση τιμή) Κάθε χρήστης εισπράττει \bar{p} μονάδες για κάθε διαμοιραζόμενο αρχείο, όπου η τιμή \bar{p} δίνεται από την εξίσωση (4.25).

Οι προσαρμογές αυτές των προηγούμενων μηχανισμών δεν λαμβάνουν υπόψη τους επιπρόσθετα στοιχεία που προκύπτουν στην περίπτωση της ελλιπούς πληροφόρησης. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε έναν βελτιωμένο μηχανισμό αν εκμαιεύσουμε επιπλέον πληροφορία από τους χρήστες. Ένας πολύ απλός και ελκυστικός μηχανισμός να το κάνουμε αυτό παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.3 και η προσαρμογή του για την περίπτωση του διαμοιρασμού αρχείων περιγράφεται στην Ενότητα 4.4. Χρησιμοποιώντας την (4.10), μπορούμε να απλοποιήσουμε την (4.9). Παρατηρήστε πρώτα ότι εφόσον όλοι οι συμμετέχοντες χρήστες συνεισφέρουν το ίδιο πλήθος αρχείων f , $F = m\sqrt{f}$, όπου m είναι το πλήθος των τελικών συμμετεχόντων. Επίσης, $c(F) = mf$, και επομένως $c(F) = F^2/m$. Ολοκληρώνοντας κατά μέρη και χρησιμοποιώντας τον περιορισμό κάλυψης του κόστους καταλήγουμε στο ισοδύναμο πρόβλημα

$$\begin{aligned} & \underset{F, \bar{\theta}}{\text{maximize}} u(\Phi) \int_{\bar{\theta}}^1 (1 - H(x)) dx \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$n(1 - H(\bar{\theta}))\bar{\theta}u(F) = \frac{F^2}{n(1 - H(\bar{\theta}))}$$

όπου αντικαταστήσαμε το m με τη μέση του τιμή $n(1 - H(\bar{\theta}))$. Αν συμβολίσουμε ως SCW το αναμενόμενο συνολικό καθαρό όφελος από το πρόβλημα βελτιστοποίησης αυτό, σύμφωνα με το [30] η διαφορά μεταξύ SCW και της δεύτερης καλύτερης αποδοτικότητας είναι $O(1/n)$, και συνεπώς γίνεται αμελητέα όσο μεγαλώνει το n . Το αποτέλεσμα αυτό μας δίνει το κίνητρο να

θεωρήσουμε τον ακόλουθο μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς:

Μηχανισμός 7 (Προκαθορισμένη συνεισφορά) Όλοι οι χρήστες που συμμετέχουν στο σύστημα απαιτείται να συνεισφέρουν $\bar{u}(F)$ αρχικά, όπου $\bar{\theta}$ και F δίνονται από τη λύση του προβλήματος (4.26).

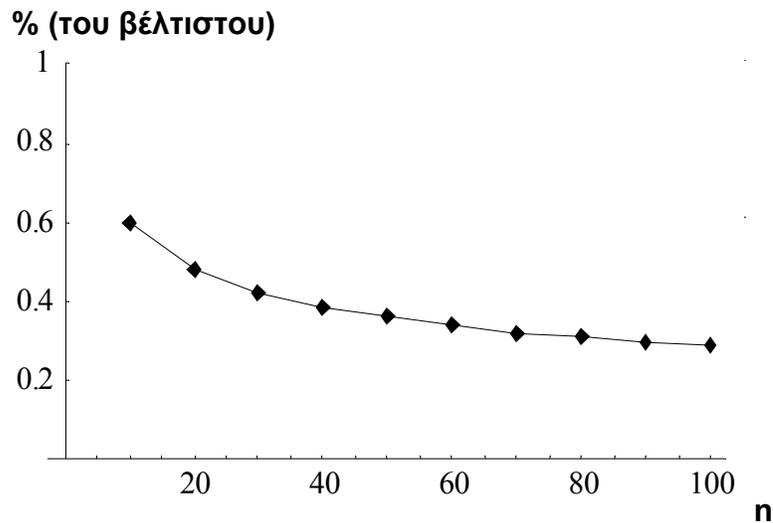
4.5.2 Σύγκριση

Στις προηγούμενες ενότητες ορίσαμε επτά μηχανισμούς κινήτρων:

1. βέλτιστος κανόνας·
2. βέλτιστη τιμή·
3. κανόνας με κίνητρο συμμετοχής·
4. ομοιόμορφη τιμή·
5. μέσος κανόνας·
6. μέση τιμή·
7. προκαθορισμένη συνεισφορά.

Στην ενότητα αυτή υπολογίζουμε το συνολικό καθαρό όφελος που επιτυγχάνεται με τους μηχανισμούς αυτούς για μία συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμότητας $u(x) = x^\alpha$, όπου $\alpha = 0.5$, και μία συγκεκριμένη συνάρτηση κατανομής H (ομοιόμορφη στο διάστημα $[0, 1]$). Σκοπός μας είναι να αξιολογήσουμε και να συγκρίνουμε την αποδοτικότητα τους όσο το πλήθος των χρηστών μεγαλώνει. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε μία λογαριθμική κανονική κατανομή για διαφορετικές τιμές διασποράς για να εξετάσουμε σε ποιό βαθμό η ετερογένεια των χρηστών επηρεάζει τα αποτελέσματά μας.

Τα αποτελέσματά μας παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.2 και 4.3. Στα σχήματα αυτά, το μέσο συνολικό καθαρό όφελος που επιτυγχάνεται από κάθε μηχανισμό εκφράζεται ως ένα ποσοστό του βέλτιστου συνολικού καθαρού οφέλους, όσο αυξάνεται το πλήθος των χρηστών. Έτσι ο βέλτιστος κανόνας ή η βέλτιστη τιμή αναπαριστούνται από μία ευθεία γραμμή στο σημείο 1 για όλες τις τιμές του n . Όπως ήταν αναμενόμενο, όλοι οι μη βέλτιστοι μηχανισμοί επιτυγχάνουν μικρότερο συνολικό καθαρό όφελος από τους βέλτιστους και έτσι οι γραμμές για τους μηχανισμούς αυτούς βρίσκονται αυστηρά κάτω από τη μονάδα. Το Σχήμα 4.2 επιβεβαιώνει την παρατήρηση της Ενότητας 4.2: χωρίς τη χρήση κάποιου μηχανισμού κινήτρων,

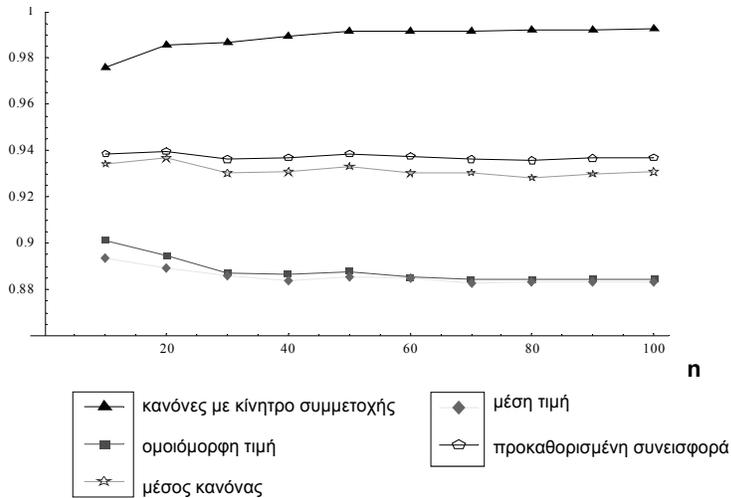


Σχήμα 4.2: Η αποδοτικότητα στο σημείο ισορροπίας Nash

οι εξωτερικότητες που σχετίζονται με τις αποφάσεις των χρηστών οδηγούν σε μειωμένη αποδοτικότητα. Μάλιστα, όπως φαίνεται στο σχήμα, όσο μεγαλώνει το πλήθος των χρηστών, η αποδοτικότητα του συστήματος σε σύγκριση με τη βέλτιστη συνεχώς χειροτερεύει. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αυξημένη επίδραση της στρατηγικής της ανέξοδης συμμετοχής όταν είναι μεγάλο το πλήθος των χρηστών. Στην περίπτωση αυτή κάθε χρήστης αναμένει ότι θα έχει μικρή επιρροή στο σύνολο των διαθέσιμων αρχείων και έτσι μειώνεται το κίνητρό του να κάνει θετική συνεισφορά.

Υπάρχουν αρκετές παρατηρήσεις που προκύπτουν από το Σχήμα 4.3. Κατ' αρχάς, ο κανόνας με κίνητρο συμμετοχής επιτυγχάνει σχεδόν τη βέλτιστη αποδοτικότητα ακόμα και για σχετικά μικρά μεγέθη του συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλώνει το σύστημα ο περιορισμός για το κίνητρο συμμετοχής γίνεται πιο εύκολο να ικανοποιηθεί καθώς η αξία του διαθέσιμου περιεχομένου αυξάνεται και έτσι χρήστες με το ίδιο θ είναι πρόθυμοι να συνεισφέρουν περισσότερο για να συμμετέχουν. Για μεγάλες τιμές του n , ένα πολύ μικρό ποσοστό των χρηστών θα είναι απρόθυμο να συνεισφέρει το πλήθος αρχείων όπως αυτό ορίζεται από τον βέλτιστο μηχανισμό και έτσι ο περιορισμός καθίσταται αδιάφορος και η αποδοτικότητα συγκλίνει στη βέλτιστη. Ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς επιτυγχάνει αυστηρά μικρότερη αποδοτικότητα. Αυτό είναι απόρροια του αποτελέσματος των Myerson-Satterthwaite: η ελλιπής πληροφόρηση οδηγεί σε απώλεια αποδοτικότητας. Η απώλεια αυτή ωστόσο, στο παράδειγμα μας, είναι σχετικά μικρή: περίπου 6–7%. Επιπλέον, ο μέσος κανόνας (ο μηχανισμός υπ' αριθμόν 5) επιτυγχάνει ικανοποιητική αποδοτικότητα αλλά αυστηρά μικρό-

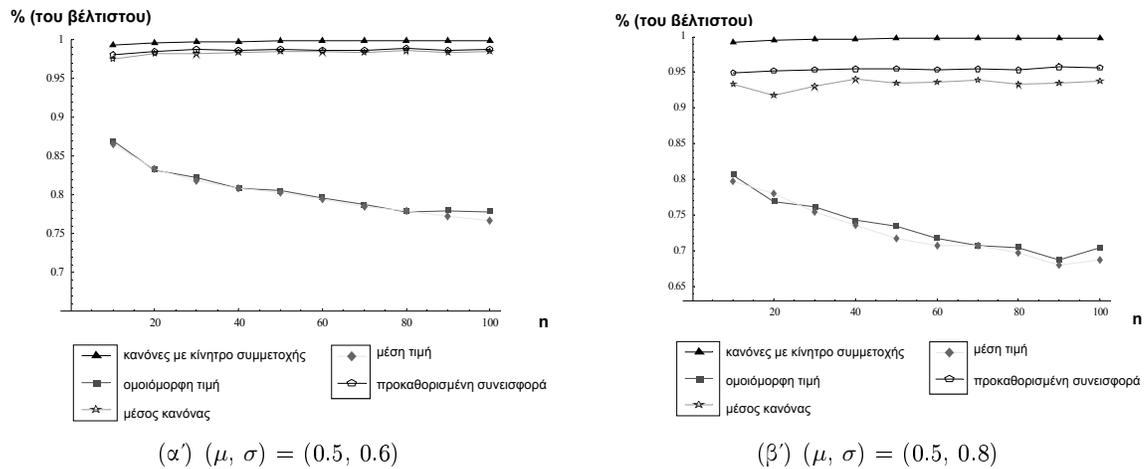
% (του βέλτιστου)



Σχήμα 4.3: Σύγκριση των μηχανισμών κινήτρων

τερη από αυτή των μηχανισμών 3 και 7. Αυτό σημαίνει ότι η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στο μηχανισμό αυτό (ο υπολογισμός της μέσης τιμής του βέλτιστου κανόνα) είναι κατώτερη της προσέγγισης του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς. Αυτό ήταν αναμενόμενο: ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς μας παρέχει ένα εργαλείο για να μεγιστοποιήσουμε τη μέση αποδοτικότητα: η προσέγγιση του μέσου κανόνα χρησιμοποιεί το μέσο αποτέλεσμα ενός εργαλείου που μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα υπό πλήρη πληροφόρηση. Το πρώτο είναι καταλληλότερο για την περίπτωση όπου έχουμε ελλιπή πληροφόρηση, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στο σχήμα.

Τέλος, όλοι οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούν τιμολόγηση (εκτός από τους βέλτιστους) επιτυγχάνουν μικρότερα επίπεδα αποδοτικότητας από όλους τους υπόλοιπους μηχανισμούς. Η μειωμένη αυτή επίδοση τους φαίνεται να οφείλεται στον ορισμό του μοντέλου μας: συγκεκριμένα, το γεγονός ότι το κόστος είναι γραμμικό. Στην περίπτωση αυτή μικρές αποκλίσεις ανέμεσα στη βέλτιστη και σε μία προσεγγιστική τιμή μεταφράζονται σε πολύ μεγάλες διαφορές στο πλήθος αρχείων που συνεισφέρουν οι χρήστες. Επομένως, το επίπεδο αποδοτικότητας των προσεγγιστικών (ομοιόμορφων ή μέσων) τιμών είναι χαμηλό. Με εναλλακτικούς ορισμούς της συνάρτησης κόστους (ειδικά για αυστηρά κυρτές συναρτήσεις κόστους) η απόδοση των προσεγγιστικών τιμών βελτιώνεται. Μάλιστα, σε αρκετά τέτοια μοντέλα με κυρτές συναρτήσεις κόστους, όσο το n μεγαλώνει, οι ομοιόμορφες τιμές επιτυγχάνουν αποδοτικότητα κοντά στη βέλτιστη.



Σχήμα 4.4: Σύγκριση των μηχανισμών κινήτρων με χρήση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής

Στο Σχήμα 4.4 συγκρίνουμε τους διαφορετικούς μηχανισμούς κινήτρων με χρήση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής για δύο διαφορετικές τιμές της διασποράς της. Σκοπός μας είναι να μελετήσουμε το αποτέλεσμα της ετερογένειας στην απόδοση των μηχανισμών. Όπως φαίνεται στο σχήμα, μικρότερη διασπορά καθιστά τους μοιόμορφους κανόνες πιο αποτελεσματικούς καθώς η έλλειψη πληροφορίας είναι λιγότερο σημαντική ενώ όσο μεγαλώνει η διασπορά τόσο χειροτερεύει η αποδοτικότητα τους. Αυτό σημαίνει ότι αν μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τους χρήστες όσον αφορά την παράμετρο χρησιμότητας τους (χρησιμοποιώντας κάποιο αντικειμενικό χαρακτηριστικό όπως το εύρος ζώνης πρόσβασης τους) σε διαφορετικές ομάδες, τότε απλοί μηχανισμοί προκαθορισμένης συνεισφοράς για την κάθε ομάδα θα οδηγούσαν σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα (βλ. Ενότητα 4.6.1).

4.6 Ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς

Στην ενότητα αυτή συζητάμε μερικά πρακτικά ζητήματα που σχετίζονται με την εφαρμογή του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς σε ένα ρεαλιστικό διομότιμο σύστημα, όπως τα πλεονεκτήματα και τα θέματα κινήτρων που προκύπτουν από τον σχηματισμό ομάδων, την αντιμετώπιση της διαφορετικής δημοτικότητας των αρχείων, την εξασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος, την εκτίμηση παραμέτρων που έχουν αρχικά θεωρηθεί γνωστές (όπως το πλήθος των χρηστών και η κατανομή H), και άλλα. Δεν παρέχουμε τελικές λύσεις σε όλα αυτά τα δύσκολα προβλήματα. Ωστόσο, η απλότητα του μοντέλου μας επιτρέπει την μελέτη

αρκετών ενδιαφερόντων διαστάσεων τους και την κατανοήση σημαντικών χαρακτηριστικών τους.

Για την ανάλυση μας στην ενότητα αυτή θα χρησιμοποιήσουμε τις προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.1.1 και θα υποθέσουμε ότι $Q(F) \approx F$. Δηλαδή, ο σχεδιαστής του συστήματος θα έχει τώρα να λύσει την παρακάτω απλοποίηση του (4.9) για να υπολογίσει την προκαθορισμένη συνεισφορά των συμμετεχόντων

$$\begin{aligned} & \underset{Q, \theta}{\text{maximize}} \quad nu(F) \int_{\theta}^1 \eta h(\eta) d\eta - F \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \\ & n[1 - H(\theta)]\theta u(F) - F \geq 0, \end{aligned} \tag{4.27}$$

όπου $u(F) = F^a$, με $0 < a < 1$, και $F = \sum_{i=1}^n f_i$. Και πάλι, η υπόθεση αυτή δεν είναι κρίσιμη για τα ποιοτικά μας αποτελέσματα.

4.6.1 Σχηματισμός ομάδων

Η απλότητα του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς έχει όμως ένα κόστος. Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, όσο αυξάνεται η ετερογένεια των χρηστών η απόσταση μεταξύ της αποδοτικότητας που επιτυγχάνεται από τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς και της βέλτιστης επίσης αυξάνεται. Ωστόσο, είναι ίσως δυνατόν για τον σχεδιαστή του συστήματος να διαχωρίσει μεταξύ διαφορετικών τύπων χρηστών και να χρησιμοποιήσει την πληροφορία αυτή για να μοντελοποιήσει την κατανομή των παραμέτρων χρησιμότητας τους με μεγαλύτερη ακρίβεια. Υποθέστε, για παράδειγμα, ότι ο πληθυσμός των χρηστών αποτελείται από χρηστές με συνδέσεις ISDN (ομάδα A) και χρήστες με συνδέσεις DSL (ομάδα B) με ομοιόμορφες κατανομές H_A και H_B των παραμέτρων χρησιμότητας τους στα διαστήματα $[0, \beta]$ και $[\beta, 1]$ αντίστοιχα, με $\beta < 1$. Η μοντελοποίηση αυτή αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι χρήστες με συνδέσεις DSL ωφελούνται περισσότερο από το διαθέσιμο περιεχόμενο από ό,τι οι χρήστες με συνδέσεις ISDN. Είναι φανερό ότι, όταν είναι δυνατόν, θα ήταν προς όφελος του συστήματος η διαφοροποίηση του κανόνα συνεισφοράς μεταξύ των χρηστών διαφορετικού τύπου.

Το γεγονός ότι το ασυμπτωτικό πρόβλημα που πρέπει να λύσουμε για να καθορίσουμε τις βέλτιστες προκαθορισμένες συνεισφορές είναι πολύ απλό μας επιτρέπει να κατανοήσουμε σημαντικές πτυχές του σχηματισμού ομάδων για την παροχή κινήτρων σε διομότιμα συστήματα.

Τρία είναι τα βασικά σενάρια που θα μπορούσε να ακολουθήσει ο σχεδιαστής του συστήματος:

1. Οι χρήστες σχηματίζουν δύο ξεχωριστές ομάδες A και B χωρίς να διαμοιράζονται περιεχόμενο μεταξύ τους.
2. Σχηματίζουν μία ενιαία ομάδα, στην οποία διαμοιράζονται περιεχόμενο, αλλά οι κατανομές των τύπων τους (H_A και H_B) δεν είναι γνωστές στον σχεδιαστή. Το μόνο που γνωρίζει είναι το ποσοστό των χρηστών του κάθε τύπου.
3. Σχηματίζουν πάλι μία ενιαία ομάδα, στην οποία διαμοιράζονται περιεχόμενο, αλλά τώρα οι κατανομές των τύπων τους (H_A και H_B) είναι γνωστές στον σχεδιαστή.

Ποιό από αυτά είναι προτιμότερο για τους χρήστες της κάθε ομάδας; Η απάντηση εξαρτάται από το σχετικό πλήθος των χρηστών του κάθε τύπου; Για να μπορέσουμε να απαντήσουμε στα ερωτήματα αυτά υπολογίσαμε τα ακόλουθα επίπεδα αποδοτικότητας. Πρώτα λύσαμε το (4.27) για $H = H_A, n = n_A$ και $H = H_B, n = n_B$ για να υπολογίσουμε την αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται όταν οι χρήστες των δύο ομάδων δεν διαμοιράζονται αρχεία μεταξύ τους, όπου n_A και n_B είναι το πλήθος των χρηστών που ανήκουν στην κάθε ομάδα αντίστοιχα. Στη συνέχεια λύσαμε το (4.27) υποθέτοντας ότι οι δύο ομάδες σχηματίζουν μία μεγαλύτερη ομάδα αλλά χωρίς να υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή η κατανομή H θα είναι ένας συνδυασμός δύο ομοιόμορφων κατανομών με διαφορετικά βάρη στα διαστήματα $[0, \beta]$ και $[\beta, 1]$ ($n_A/(n_A + n_B)$ και $n_B/(n_A + n_B)$ αντίστοιχα). Υπολογίσαμε τέλος τη λύση του ακόλουθου προβλήματος το οποίο λαμβάνει υπόψη του το γεγονός ότι μπορούμε να διαχωρίσουμε την απαιτούμενη προκαθορισμένη συνεισφορά μεταξύ χρηστών διαφορετικού τύπου.

$$\begin{aligned} & \underset{F, \theta_A, \theta_B}{\text{maximize}} \quad n_A u(F) \int_{\theta_A}^1 \eta h_A(\eta) d\eta + n_B u(F) \int_{\theta_B}^1 \eta h_B(\eta) d\eta - F \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$n_A[1 - H_A(\theta_A)]\theta_A u(F) + n_B[1 - H_B(\theta_B)]\theta_B u(F) - F \geq 0,$$

όπου $u(F) = F^a$, με $0 < a < 1$, και θ_A, θ_B συμβολίζουν την παράμετρο χρησιμότητας του οριακού χρήστη της κάθε ομάδας.

Στο Σχήμα 4.5 παρατίθενται οι τιμές της κοινωνικής ευημερίας για κάθε ομάδα ξεχωριστά και ως σύνολο για κάθε σενάριο —για την απλή περίπτωση όπου $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ και $n_A = n_B$. Βλέπουμε ότι οι χρήστες έχουν πάντα το κίνητρο να σχηματίσουν μία ενιαία ομάδα αλλά η συνολική αποδοτικότητα μεγιστοποιείται όταν η κατανομή των τύπων τους είναι γνωστή

στον σχεδιαστή. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή οι χρήστες της ομάδας B θα προτιμούσαν να σχηματίσουν τη δική τους ξεχωριστή ομάδα καθώς η συνολική κοινωνική τους ευημερία μειώνεται κατά 11% όταν συμφωνούν να συμμετέχουν στην ενιαία ομάδα δηλώνοντας τον τύπο τους.

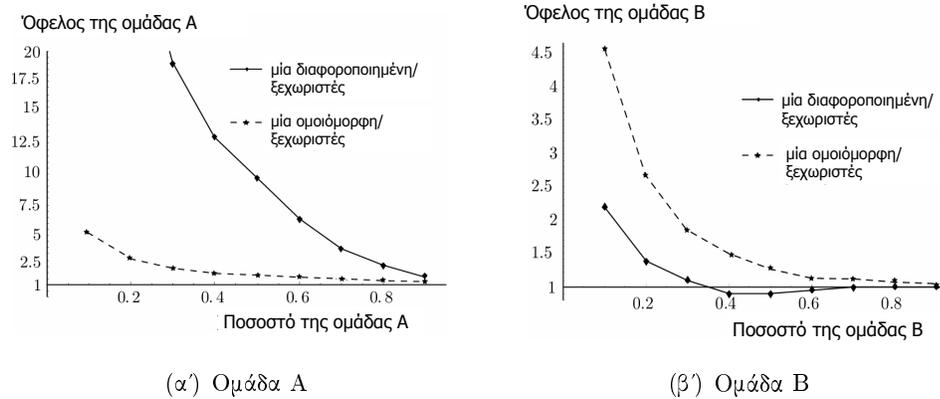
Ευημερία	Ομάδα A	Ομάδα B	Σύνολο
Ξεχωριστές ομάδες	3296	35156	38452
Μία ομάδα, ομοιόμορφη	6976 (+ 111%)	44792 (+ 27%)	51768
Μία ομάδα, διαφοροποιημένη	31249 (+ 848%)	31250 (-11%)	62500

Σχήμα 4.5: Η κοινωνική ευημερία που επιτυγχάνεται στα διαφορετικά σενάρια σχηματισμού ομάδων για $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ και $n_A = n_B = 500$

Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ο λόγος της κοινωνικής ευημερίας των χρηστών με συνδέσεις ISDN, ομάδα A (Σχήμα 4.6(α')), και των χρηστών με συνδέσεις DSL, ομάδα B (Σχήμα 4.6(β')), ως προς την κοινωνική ευημερία που λαμβάνουν όταν σχηματίζουν ξεχωριστές ομάδες, όταν ο τύπος τους είναι γνωστός και άγνωστος στην ενιαία ομάδα, ως συνάρτηση του ποσοστού τους στην ομάδα ($n_A/(n_A + n_B)$ και $n_B/(n_A + n_B)$ αντίστοιχα). Αξίζει να κάνουμε δύο ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

- Όσο το ποσοστό των χρηστών με συνδέσεις DSL μειώνεται, οι χρήστες αυτοί προτιμούν περισσότερο το δεύτερο σενάριο: μία ενιαία ομάδα με άγνωστους τύπους· η επόμενη καλύτερη προτίμηση τους είναι το σενάριο όπου σχηματίζουν τη δική τους ανεξάρτητη ομάδα. Ωστόσο, όταν το ποσοστό τους είναι μικρό (μικρότερο από 30%) συνεχίζουν να προτιμούν το σενάριο της ενιαίας ομάδας με άγνωστους τύπους αλλά η δεύτερη επιλογή τους είναι η ενιαία ομάδα με γνωστούς τύπους.
- Όσο το ποσοστό των χρηστών με συνδέσεις ISDN μειώνεται, οι χρήστες αυτοί προτιμούν το τρίτο σενάριο καθώς στο σημείο μεγιστοποίησης της κοινωνικής ευημερίας οι χρήστες με τις συνδέσεις DSL προσφέρουν την πλειοψηφία του περιεχομένου. Το δεύτερο σενάριο, η ενιαία ομάδα με άγνωστους τύπους, δεν είναι τόσο ελκυστικό επειδή αναγκάζονται στην περίπτωση αυτή να συνεισφέρουν σημαντική ποσότητα περιεχομένου.

Έτσι, δυστυχώς, το σενάριο της ενιαίας ομάδας με γνωστούς τύπους δεν είναι ποτέ η επιθυμητή



Σχήμα 4.6: Ο λόγος της κοινωνικής ευημερίας των χρηστών με συνδέσεις ISDN, ομάδα *A*, και των χρηστών με συνδέσεις DSL, ομάδα *B*, με την κοινωνική ευημερία που λαμβάνουν όταν σχηματίζουν ξεχωριστές ομάδες, όταν ο τύπος τους είναι γνωστός και άγνωστος στην ενιαία ομάδα.

επιλογή και για τις δύο ομάδες ακόμα και αν επιτυγχάνει τη μέγιστη συνολική κοινωνική ευημερία. Θα συζητήσουμε στη συνέχεια μεθόδους που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε για να δώσουμε τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες να συμμετάσχουν στην ενιαία ομάδα όταν ο τύπος τους είναι γνωστός ή να δηλώσουν την πραγματική ομάδα στην οποία ανήκουν όταν δεν είναι.

Βέλτιστος διαχωρισμός με στατιστική πληροφορία

Έχουμε εξερευνήσει τα οφέλη από τον σχηματισμό ομάδων όταν μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τους χρήστες σε δύο διαφορετικές ομάδες. Ένα εύλογο ερώτημα είναι εάν θα ήταν επιπλέον ωφέλιμο να χωρίσουμε τους χρήστες σε περισσότερες από δύο ομάδες, ορίζοντας διαφορετική ελάχιστη συνεισφορά για την κάθε μία. Με άλλα λόγια, υποθέτοντας ότι ο σχεδιαστής του συστήματος θα μπορούσε να αποκτήσει πληροφορία που θα του επέτρεπε να κατηγοριοποιήσει τους χρήστες σε μικρότερες υπο-ομάδες, έτσι ώστε οι παράμετροι χρησιμότητας των χρηστών της κάθε υπο-ομάδας να κατανέμονται σε μη επικαλυπτόμενα διαστήματα του $[0, 1]$, μπορεί πάντα να επωφελείται πραγματοποιώντας αυτόν τον επιπλέον διαχωρισμό; Η απάντηση είναι ότι δεν είναι πάντα έτσι.

Πριν καταδείξουμε το γεγονός αυτό, θα πρέπει πρώτα να ορίσουμε τη μέγιστη αποδοτικότητα που θα μπορούσε να επιτευχθεί υποθέτοντας τη μέγιστη δυνατότητα διαχωρισμού. Με τη φράση “δυνατότητα διαχωρισμού” εννοούμε τον ορισμό ενός συγκεκριμένου πλήθους μη επικαλυπτόμενων υπο-ομάδων για τις οποίες ο σχεδιαστής του συστήματος έχει την απαραίτητη

πληροφορία ώστε να μπορεί να αποφασίζει ποιοί χρήστες ανήκουν σε ποιά υπο-ομάδα με βάση την πραγματική παράμετρο χρησιμότητας τους (όχι όμως την ακριβή τιμή της). Είναι φανερό ότι αν ο σχεδιαστής είχε τη δυνατότητα να χωρίσει το αρχικό διάστημα σε ένα μεγάλο πλήθος υπο-διαστημάτων και να χρησιμοποιήσει την πληροφορία του πόσων χρηστών n_j οι παράμετροι χρησιμότητας βρίσκονται στο διάστημα j , θα μπορούσε να επιτύχει τη βέλτιστη αποδοτικότητα. Μία ενδιαφέρουσα και πιο πρακτική περίπτωση είναι όταν ο σχεδιαστής πρώτα αποφασίζει το διαχωρισμό και τις αντίστοιχες συνεισφορές και στη συνέχεια οι χρήστες αποφασίζουν αν θα συμμετέχουν ή όχι. Στην περίπτωση αυτή το πραγματικό πλήθος χρηστών που ανήκει στο κάθε υπο-διάστημα δεν είναι γνωστό στον σχεδιαστή όταν αποφασίζει ως προς τη βέλτιστη πολιτική και έτσι θα πρέπει να κάνει τους υπολογισμούς του για τη μέση περίπτωση. Τότε, δείχνουμε ότι μετά από κάποιο σημείο ο περαιτέρω διαχωρισμός δεν επιφέρει καμία βελτίωση της αποδοτικότητας.

Παρατηρείστε κατ' αρχάς ότι η μόνη πληροφορία που είναι διαθέσιμη στο σχεδιαστή κατά τον υπολογισμό των ελάχιστων συνεισφορών είναι η κατανομή H και το καλύτερο που μπορεί να ελπίζει να επιτύχει είναι η μέγιστη μέση αποδοτικότητα χωρίς περιορισμούς. Δηλαδή, η λύση του ακόλουθου προβλήματος

$$\max_{F \geq 0} \mathbb{E} \left[\sum_i \theta_i u(F) - c(F) \right]. \quad (4.29)$$

Υποθέστε λοιπόν ότι η κατανομή H είναι ομοιόμορφη στο $[0, 1]$. Το διάστημα αυτό πρόκειται να χωριστεί σε k μη επικαλυπτόμενα διαστήματα όπου τα άκρα του κάθε υπο-διαστήματος j συμβολίζονται ως β_{j-1} και β_j . Επομένως το διάνυσμα $\beta = (\beta_0, \dots, \beta_k)$, όπου $\beta_0 = 0$, $\beta_k = 1$, και $0 < \beta_1 < \dots < \beta_{k-1} < 1$, ορίζει τα k υπο-διαστήματα του $[0, 1]$. Τότε το μέσο πλήθος χρηστών που τελικά θα ανήκουν στην κάθε υπο-ομάδα j θα είναι $n(\beta_j - \beta_{j-1})$ και οι παράμετροι χρησιμότητάς τους θα είναι ομοιόμορφοι στο διάστημα $[\beta_{j-1}, \beta_j]$.

Με βάση την πληροφορία αυτή, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να υπολογίσει τις προκαθορισμένες συνεισφορές για τους χρήστες που ανήκουν στην κάθε υπο-ομάδα (έστω $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_k)$ το διάνυσμα των απαιτούμενων ελάχιστων συνεισφορών για την κάθε υπο-ομάδα) έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την κοινωνική ευημερία με τον περιορισμό να καλύψει το αντίστοιχο κόστος. Θα δείξουμε ότι υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός k για τον οποίο η κοινωνική ευημερία του προβλήματος με τον περιορισμό, τη συμβολίζουμε $SW(k)$, θα είναι η μέγιστη δυνατή (η λύση του προβλήματος με πλήρη πληροφόρηση (4.29)), την οποία συμβολίζουμε ως SW^* .

Παρατηρείστε όμως ότι για να επιτύχουμε το επίπεδο αποδοτικότητας αυτό κανένας χρήστης δεν θα πρέπει να αποκλειστεί από το σύστημα κατά μέσο όρο, όπως έχουμε υποθέσει για τον υπολογισμό της SW^* . Έτσι, για τον υπολογισμό της $SW(k)$ θα πρέπει να περιοριστούμε στους κανόνες συνεισφοράς που επιτρέπουν σε όλους τους χρήστες να συμμετέχουν. Δηλαδή, θεωρούμε ένα διάνυσμα \mathbf{f} για το οποίο

$$f_j = \beta_{j-1}u(F^*), \forall j \in [1, k], \quad (4.30)$$

όπου F^* είναι η τιμή του F για την οποία το (4.29) μεγιστοποιείται. Παρατηρείστε ότι υπολογίζουμε το διάνυσμα \mathbf{f} υποθέτοντας ότι η βέλτιστη ποσότητα περιεχομένου F^* πράγματι διατίθεται. Συνεπώς για να ελέγξουμε αν η υπόθεση μας ήταν σωστή, και η λύση μας εφικτή, αυτό που θα πρέπει να ελέγξουμε είναι η συνθήκη κάλυψης τους κόστους

$$F^* \leq \sum_{j=1}^k n(\beta_{j-1} - \beta_j)f_j, \quad (4.31)$$

όπου η f_j είναι όπως ορίστηκε από την (4.30), $n(\beta_{j-1} - \beta_j)$ είναι το μέσο ποσοστό χρηστών στο διάστημα $[\beta_{j-1} - \beta_j]$, και $c(F) = F$. Επομένως, αν η (4.31) ισχύει, αρκεί για να πούμε ότι η μέση κοινωνική ευημερία μπορεί να μεγιστοποιηθεί όταν οι χρήστες μπορούν να χωριστούν σε k ομάδες.

Πριν εξετάσουμε τη γενική περίπτωση ας αναλύσουμε πρώτα ένα απλό παράδειγμα. Αν $u(F) = F^a$, και η αρχική κατανομή είναι ομοιόμορφη στο $[0, 1]$, η λύση του (4.29) είναι

$$F^* = \left(n a \int_0^1 \eta h(\eta) d\eta \right)^{\frac{1}{1-a}} = (0.5 n a)^{\frac{1}{1-a}}. \quad (4.32)$$

Τώρα θα πρέπει να δοκιμάσουμε αύξουσες τιμές του k ώστε να βρούμε την ελάχιστη για την οποία μπορούμε να ικανοποιήσουμε τη συνθήκη (4.31), επιλέγοντας κατάλληλα το διάνυσμα β . Για $k = 2$, και καθώς $\beta_0 = 0$, η (4.31) γίνεται

$$n(1 - \beta_1)\beta_1 \geq (F^*)^{1-a} = 0.5 n a. \quad (4.33)$$

Επομένως, αν υπάρχει ένα β_1 για το οποίο $(1 - \beta_1)\beta_1 = 0.5 a$ τότε $k = 2$ είναι αρκετό. Προφανώς, το κατά πόσο αυτό ισχύει εξαρτάται από την τιμή του a . Είναι εύκολο να δει κανείς ότι υπάρχει ένα τέτοιο β_1 για $a \leq 0.5$ καθώς η μέγιστη τιμή του $(1 - \beta_1)\beta_1$, για

$0 < \beta_1 < 1$, είναι 0.25. Αυτό σημαίνει ότι για $a > 0.5$ θα χρειαζόμασταν τον σχηματισμό περισσότερων των δύο ομάδων.

Ας εξετάσουμε εάν $k = 3$ είναι αρκετό. Η συνθήκη (4.31) γίνεται τώρα

$$n(\beta_2 - \beta_1)\beta_1 + n(1 - \beta_2)\beta_2 \geq 0.5na. \quad (4.34)$$

Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να βρούμε τιμές των β_1 και β_2 για τις οποίες το άθροισμα $(\beta_2 - \beta_1)\beta_1 + (1 - \beta_2)\beta_2$ μεγιστοποιείται. Είναι εύκολο να δει κανείς ότι το άθροισμα αυτό μεγιστοποιείται όταν $\beta_1 = 1/3$ και $\beta_2 = 2/3$ · όταν διαιρούμε το διάστημα $[0, 1]$ σε τρία ίσα υπο-διαστήματα με μήκος $1/3$. Άρα, $k = 3$ είναι αρκετό όταν $a \leq 2/3$. Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι για $k = 4$, όπως προκύπτει, μπορούμε να βρούμε ένα διάνυσμα β το οποίο επιτυγχάνει τη μέση βέλτιστη αποδοτικότητα για οποιαδήποτε τιμή του a ($0 < a < 1$).

Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι η ικανότητα να χωρίζουμε τους χρήστες σε ομάδες είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο και ακόμα και ένα πολύ μικρό πλήθος ομάδων είναι σε πολλές περιπτώσεις αρκετό ώστε να επιτύχουμε την αποδοτικότητα του (4.30). Παρατηρείστε μάλιστα ότι η ομοιόμορφη κατανομή είναι μία ιδιαίτερα ετερογενής κατανομή. Αν υποθέσουμε μία λιγότερο ετερογενή κατανομή —π.χ. μία διακριτή τριγωνική κατανομή¹ στο $[0, 1]$, της οποίας η μέση τιμή είναι επίσης 0.5— και ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία (με ελαφρώς πιο πολύπλοκους υπολογισμούς), μπορεί να δει κανείς ότι για $k = 2$ μπορούμε να μεγιστοποιήσουμε την μέση κοινωνική ευημερία όταν $a < 0.55$ (για $b_1 = 0.4$) και $k = 3$ είναι αρκετό όταν $a < 0.7$ (για $b_1 = 0.3$ και $b_2 = 0.53$). Αντίθετα, όταν η κατανομή είναι περισσότερο ετερογενής από την ομοιόμορφη, θα περίμενε κανείς να χρειαζόμαστε περισσότερες ομάδες (μεγαλύτερες τιμές του k) ώστε να επιτύχουμε τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα.

Γενικότερα, μπορούμε να δείξουμε ότι υπάρχει πάντα μία πεπερασμένη τιμή του k για την οποία μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα. Παρατηρείστε πρώτα ότι για να υπολογίσουμε την ελάχιστη τιμή του k για διαφορετικές τυχαίες κατανομές θα πρέπει απλώς να αντικαταστήσουμε τον όρο $(\beta_{j-1} - \beta_j)$ της συνθήκης (4.31) με το ποσοστό των χρηστών που ανήκουν στο αντίστοιχο διάστημα παραμέτρων χρησιμότητας, και την τιμή του $\int_0^1 \eta h(\eta) d\eta$ με την αντίστοιχη μέση τιμή της νέας κατανομής. Στην περίπτωση αυτή επιλέγουμε να χωρίσουμε τους χρήστες σε ομάδες με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ομάδα να έχει το ίδιο πλήθος χρηστών, n/k , κατά μέσο όρο. Τότε, ξαναγράφοντας τις εξισώσεις (4.30) και (4.32), και υποθέτοντας μία γενική

¹ $P(X \leq x) = \frac{g(x)(g(x)-1)}{2^n}$, για $x \leq 0.5$ και $P(X \leq x) = \frac{2n-g(1-x)(g(1-x)-1)}{2^n}$, για $x \geq 0.5$, όπου $g(x) = [x(1 + \sqrt{1 + 4n})] + 1$.

κατανομή Z με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας z στο διάστημα $[x, y]$, η (4.31) γίνεται

$$\frac{n}{k} \sum_{j=1}^k \beta_{j-1} u(F^*) \geq F^* \Leftrightarrow \frac{n}{k} \sum_{j=1}^k \beta_{j-1} \geq (F^*)^{1-a} = n a \int_x^y \eta z(\eta) d\eta. \quad (4.35)$$

Παρατηρείστε τώρα ότι όσο αυξάνεται το k , η έκφραση $\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \beta_{j-1}$ συγκλίνει στο $\int_x^y \eta z(\eta) d\eta$. Άρα, για $0 < a < 1$ υπάρχει πάντα ένα πεπερασμένο k για το οποίο η (4.35) ισχύει.

Θέματα κινήτρων

Η παραπάνω ανάλυση του βέλτιστου διαχωρισμού είναι ενθαρρυντική σε ό,τι αφορά το πλήθος των ομάδων που απαιτείται ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα. Ωστόσο, υπάρχουν δύο σημαντικά εμπόδια που θα πρέπει να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής του συστήματος για να καταφέρει να εκμεταλλευτεί την επιπλέον πληροφορία που προκύπτει από τον διαχωρισμό των χρηστών σε ομάδες. Το πρώτο είναι η δυνατότητα να προσδιορίσει ποιοι χρήστες ανήκουν σε ποια ομάδα. Αυτό δεν είναι καθόλου εύκολο και στην πράξη υπάρχει ένα “φυσικό” όριο διαχωρισμού ανάλογα με τα εγγενή χαρακτηριστικά του πληθυσμού των χρηστών, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι υπάρχουν κάποιοι χρήστες με συνδέσεις DSL και άλλοι με συνδέσεις ISDN, και το κατά πόσο αυτά είναι εμφανή στο διαχειριστή του συστήματος (π.χ. αν είναι τεχνολογικά εφικτό να ελέγξει εάν ένας χρήστης έχει σύνδεση DSL ή ISDN).

Ακόμα όμως και στην πιο βολική περίπτωση (δύο σαφώς ορισμένες ομάδες με εμφανή χαρακτηριστικά), αν οι χρήστες υψηλής χρησιμότητας έχουν την επιλογή να σχηματίσουν τη δική τους ξεχωριστή ομάδα τα κατάλληλα κίνητρα θα πρέπει να τους δοθούν ώστε να δεχθούν να συμμετέχουν στη μεγαλύτερη ενιαία ομάδα. Όπως έχουμε ήδη δείξει τέτοια κίνητρα είναι απαραίτητα όταν το ποσοστό του πληθυσμού τους στην ενιαία ομάδα είναι σημαντικό. Για παράδειγμα, όταν $n_B/n = 50\%$, ο βέλτιστος κανόνας συνεισφοράς τους οδηγεί σε μείωση της κοινωνικής ευημερίας κατά 11% συγκριτικά με αυτή που θα επιτυγχάναν αν σχημάτιζαν τη δική τους ανεξάρτητη ομάδα (βλ. Σχήμα 4.5). Αν υποθέσουμε ότι η ομάδα στην οποία ανήκουν είναι εμφανής, προκύπτει δηλαδή με αντικειμενικά κριτήρια, μία λύση θα ήταν να αλλάξουμε τη συνεισφορά των χρηστών υψηλής χρησιμότητας (π.χ. αυτών με τις DSL συνδέσεις) έτσι ώστε να είναι συμφέρον για αυτούς να συμμετέχουν. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να επιτρέψουμε η συνεισφορά τους να είναι χαμηλότερη από $\theta_B^* u(F^*)$, έστω $xu(F^*)$, όπου $\theta_A^* < x < \beta$ (θυμηθείτε ότι $\theta_A \in [0, \beta]$ και $\theta_B \in [\beta, 1]$), εξασφαλίζοντας έτσι θετικό καθαρό όφελος για όλα τα μέλη της ομάδας αυτής. Έτσι, θα πρέπει να λύσουμε το ακόλουθο πρόβλημα

βελτιστοποίησης

$$\begin{aligned} & \underset{F, \theta_A, x}{\text{maximize}} \quad n_A u(F) \int_{\theta_A}^{\beta} \eta h_A(\eta) d\eta + n_B u(F) \int_{\beta}^1 \eta h_B(\eta) d\eta - F \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \\ & n_A [1 - H_A(\theta_A)] \theta_A u(F) + n_B x u(F) - F \geq 0, \\ & \text{και } \theta_A < x < \beta, \end{aligned} \tag{4.36}$$

και με τον επιπλέον περιορισμό ότι η συνολική κοινωνική ευημερία για την ομάδα B θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή από αυτή που επιτυγχάνεται όταν σχηματίζουν τη δική τους ξεχωριστή ομάδα.

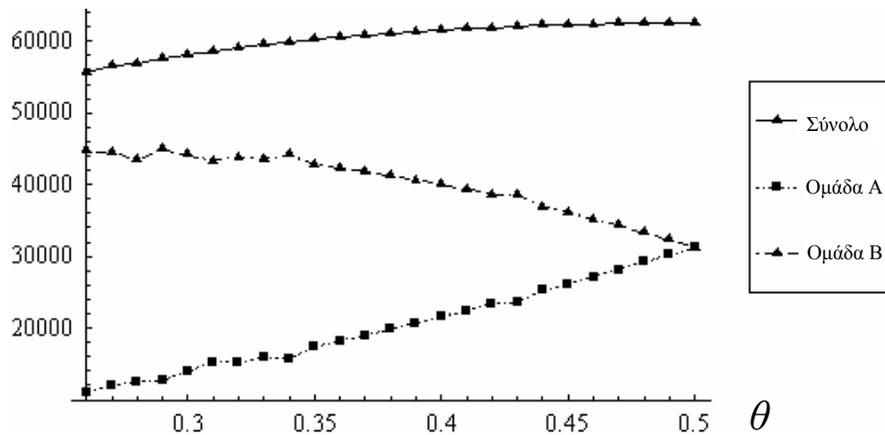
Στο αριθμητικό παράδειγμα του Σχήματος 4.5, η τιμή αυτή είναι 35156 μονάδες (σημειώστε ότι στο παράδειγμα αυτό $\theta_A^* = 0$ και $\theta_B^* = 0.5$ όπως προκύπτει και από την ανάλυση του βέλτιστου διαχωρισμού παραπάνω) και λύνοντας το παραπάνω πρόβλημα χρησιμοποιώντας αυτό το όριο για τη συνολική ευημερία που θα πρέπει να επιτύχει η ομάδα B , παίρνουμε ότι $x^* = 0.46$. Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι τώρα απαιτούμε μία ελάχιστη συνεισφορά από την ομάδα A επίσης ($\theta_A^* = 0.12$) και επομένως κάποιοι χρήστες θα πρέπει να αποκλειστούν. Έτσι, η συνολική κοινωνική ευημερία μειώνεται σε 62359 μονάδες (από 62500). Τώρα όμως η ομάδα B λαμβάνει μεγαλύτερο μέρος της (35200 μονάδες), πάλι μικρότερη από το σενάριο όπου δεν υπάρχει διαχωρισμός στην ενιαία ομάδα, αλλά μεγαλύτερη από το σενάριο όπου σχηματίζουν τη δική τους ξεχωριστή ομάδα. Και η ομάδα A λαμβάνει μικρότερη κοινωνική ευημερία (27156 μονάδες αντί για 31249), η οποία όμως είναι και πάλι μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες επιλογές.

Μειώνοντας περισσότερο την τιμή του x θα μπορούσε κανείς να δώσει ακόμα μεγαλύτερο κίνητρο στους χρήστες υψηλής χρησιμότητας να συμμετέχουν με αποτέλεσμα όμως την περαιτέρω μείωση της συνολικής κοινωνικής ευημερίας (βλ. Σχήμα 4.7). Επομένως, όταν είναι δυνατόν να κατηγοριοποιούμε αντικειμενικά τους χρήστες σε ομάδες μπορούμε πάντα να υπολογίζουμε κατάλληλες ελάχιστες προκαθορισμένες συνεισφορές για τις διαφορετικές ομάδες έτσι ώστε να είναι επωφελές για όλους τους χρήστες να συμμετέχουν και να επιτυγχάνεται αυξημένη συνολική αποδοτικότητα.

Διαφοροποιημένη υπηρεσία

Τι μπορούμε να κάνουμε όμως αν η ομάδα ενός χρήστη δεν μπορεί να καθοριστεί αντικειμενικά από τον σχεδιαστή; Τότε, φανερά, όλα τα μέλη της ομάδας B στο παράδειγμα μας θα

Κοινωνική ευημερία



Σχήμα 4.7: Συνολική και επιμέρους αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται για τις δύο ομάδες για διαφορετικές τιμές του x για $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ και $n_A = n_B = 500$

έχουν το κίνητρο να δηλώσουν ότι ανήκουν στην ομάδα A ώστε να συνεισφέρουν λιγότερο και έτσι να λάβουν μεγαλύτερο καθαρό όφελος. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει κανείς να δημιουργήσει τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες ώστε να δηλώνουν οικειοθελώς την ομάδα τους. Για να επιτύχουμε αυτό το πολύ ελκυστικό χαρακτηριστικό θα πρέπει και πάλι να συμβιβαστούμε. Μία κλασική προσέγγιση είναι να επιτρέψουμε περισσότερα από ένα επίπεδα συμμετοχής δημιουργώντας διαφορετικές εκδόσεις της παρεχόμενης υπηρεσίας (ως προς την ποιότητα). Ιδανικά, οι επιτρεπόμενες επιλογές θα έπρεπε να στοχεύουν σε διαφορετικούς τύπους χρηστών και να παρέχουν τα κίνητρα στον κάθε χρήστη να επιλέγει από μόνος του την επιλογή που έχει σχεδιαστεί για τον τύπο του. Για παράδειγμα, φανταστείτε ότι κάθε χρήστης έχει την επιλογή ανάμεσα σε διαθεσιμότητα περιεχομένου F αν συνεισφέρει f_2 , ή ρF , αν συνεισφέρει f_1 , όπου $\rho < 1$ και $f_1 < f_2$. Παρατηρήστε ότι στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε το φυσικό διαχωριστικό (αν υπάρχει) των ομάδων των χρηστών. Θα πρέπει απλώς να βεβαιωθούμε ότι οι χρήστες έχουν το κίνητρο να επιλέξουν την πραγματική τους ομάδα για την επιλογή μας των f_1 , f_2 και ρ . Ανάλογα με την τιμή των παραμέτρων αυτών, θα υπάρχει ένας οριακός χρήστης από την ομάδα χαμηλής χρησιμότητας με παράμετρο χρησιμότητας θ_l (χρήστες με $\theta_i < \theta_l$ δεν θα συμμετέχουν) και ένας οριακός χρήστης από την ομάδα υψηλής χρησιμότητας με παράμετρο χρησιμότητας θ_h ο οποίος θα είναι ο πρώτος που θα προτιμήσει να πληρώσει τη μεγαλύτερη συνεισφορά f_2 έτσι ώστε να έχει πρόσβαση σε όλο το διαθέσιμο περιεχόμενο του συστήματος. Δηλαδή, $\theta_h u(F) - f_2 \geq \theta_h u(\rho F) - f_1$.

Έτσι, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα πρέπει να λύσουμε ώστε να μεγιστοποιήσουμε την κοινωνική ευημερία είναι το εξής:

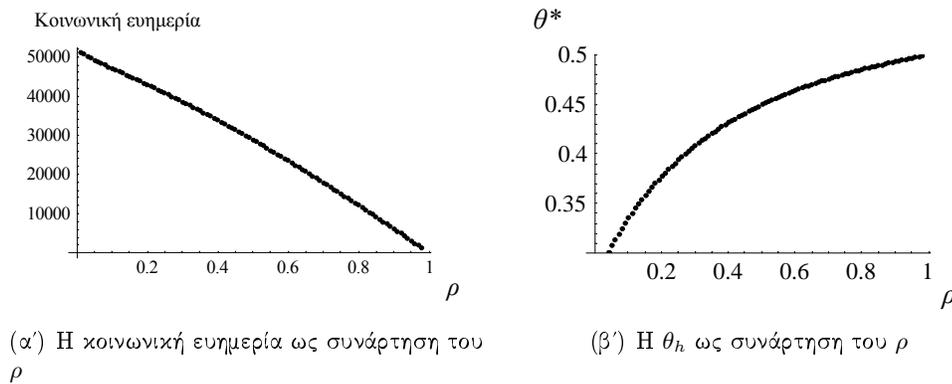
$$\begin{aligned} & \underset{\theta_l, \theta_h, f_1, f_2, \rho}{\text{maximize}} \quad nu(\rho F) \int_{\theta_l}^{\theta_h} \eta h(\eta) d\eta + nu(F) \int_{\theta_h}^1 \eta h(\eta) d\eta - F \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \\ & \theta_l u(\rho F) - f_1 = 0, \\ & \text{και } \theta_h u(F) - f_2 \geq \theta_h u(\rho F) - f_1, \\ & \text{και } F = n[H(\theta_h) - H(\theta_l)]f_1 + n[1 - H(\theta_h)]f_2. \end{aligned} \tag{4.37}$$

Αν και το μαθηματικό πρόβλημα αυτό είναι σαφώς ορισμένο και υπάρχει πάντοτε μία λύση δεν είναι εύκολο να λυθεί, ούτε αριθμητικά. Προφανώς, το γεγονός ότι ο σχεδιαστής του συστήματος δεν έχει τώρα την απαιτούμενη πληροφορία ώστε να κατηγοριοποιήσει αντικειμενικά τους χρήστες σε ομάδες παρέχει ένα πληροφοριακό κέρδος στους χρήστες και επομένως η κοινωνική ευημερία που μπορεί να επιτευχθεί από την δημιουργία μίας ενιαίας ομάδας θα είναι μειωμένη συγκριτικά με την περίπτωση που ο διαχωρισμός είναι αντικειμενικός. Πιο συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται στην ανάγκη να προσφέρουμε μικρότερη αξία σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό του πληθυσμού και ταυτόχρονα να απαιτήσουμε μικρότερη συνεισφορά από τους χρήστες υψηλής χρησιμότητας ώστε να μην έχουν το κίνητρο να πάρουν την προσφορά που αφορά τους χρήστες χαμηλής χρησιμότητας.

Ωστόσο, υπάρχει μία ενδιαφέρουσα ειδική περίπτωση του (4.37): όταν δεν είναι επιθυμητοί οι αποκλεισμοί. Χρησιμοποιώντας το συμβολισμό μας, οι αποκλεισμοί αποφεύγονται όταν $f_1 = 0$ (και επομένως $\theta_l = 0$). Η προσέγγιση αυτή είναι επίσης επιθυμητή όταν το κόστος του να εκμεταλλευτεί κανείς πολύ μικρές συνεισφορές είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο όφελος όπως για παράδειγμα όταν ένας χρήστης έχει μία πολύ αργή σύνδεση πρόσβασης ή όταν οργανισμοί με λίγους πόρους συνδέονται σε ένα επιστημονικό πλέγμα. Στις περιπτώσεις αυτές ο σχεδιαστής του συστήματος βρίσκεται αντιμέτωπος με ένα δίλημμα. Ο αποκλεισμός των χρηστών αυτών θα μπορούσε να εγείρει ηθικά ζητήματα ανάλογα με την εφαρμογή. Παράλληλα, αν τους επιτραπεί η χωρίς όρους πρόσβαση στο κοινό αγαθό θα μειωθεί σημαντικά η αποτελεσματικότητα των μηχανισμών κινήτρων για συνεισφορά. Θα πρέπει λοιπόν να συμβιβαστεί αν δεν θέλει να αποκλείσει κανέναν χρήστη από το σύστημα.

Αυτό εκφράζεται και από το μοντέλο μας καθώς όταν δεν απαιτείται συνεισφορά από τους χρήστες χαμηλής χρησιμότητας (όταν $f_1 = 0$), είναι εύκολο να δει κανείς ότι στη λύση

του (4.37) θα έχουμε ότι $\rho^* = 0$. Δηλαδή, οι χρήστες χαμηλής χρησιμότητας θα πρέπει να αποκλειστούν από τη χρήση του κοινού αγαθού. Ο λόγος είναι ότι μία οριακή αύξηση του ρ θα έκανε τον οριακό χρήστη της ομάδας που συνεισφέρει (αυτόν με $\theta_i = \theta_h$) να μετακινηθεί στην ομάδα που δεν συνεισφέρει. Τότε το F θα μειώνονταν κατά f_2 και επομένως θα μειώνονταν αντίστοιχα το καθαρό όφελος $(n - 1)$ χρηστών ενώ το καθαρό όφελος του οριακού χρήστη θα αυξάνονταν μόνο κατά ϵ . Έτσι, είναι πάντοτε επωφελής, σε ό,τι αφορά την κοινωνική ευημερία, η μείωση του ρ . Αυτό σημαίνει ότι στο σενάριο αυτό η επιλογή της τιμής του ρ είναι μία “πολιτική” απόφαση· δηλαδή, η απόφαση του πόση αξία είναι πολιτικά ορθό να παίρνουν από το σύστημα οι χρήστες που έχουν μηδενική συνεισφορά. Τότε, αυτό που θα πρέπει να υπολογίσουμε είναι τις βέλτιστες τιμές των f_2 και θ_h ώστε να μεγιστοποιηθεί η κοινωνική ευημερία δεδομένης της τιμής του ρ . Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται η κοινωνική ευημερία και το αντίστοιχο θ_h του οριακού χρήστη για διαφορετικές τιμές του ρ .



Σχήμα 4.8: Η κοινωνική ευημερία και η θ_h^* σύμφωνα με την (4.37) ως συνάρτηση του ρ όταν $f_1 = 0$ ($\alpha = 0.5$, $n = 1000$)

4.6.2 Ετερογενής δημοτικότητα αρχείων

Στο προτεινόμενο οικονομικό μοντέλο υποθέτουμε ότι όλα τα διαθέσιμα αρχεία προσφέρουν την ίδια αξία στους χρήστες και προκαλούν το ίδιο κόστος. Θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι αυτό δεν ισχύει σε ρεαλιστικά συστήματα διαμοιρασμού αρχείων εξαιτίας της ετερογενούς δημοτικότητας του περιεχομένου. Ωστόσο, δεν είναι προφανές πώς η δημοτικότητα επηρεάζει την αξία και το κόστος ενός αρχείου. Για παράδειγμα, ένα σπάνιο αρχείο θα μπορούσε να προσφέρει μεγαλύτερη αξία από ένα δημοφιλές που εν γένει μπορεί να βρεθεί πιο εύκολα. Επιπλέον, παρόλο που τα δημοφιλή αρχεία προσελκύουν περισσότερη ζήτηση, υπάρχουν περισσότερα αντίγραφα τους διαθέσιμα και επομένως η αυξημένη αυτή ζήτηση δια-

μοιράζεται ανάμεσα σε περισσότερους χρήστες. Έτσι, στη μέχρι τώρα ανάλυσή μας έχουμε κάνει την έμμεση υπόθεση ότι όλα τα αρχεία δέχονται παρόμοιο (μικρό) ρυθμό αιτήσεων (είτε επειδή δεν είναι δημοφιλή είτε επειδή το πλήθος των αντιγράφων τους είναι ανάλογο της δημοτικότητας τους) και είναι εξίσου χρήσιμα σε κάποιον χρήστη που τα καταφορτώνει.

Θα μπορούσαμε, ωστόσο, να επεκτείνουμε το μοντέλο μας σε περιπτώσεις όπου η δημοτικότητα των αρχείων επηρεάζει τη χρησιμότητα και το κόστος. Για παράδειγμα, υποθέστε το ακόλουθο σενάριο. Υπάρχουν N_1 δημοφιλή αρχεία και N_2 λιγότερο δημοφιλή. Οι αιτήσεις για ένα δημοφιλές αρχείο έχουν ρυθμό διπλάσιο από αυτόν των αιτήσεων για ένα μη δημοφιλές (και συνεπώς το κόστος για την παροχή του δημοφιλούς είναι διπλάσιο), αλλά δημιουργεί δύο φορές μεγαλύτερη αξία. Το συνολικό κόστος τώρα θα είναι $c(F_1, F_2) = 2F_1 + F_2$ και η αντίστοιχη χρησιμότητα $u(2F_1 + F_2)$. Η ανάλυση είναι παρόμοια με την παραπάνω. Απαιτούμε από τον κάθε χρήστη να συνεισφέρει f_1 αρχεία του τύπου 1 και f_2 αρχεία του τύπου 2. Παρατηρήστε ότι επειδή η αναλογία κόστους και οφέλους είναι η ίδια και για τους δύο τύπους αυτό που μας ενδιαφέρει είναι μόνο η τιμή του $f = 2f_1 + f_2$. Επομένως ο σχεδιαστής δεν έχει καμία προτίμηση για τον συγκεκριμένο συνδυασμό των f_1 και f_2 που επιλέγει ο χρήστης για τη συνεισφορά του. Αν η αναλογία αξία/κόστος ήταν διαφορετική για τους δύο τύπους, τότε θα ήταν βέλτιστο να διαμοιραστεί κανείς μόνο τον έναν τύπο (αυτόν με τη μεγαλύτερη αναλογία). Συνεπώς, όπως στο αρχικό μας μοντέλο, ο σχεδιαστής μπορεί να ελέγξει εάν ένας χρήστης συμμορφώνεται με τον κανόνα συνεισφοράς του συστήματος απλά ελέγχοντας ότι το συνολικό πλήθος των διαμοιραζομένων αρχείων ισούται με f .

4.6.3 Σταθερότητα

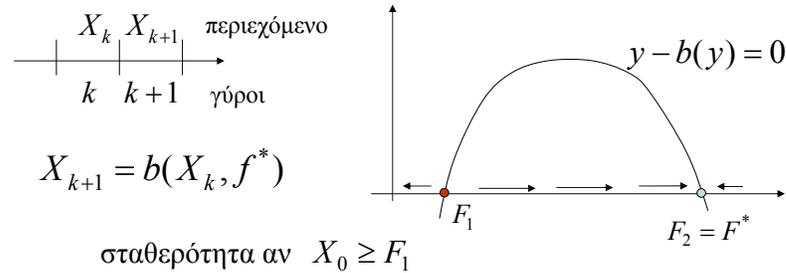
Υποθέστε ότι ο σχεδιαστής του συστήματος διαμορφώνει τον μηχανισμό δεδομένου ότι υπάρχουν n χρήστες. Αναμένει ότι $(1 - H(\theta))n$ από αυτούς θα συνεισφέρουν $f = \theta u(F)$ αρχεία. Έτσι το συνολικό πλήθος αρχείων που θα διατεθούν θα ισούται με $F = (1 - H(\theta))nf$.

Υποθέστε ότι υπάρχουν πράγματι n χρήστες, αλλά αρχικά κάποιοι από αυτούς δυσπιστούν ότι η τιμή του F θα είναι όσο μεγάλη ισχυρίζεται ο σχεδιαστής. Επομένως, κάποιοι δεν θα συμμετέχουν και το πλήθος των αρχείων που θα διατεθεί αρχικά θα είναι $F_1 < F$. Αν $f > u(F_1)$, τότε κανένας χρήστης δεν θα έχει θετικό καθαρό όφελος από τη συμμετοχή του και έτσι όλοι θα αποχωρήσουν. Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι $f < u(F_1)$. Αφού όλοι οι χρήστες παρατηρήσουν την τιμή του F_1 , εκείνοι με $\theta_i > f/u(F_1)$ θα συνειδητοποιήσουν ότι είναι προς όφελός τους να συμμετέχουν. Οι επιπλέον συνεισφορές τους θα οδηγήσουν στη διαθεσιμότητα

F_2 αρχείων όπου

$$F_2 = \left(1 - H\left(\frac{f}{u(F_1)}\right)\right) nf. \quad (4.38)$$

Ας το γράψουμε αυτό ως $F_2 = \phi(F_1)$. Τότε, διαδοχικά, $F_{k+1} = \phi(F_k)$, $k = 1, 2, \dots$. Εν γένει, οι ρίζες της εξίσωσης $F = \phi(F)$ μπορεί να είναι περισσότερες από μία. Για παράδειγμα, αν $u(F) = 0.6F^{1/2}$, $f = 5$, $n = 120$, και τα θ_i είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στο $[0, 1]$, τότε $\phi(F) = (1 - 5/0.6F^{1/2})(120)(5)$. Στο παράδειγμα αυτό υπάρχουν δύο ρίζες: $F = 100.00$



Σχήμα 4.9: Σταθερότητα

και $F = 320.87$. Μπορεί κανείς εύκολα να αποδείξει ότι αν το F_1 είναι μεγαλύτερο από τη μικρότερη ρίζα τότε το F_k τείνει στη μεγαλύτερη ρίζα καθώς το k τείνει στο άπειρο. Διαφορετικά $F_k \rightarrow 0$. Για $F = 100$ η κοινωνική ευημερία ισούται με 10, ενώ για $F = 320.87$ ισούται με 184.4. Άρα, το μεγαλύτερο F στο οποίο συγκλίνει το σύστημα είναι και η ρίζα για την οποία μεγαλύτερο πλήθος χρηστών συμμετέχουν και μεγαλύτερη κοινωνική ευημερία επιτυγχάνεται.

4.6.4 Υπολογισμός παραμέτρων του συστήματος

Έχουμε υποθέσει ότι τα n , $u(\cdot)$ και $H(\cdot)$ είναι γνωστά στον σχεδιαστή του συστήματος όταν υπολογίζει τη βέλτιστη συνεισφορά f . Θα ήταν ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα εάν γνωρίζοντας κανείς μόνο τη μορφή της βέλτιστης λύσης αλλά όχι τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων να σχεδιάσει μία προσαρμοστική πολιτική η οποία να εκμαιεύει την πληροφορία αυτή από τη συμπεριφορά των χρηστών. Στην ενότητα αυτή κάνουμε μόνο κάποιες αρχικές διαπιστώσεις. Αν μόνο η τιμή του n δεν είναι γνωστή, ο σχεδιαστής θα μπορούσε να θέσει μία καθορισμένη συνεισφορά και στη συνέχεια να παρατηρήσει το μέγεθος του F στο οποίο θα σταθεροποιηθεί το σύστημα (σύμφωνα με την (4.38)). Τότε το n μπορεί να εκτιμηθεί ως $F/(1 - H(f/u(F)))$.

Αν μόνο η κατανομή H δεν είναι γνωστή, και οι χρήστες δηλώνουν τις πραγματικές παραμέτρους χρησιμότητάς τους, τότε ο σχεδιαστής θα μπορούσε να εκτιμήσει την H από την

κατανομή που ακολουθούν οι δηλώσεις ως για παράδειγμα \hat{H} , και τότε να υλοποιήσει τη βέλτιστη λύση για την κατανομή \hat{H} . Για μεγάλα n θα πρέπει να ισχύει ότι $\hat{H} \approx H$, δεδομένου ότι οι χρήστες είναι ειλικρινείς. Αυτό θα ισχύει αν υποθέσουμε ότι οι χρήστες έχουν διαφορετικές παραμέτρους χρησιμότητας σε διαφορετικές στιγμές του παιγνίου (για παράδειγμα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές που συνδέονται στο σύστημα) αφού εάν η παραμέτρος χρησιμότητας ενός τυπικού χρήστη είναι ένα επαναλαμβανόμενο δείγμα της $H(\cdot)$ το μέσο καθαρό του όφελος θα είναι το $1/n$ επί της συνολικής κοινωνικής ευημερίας, και τότε θα είναι πράγματι βέλτιστο για αυτόν να είναι ειλικρινής. Ωστόσο, αν η παράμετρος χρησιμότητας παραμένει σταθερή θα μπορούσε να υπάρχει το κίνητρο για μία κατηγορία χρηστών να δηλώσουν ψευδή παράμετρο χρησιμότητας ελπίζοντας σε λάθος εκτίμηση της H από τον σχεδιαστή έτσι ώστε να επωφεληθούν οι ίδιοι.

4.6.5 Θέματα υλοποίησης

Θεωρητικά, για να εξαναγκάσει ένα σύστημα τους χρήστες του να διαθέσουν ένα ελάχιστο πλήθος αρχείων στη μονάδα του χρόνου, χρειάζεται να υπολογίσει το συνολικό χρόνο που ένας χρήστης έχει μείνει στο σύστημα (στη διάρκεια μιας προκαθορισμένης περιόδου) και να διασφαλίσει ότι το απαιτούμενο πλήθος αρχείων ήταν διαθέσιμο στο χρόνο αυτό. Με βάση την πληροφορία αυτή, μπορεί στη συνέχεια να τιμωρεί κατάλληλα του χρήστες κατά τη διάρκεια της επόμενης περιόδου.

Μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει τις πραγματικές αναφορές που πραγματοποιήσει ένας χρήστης ως ένδειξη για το πλήθος αρχείων που διέθεσε. Για παράδειγμα, θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει την έκδοση ηλεκτρονικών ληξιπρόθεσμων αποδείξεων οι οποίες θα υπογράφονται από τους χρήστες που καταφορτώνουν περιεχόμενο, και οι οποίες θα ελέγχονται από μελλοντικούς εξυπηρετητές πριν ικανοποιήσουν μία αίτηση για περιεχόμενο. Έτσι, οι χρήστες θα μπορούν να καταφορτώσουν περιεχόμενο μόνο αν μπορούν να επιδείξουν ένα ικανοποιητικό πλήθος τέτοιων αποδείξεων. Ρυθμίζοντας κατάλληλα τον χρόνο λήξης, ο σχεδιαστής του συστήματος θα μπορούσε να επιβάλλει το απαιτούμενο επίπεδο διαμοιρασμού σε κάθε περίοδο. Παρατηρείστε ότι ένας τέτοιος μηχανισμός διαφέρει από τους μηχανισμούς που εξισώνουν την κατανάλωση με τη συνεισφορά στο ότι ο ρυθμός αιτήσεων παραμένει ελεύθερος. Ωστόσο, όπως και όλοι οι μηχανισμοί των οποίων η επιβολή βασίζεται στην καταμέτρηση και διαχείριση του ιστορικού χρήσης των χρηστών, ο μηχανισμός αυτός είναι επιρεπής στις επιθέσεις της πλαστής συναλλαγής (μπορεί κάποιος να υπογράψει

πλαστές αποδείξεις για τους φίλους του ή ακόμα και για τον ίδιο αν δημιουργήσει περισσότερα από ένα ψευδώνυμα) και του ξεπλύματος της κακής φήμης (βλ. Ενότητα 2.5.2).

Στο επόμενο κεφάλαιο προτείνουμε ένα μηχανισμό κινήτρων χωρίς μνήμη εμπνευσμένο από τον προτεινόμενο μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς. Η πιο σημαντική του διαφοροποίηση είναι ότι ο χρόνος που οι χρήστες παραμένουν συνδεδεμένοι στο σύστημα διαμοιράζοντας τα αρχεία τους εξαρτάται από τον ρυθμό αιτήσεων τους. Αυτό είναι το κόστος που θα πρέπει κανείς να πληρώσει αν επιθυμεί να υλοποιήσει οποιοδήποτε μηχανισμό κινήτρων στο επισφαλές περιβάλλον των διομήτιμων συστημάτων, όπου η καταγραφή του ιστορικού χρήσης των χρηστών είναι προβληματική ή ακόμα αδύνατη. Δηλαδή, θα πρέπει να περιοριστεί μόνο στο χρόνο που οι χρήστες καταναλώνουν πόρους προς όφελος τους για να τους εξαναγκάσει να συνεισφέρουν στο σύστημα.

4.7 Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράψαμε τη σχέση του διαμοιρασμού αρχείων με τα κοινά αγαθά. Ορίσαμε έτσι την έννοια της αποδοτικότητας ενός διομήτιμου συστήματος διαμοιρασμού αρχείων και καταδείξαμε τα ελκυστικά χαρακτηριστικά ενός μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς. Κυρίως, ότι ένας τέτοιος απλός μηχανισμός είναι αρκετός για να οδηγήσει, ασυμπτωτικά, το σύστημα στο μέγιστο επίπεδο αποδοτικότητας που θα μπορούσε να επιτευχθεί σε συνθήκες ελλιπούς πληροφόρησης.

Ωστόσο, η απόδοση του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς μειώνεται με την ετερογένεια των χρηστών ως προς τις παραμέτρους χρησιμότητάς τους. Επομένως, η κατηγοριοποίηση των χρηστών σε διαφορετικές ομάδες θα ήταν ιδιαίτερα ωφέλιμη. Καταδείξαμε το γεγονός αυτό και μάλιστα δείξαμε ότι σε πολλές περιπτώσεις ένα μικρό μόνο πλήθος τέτοιων ομάδων είναι αρκετό για να μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα κατά μέσο όρο. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως θα πρέπει να υπάρχουν τα κατάλληλα κίνητρα ώστε οι χρήστες να συμφωνήσουν να συμμετέχουν δηλώνοντας την ομάδα στην οποία πραγματικά ανήκουν σύμφωνα με τον τύπο τους ή να συμφωνήσουν να διαφοροποιηθούν αν ο τύπος τους είναι ορατός. Αναλύσαμε μερικές πιθανές λύσεις ώστε να εκμεταλλευτούμε την επιπλέον πληροφορία που προκύπτει χάρις στον σχηματισμό ομάδων και συζητήσαμε τα αντισταθμιστικά οφέλη που προκύπτουν.

Επίσης, κάναμε κάποιες πρώτες σκέψεις για την αντιμετώπιση σημαντικών προβλημάτων που εμφανίζονται όταν ο προτεινόμενος μηχανισμός θα πρέπει να υλοποιηθεί σε ένα ρεαλιστι-

κό διομότιμο σύστημα όπως είναι η επίδραση της διαφορετικής δημοτικότητας των αρχείων, οι συνθήκες που απαιτούνται για να διασφαλιστεί η σταθερότητα, το δύσκολο πρόβλημα της ανακάλυψης παραμέτρων του συστήματος που έχουμε υποθέσει ότι είναι γνωστές (όπως το πλήθος των χρηστών και η κατανομή H), καθώς και τα ιδιαίτερα σημαντικά θέματα υλοποίησης, τα οποία συζητάμε λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Παρατηρείστε ότι αν και δεν είναι πάντα εύκολο να επιβάλλουμε τον προτεινόμενο μηχανισμό και πολλά πρακτικά θέματα δεν έχουν πλήρως αντιμετωπιστεί, το κομμάτι αυτό της εργασίας μας παρέχει ένα πολύ χρήσιμο θεωρητικό μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση διαφορετικών πρακτικών μηχανισμών κινήτρων όπως αυτός που προτείνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, ένα μεγάλο μέρος της ανάλυσης αυτής είναι εφαρμόσιμο και σε άλλα διομότιμα συστήματα τα οποία επίσης έχουν χαρακτηριστικά των κοινών αγαθών όπως τα επιστημονικά πλέγματα και ο διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης, και τα οποία θα μπορούσαν να έχουν εν γένει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την υλοποίηση. Αυτός είναι και ο λόγος που χειριστήκαμε την οικονομική μοντελοποίηση και την υλοποίηση ως ορθογώνιες διαστάσεις της σχεδίασης μηχανισμών κινήτρων για παροχή πόρων σε διομότιμα συστήματα. Εξάλλου, η τεχνολογία δεν έχει ακόμα σταθεροποιηθεί και είναι πολύ σημαντικό να κάνει κανείς τις κατάλληλες αφαιρέσεις σε αυτό το περίπλοκο πρόβλημα μοντελοποίησης ώστε να καταλάβει τι είναι σημαντικό και τι όχι. Πιστεύουμε ότι η έννοια του κοινού αγαθού σε ένα διομότιμο σύστημα παίζει σε πολλές περιπτώσεις καθοριστικό ρόλο σε ό,τι αφορά την παροχή και τον διαμοιρασμό πόρων και επομένως η σημασία και η εφαρμόσιμότητα των αποτελεσμάτων μας στο κεφάλαιο αυτό δεν περιορίζονται στις διομότιμες εφαρμογές διαμοιρασμού αρχείων.

Κεφάλαιο 5

Ένας μηχανισμός επιβολής χωρίς μνήμη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε έναν υποψήφιο μηχανισμό χωρίς μνήμη που επιβάλλει έναν παρόμοιο κανόνα με τον θεωρητικό μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς τον οποίο αναλύσαμε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπό ορισμένες υποθέσεις, ο νέος μηχανισμός αυτός θα μπορούσε να οδηγήσει ένα ρεαλιστικό διομότιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων σε ικανοποιητικά επίπεδα αποδοτικότητας, ένα ιδιαίτερα ελκυστικό χαρακτηριστικό δεδομένου ότι δεν απαιτεί την ύπαρξη ενός μηχανισμού καταγραφής και διαχείρισης του ιστορικού χρήσης των χρηστών. Συζητάμε τις απαιτήσεις για την υλοποίηση του συστήματος και ορίζουμε ένα νέο οικονομικό μοντέλο με την βοήθεια του οποίου αξιολογούμε τον προτεινόμενο μηχανισμό και να τον συγκρίνουμε με άλλους εναλλακτικούς.

Μέρος του κεφαλαίου αυτού αποτελεί απο κοινού εργασία με τον Ben Strulo (δείτε επίσης το [11]).

5.1 Εισαγωγή

Ο τελικός στόχος της διατριβής αυτής είναι η περιγραφή ενός συστήματος που εστιάζει στη διαθεσιμότητα περιεχομένου (όπως το Direct Connect) χωρίς όμως να απαιτεί την δυνατότητα αποθηκεύσης πληροφοριών για τους χρήστες ή τη δυνατότητα μόνιμου αποκλεισμού χρηστών από την κοινότητα, ακολουθώντας τη βασική αρχή υλοποίησης του BitTorrent. Ελπίζουμε έτσι να βελτιώσουμε την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος χωρίς την απειλή των επιθέσεων “ξέπλυμα κακής φήμης” και “εικονική συναλλαγή” και χωρίς την ανάγκη υλοποίη-

σης της απαραίτητης λειτουργικότητας για την καταγραφή και διαχείριση του ιστορικού των χρηστών.

Ένας αξιόπιστος μηχανισμός επιβολής χωρίς μνήμη θα πρέπει να βασίζεται μόνο στο χρόνο που οι χρήστες καταναλώνουν πόρους (δηλ. κατά τη διάρκεια της αντιγραφής αρχείων) και συνεπώς θα πρέπει να βασίζεται στον χρήστη που παρέχει υπηρεσίες για την επιβολή του αντίστοιχου μηχανισμού κινήτρων. Οι μηχανισμοί άμεσης ανταλλαγής (βλ. Ενότητα 2.5.4), βασίζονται ακριβώς στην αρχή αυτή για να επιβάλλουν την απαιτούμενη ανταποδοτικότητα μεταξύ των χρηστών. Η προσέγγιση μας είναι λιγότερο αυστηρή καθώς δεν απαιτεί από τους χρήστες να ανταποδίδουν άμεσα τις υπηρεσίες που λαμβάνουν αλλά απλά να συνεισφέρουν στο σύστημα ως σύνολο ενώ καταναλώνουν πόρους, αντιμετωπίζοντας τις υπηρεσίες που παρέχονται ως ένα αγαθό κοινής ωφέλειας. Έχει και αυτή έχει επίσης τις αδυναμίες της (για παράδειγμα εξαρτάται από την ύπαρξη χρηστών αυξημένων υποχρεώσεων) αλλά πιστεύουμε ότι η ελαστική της φύση (και η έμφαση στη διαθεσιμότητα περιεχομένου) καθιστά τον προτεινόμενο μηχανισμό ελκυστικό για ρεαλιστικά διομήτιμα συστήματα όπου υπάρχουν πράγματι χρήστες που επιθυμούν να αναλάβουν αυξημένες υποχρεώσεις και οι αυστηρές προσεγγίσεις που εξισώνουν την κατανάλωση με τη συνεισφορά θα μπορούσαν να βλάψουν τη διαθεσιμότητα του περιεχομένου και το συλλογικό πνεύμα. Μελετάμε σε μεγαλύτερο βάθος τα αντισταθμιστικά οφέλη των διαφορετικών επιλογών στη συνέχεια.

Πρώτα συνοψίζουμε τις βασικές μας υποθέσεις. Κατ' αρχάς, θεωρούμε το κόστος αναφόρτωσης μικρής σημασίας, ειδικά κατά τη διάρκεια της καταφόρτωσης. Επίσης, η έμφαση που δίνουμε στη διαθεσιμότητα περιεχομένου αντί για το εύρος ζώνης που παρέχεται για τις αναφορτώσεις καθιστά τις ακόλουθες υποθέσεις ρεαλιστικές: 1) τα φαινόμενα συμφόρησης είναι σπάνια και 2) όλα τα αρχεία έχουν παρόμοιο (χαμηλό) ρυθμό αιτήσεων, είτε επειδή δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλή είτε επειδή η διαθεσιμότητα τους είναι ανάλογη της δημοτικότητάς τους. Τέλος, υποθέτουμε ότι οι χρήστες ενεργούν ορθολογικά, για το προσωπικό τους συμφέρον, και όχι με αντικειμενικό σκοπό να βλάψουν το σύστημα.

5.2 Ο μηχανισμός επιβολής

Δύο είναι τα βασικά συστατικά της συνεισφοράς ενός χρήστη ως προς τη διαθεσιμότητα περιεχομένου:

- Το πλήθος αρχείων που διαμοιράζεται.

- Η προσωπική του διαθεσιμότητα (ο χρόνος που μένει συνδεδεμένος παρέχοντας τα αρχεία αυτά).

Προτείνουμε λοιπόν έναν μηχανισμό κατά τον οποίο ο χρήστης που αναφορτώνει ένα από τα αρχεία του ελέγχει πρώτα εάν ο ομότιμός του χρήστης διαμοιράζεται επίσης το απαιτούμενο πλήθος αρχείων. Επίσης, θα πρέπει να σιγουρευτεί ότι τα αρχεία αυτά είναι διαθέσιμα στους υπόλοιπους χρήστες (για παράδειγμα ελέγχοντας μέσω του μηχανισμού αναζήτησης για τη διαθεσιμότητα τους). Αν ο χρήστης που δέχεται το αρχείο αρνηθεί να αναφορτώσει και ο ίδιος ένα από τα αρχεία του σε περίπτωση που ζητηθεί από κάποιον άλλο χρήστη, ο τελευταίος θα ενημερώσει αυτόν που του το προσφέρει ώστε να σταματήσει τη μεταφορά. Το ίδιο θα συμβεί στην περίπτωση που ένα αρχείο δεν είναι έγκυρο όπως συζητάμε στην Ενότητα 5.3.1.

Το δεύτερο συστατικό της συνεισφοράς ενός χρήστη, και ίσως το πιο σημαντικό, είναι ο χρόνος που περνάει στο σύστημα διαμοιράζοντας το απαιτούμενο πλήθος αρχείων. Εφόσον έχουμε υποθέσει ότι μπορούμε να εξαναγκάσουμε τους χρήστες να συνεισφέρουν μόνο ενόσω καταφορτώνουν αρχεία, ο χρόνος αυτός εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό αναφόρτωσης. Έτσι, για να καταφέρει το σύστημα να επιβάλλει μία ορισμένη συνεισφορά στους χρήστες θα πρέπει να περιορίσει τον ελάχιστο μέσο χρόνο καταφόρτωσης. Αυτό θα μπορούσε εύκολα να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα απλό και ελαφρύ πρωτόκολλο το οποίο θα ενημερώνει όλους τους συμμετέχοντες για τον προκαθορισμένο ρυθμό αναφόρτωσης που θα χρησιμοποιούν και το οποίο θα επιτρέπει τη δυναμική ρύθμιση του ρυθμού αυτού.

Η αύξηση του μέσου χρόνου καταφόρτωσης θα είχε θετική επίδραση και στη διαθεσιμότητα του περιεχομένου και στην πιθανότητα να ζητηθεί ένα αρχείο του χρήστη που καταφορτώνει (οπότε και θα αναγκαστεί να το προσφέρει για να συνεχίσει την καταφόρτωση του). Μειώνει όμως τη χρησιμότητα των χρηστών απαιτώντας να περιμένουν περισσότερο για να ολοκληρωθούν οι καταφορτώσεις τους. Μελετάμε τέτοια αντισταθμιστικά οφέλη σχετικά με την κρίσιμη αυτή παράμετρο του μηχανισμού μας στην Ενότητα 5.4.3.

Στη συνέχεια, περιγράφουμε τις βασικές απαιτήσεις για την υλοποίηση ενός συστήματος που χρησιμοποιεί τον προτεινόμενο μηχανισμό χωρίς μνήμη.

5.2.1 Ομότιμοι χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων

Η τρέχουσα γενιά των διομήτιμων εφαρμογών διαμοιρασμού αρχείων εκμεταλλεύεται την ετερογένεια μεταξύ των ομότιμων χρηστών η οποία είχε προηγουμένως διαπιστωθεί στην πράξη [90][94]. Αντίθετα λοιπόν από τα καθαρόαιμα διομήτιμα συστήματα όπως το αρχικό δίκτυο

Gnutella, όπου όλοι οι χρήστες είχαν τις ίδιες υποχρεώσεις, τα τρέχοντα συστήματα, όπως το Kazaa και το νέο πρωτόκολλο Gnutella (Gnutella 2.0), αναθέτουν περισσότερες υποχρεώσεις σε χρήστες με περισσότερους πόρους (όπως μεγάλο εύρος ζώνης πρόσβασης, περισσότερη υπολογιστική ισχύ και διαθέσιμο περιεχόμενο) και/ή σταθερή συνδεσιμότητα. Οι χρήστες αυτοί σχηματίζουν έναν κορμό ο οποίος είναι υπεύθυνος, κυρίως, να απαντάει ερωτήσεις αναζήτησης περιεχομένου. Οι υπόλοιποι χρήστες συνδεόνται στον κορμό αυτό μέσω ενός ή περισσοτέρων χρηστών αυξημένων υποχρεώσεων (super-peers).

Τα οφέλη μίας τέτοιας ιεραρχικής αρχιτεκτονικής είναι προφανή. Η τρέχουσα πρακτική και η τεράστια επιτυχία των διομότιμων εφαρμογών αποτελούν μάλιστα μία απόδειξη για την επεκτασιμότητα και την αποτελεσματικότητα των υβριδικών διομότιμων συστημάτων (δείτε επίσης το [16] για μία ποσοτική αξιολόγηση). Μία λογική ερώτηση προκύπτει ωστόσο. Ποιά είναι τα κίνητρα των χρηστών να δεχθούν να αναλάβουν αυξημένες υποχρεώσεις; Η απάντηση είναι ότι υπάρχουν πολλοί χρήστες (όπως οι φοιτητές ή ορισμένοι εξειδικευμένοι χρήστες) που έχουν πολύ μικρό κόστος λειτουργίας, ευρυζωνική και μόνιμη σύνδεση στο Διαδίκτυο, μεγάλη συλλογή περιεχομένου και αλτρουϊστικά κίνητρα, οι οποίοι επιθυμούν να συνεισφέρουν εθελοντικά τους αχρησιμοποίητους πόρους τους για την αποδοτική λειτουργία μίας διομότιμης κοινότητας. Στο [71] περιέχονται μετρήσεις για το δίκτυο Kazaa οι οποίες αποτελούν ένδειξη ότι πράγματι αρκετοί χρήστες ίσως επιθυμούν να παίξουν το ρόλο αυτό ακόμα και αν αυτό δεν αποτελεί μία ορθολογική απόφαση.

Συνεπώς, δεν είναι μη ρεαλιστικό να υποθέσουμε την ύπαρξη κάποιων χρηστών που έχουν τους πόρους και τα κατάλληλα κίνητρα ώστε να αναλάβουν αυξημένες υποχρεώσεις για την υλοποίηση της απαραίτητης λειτουργικότητας. Σημειώστε ότι σε κάθε περίπτωση η ύπαρξη τους είναι απαραίτητη για ακόμα πιο θεμελιώδεις λειτουργίες του συστήματος όπως η αναζήτηση υπηρεσιών, και για το λόγο αυτό πιστεύουμε ότι πρακτικοί μηχανισμοί κινήτρων που δεν κάνουν την υπόθεση αυτή ίσως να αυτοπεριορίζονται χωρίς λόγο σε χειρότερα σημεία αποδοτικότητας από αυτά που θα μπορούσαν να επιτευχθούν διαφορετικά.

Στο σύστημα μας χρειαζόμαστε τέτοιους χρήστες για δύο σημαντικούς λόγους. Πρώτον, είναι απαραίτητοι για να παίξουν το ρόλο της αρχικής πηγής περιεχομένου παρέχοντας ένα ορισμένο πλήθος αρχείων και το ρόλο της ρίζας στα δέντρα καταφόρτωσης αρχείων που θα σχηματιστούν και τα οποία θα αυξήσουν ακόμα περισσότερο τη διαθεσιμότητα περιεχομένου στο σύστημα. Διαφορετικά, ο μηχανισμός μας θα απαιτούσε τον σχηματισμό κύκλων από αιτήσεις για περιεχόμενο μοιάζοντας έτσι με ένα μηχανισμό άμεσης ανταλλαγής (βλ. το [3]). Δεύτερον, οι χρήστες αυτοί θα είναι υπεύθυνοι για τον υπολογισμό χρήσιμων πληροφοριών

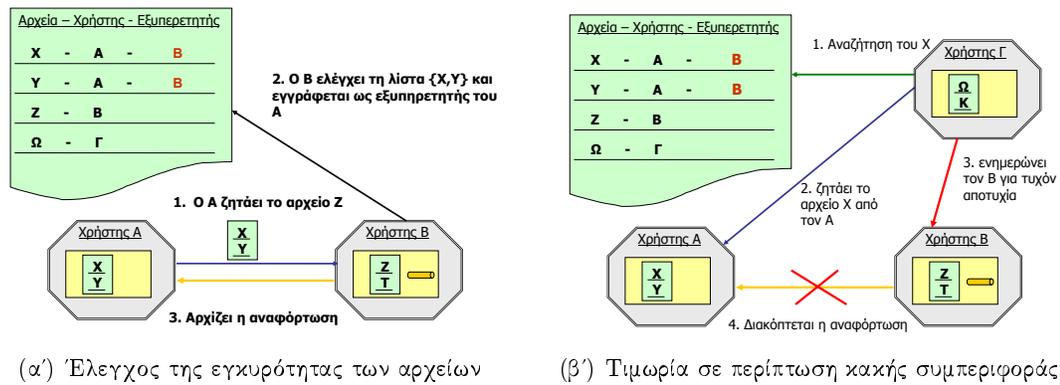
για το σύστημα (όπως το μέγεθος του, το πλήθος των διαμοιραζόμενων αρχείων, κ.ά.) και την ρύθμιση σημαντικών παραμέτρων όπως ο προκαθορισμένος ρυθμός αναφόρτωσης και το ελάχιστο πλήθος αρχείων που οφείλει να διαμοιράζεται ο κάθε χρήστης. Σημειώστε ότι αυτό είναι το βασικό συστατικό του μηχανισμού μας που τον διαφοροποιεί από υπάρχοντα διομότιμα συστήματα και τη σχετική βιβλιογραφία. Δηλαδή, η προσπάθεια μας να εισάγουμε κάποια έννοια ρύθμισης με σκοπό τη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας του συστήματος όπως αυτή ορίζεται από το προτεινόμενο οικονομικό μοντέλο. Επιπλέον, η υπέρψη χρηστών με αυξημένες υποχρεώσεις καθιστά την υλοποίηση της λειτουργικότητας του προτεινόμενου μηχανισμού πιο ρεαλιστική και βοηθά την αντιμετώπιση ορισμένων περιπτώσεων στις οποίες δεν υπάρχει πάντα συμβατότητα κινήτρων, όπως συζητάμε στη συνέχεια.

Δεν είναι σκοπός της διατριβής αυτής να δώσει μία λεπτομερή σχεδίαση ενός συστήματος που υλοποιεί τον προτεινόμενο μηχανισμό. Πιστεύουμε όμως ότι η βασική του λειτουργικότητα που περιγράφεται στη συνέχεια θα μπορούσε εύκολα να συμπεριληφθεί στις προδιαγραφές μιας υβριδικής διομότιμης αρχιτεκτονικής όπως η Gnutella 2.

5.2.2 Έλεγχος της εγκυρότητας των αρχείων

Περιγράφουμε πρώτα ένα πρωτόκολλο (σε υψηλό επίπεδο) που μεταφέρει την απαραίτητη πληροφορία μεταξύ των χρηστών ώστε να επιτευχθεί το πιο δύσκολο κομμάτι της λειτουργικότητας του προτεινόμενου μηχανισμού: την εξασφάλιση ότι ένας χρήστης που ζητά να καταφορτώσει ένα αρχείο διαμοιράζεται ο ίδιος ένα προκαθορισμένο πλήθος έγκυρων αρχείων. Αρχικά, όπως φαίνεται στην Σχήμα 5.1(α'), ο Χρήστης A βρίσκει αρχεία του ενδιαφέροντός του μέσω του συστήματος αναζήτησης και στέλνει μία αίτηση για αναφόρτωση στον Χρήστη B (που διαθέτει τα συγκεκριμένα αρχεία). Η αίτηση αυτή περιλαμβάνει έναν κατάλογο από αρχεία που προσφέρει ο A ως απόδειξη για τη συνεισφορά του. Ο B πρέπει να ελέγξει την εγκυρότητα του καταλόγου αυτού (ή για να μειώσει το κόστος, ένα τυχαίο υποσύνολο αρχείων από τον κατάλογο αυτό). Το κάνει αυτό με το να τα αναζητήσει ο ίδιος. Αν δεν καταφέρει να τα βρει θα αρνηθεί να εξυπηρετήσει τον A. Αν όντως τα βρει, θα προσθέσει μία σημείωση στις αντίστοιχες εγγραφές του καταλόγου αναζήτησης εκφράζοντας έτσι το τρέχον ενδιαφέρον του για την αξιοπιστία της αντίστοιχης υπηρεσίας. Ξεκινάει τότε να εξυπηρετεί τον A.

Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη επειδή το γεγονός ότι ένας ορισμένο πλήθος αρχείων είναι διαθέσιμο από έναν χρήστη δεν σημαίνει ότι στην πράξη θα τα προσφέρει όταν του ζητηθεί. Έτσι, ενόσω ο B εξυπηρετεί τον A είναι πιθανό κάποιος άλλος χρήστης C να ζητήσει ένα αρχείο



Σχήμα 5.1: Βασική λειτουργικότητα του πρωτοκόλλου επιβολής

από τον Α ενώ θα έχει ενημερωθεί για το ενδιαφέρον του Β για την εγκυρότητα των υπηρεσιών του Α. Τότε αν η υπηρεσία προς τον C δεν είναι ικανοποιητική (το αρχείο δεν αποστέλλεται καθόλου ή είναι προβληματικό, κ.ά.), ο C μπορεί να ενημερώσει τον Β (βλ. Σχήμα 5.1(β')). Στο σημείο αυτό ο Β μπορεί να τιμωρήσει τον Α διακόπτοντας την καταφόρτωση αφού πρώτα ελέγξει επίσης την εγκυρότητα των αρχείων του C (για να πιστοποιήσει ότι δεν ήταν αυτός ο λόγος που δεν εξυπηρετήθηκε).

Ο επιπλέον αυτός έλεγχος θα μπορούσε να πραγματοποιείται μόνο αν υπάρχει διαφωνία ώστε να μειωθεί ο αριθμός των ελέγχων εγκυρότητας οι οποίοι θα μπορούσαν να έχουν μεγάλο κόστος (δείτε επίσης την Ενότητα 5.3.1). Δηλαδή όταν ο Χρήστης Β αρνείται τη δήλωση του C (ότι ο Β δεν συμπεριφέρεται σωστά). Σημειώστε ότι ο Β δεν έχει το κίνητρο να το κάνει αυτό αν ο C είναι ένας νομοταγής χρήστης τον οποίο δεν εξυπρέτησε όπως θα έπρεπε. Ομοίως, ο C δεν έχει το κίνητρο να κατηγορήσει ψευδώς τον Β ότι δεν τον εξυπηρετεί.

5.2.3 Ρύθμιση παραμέτρων

Το δεύτερο συστατικό του προτεινόμενου μηχανισμού επιβολής, ο καθορισμένος ρυθμός αναφόρτωσης, είναι πιο εύκολο να ελεγχθεί από τους χρήστες. Σε σχετικά σταθερά συστήματα (π.χ. με σταθερό μέσο πλήθος χρηστών) η λειτουργικότητα αυτή θα μπορούσε να υλοποιηθεί στο λογισμικό του χρήστη το οποίο θα ήταν εξ' αρχής σχεδιασμένο να αναφορτώνει αρχεία με έναν προκαθορισμένο ρυθμό.

Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα χαρακτηριστικά των διομήτιμων συστημάτων αλλάζουν σημαντικά στη διάρκεια του χρόνου. Έτσι, ένα κατάλληλο πρωτόκολλο θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε η τιμή του ρυθμού αναφόρτωσης να μπορεί να ανανεωθεί από τους χρήστες

αυξημένων υποχρεώσεων με βάση μετρήσεις της συνολικής δραστηριότητας στο σύστημα. Το κομμάτι της ανανέωσης είναι σχετικά απλό καθώς από τη στιγμή που οι χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων συμφωνήσουν στην τιμή του ρυθμού αναφόρτωσης που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, κάθε ένας από αυτούς μπορεί να τον μεταδώσει στο υποδίκτυο που βρίσκεται υπό τον έλεγχο του.

5.3 Θέματα κινήτρων

Καταφέρνει ο προτεινόμενος μηχανισμός να δημιουργήσει πραγματικά τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες; Αν επιλέξουν να μην διαθέσουν περιεχόμενο δεν θα μπορούν να καταφορτώνουν αρχεία. Θα μπορούσαν όμως να υποκριθούν ότι διαμοιράζονται αρχεία αλλά στην πραγματικότητα να μην προσφέρουν υπηρεσίες; Συζητάμε στη συνέχεια αυτό και άλλα θέματα κινήτρων που προκύπτουν στα πλαίσια του μηχανισμού μας.

5.3.1 Διαμοιρασμός μη έγκυρων αρχείων

Εφόσον δεν απαιτούμε από έναν ομότιμο χρήστη να αναφορτώνει οπωσδήποτε ένα αρχείο ενώ καταφορτώνει κάποιο άλλο, θα πρέπει να κάνουμε ό,τι καλύτερο μπορούμε για να ελέγξουμε την εγκυρότητα των αρχείων που δηλώνονται ως διαθέσιμα το νωρίτερο δυνατό. Ο πρώτος έλεγχος είναι ότι τα αρχεία είναι πραγματικά προσβάσιμα μέσω του κατανεμημένου μηχανισμού αναζήτησης ώστε να μην μπορούν οι χρήστες να δηλώνουν ότι διαμοιράζονται αρχεία χωρίς να παίρνουν το ρίσκο ότι κάποια από αυτά μπορεί να ζητηθούν.

Μία πιθανή απάτη που μπορεί να επιχειρήσει ένας χρήστης είναι να διαφημίσει αρχεία με ανύπαρκτα ονόματα και έτσι να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα να δεχθεί αίτηση για αναφόρτωση. Θα μπορούσαμε να φανταστούμε διαδικασίες, οι οποίες θα εκτελούνται από τους χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων, και οι οποίες θα διαγράφουν από τον κατάλογο αναζήτησης μη έγκυρους τίτλους, χρησιμοποιώντας πιθανόν κάτι παρόμοιο με την υπηρεσία freedb¹ (είτε κεντρικοποιημένα είτε κατανεμημένα). Αυτό θα καταστήσει δύσκολο για τους χρήστες να διαφημίζουν ανύπαρκτους τίτλους. Ο χρήστης που αναφορτώνει ένα αρχείο θα μπορούσε επίσης να κάνει τέτοιου είδους ελέγχους.

Μία πιθανή απάτη που μπορεί επίσης να επιχειρηθεί είναι η διαφήμιση αρχείων με έγκυρα ονόματα αλλά μη έγκυρο περιεχόμενο. Αυτό επίσης θα μπορούσε να ελεγχθεί από τον χρήστη που αναφορτώνει ένα αρχείο (ή ίσως προτιμότερα από μελλοντικούς πελάτες) χρησιμοποιώντας

¹<http://www.freedb.org/>

τέχνικες όπως αυτές που προτείνονται στο [72]. Ωστόσο, αν η πιθανότητα να λάβει κανείς αίτηση είναι μικρή, αυτή θα μπορούσε να είναι παρόλα αυτά μία επωφελής επίθεση. Υπάρχουν όμως ορισμένοι πρακτικοί μηχανισμοί που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν το ρίσκο αυτό. Για παράδειγμα,

- οι χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων θα μπορούσαν να πραγματοποιούν τυχαίους ελέγχους στα διαμοιραζόμενα αρχεία, ίσως εστιάζοντας σε νέους χρήστες ή νέο περιεχόμενο. Αν υπάρχει ένα υποσύνολο έμπιστων χρηστών αυξημένων υποχρεώσεων ένας επιτυχής έλεγχος θα μπορούσε να ανταμοίβεται με ένα υπογεγραμμένο πιστοποιητικό το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιείται σε μελλοντικές συναλλαγές. Επίσης
- θα μπορούσαν να παρέχονται κίνητρα στους χρήστες να συνεισφέρουν τις δικές τους (ίσως σπάνιες) προτιμήσεις στην κοινότητα και έτσι να γίνονται μέλη κοινωνικών δικτύων με βάση τα ενδιαφέροντα τους. Ή θα μπορούσαν να παρέχονται επιπλέον κοινωνικά κίνητρα όπως για παράδειγμα η φήμη για την παροχή χρήσιμου περιεχομένου.

Στο κεφάλαιο αυτό δίνουμε έμφαση στην παροχή κινήτρων ώστε οι χρήστες να διαμοιράζονται περιεχόμενο για αρκετό χρόνο ώστε να αυξάνεται η διαθεσιμότητα του. Δεν παρέχουμε μία πλήρη λύση για το ζήτημα της εγκυρότητας του περιεχομένου και περισσότερο έρευνα χρειάζεται για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού.

5.3.2 Άρνηση παροχής υπηρεσιών

Ακόμα και αν εξασφαλίσουμε όμως ότι οι χρήστες διαμοιράζονται έγκυρα αρχεία θα μπορούσαν πάντα να αρνηθούν να τα αναφορτώσουν σε πιθανούς πελάτες. Παρόλα αυτά, τέτοιου είδους συμπεριφορά μπορεί να εντοπιστεί και να τιμωρηθεί μόλις ένα αρχείο πραγματικά ζητηθεί από κάποιον τρίτο χρήστη (βλ. Σχήμα 5.1(β')). Αυτό όμως δεν εμποδίζει έναν χρήστη να επανέλθει στο σύστημα και να συνεχίσει καταφορτώσεις που έχουν διακοπεί για τον παραπάνω λόγο. Τότε όμως η καταφόρτωση θα διαρκέσει παραπάνω χρόνο από αυτόν που θα χρειαζόταν αν ο εν λόγω χρήστης είχε συνεργαστεί. Έτσι, καθώς έχουμε υποθέσει ότι η αναφόρτωση ενός αρχείου δεν επιφέρει επιπλέον κόστος, ένας χρήστης που καταφορτώνει ένα αρχείο προς όφελος του, έχοντας ήδη πληρώσει το κόστος διαμοιρασμού αρχείων και αναμονής για την ολοκλήρωση της καταφόρτωσης, δεν έχει το κίνητρο να αρνηθεί να αναφορτώσει και ο ίδιος ένα αρχείο στη διάρκεια του χρόνου αυτού. Συνεπώς, δεν θεωρούμε τη συγκεκριμένη επίθεση μία ορθολογική απόφαση σύμφωνα με τις βασικές μας υποθέσεις.

Παρατηρείστε ότι η επίθεση αυτή μοιάζει με μία αντίστοιχη επίθεση στην εφαρμογή BitTorrent (βλ. [85]). Η πράξη όμως έχει δείξει ότι δεν εφαρμόζεται από τους χρήστες [4][53], γεγονός που ενισχύει την πεποίθησή μας ότι δεν αποτελεί σημαντική απειλή επίσης για τον δικό μας μηχανισμό. Σημειώστε επίσης ότι, όπως στην περίπτωση της εγκυρότητας του περιεχομένου που συζητήθηκε παραπάνω, η επίθεση αυτή γίνεται πιο επωφελής όσο πιο μικρή είναι η πιθανότητα αίτησης για ένα αρχείο. Έτσι, μερικές από τις λύσεις που προτάθηκαν για την αντιμετώπιση της επίθεσης διαμοιρασμού μη έγκυρων αρχείων θα είχαν θετικό αποτέλεσμα και στην περίπτωση της επίθεσης άρνησης παροχής υπηρεσιών.

5.3.3 Κίνητρα για επιβολή

Όπως έχουμε ήδη συζητήσει όλοι οι μηχανισμοί κινήτρων για παροχή πόρων σε διομότιμα συστήματα, πλήρως ή μερικώς κατανεμημένα, επιβάλλουν ένα ορισμένο κόστος για την επιβολή τους στους συμμετέχοντες χρήστες. Το δικό μας πρωτόκολλο επιβολής κινήτρων έχει δύο τμήματα: α) τον έλεγχο της εγκυρότητας των αρχείων και β) τον περιορισμό του ρυθμού αναφόρτωσης που προσφέρεται.

Το πρώτο τμήμα επιφέρει ένα ορισμένο σταθερό κόστος στους χρήστες που το εκτελούν. Ωστόσο, περιμένουμε το κόστος αυτό να είναι σχετικά μικρό, τουλάχιστον σε περιπτώσεις όπου το εύρος ζώνης είναι σε περίσσεια όπως έχουμε υποθέσει. Φυσικά όμως, ο σχεδιαστής του συστήματος θα πρέπει να εξασφαλίσει ότι το κόστος αυτό είναι το ελάχιστο δυνατό μέσω προσεκτικού σχεδιασμού και μεταφοράς του μέγιστου δυνατού μέρους της λειτουργικότητας στους χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων. Τότε, τουλάχιστον για κάποιους χρήστες, το κόστος αυτό θα δικαιολογείται από το όφελος του ελέγχου: ότι οι υπόλοιποι χρήστες εμποδίζονται από το να καταχραστούν το σύστημα. Σημειώστε εξάλλου ότι, όπως φαίνεται, η ανθρώπινη φύση περιλαμβάνει μία τάση να τιμωρεί την απάτη ακόμα και αν αυτό επιφέρει κάποιο κόστος [45].

Το δεύτερο τμήμα του πρωτόκολλου επιβολής, ο καθορισμός ενός συγκεκριμένου ρυθμού αναφόρτωσης, δεν εμπεριέχει κανένα κόστος και συνεπώς οι χρήστες δεν θα έχουν κίνητρο να το αυξήσουν, ειδικά εφόσον ο καθορισμός του γίνεται εσωτερικά στο λογισμικό της εφαρμογής. Η μείωση του ρυθμού αναφόρτωσης δεν είναι επίσης μία ορθολογική στρατηγική σύμφωνα με τις υποθέσεις μας. Τέλος, συνωμοσίες κατά τις οποίες ορισμένοι χρήστες συμφωνούν να αναφορτώνουν αρχεία μεταξύ τους με μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο ρυθμό αναφόρτωσης δεν επιφέρουν σημαντικά οφέλη όταν οι χρήστες αυτοί συναλλάσσονται επίσης με άλλους

χρήστες ή χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων καθώς θα πρέπει να περιμένουν για αυτές τις καταφορτώσεις να ολοκληρωθούν. Αν δεν συναλλάσσονται με άλλους χρήστες τότε ουσιαστικά σχηματίζουν το δίκτυο τους ανεξάρτητο σύστημα το οποίο είναι πάντα μία δυνατή επιλογή.

5.4 Οικονομική μοντελοποίηση

Θα επαναδιατυπώσουμε τώρα το μοντέλο του Κεφαλαίου 4 ώστε να δίνει έμφαση στη διαθεσιμότητα των χρηστών. Δηλαδή, να θεωρεί μόνο το χρόνο που ένας χρήστης αποφασίζει να μείνει συνδεδεμένος ως τη βασική του συνεισφορά για τη διαθεσιμότητα του περιεχομένου. Εν συνεχεία θα το επεκτείνουμε ώστε να εκφράσουμε το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του προτεινόμενου μηχανισμού επιβολής: το γεγονός ότι οι χρήστες συνεισφέρουν τους πόρους τους μόνο ενόσω καταναλώνουν προς όφελος τους.

Υποθέστε ότι οι ομότιμοι χρήστες $1, \dots, n$ μοιράζονται τη χρήση ενός αγαθού κοινής ωφέλειας: το αναμενόμενο πλήθος διαφορετικών αρχείων που είναι διαθέσιμα στο σύστημα. Το αγαθό μπορεί να προσφερθεί σε ποσότητα Q με ρυθμό κόστους $c(Q)$. Αν N , είναι το μέγιστο πλήθος διαφορετικών έγκυρων αρχείων, χρησιμοποιούμε τώρα το μέγεθος Q/N , την πιθανότητα μία τυχαία αίτηση να ικανοποιηθεί, για να εκφράσουμε τη διαθεσιμότητα περιεχομένου που επιτυγχάνεται σε ένα σύστημα μεγέθους Q .

Όπως στα Κεφάλαια 3 και 4, ο χρήστης i έχει χρησιμότητα για το αγαθό $\theta_i u(Q/N)$, όπου θ_i είναι η παράμετρος χρησιμότητας η οποία είναι γνωστή μόνο στον χρήστη i , αλλά η οποία είναι πάλι ένα τυχαίο δείγμα μίας κατανομής στο διάστημα $[0, 1]$, με συνάρτηση κατανομής $H(\cdot)$ και πυκνότητα πιθανότητας $h(\cdot)$. Η συνάρτηση $u(\cdot) \geq 0$ υποθέτουμε ότι είναι κοίλη ($u(x) = x^\beta$, όπου $\beta < 1$ είναι μία θετική σταθερά). Για να κατεσκευάσουμε το αγαθό Q , κάθε χρήστης πρέπει να διαμοιραστεί f_i αρχεία για ένα ποσοστό t_i του χρόνου ($0 \leq t_i \leq 1$). Τότε, σε κάποια τυχαία στιγμή το συνολικό αναμενόμενο πλήθος των, όχι απαραίτητα διαφορετικών, αρχείων F θα είναι $F = \sum_{i=1}^n (f_i t_i)$. Εξαιτίας της ύπαρξης αντιγράφων, το διαθέσιμο πλήθος διαφορετικών αρχείων Q θα είναι εν γένει μία κοίλη συνάρτηση του F , το οποίο όταν ο λόγος Q/N δεν είναι κοντά στη μονάδα και όλα τα αρχεία είναι εξίσου δημοφιλή, μπορεί να προσεγγιστεί από το F , όπως δείξαμε στην Ενότητα 4.1.1. Δηλαδή, στην έκταση τιμών των παραμέτρων μας, $Q(F) \approx F$, και μπορούμε να χρησιμοποιούμε το Q αντί για το F . Στη συνέχεια κάνουμε αυτή την υπόθεση για απλότητα, η οποία δεν είναι κρίσιμη για τα ποιοτικά αποτελέσματά μας.

Εφόσον δεν λαμβάνουμε υπόψη μας το κόστος αναφόρτωσης, δεν τίθεται κανένας περιο-

ρισμός στο ρυθμό με τον οποίο οι χρήστες ζητούν και καταφορτώνουν αρχεία. Επιπλέον, το πλήθος των διαμοιραζόμενων αρχείων θεωρείται πάγιο κόστος (sunk cost), το οποίο πληρώνουν οι χρήστες πριν συνδεθούν στο σύστημα και περιλαμβάνει κυρίως το κόστος απόκτησης και απόθηκευσης του περιεχομένου. Στην ανάλυση μας έχουμε υποθέσει ότι ο σχεδιαστής του συστήματος έχει καθορίσει εξ αρχής ένα σταθερό και κοινό για όλους πλήθος αρχείων f που απαιτείται να διαμοιράζεται ο κάθε χρήστης με βάση παράμετρους του συστήματος όπως το αναμενόμενο πλήθος συμμετεχόντων, το μέγιστο πλήθος διαφορετικών αρχείων N , το μέσο μέγεθος και η αξία των αρχείων, κ.ά.

Έτσι, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος, ο ρυθμός κόστους των χρηστών για την κατασκευή του αγαθού κοινής ωφέλειας Q εξαρτάται μόνο από το ποσοστό του χρόνου t_i που θα πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένοι διαμοιράζοντας το σταθερό πλήθος f αρχείων. Υποθέτουμε ότι το κόστος είναι γραμμικό ως προς t_i και το ίδιο για όλους τους χρήστες. Άρα, $c(Q) = \alpha \sum_{i=1}^n t_i$, όπου η μεταβλητή α μετατρέπει τις μονάδες χρόνου σε μονάδες χρησιμότητας, και το Q θα είναι ίσο με $\sum_{i=1}^n t_i f$ και συνεπώς $c(Q) = \alpha Q/f$.

Στη συνέχεια υπενθυμίζουμε τη βέλτιστη αποδοτικότητα και το μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς με τις παραπάνω μικρές τροποποιήσεις και παρουσιάζουμε και αναλύουμε σε βάθος το νέο οικονομικό μοντέλο που περιγράψαμε παραπάνω ώστε να εκφράσουμε το γεγονός ότι οι χρήστες μπορούν να αναγκαστούν να συνεισφέρουν τα αρχεία τους μόνο ενόσω καταφορτώνουν.

5.4.1 Βέλτιστη αποδοτικότητα

Όταν έχουμε πλήρη πληροφόρηση (όταν η παράμετρος θ_i του κάθε χρήστη i είναι γνωστή) και απεριόριστες δυνατότητες επιβολής, ο σχεδιαστής του συστήματος θα έπρεπε να αποφασίσει για το βέλτιστο ποσό αγαθού Q και το ποσοστό του χρόνου t_i που ο κάθε χρήστης i θα πρέπει να μένει συνδεδεμένος, λύνοντας το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης

$$\begin{aligned} & \underset{\{t_1, \dots, t_n\}, Q}{\text{maximize}} \sum_{i=1}^n \theta_i u(Q/N) - c(Q) \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \\ & 0 \leq t_i \leq 1 \ \&\& \ \theta_i u(Q/N) \geq \alpha t_i, \ \forall i. \end{aligned} \tag{5.1}$$

Όταν το βέλτιστο μέγεθος του συστήματος Q^* υπολογιστεί λύνοντας το (5.1), είναι τότε τετριμμένο να υπολογίσουμε ένα σύνολο από εφικτά t_i^* (δηλ. τέτοια ώστε $\theta_i u(Q^*/N) \geq$

$\alpha t_i^*, \forall i$).

Η λύση του προβλήματος αυτού (η βέλτιστη παροχή πόρων) θα αποτελέσει το μέτρο σύγκρισης για να αξιολογήσουμε την αποδοτικότητα του προτεινόμενου μηχανισμού καθώς η αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται με τη λύση του (5.1) είναι η μέγιστη δυνατή.

5.4.2 Ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς

Σύμφωνα με τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς που αναλύθηκε σε βάθος στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο σχεδιαστής του συστήματος θα πρέπει να επιλέξει τα $\bar{\theta}$ και Q σύμφωνα με το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης

$$\begin{aligned} & \underset{Q, \bar{\theta}}{\text{maximize}} \quad nu(Q/N) \int_{\bar{\theta}}^1 x dH - c(Q) \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \\ & n(1 - H(\bar{\theta}))\bar{\theta}u(Q/N) = c(Q) \end{aligned} \tag{5.2}$$

Όπως έχουμε ήδη δείξει (βλ. Κεφάλαιο 4), το (5.2) μεγιστοποιεί την αναμενόμενη κοινωνική ευημερία ως προς το φάσμα των δυνατών πολιτικών προκαθορισμένης συνεισφοράς. Η βέλτιστη πολιτική θα αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των δύο μεταβλητών Q και $\bar{\theta}$. Λύνοντας το (5.2) με $c(Q) = \alpha Q/f$ και τον επιπλέον περιορισμό ότι $t^* \leq 1$, μπορούμε να υπολογίσουμε το Q^* και τότε η ελάχιστη συνεισφορά του κάθε χρήστη θα είναι $t^* = \bar{\theta}u(Q^*/N)/\alpha$.

Αν και ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς είναι στη θεωρία ένας πολύ απλός και ελκυστικός μηχανισμός κινήτρων για τη διαθεσιμότητα περιεχομένου, δεν μπορεί να επιβληθεί από ένα ρεαλιστικό διομότιμο σύστημα καθώς απαιτεί συνεχή έλεγχο της συνεισφοράς ενός χρήστη και αποθήκευση και διαχείριση της πληροφορίας αυτής στο χρόνο (βλ. Ενότητα 4.6.5). Για παράδειγμα, στην οριακή περίπτωση όπου το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι άπειρο, και άρα ο μέσος χρόνος καταφόρτωσης θα ισούται με μηδέν, ένας ορθολογικός χρήστης θα έθετε $t_i = 0$, χωρίς να επηρεάσει τη δική του χρήση των διαθέσιμων πόρων. Έτσι, η ανικανότητα να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες να παραμείνουν στο σύστημα παραπάνω από όσο χρειάζεται για να ολοκληρώσουν τις καταφορτώσεις τους θα οδηγούσε σε κατάρρευση του συστήματος.

5.4.3 Ο μηχανισμός προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης δεδομένων

Στα πλαίσια του μηχανισμού μας χωρίς μνήμη προτείνουμε τον έλεγχο του ρυθμού b με τον οποίο οι χρήστες αναφορτώνουν αρχεία. Συμβολίζουμε με d το μέσο χρόνο καταφόρτωσης ενός αρχείου, ο οποίος είναι γενικά μία φθίνουσα συνάρτηση του b και συνεπώς θα χρησιμοποιήσουμε το d ως την παράμετρο που επιθυμούμε να ρυθμίσουμε στην ανάλυση μας παρακάτω και για απλότητα υποθέτουμε ότι $d(b) = s/b$, όπου s είναι το μέσο μέγεθος αρχείου.²

Με τον μηχανισμό προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης η συνεισφορά των χρηστών θα εξαρτάται από το ρύθμο αιτήσεων τους πολλαπλασιασμένο με την πιθανότητα οι αιτήσεις τους να είναι επιτυχείς, και έτσι δεν θα είναι η ίδια για όλους όπως στην περίπτωση του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς. Ορίζουμε τη συνάρτηση $r(\theta)$ η οποία συνδέει τον τύπο ενός χρήστη με το ρυθμό αιτήσεων του. Για την ανάλυση μας επιλέξαμε $r(\theta) = \theta^2$, υποθέτοντας μία κυρτή σχέση μεταξύ τύπου και ρυθμού αιτήσεων των χρηστών. Έστω x_i ($0 \leq x_i \leq \theta_i$) η τιμή στην οποία ένας χρήστης επιθυμεί να μειώσει τον τύπο του και συνεπώς τον ρυθμό αιτήσεων του όταν αντιμετωπίζει ένα μέσο χρόνο καταφόρτωσης d σε ένα σύστημα μεγέθους Q . Τότε το ποσοστό του χρόνου που ο χρήστης i θα καταφορτώνει αρχεία στο σύστημα θα ισούται με $t_i = r(x_i)(Q/N) \times d$, το ρυθμό επιτυχημένων αιτήσεων, $r(x_i)(Q/N)$, επί το μέσο χρόνο καταφόρτωσης για κάθε επιτυχημένη αίτηση, d .

Περιγράφουμε τώρα τη διαδικασία που θα συγκλίνει στην οριακή τιμή του Q . Υποθέστε ότι Q_0 αρχεία γίνονται διαθέσιμα από τους χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων και Q_1 επιπλέον αρχεία γίνονται διαθέσιμα από τους κανονικούς χρήστες ενόσω βρίσκονται στο σύστημα καταφορτώνοντας αρχεία. Συμβολίζουμε με Q το συνολικό περιεχόμενο στο σύστημα, $Q = Q_0 + Q_1$. Κάθε χρήστης i θα επιλέξει ένα βέλτιστο x_i λύνοντας το ακόλουθο τοπικό

²Για να ισχύει αυτό θα πρέπει να υποθέσουμε επίσης ότι εφόσον ξεκινήσει μία καταφόρτωση, τότε θα ολοκληρωθεί (π.χ. απαιτώντας από τους χρήστες να περιμένουν να ολοκληρωθούν όλες οι αναφορτώσεις που ξεκίνησαν πριν το τέλος της δικής τους καταφόρτωσης να ολοκληρωθούν επίσης). Ωστόσο, αυτό δεν είναι εύκολο να επιβληθεί σε ένα ρεαλιστικό διομότιμο σύστημα. Οι χρήστες όμως στην πράξη κάνουν παράλληλες αιτήσεις, δεν αποσυνδέονται αμέσως μετά το τέλος μιας καταφόρτωσης, συνεχίζουν να ψάχνουν για περιεχόμενο κατά τη διάρκεια των καταφορτώσεων, κλπ. Αυτό που απαιτεί το μοντέλο μας είναι η ικανότητα εξαναγκασμού των χρηστών να παραμένουν στο σύστημα περισσότερο χρόνο ανά καταφόρτωση και πιστεύουμε ότι θέτοντας το ρύθμο αναφόρτωσης σε μία ορισμένη (χαμηλή) τιμή θα είχε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Συνεπώς δεν είναι παράλογο να κάνουμε την υπόθεση αυτή, σύμφωνα με την οποία το μοντέλο μας ισχύει.

πρόβλημα βελτιστοποίησης.

$$\begin{aligned} & \underset{x_i}{\text{maximize}} \left\{ x_i u((Q_0 + Q_1)/N) - \alpha r(x_i)((Q_0 + Q_1)/N)d \right\} \\ & \text{υπό τον περιορισμό} \\ & 0 \leq x_i \leq \theta_i \text{ και } r(x_i)((Q_0 + Q_1)/N)d \leq 1. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Παίρνουμε το κόστος να είναι ανάλογο του ποσοστού του χρόνου που ο χρήστης καταφορτώνει αρχεία (και άρα το ποσοστό του χρόνου που κάνει διαθέσιμα τα δικά του αρχεία). Η λύση θα είναι (όταν $r(x_i) = x_i^2$)

$$x_i(Q) = \min \{ \theta_i, \bar{\theta}(Q) \}, \text{ όπου } \bar{\theta}(Q) = \frac{u(Q/N)}{2\alpha d(Q)/N}.$$

Υποθέτοντας ότι ενόσω καταφορτώνει ένας χρήστης κάνει διαθέσιμα f αρχεία, η επιλογή του x_i θα έχει επίδραση στο πλήθος των διαφορετικών αρχείων, $Q_0 + Q_1$, που είναι διαθέσιμα στους υπόλοιπους. Υποθέστε ότι ο χρήστης 1 υπολογίζει το πλήθος των αρχείων στο σύστημα ως $Q_0 + Q_1$ και αποφασίζει να αλλάξει τον τύπο του από x_1 σε $x_1(Q_0 + Q_1)$. Τότε το Q_1 θα αλλάξει από τη λύση του

$$Q_1 = \sum_i r(x_i)((Q_0 + Q_1)/N)df$$

στη λύση του

$$Q'_1 = \left[r(x_1(Q_0 + Q_1)) + \sum_{i \neq 1} r(x_i) \right] ((Q_0 + Q'_1)/N)df.$$

Τώρα ο χρήστης 2 υπολογίζει το πλήθος των αρχείων στο σύστημα ως $Q_0 + Q'_1$. Τώρα

$$Q''_1 = \left[r(x_1(Q_0 + Q_1)) + r(x_2(Q_0 + Q'_1)) + \sum_{i \neq 1,2} r(x_i) \right] ((Q_0 + Q''_1)/N)df.$$

Και έτσι, επαναλαμβάνοντας διαδοχικά για $k = 1, 2, \dots$ θα έχουμε ότι

$$Q_1^{k+1} = \sum_{i=1}^n r(x_i(Q_0 + Q_1^k))((Q_0 + Q_1^k)/N)df.$$

Η πρώτη μας παρατήρηση είναι ότι η διαδικασία αυτή θα οδηγήει πάντα σε ένα σταθερό σημείο

$$Q_1 = \frac{\sum_{i=1}^n r(x_i) Q_0 df}{N - \sum_{i=1}^n r(x_i) df}, \quad (5.4)$$

εκτός από την περίπτωση όπου $Q_0 = 0$, όπου απαιτούμε $\frac{\sum_{i=1}^n r(x_i) df}{N} = 1$ και συνεπώς

$$\rho := \frac{\sum_{i=1}^n r(\theta_i) df}{N} \geq 1, \quad (5.5)$$

αφού αν $\rho < 1$ τότε θα είχαμε

$$Q_1^{k+1} = r(x_i(Q_1^k))(Q_1^k/N) df \leq r(\theta_i)(Q_1^k/N) df < \rho Q_1^k \leq \rho^k Q_1^{(0)},$$

και συνεπώς $Q_k \rightarrow 0$ όσο $k \rightarrow \infty$.

Παρέχουμε τώρα μία πλήρη ανάλυση σταθερότητας για μία συγκεκριμένη περίπτωση, η οποία πιστεύουμε ότι έχει γενικότερη εφαρμογή. Θεωρήστε πρώτα την περίπτωση $Q_0 = 0$. Υποθέστε ότι το n είναι μεγάλο και ότι βρισκόμαστε σε σημείο ισορροπίας. Τότε θα πρέπει να ισχύει

$$\frac{\sum_{i=1}^n r(x_i) df}{N} = 1 \quad (5.6)$$

όπου

$$x_i = \min \left\{ \theta_i, \frac{u(Q/N)}{2\alpha(Q/N)d} \right\} = \min \{ \theta_i, \bar{\theta} \},$$

για κάποια Q και $\bar{\theta}$, όπου

$$\bar{\theta} = \frac{u(Q/N)}{2\alpha(Q/N)d}. \quad (5.7)$$

Αν υποθέσουμε τώρα ότι οι $\theta_1, \dots, \theta_n$ είναι ομοιόμορφα κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές στο διάστημα $[0, 1]$ και άρα το ίδιο είναι και οι $r(x_i)$, $i = 1, \dots, n$, με απλούς υπολογισμούς παίρνουμε ότι

$$\frac{1}{n} E [\sum_{i=1}^n r(x_i)] = (1/3)\bar{\theta}^3 + (1 - \bar{\theta})\bar{\theta}^2. \quad (5.8)$$

Ξαναγράφοντας την συνθήκη σταθερότητας μας ως

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r(x_i) = \frac{N}{df n} \quad (5.9)$$

και παρατηρώντας ότι η $\frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n r(x_i)] - E [\sum_{i=1}^n r(x_i)]$ είναι μία $O(1/\sqrt{n})$ ποσότητα (από το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα) η συνθήκη σταθερότητας (5.9) γίνεται

$$\frac{1}{n} E [\sum_{i=1}^n r(x_i)] + \frac{A}{\sqrt{n}} = \frac{N}{dfn}. \quad (5.10)$$

όπου ο πρώτος όρος της αριστερού μέρους είναι μία ποσότητα $O(1)$ η οποία δίνεται από την (5.8).

Υποθέτοντας ότι το n είναι μεγάλο, μπορούμε να αδιαφορήσουμε για τον όρο A/\sqrt{n} και να καταλήξουμε στην ακόλουθη προσεγγιστική συνθήκη σταθερότητας:

$$\frac{1}{n} E [\sum_{i=1}^n r(x_i)] = \frac{N}{dfn} \Leftrightarrow (1/3)\bar{\theta}^3 + (1 - \bar{\theta})\bar{\theta}^2 = \frac{N}{dfn}. \quad (5.11)$$

Η αναμενόμενη κοινωνική ευημερία, με χρήση της (5.7), είναι

$$SW = n \left[(1/2)\bar{\theta}^2 + (1 - \bar{\theta})\bar{\theta} \right] u(Q/N) - n\alpha \left[(1/3)\bar{\theta}^3 + (1 - \bar{\theta})\bar{\theta}^2 \right] (Q/N)d \quad (5.12)$$

$$= n \left[(1/2)\bar{\theta}^2 + (1 - \bar{\theta})\bar{\theta} \right] 2\alpha(Q/N)d\bar{\theta} - n\alpha \left[(1/3)\bar{\theta}^3 + (1 - \bar{\theta})\bar{\theta}^2 \right] (Q/N)d \quad (5.13)$$

$$= n(Q/N)d\alpha \left[(2/3)\bar{\theta}^3 + (1 - \bar{\theta})\bar{\theta}^2 \right] \quad (5.14)$$

Υποθέστε ότι $u(Q) = Q^{1/2}$. Τότε $Q/N = 1/(2\alpha d\bar{\theta})^2$ σύμφωνα με την (5.7). Έτσι αντικαθιστώντας στην (5.14) παίρνουμε ότι

$$SW = \frac{n^2(3 - \bar{\theta})(3 - 2\bar{\theta})\bar{\theta}^2 f}{36\alpha N}. \quad (5.15)$$

Παρατηρήστε ότι αυτή είναι μία εξίσωση που περιλαμβάνει μόνο το $\bar{\theta}$, το οποίο είναι συνάρτηση του d . Μεγιστοποιείται για $\bar{\theta} = (3/16)(9 - \sqrt{17}) \approx 0.9144$. Συνεπώς θα έπρεπε να πάρουμε

$$d^* = \frac{3.06 N}{nf} \quad (5.16)$$

σύμφωνα με την (5.7) αντικαθιστώντας το $\bar{\theta}$. Είναι ενδιαφέρον ότι αυτή η βέλτιστη απόφαση δεν εξαρτάται από την τιμή του α .

Η περίπτωση όπου $Q_0 > 0$ έχει ως ακολούθως. Θυμηθείτε ότι το Q συμβολίζει το σύνολο του περιχομένου στο σύστημα και το Q_1 το περιεχόμενο που παρέχεται από τους κανονικούς

χρήστες στο σημείο ισορροπίας, $Q = Q_0 + Q_1$. Τότε

$$Q_1 = \frac{\sum_{i=1}^n r(x_i)(Q_0 + Q_1) df}{N},$$

ή ισοδύναμα, η συνθήκη σταθερότητας γίνεται

$$\frac{\sum_{i=1}^n r(x_i) df}{N} \approx \frac{n[(1/3)\bar{\theta} + (1 - \bar{\theta})]\bar{\theta}^2 df}{N} = \frac{Q - Q_0}{Q}. \quad (5.17)$$

Υποθέτοντας ξανά ότι $u(Q) = Q^{1/2}$ θα έχουμε επίσης (σύμφωνα με την 5.7) ότι

$$Q = \frac{N}{(2\alpha d\bar{\theta})^2}. \quad (5.18)$$

Τώρα οι (5.17) και (5.18) ορίζουν ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού ως προς d

$$n[(1/3)\bar{\theta} + (1 - \bar{\theta})]\bar{\theta}^2 df + Q_0(2\alpha\bar{\theta})^2 d^2 - N = 0, \quad (5.19)$$

το οποίο μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τη θετική του ρίζα. Αντικαθιστώντας το d στην (5.14) μας επιτρέπει να εκφράσουμε την κοινωνική ευημερία ως συνάρτηση του $\bar{\theta}$ όπως πριν. Και πάλι, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε την τιμή του $\bar{\theta}$ που μεγιστοποιεί την κοινωνική ευημερία ως συνάρτηση των υπολοίπων παραμέτρων και να χρησιμοποιήσουμε την (5.19) για να υπολογίσουμε την εξάρτηση της βέλτιστης τιμής του d ως προς τις υπόλοιπες παραμέτρους.

5.4.4 Σταθερότητα

Θα συζητήσουμε στην ενότητα αυτή μερικές ενδιαφέρουσες ιδιότητες του μοντέλου μας και πιο συγκεκριμένα τον ρόλο της παραμέτρου d . Θα θεωρήσουμε την περίπτωση όπου $Q_0 = 0$ και $u(Q) = Q^{1/2}$, για την οποία οι εκφράσεις που προκύπτουν είναι απλούστερες και είναι ευκολότερο να αναλυθούν αλλά επίσης εστιάζει στην ποσότητα του περιεχομένου που προσφέρεται από τους απλούς χρήστες. Για τον υπολογισμό της κοινωνικής ευημερίας για διαφορετικές τιμές του d θα υποθέσουμε ότι υπάρχει κάποιο αρχικό περιεχόμενο για να ξεκινήσει η λειτουργία του συστήματος, το οποίο αποσύρεται όταν οι χρήστες αρχίζουν να καταφορτώνουν αρχεία μεταξύ τους.

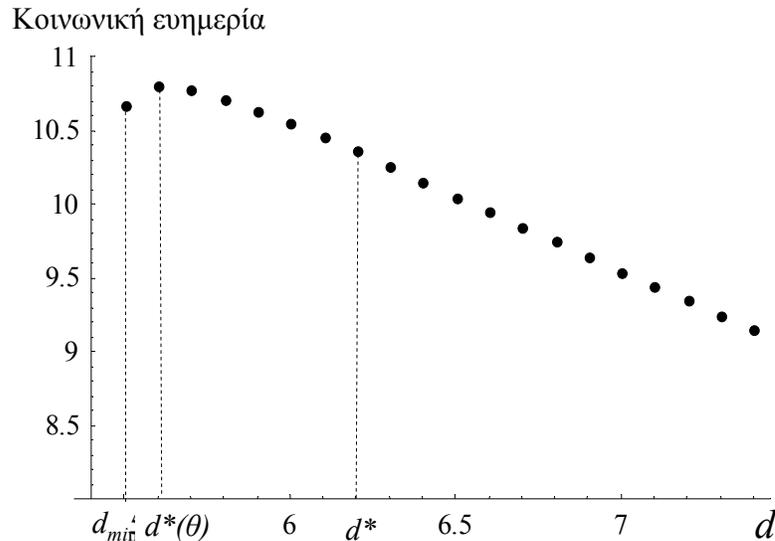
Παρατηρείστε ότι η βέλτιστη τιμή του d όταν $Q_0 = 0$ είναι πολύ κοντά στην ελάχιστη δυνατή σύμφωνα με τη συνθήκη σταθερότητας (σχέση (5.5)). Ο λόγος είναι ότι στο βέλτιστο σημείο $\bar{\theta} = 0.9144$ (κοντά στη μονάδα) και $x_i = \min\{\theta_i, \bar{\theta}\}$ ενώ η ελάχιστη επιφικτή τιμή για

το d , d_{min} , δίνεται από την

$$d_{min} = \frac{N}{(1/n) \sum_{i=1}^n r(\theta_i) f n}. \quad (5.20)$$

Έτσι καθώς $\frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n r(\theta_i)] \approx \frac{3N}{nf}$ για μεγάλο n , το d_{min} είναι κοντά στο d^* (θυμηθείτε ότι $d^* = \frac{3.06N}{nf}$).

Άρα, χρησιμοποιώντας το d^* ως βέλτιστη επιλογή για το d , αν για κάποια συγκεκριμένα θ_i ισχύει ότι $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i) < 1/3.06$ (A), τότε η συνθήκη σταθερότητας δεν θα ισχύει επειδή στην περίπτωση αυτή $d_{min}(\theta) > d^*$. Εφόσον όμως η μέση τιμή του $r(\theta_i)$ ισούται με $1/3$, η πιθανότητα να συμβεί το (A) τείνει στο μηδέν πολύ γρήγορα ως συνάρτηση του n . Επίσης, αν $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i) > 1/3.06$, υπάρχει μία τιμή $d^*(\theta)$ για την οποία η κοινωνική ευημερία θα ήταν μεγαλύτερη από αυτή που θα επιτυγχάναμε με $d = d^*$. Σημειώστε όμως ότι και η $d_{min}(\theta)$ και η $d^*(\theta)$ είναι ποσότητες οι οποίες χρειάζονται πλήρη πληροφόρηση για να υπολογιστούν. Αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιούμε την τιμή $d^* = \frac{3.06N}{nf}$, η οποία είναι μία προσέγγιση του $d^*(\theta)$ για μεγάλα n που χρησιμοποιεί την πληροφορία της κατανομής των θ_i .



Σχήμα 5.2: Η κοινωνική ευημερία ως συνάρτηση του d ($n = 100$, $\beta = 0.5$, $\alpha = 0.3$, $N = 10^4$, $f = 50$)

Στο Σχήμα 5.2 δείχνουμε την εξάρτηση της τιμής της κοινωνικής ευημερίας από την επιλογή της παραμέτρου d . Έχουμε υπολογίσει την τιμή της κοινωνικής ευημερίας στο σημείο ισορροπίας για διαφορετικές τιμές του d , μεγαλύτερες του d_{min} , για ένα συγκεκριμένο θ για το οποίο $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r(\theta_i) > 1/3.06$. Παρατηρείστε ότι το $d^*(\theta)$ είναι πάλι κοντά στο d_{min} . Επι-

πλέον, όπως εξηγήσαμε παραπάνω, στην περίπτωση αυτή όπου το n είναι μικρό, το d^* δεν είναι η βέλτιστη επιλογή για το d .

5.4.5 Αξιολόγηση

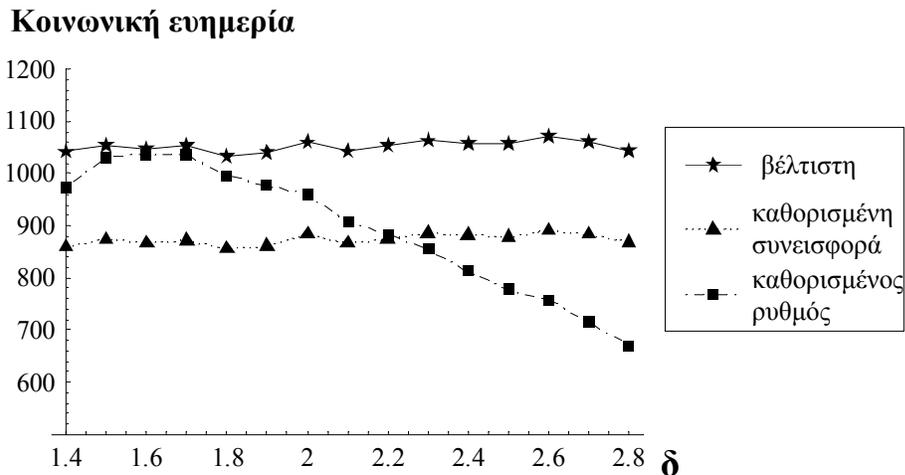
Έχοντας χαρακτηρίσει τη βέλτιστη αποδοτικότητα και αυτή που επιτυγχάνεται από τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς ένα λογικό ερώτημα είναι το πώς συγκρίνονται με την αποδοτικότητα του μηχανισμού προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης με αυτούς. Υπάρχουν όμως δύο διαφορές του παραπάνω μοντέλου με τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς (και τον βέλτιστο).

Πρώτον, το γεγονός ότι ο τελευταίος δεν θεωρεί τη δυνατότητα των χρηστών να αποφασίζουν το ρυθμό αιτήσεων τους και, πιο σημαντικά, τον τύπο τους, ο οποίος είχε θεωρηθεί σταθερός. Ωστόσο, στον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς οι χρήστες δεν θα είχαν το κίνητρο να μειώσουν τον τύπο τους (ούτε το ρυθμό αιτήσεων τους) καθώς το χρονικό διάστημα που θα μείνουν συνδεδεμένοι (η συνεισφορά τους) είναι προκαθορισμένη και επιβάλλεται μέσω κάποιου εξωτερικού μηχανισμού επιβολής. Αν λοιπόν υποθέσουμε ότι η σχέση μεταξύ τύπου και ρυθμού αιτήσεων ισχύει και για τις δύο περιπτώσεις και ότι οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν τον τύπο τους και στην περίπτωση του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς επίσης, οι συμμετέχοντες χρήστες πάντα θα επέλεγαν $x_i = \theta_i$, καθώς επιλέγοντας ένα x_i τέτοιο ώστε $0 \leq x_i < \theta_i$, δεν θα μείωνε το κόστος τους αλλά μόνο τη χρησιμότητα τους. Προφανώς μία τέτοια δυνατότητα επιλογής δεν θα επηρέαζε επίσης την απόφαση των αποκλεισμένων χρηστών (να μη συμμετέχουν). Το ίδιο ισχύει για την περίπτωση της βέλτιστης παροχής πόρων.

Η δεύτερη διαφορά παίζει πιο σημαντικό ρόλο. Πιο συγκεκριμένα, στο μηχανισμό προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης έχουμε υποθέσει ότι οι χρήστες αναζητούν περιεχόμενο με ένα ρυθμό που εξαρτάται από τον πραγματικό τους τύπο. Όπως συζητάμε στη συνέχεια, η ύπαρξη της σχέσης αυτής και η μορφή της αντίστοιχης συνάρτησης $r(\cdot)$ έχουν σημαντική επίδραση στην αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται από τον μηχανισμό μας. Επιπλέον, στο νέο αυτό περιβάλλον δεν γνωρίζουμε ποιος είναι ο βέλτιστος μηχανισμός με ελλιπή πληροφόρηση (αυτό είναι ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα για μελλοντική έρευνα) και τώρα ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ως απλώς ένας εναλλακτικός μηχανισμός κινήτρων (και όχι αυτός που ασυμπτωτικά επιτυγχάνει την δεύτερη καλύτερη αποδοτικότητα). Μάλιστα, όπως προκύπτει, ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς δεν είναι πια, πάντα,

η καλύτερη επιλογή.

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η μέση αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται από τη βέλτιστη παροχή πόρων, τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς, και τον μηχανισμό προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης ως συνάρτηση μιας μεταβλητής δ η οποία εκφράζει τη μορφή της συνάρτησης $r(\cdot)$ (δηλ. $r(\theta) = \theta^\delta$).



Σχήμα 5.3: Αξιολόγηση του μηχανισμού προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης ($n = 10^4$, $\beta = 0.5$, $\alpha = 0.3$, $N = 10^6$, $f = 50$)

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, ο προτεινόμενος μηχανισμός επιτυγχάνει μεγαλύτερη αποδοτικότητα από τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς για $\delta < 2.3$. Μάλιστα, για ένα μικρό εύρος τιμών της δ (για $1.5 \leq \delta \leq 1.7$) η αποδοτικότητα του μηχανισμού προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης πλησιάζει πολύ κοντά στο βέλτιστο. Η αιτία είναι ότι λόγω της υπόθεσής μας ότι ο ρυθμός αιτήσεων των χρηστών εξαρτάται από τον τύπο τους, επιλέγοντας το d κατάλληλα τους αναγκάζει να αποκαλύψουν σημαντική πληροφορία για τον πραγματικό τους τύπο (επιλέγοντας τον ρυθμό αιτήσεων που υποθέσαμε για τον υπολογισμό του d), η οποία δεν θα ήταν διαθέσιμη διαφορετικά. Όπως έχουμε ήδη δείξει, για μεγάλο n , το d^* συγκλίνει στο βέλτιστο $d^*(\theta)$ και συνεπώς χρησιμοποιώντας $d = d^*$ είναι σαν να έχουμε πλήρη πληροφόρηση για τον τύπο των χρηστών. Επιπλέον, ο μηχανισμός μας επιτρέπει στον σχεδιαστή του συστήματος να επιβάλλει διαφορετική συνεισφορά στους χρήστες ανάλογα με τον τύπο τους και να αποφύγει τους αποκλεισμούς χωρίς να χάσει τη δυνατότητά του να αποσπάσει σημαντικές συνεισφορές από χρήστες με μεγάλη χρησιμότητα.

Ωστόσο, η απόδοση του μηχανισμού μας εξαρτάται σημαντικά από τη μορφή της συνάρτησης $r(\cdot)$, και όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3 υπάρχουν περιπτώσεις που είναι χειρότερη από

αυτή του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς. Συνεπώς, η μορφή της συνάρτησης $r(\cdot)$, η οποία θα πρέπει να τονίσουμε είναι εξωτερική παράμετρος του συστήματος που δεν μπορεί να ελέγξει ο σχεδιαστής, επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά των χρηστών και άρα και τη συνολική ποσότητα περιεχομένου και τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος.

Σε κάθε περίπτωση, πιστεύουμε ότι τα πρώτα αποτελέσματα μας είναι ενθαρρυντικά σε ό,τι αφορά τη θετική επίδραση του προτεινόμενου μηχανισμού στην οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος όπως αυτή ορίζεται από το μοντέλο μας. Περισσότερη μελέτη χρειάζεται ωστόσο για να δείξουμε αυστηρά ότι επιτυγχάνει τη ζητούμενη συμβατότητα κινήτρων στα πλαίσια της θεωρίας σχεδίασης μηχανισμών και για να αξιολογήσουμε την αποδοτικότητά του υπό διαφορετικές υποθέσεις για τα χαρακτηριστικά του ρυθμού αιτήσεων των χρηστών.

5.4.6 Η αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων

Στον προτεινόμενο μηχανισμό ορίσαμε ως συνεισφορά ενός χρήστη τον χρόνο που απαιτείται να μένει συνδεδεμένος προσφέροντας ένα προκαθορισμένο πλήθος αρχείων ανεξάρτητα από τις εισερχόμενες αιτήσεις για αναφορτώσεις. Θα ήταν ωστόσο ενδιαφέρον να αξιολογήσουμε πώς θα απέδιδε σε ό,τι αφορά το πλήθος των αναφορτώσεων που τελικά θα πραγματοποιούνται κατά μέσο όρο υπό τον συγκεκριμένο μηχανισμό.

Υπάρχει μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε προς αυτή την κατεύθυνση. Παρατηρήστε αρχικά ότι το μέσο πλήθος αναφορτώσεων που προσφέρει ένας χρήστης στη μονάδα του χρόνου που είναι συνδεδεμένος ισούται με $U = \sum_{j=1}^n r(x_j)(f/N)$ (ο συνολικός ρυθμός αιτήσεων επί την πιθανότητα ένα από τα f αρχεία του να ζητηθεί). Έτσι, το συνολικό αναμενόμενο πλήθος αναφορτώσεων που ένας χρήστης i θα προσφέρει θα ισούται με $r(x_i)(Q/N)dU$, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που μένει συνδεδεμένος λόγω επιτυχών αιτήσεων για περιεχόμενο επί το μέσο πλήθος αναφορτώσεων στη μονάδα του χρόνου. Στο σημείο ισορροπίας όμως, όταν $Q_0 = 0$, $dU = 1$ (λόγω της (5.6)). Άρα, στην περίπτωση αυτή οι χρήστες θα αναφορτώνουν όσα αρχεία καταφορτώνουν κατά μέσο όρο ($r(x_i)(Q/N)$), ανεξάρτητα από την τιμή του d . Ομοίως, όταν $Q_0 > 0$, λόγω της (5.17), έχουμε ότι στο σημείο ισορροπίας η αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων θα ισούται με $\frac{Q-Q_0}{Q}$.

Πιο ενδιαφέρον όμως έχει το γεγονός ότι, έχοντας υπολογίσει το μέσο πλήθος αναφορτώσεων που πραγματοποιούν οι χρήστες για κάθε καταφόρτωση στο σύστημα μας, μπορούμε τώρα να συγκρίνουμε τον προτεινόμενο μηχανισμό με το πολύ δημοφιλή μηχανισμό που επιβάλλει την εξίσωση καταφορτώσεων και αναφορτώσεων με χρήση εικονικού συναλλάγματος ή

άλλους τρόπους (θα αναφερόμαστε στον μηχανισμό αυτό ως ο “1-1 κανόνας” καθώς επιβάλλει μία ένα προς ένα (1-1) αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων για κάθε χρήστη). Για να έχει νόημα η σύγκριση θα πρέπει να υποθέσουμε ότι το πλήθος των αρχείων που διαμοιράζονται οι χρήστες σε ένα σύστημα που επιβάλλει τον 1-1 κανόνα είναι πάλι f αν και στην πραγματικότητα η απόφαση αυτή είναι μέρος της στρατηγικής των χρηστών σε ένα σύστημα που εφαρμόζει τον κανόνα αυτόν. Υποθέτουμε επιπλέον ότι το κόστος των χρηστών είναι επίσης ο χρόνος που απαιτείται να μένουν συνδεδεμένοι διαμοιράζοντας τα αρχεία τους. Παρατηρήστε ότι ο χρόνος αυτός τώρα εξαρτάται άμεσα από την συμπεριφορά των υπόλοιπων χρηστών καθώς ένας χρήστης θα πρέπει να μείνει συνδεδεμένος όσο χρειάζεται για να αποκτήσει τη δυνατότητα (π.χ. τον απαιτούμενο αριθμό κουπονιών) ώστε να ικανοποιήσει τη ζήτησή του. Αυτή είναι και η πιο θεμελιώδης διαφορά των δύο μηχανισμών: στον δικό μας μηχανισμό χωρίς μνήμη επιβάλλουμε ένα ορισμένο σταθερό κόστος συνεισφοράς για κάθε καταφόρτωση με σκοπό να μεγιστοποιήσουμε την κοινωνική ευημερία ενώ στο μηχανισμό που δημιουργεί μία αγορά για αναφορτώσεις ο κανόνας του συστήματος είναι ανεξάρτητος από παραμέτρους όπως η κατανομή του τύπου των χρηστών ή το μέγεθος του συστήματος.

Επιστρέφοντας στο συμβολισμό του μοντέλου μας, υπάρχει πάλι ένα ορισμένο χρονικό διάστημα d , το συμβολίζουμε d_{1-1} , για το οποίο ένας χρήστης θα πρέπει να μείνει συνδεδεμένος διαμοιράζοντας τα αρχεία του για κάθε καταφόρτωση, το οποίο τώρα εξαρτάται από το πραγματικό συνολικό ρυθμό αιτήσεων στο σύστημα. Δηλαδή, $d_{1-1} = \frac{N}{\sum_{i=1}^n r(x_i) f}$. Για να δείτε γιατί, παρατηρήστε ότι d_{1-1} είναι ο χρόνος που απαιτείται από έναν χρήστη να μείνει συνδεδεμένος ώστε να αναφορτώσει ένα αρχείο. Και αυτός είναι ακριβώς ο χρόνος που θα πρέπει να συνεισφέρει ο κάθε χρήστης για κάθε καταφόρτωση του. (Έχουμε επίσης υποθέσει για απλότητα ότι χωρίς κανένα περιορισμό του ρυθμού αναφόρτωσης ο μέσος χρόνος καταφόρτωσης είναι μηδέν).

Δεν είναι εύκολο να υπολογίσουμε αναλυτικά το αντίστοιχο σημείο ισορροπίας. Ωστόσο, περιμένουμε ότι η αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται από τον 1-1 κανόνα θα είναι εν γένει μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται από τον μηχανισμό μας. Ο λόγος είναι ότι στην περίπτωση μας υπολογίζουμε τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου d για να μεγιστοποιήσουμε την αποδοτικότητα, ενώ στην περίπτωση του 1-1 κανόνα δεν υπάρχει λόγος στο σημείο ισορροπίας η τιμή του d_{1-1} να είναι η βέλτιστη. Από τα αριθμητικά πειράματα που πραγματοποιήσαμε φαίνεται ότι όταν φτάνει το σύστημα σε σημείο ισορροπίας, η αντίστοιχη αποδοτικότητα είναι κατά μέσο όρο 40% μικρότερη από αυτή του μηχανισμού προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης. Επιπλέον, όπως επίσης προκύπτει από τα αριθμητικά μας πειράματα, η ύπαρξη σημείου

ισορροπίας δεν είναι εγγυημένη με τον 1-1 κανόνα αλλά εξαρτάται εν γένει από τις αρχικές συνθήκες του πειράματος (δηλ. την ποσότητα περιεχομένου που χρησιμοποιείται για αρχικοποίηση).

Μία επιπλέον αδυναμία του 1-1 κανόνα στα πλαίσια του μοντέλου μας είναι ότι δεν εκμεταλλεύεται το πλήθος αρχείων Q_0 που πιθανώς να συνεισφέρουν οι χρήστες αυξημένων υποχρεώσεων όπως κάνει ο μηχανισμός μας: όσο πιο μεγάλο είναι το Q_0 τόσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την (5.17), η αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων για κάθε χρήστη κατά μέσο όρο θα είναι $\frac{Q-Q_0}{Q}$ στο σημείο ισορροπίας. Ίσως πιο σημαντικά όμως, ο 1-1 κανόνας πάντα θα αποτυγχάνει να καταλήξει σε σημείο ισορροπίας όταν $Q_0 > 0$ στα πλαίσια του μοντέλου μας. Και ο λόγος είναι ακριβώς το γεγονός ότι δεν επιτρέπει διαφορετική αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων όπως απαιτεί η συνθήκη σταθερότητας (5.17), για $Q_0 > 0$. Άρα, στην περίπτωση του 1-1 κανόνα, η αναλογία αναφορτώσεων/καταφορτώσεων θα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με την τιμή του Q_0 το οποίο δεν είναι γενικά πρακτικό.

Τέλος, υπάρχει ένα επιπλέον ποιοτικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τις δύο προσεγγίσεις. Ο 1-1 κανόνας απαιτεί μία εκ των προτέρων συνεισφορά από τους χρήστες ενώ στον μηχανισμό μας η συνεισφορά παρέχεται εκ των υστέρων καθώς όλοι είναι ελεύθεροι να καταναλώσουν χωρίς περιορισμούς και η συνεισφορά προκύπτει ως συνέπεια της κατανάλωσης. Επιπλέον, στον μηχανισμό μας η συνεισφορά είναι σταθερή (και προκαθορισμένη) και έτσι δημιουργεί λιγότερη αβεβαιότητα για το απαιτούμενο κόστος και είναι πιο απλό για τους χρήστες να πάρουν τις αποφάσεις τους συγκριτικά με τον 1-1 κανόνα. Πιστεύουμε λοιπόν ότι ο μηχανισμός προκαθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης είναι πιο φιλικός λόγω της απλότητας και την ελαστικότητάς του, και δεν θα έβλαπτε σημαντικά το συλλογικό πνεύμα που είναι εγγενές χαρακτηριστικό πολλών διομοτίμων εφαρμογών, και το οποίο μάλιστα φαίνεται ότι παίζει πολύ σημαντικό (συχνά αποφασιστικό) ρόλο για την επιτυχία τους.

5.5 Αποτελεσματικότητα των μηχανισμών συνεισφοράς κατά την κατανάλωση

Ο προτεινόμενος μηχανισμός χωρίς μνήμη ανήκει σε μία γενικότερη κατηγορία μηχανισμών επιβολής τους οποίους θα μπορούσαμε να ονομάσουμε μηχανισμούς “συνεισφοράς κατά την κατανάλωση”. Οι μηχανισμοί αυτοί εκτός από το ό,τι δεν απαιτούν την υλοποίηση της απαιτούμενης λειτουργικότητας για την καταγραφή και διαχείριση του ιστορικού των χρηστών

αποφεύγουν επιπλέον την ανάγκη συγχρονισμού σε επίπεδο παροχής υπηρεσιών που απαιτούν άλλοι μηχανισμοί χωρίς μνήμη, όπως η άμεση ανταλλαγή πόρων. Ωστόσο, η πιο σημαντική δυσκολία για την εφαρμογή ενός μηχανισμού επιβολής του είδους αυτού είναι το κατά πόσο μπορεί ένας χρήστης που παρέχει υπηρεσίες σε κάποιον άλλον να ελέγξει αν ο τελευταίος συνεισφέρει πράγματι τους δικούς του πόρους.

Για παράδειγμα, η πιο σημαντική αδυναμία εφαρμογών του προτεινόμενου μηχανισμού είναι πιθανές επιθέσεις σχετικές με την παροχή μη έγκυρου περιεχομένου ειδικά όταν το κόστος παροχής ενός αρχείου δεν είναι αμελητέο και η πιθανότητα για αίτηση είναι χαμηλή. Τότε κάποιοι χρήστες ίσως να μπορούσαν να ξεφεύγουν από την απαιτούμενη συνεισφορά διαφημίζοντας μη έγκυρο περιεχόμενο για όσο χρειάζεται να ολοκληρώσουν τις καταφορτώσεις τους. Ωστόσο, σε διαφορετικά σενάρια, όπου το κόστος εισαγωγής ή δημιουργίας και παροχής περιεχομένου είναι μικρότερο αυτή η επίθεση θα ήταν λιγότερο ελκυστική. Πιστεύουμε ότι στο μέλλον πολλές ομάδες χρηστών θα έχουν έτσι κι αλλιώς αρκετό περιεχόμενο στους προσωπικούς υπολογιστές τους, ίσως νόμιμα διαθέσιμο. Τότε το κόστος για να παρέχει κανείς το περιεχόμενο αυτό θα είναι μικρό (τουλάχιστον όχι μεγαλύτερο από το κόστος να δημιουργήσει ένα ρεαλιστικό ψεύτικο αρχείο περιεχομένου) και τα κέρδη της απάτης δεν θα υπερτερούν του κόστους από την πιθανότητα διακοπής μιας καταφόρτωσης.

Επιπρόσθετα κίνητρα θα μπορούσαν επίσης να δοθούν για την υποστήριξη του βασικού μας μηχανισμού, όπως για παράδειγμα η κατασκευή κοινωνικών δικτύων με βάση τις προτιμήσεις των χρηστών όπου οι συμμετέχοντες θα έχουν το κίνητρο να διαθέτουν το περιεχόμενο που αντιπροσωπεύει καλύτερα την προσωπικότητά τους. Πιστεύουμε ότι η αυστηρή μοντελοποίηση των κοινωνικών κινήτρων στο πλαίσιο των διομότιμων εφαρμογών είναι μία ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για μελλοντική εργασία.

Τέλος, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι εκτός από την άμεση ανταλλαγή πόρων και τον λιγότερο αυστηρό (σε ό,τι αφορά την πραγματική παροχή υπηρεσιών) προτεινόμενο μηχανισμό, θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί μηχανισμούς συνεισφοράς κατά την κατανάλωση που βρίσκονται ανάμεσα στα δύο αυτά άκρα. Περιγράφουμε εν συντομία έναν τέτοιο μηχανισμό που θα μπορούσε υπό ορισμένες προϋποθέσεις να δίνει τα κατάλληλα κίνητρα στους κόμβους ενός αυθόρμητου δικτύου να προωθούν πακέτα που ανήκουν σε άλλους κόμβους του δικτύου για να καταδείξουμε την εφαρμοσιμότητα αυτής της κατηγορίας μηχανισμών κινήτρων σε διαφορετικές διομότιμες εφαρμογές.

5.5.1 Η περίπτωση της προώθησης πακέτων σε αυθόρμητα δίκτυα

Στα αυθόρμητα δίκτυα (ad-hoc networks), οι ομότιμοι κόμβοι χρειάζεται να προωθούν πακέτα αδιάφορα για τους ίδιους και χωρίς κάποιο άμεσο όφελος. Αντί να χρησιμοποιήσει κανείς μηχανισμούς κινήτρων που βασίζονται στην καταγραφή και διαχείριση πληροφορίας χρήσης για την υλοποίηση εικονικών αγορών ή ανταποδοτικών μηχανισμών, θα θέλαμε να εξετάσουμε την πιθανότητα να αναγκάζουμε τους κόμβους ενόσω καταναλώνουν πόρους ενός ομότιμου κόμβου (προωθούν ένα πακέτο τους μέσω αυτού) να παρέχουν τις υπηρεσίες τους σε οποιονδήποτε άλλο κόμβο στο σύστημα. Όπως περιγράφουμε στη συνέχεια, στην περίπτωση αυτή, αντίθετα με τον μηχανισμό μας για την διαθεσιμότητα περιεχομένου, η συνεισφορά αυτή θα μπορούσε να οριστεί έτσι ώστε να είναι μια πραγματική παροχή υπηρεσιών προς κάποιους άλλους κόμβους του δικτύου. Και πάλι, η μεγάλη πρόκληση για την επιβολή του μηχανισμού αυτού είναι η εξασφάλιση της εγκυρότητας της συνεισφοράς αυτής.

Ένας μηχανισμός χωρίς μνήμη στα πλαίσια αυτά θα πρέπει να εκμεταλλευτεί το γεγονός ότι οι συμμετέχοντες κόμβοι θα ενδιαφέρονται εν γένει να προωθήσουν και οι ίδιοι τα δικά τους πακέτα και έτσι θα μπορούσε να απαιτεί από τους χρήστες να προωθούν ένα συγκεκριμένο πλήθος επιπλέον πακέτων μαζί με το δικό τους ώστε να προωθηθεί το τελευταίο. Η επισύναψη επιπλέον πακέτων σε κάθε πακέτο που προωθείται εκτός από απόδειξη συνεισφοράς θα έχει θετική επίδραση στο συνολικό κόστος προώθησης πακέτων καθώς το πλήθος των διαφορετικών πακέτων έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας από ό,τι το μέγεθος ενός πακέτου [44][43].

Η απαίτηση όμως για έναν χρήστη να λάβει πρώτα ένα συγκεκριμένο πλήθος αιτήσεων για προώθηση πριν μπορέσει να στείλει το δικό του πακέτο θα μπορούσε εν γένει να είναι πολύ περιοριστική. Ωστόσο, όταν η αντίστοιχη εφαρμογή είναι ανεκτική σε καθυστερήσεις (delay-tolerant) και όλοι οι χρήστες έχουν συμμετρικές ανάγκες και συνεπώς όλοι θέλουν να στείλουν πακέτα προς κάποιο προορισμό (όπως για παράδειγμα στα πλαίσια της διομότιμης υλοποίησης μιας κοινωνικής εφαρμογής σε αυθόρμητα δίκτυα, όπως η serendipity [39]), όλοι οι κόμβοι θα έχουν πακέτα προς αποστολή και συνεπώς η πιθανότητα αιτήσεων για προώθηση θα είναι μεγάλη. Έτσι, για τέτοιου τύπου εφαρμογές, ένας τέτοιος μηχανισμός κινήτρων θα μπορούσε να έχει θετική επίδραση στην παροχή πόρων από τους συμμετέχοντες.

Τότε μία σημαντική απειλή που ίσως να πρέπει να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής του συστήματος είναι το γεγονός ότι ένας κόμβος μπορεί να δημιουργήσει ψεύτικα πακέτα για να εξαπατήσει τον προτεινόμενο μηχανισμό κινήτρων αποφεύγοντας το κόστος του να λάβει πακέ-

τα από το δίκτυο. Εν γένει, ωστόσο, οι χρήστες επιθυμούν να λαμβάνουν πακέτα σε περίπτωση που είναι οι ίδιοι ο προορισμός τους και έτσι το κόστος για την υλοποίηση της επίθεσης αυτής ίσως να μην δικαιολογεί τα αντίστοιχα οφέλη. Σε περιπτώσεις όμως που μια τέτοια επίθεση θα ήταν επωφελής ο σχεδιαστής του συστήματος θα έπρεπε να ανακαλύψει μηχανισμούς που θα επιτρέπουν στους χρήστες να εντοπίζουν τέτοιου είδους πλαστά πακέτα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, αυτή είναι η πιο σημαντική πρόκληση που θα πρέπει κανείς να αντιμετωπίσει κατά την υλοποίηση ενός μηχανισμού συνεισφοράς κατά την κατανάλωση. Πιστεύουμε όμως ότι οι ελκυστικές του ιδιότητες καθιστούν την αναζήτηση πρακτικών τρόπων για τον έλεγχο της συνεισφοράς προς το σύστημα ως σύνολο στη διάρκεια της κατανάλωσης για διαφορετικά είδη διομότιμων εφαρμογών μία ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για μελλοντική εργασία.

5.6 Περίληψη και μελλοντική εργασία

Στο κεφάλαιο αυτό προτείναμε έναν μηχανισμό κινήτρων χωρίς μνήμη ο οποίος αντιμετωπίζει μία σημαντική διάσταση της συνεισφοράς ενός χρήστη σε ένα διομότιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων όσον αφορά τη διαθεσιμότητα περιεχομένου: το χρονικό διάστημα που μένει συνδεδεμένος διαμοιράζοντας τα αρχεία του. Μελετήσαμε τα θέματα υλοποίησης για την επιβολή του και ορίσαμε ένα κατάλληλο οικονομικό μοντέλο που εκφράζει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος.

Αυτή είναι μία σημαντική συνεισφορά της διατριβής αυτής γιατί παρέχει μία πρακτική λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ανέξοδης συμμετοχής στο διομότιμα συστήματα διαμοιρασμού αρχείων. Επιπλέον, το αντίστοιχο θεωρητικό πλαίσιο μας δίνει τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε την αποδοτικότητα του μηχανισμού μας και να τη συγκρίνουμε με τη βέλτιστη και αυτή που επιτυγχάνεται από τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς, αλλά επίσης και με αυτή άλλων εναλλακτικών πρακτικών μηχανισμών κινήτρων όπως ο δημοφιλής κανόνας που εξισώνει τις αναφορτώσεις με τις καταφορτώσεις του κάθε χρήστη. Πιστεύουμε ότι οι μηχανισμοί συνεισφοράς κατά την κατανάλωση θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή και σε διαφορετικά πλαίσια και ελπίζουμε ότι η ανάλυση μας στο κεφάλαιο αυτό παρέχει τα μέσα για να κατανοήσουμε τα σχετικά αντισταθμιστικά οφέλη και έτσι αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την παροχή κινήτρων σε ρεαλιστικές διομότιμες εφαρμογές.

Η τρέχουσα εργασία μας περιλαμβάνει τη διατύπωση εναλλακτικών, πιο λεπτομερών, οικονομικών μοντέλων για να επαληθεύσουμε τα βασικά αποτελέσματα του αρχικού μας μοντέλου. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε μοντέλα στα οποία ο ρυθμός αιτήσεων των

χρηστών είναι εν γένει ανεξάρτητος από τον τύπο τους και/ή η χρησιμότητά τους είναι μία συνάρτηση του πραγματικού ρυθμού καταφορτώσεων (τότε οι χρήστες θα ελέγχουν τον ρυθμό αιτήσεων τους με σκοπό να επιτύχουν τον επιθυμητό ρυθμό καταφορτώσεων).

Επιπλέον, επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις συναλλαγές που λαμβάνουν χώρα σε ό,τι αφορά τις διαδοχικές καταφορτώσεις που συνδέουν τους χρήστες μεταξύ τους, τις αλληλοεξαρτήσεις που προκύπτουν, και πώς ο μέσος χρόνος καταφόρτωσης και κατ' επέκταση η διαθεσιμότητα περιεχομένου επηρεάζεται από τη ρύθμιση του ρυθμού αναφόρτωσης που χρησιμοποιείται από όλους τους χρήστες.

Τέλος, ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα για μελλοντική έρευνα είναι η περιγραφή ενός πραγματικού συστήματος που να υλοποιεί τον προτεινόμενο μηχανισμό επιβολής και να παρέχει στους χρήστες τα μέσα για να θέτουν και να ρυθμίζουν τις κρίσιμες παραμέτρους του με βάση δυναμικές μετρήσεις των βασικών χαρακτηριστικών του συστήματος όπως το μέγεθος του, την διαθεσιμότητα περιεχομένου και τη γενικότερη δραστηριότητα (π.χ. το μέσο ρυθμό αιτήσεων, τη διαθεσιμότητα των χρηστών, το ποσοστό των καταφορτώσεων που διακόπτονται, κλπ.).

Κεφάλαιο 6

Πιο γενικές συναρτήσεις κόστους

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνουμε ένα εναλλακτικό οικονομικό μοντέλο, το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος που οφείλεται στις αιτήσεις για περιεχόμενο (κυρίως το κόστος αναφόρτωσης), και εξερευνούμε τη χρήση απλών κανόνων οι οποίοι επιβάλλουν μία ορισμένη σχέση μεταξύ κατανάλωσης και συνεισφοράς (γενικεύοντας τον 1-1 κανόνα που μελετάται συχνά στη βιβλιογραφία των οικονομικών των διομότιμων συστημάτων) με σκοπό τη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας του συστήματος.

Τμήματα του κεφαλαίου αυτού είναι εργασία από κοινού με τον Robin Mason (δείτε επίσης το [7]).

6.1 Αρνητικές εξωτερικότητες

Εφόσον στη διατριβή αυτή εστιάζουμε στη διαθεσιμότητα περιεχομένου έχουμε κάνει τη σημαντική υπόθεση ότι η αναφόρτωση περιεχομένου δεν επιφέρει σημαντικό κόστος στους χρήστες. Στη συνέχεια συζητάμε πώς το βασικό μας μοντέλο θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη του τέτοιου είδους κόστη (εξαιτίας της αναφόρτωσης καθαυτής ή της συμφόρησης).

6.1.1 Κόστος αναφόρτωσης

Η πρώτη πιθανή επέκταση του μοντέλου μας είναι να υποθέσουμε ότι το κόστος διαμοιρασμού αρχείων εξαρτάται επίσης από τον αντίστοιχο ρυθμό αιτήσεων εξαιτίας του κόστους αναφόρτωσης: το κόστος ενός χρήστη είναι ανάλογο του ρυθμού με τον οποίο εξυπηρετεί αιτήσεις για αναφόρτωση αρχείων (για παράδειγμα επειδή πληρώνει το εύρος ζώνης πρόσβασης

με βάση τη χρήση ή επειδή στερείται ο ίδιος το εύρος ζώνης που καταναλώνεται για κάθε αναφόρτωση).

Υποθέτοντας ότι όλοι οι χρήστες ζητάνε περιεχόμενο με τον ίδιο ρυθμό και ότι όλα τα αρχεία είναι το ίδιο δημοφιλή το συνολικό κόστος που θα δημιουργούνταν στο σύστημα θα ήταν ανάλογο του γινομένου του πλήθους των χρηστών (που δημιουργούν τις αιτήσεις) και του πλήθους των διαφορετικών αρχείων, δηλαδή, $c(Q) = (\sum_i \pi_i)Q$. Για την απλή αυτή περίπτωση τα αποτελέσματα του [30] ως προς τις ιδιότητες του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς συνεχίζουν να ισχύουν.

Μία εναλλακτική προσέγγιση θα ήταν να υποθέσουμε ότι ο ρυθμός αιτήσεων συνδέεται με κάποιο τρόπο με τον τύπο ενός χρήστη, τη μεταβλητή θ_i : για παράδειγμα μέσω μιας συνάρτησης $r(\theta_i)$, ίδια για όλους του χρήστες. Την προσέγγιση αυτή ακολουθήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο (υποθέτοντας ότι η $r(\cdot)$ είναι μία κυρτή συνάρτηση) για να μελετήσουμε το αποτέλεσμα που θα είχε ο προτεινόμενος μηχανισμός κινήτρων στο ρυθμό αιτήσεων των χρηστών. Αυτό που κερδίζουμε είναι ότι οι χρήστες συνεχίζουν να χαρακτηρίζονται από μία μοναδική μεταβλητή, τον τύπο τους θ_i . Και το γεγονός αυτό καθιστά ίσως εφικτό να επεκτείνουμε το μοντέλο μας αγαθών κοινής ωφέλειας ώστε να λαμβάνει υπόψη του το κόστος αναφόρτωσης καθώς και πάλι το κόστος αυτό εξαρτάται μόνο από το πλήθος των συμμετεχόντων (αφού ο ρυθμός αιτήσεων θα είναι μία αύξουσα συνάρτηση ως προς τον τύπο των χρηστών).

Τι θα συνέβαινε όμως αν ο ρυθμός αιτήσεων ήταν μία ανεξάρτητη μεταβλητή της συμπεριφοράς των χρηστών και έτσι επιπρόσθετα του τύπου του θ_i , ο χρήστης i χαρακτηριζόταν και από το μέσο ρυθμό αιτήσεων του r_i ; Τότε το συνολικό κόστος παροχής πόρων δεν θα εξαρτιόταν μόνο από το πλήθος των συμμετεχόντων στο σύστημα αλλά και από το ποιοί ακριβώς είναι αυτοί. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4 δεν θα ίσχυαν για την περίπτωση αυτή. Τώρα θα πρέπει να καθορίσουμε και τη συνεισφορά των χρηστών ως προς το πλήθος των διαμοιραζομένων αρχείων στη μονάδα του χρόνου αλλά και το ρυθμό αιτήσεων τους καθώς αυτός έχει αρνητικές επιπτώσεις στη χρησιμότητα όλων των υπολοίπων χρηστών. Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό προτείνουμε ένα πιο λεπτομερές οικονομικό μοντέλο το οποίο αντιμετωπίζει το ρυθμό αιτήσεων ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Αναζητούμε και πάλι απλούς κανόνες οι οποίοι να περιορίζουν τη συμπεριφορά των χρηστών συσχετίζοντας τον επιτρεπόμενο ρυθμό αιτήσεων τους με το πλήθος των διαμοιραζομένων αρχείων και δείχνουμε ότι ένας γραμμικός τέτοιος κανόνας είναι αρκετός για να μεγιστοποιήσει την κοινωνική ευημερία. Ωστόσο, δείχνουμε επίσης ότι ένας τέτοιος κανόνας θα έπρεπε να είναι προσωποποιημένος (διαφορετικός για κάθε χρήστη) ενώ δεν ισχύει το ίδιο για την περίπτωση της τιμολόγησης. Επίπλέον, ο

βέλτιστος ομοιόμορφος κανόνας στο πλαίσιο αυτό δεν είναι γνωστός και μόνο ευρετικοί (ή ευριστικοί) κανόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός ομοιόμορφου κανόνα.

Μία ακόμα πιο λεπτομερής μοντελοποίηση θα μπορούσε να υποθέσει ότι δεν προσφέρουν όλοι οι χρήστες ίδιας αξίας υπηρεσίες στη διομότιμη κοινότητα. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στη συγγένεια προτιμήσεων ή το αντίθετο. Στο [17] η κατάσταση αυτή μοντελοποιείται υποθέτοντας ότι ένας χρήστης i λαμβάνει διαφορετική αξία από διαφορετικούς χρήστες j , η οποία συμβολίζεται ως b_{ij} . Στην Ενότητα 6.4.6 παρουσιάζουμε ένα παρόμοιο μοντέλο, το οποίο είχε σχεδιαστεί αρχικά για την εφαρμογή διαμοιρασμού ασύρματης πρόσβασης (WLAN peering) [9], το οποίο υποθέτει ότι κάθε χρήστης i πραγματοποιεί διαφορετικό ρυθμό αιτήσεων προς διαφορετικούς χρήστες j , r_{ij} , και επιπλέον κάθε χρήστης προσφέρει διαφορετικό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας Q_i . Υπολογίζουμε επίσης για την περίπτωση αυτή τους βέλτιστους κανόνες του συστήματος οι οποίοι πάλι, όπως αναμενόταν, θα πρέπει να είναι προσωποποιημένοι.

6.1.2 Συμφόρηση

Το κόστος συμφόρησης ως συνάρτηση του ρυθμού αιτήσεων ενός χρήστη αφορά τους υπόλοιπους χρήστες που επιθυμούν αρχεία από τον ίδιο κόμβο επειδή η χωρητικότητα αναφόρτωσης είναι περιορισμένη. Στην περίπτωση αυτή ο συνολικός ρυθμός αιτήσεων δεν αυξάνει το κόστος των χρηστών λόγω του διαμοιρασμού αρχείων (όπως στην περίπτωση του κόστους αναφόρτωσης) αλλά μειώνει τη χρησιμότητά τους εξαιτίας της χειρότερης ποιότητας υπηρεσίας λόγω συμφόρησης (π.χ. χαμηλός ρυθμός μετάδοσης, πιθανότητα άρνησης παροχής υπηρεσίας, κλπ.)

Έτσι, επεκτείνοντας το μοντέλο του Κεφαλαίου 4 ώστε να λαμβάνει υπόψη τη μείωση της ποιότητας υπηρεσίας εξαιτίας της συμφόρησης, το καθαρό όφελος του χρήστη i θα γινόταν

$$b_i = \theta_i u(Q, \sum_j r_j) - c(f_i), \quad (6.1)$$

όπου η $u(\cdot)$ είναι αύξουσα και κοίλη ως προς Q και φθίνουσα ως προς $\sum_j r_j$. Η πρόσθεση όμως μίας επιπλέον παραμέτρου για τον χαρακτηρισμό των χρηστών καθιστά πολύ δύσκολη την επίλυση του προβλήματος. Θα μπορούσαμε να προσπαθήσουμε να το λύσουμε κάνοντας την υπόθεση του προηγούμενου κεφαλαίου ότι υπάρχει μία συνάρτηση $r(\cdot)$ τέτοια ώστε ο ρυθμός αιτήσεων του κάθε χρήστη ισούται με $r_i = r(\theta_i)$. Αυτό αφήνεται για μελλοντική έρευνα.

6.2 Ένα εναλλακτικό μοντέλο για παροχή πόρων σε διομοτίμα συστήματα

Διατυπώνουμε παρακάτω ένα εναλλακτικό οικονομικό μοντέλο που συμπεριλαμβάνει το κόστος αναφόρτωσης και θεωρεί το ρυθμό αιτήσεων ανεξάρτητο από τον τύπο των χρηστών. Έτσι, κάθε χρήστης i αποφασίζει για το ρυθμό αιτήσεων του r_i και για το πλήθος αρχείων f_i που θα διαμοιράζεται στη μονάδα του χρόνου. Το καθαρό όφελος του όταν συμμετέχουν n χρήστες και $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_n)$ και $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)$ είναι οι ρυθμοί αιτήσεων και τα διαμοιραζόμενα αρχεία τους είναι

$$b_i(\mathbf{r}, \mathbf{f}) = u_i \left(r_i, \sum_{j=1}^n f_j \right) - c_i \left(\sum_{j=1}^n r_j, f_i \right). \quad (6.2)$$

Εδώ θεωρούμε ότι η συνάρτηση χρησιμότητας $u_i(\cdot, \cdot) \geq 0$ είναι συνεχώς παραγωγίσιμη, αύξουσα και αυστηρά κοίλη ως προς και τις δύο μεταβλητές της και η συνάρτηση κόστους $c_i(\cdot, \cdot) \geq 0$ είναι συνεχώς παραγωγίσιμη, αύξουσα και αυστηρά κυρτή ως προς και τις δύο μεταβλητές της, για κάθε i . Επιπλέον, θεωρούμε ότι οι συναρτήσεις έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες ώστε τα προβλήματα μεγιστοποίησης που μελετούνται στο κεφάλαιο αυτό (όσον αφορά το σημείο ισορροπίας και την κοινωνική ευημερία) να έχουν μοναδικές λύσεις.

Ο διαμοιρασμός αρχείων είναι και πάλι ένα αγαθό κοινής ωφέλειας. Η αίτηση για περιεχόμενο όμως προκαλεί κοινή ζημία: ο ρυθμός αιτήσεων του χρήστη i αυξάνει ισόποσα το φόρτο σε όλους τους υπόλοιπους χρήστες. Το κλασικό πρόβλημα με τα αγαθά κοινής ωφέλειας είναι ότι το σημείο ισορροπίας (Nash), όπου οι χρήστες καθορίζουν τα επίπεδα συνεισφοράς τους έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν την προσωπική τους χρησιμότητα είναι, τυπικά, μη αποδοτικό συγκριτικά με το κοινωνικά βέλτιστο, στο οποίο οι συνεισφορές τίθενται έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το άθροισμα της χρησιμότητας όλων των χρηστών, εξαιτίας του προβλήματος της δωρεάν συμμετοχής. Το ίδιο όμως ισχύει και για τις αρνητικές εξωτερικότητες που οφείλονται στις αιτήσεις για περιεχόμενο στο πιο λεπτομερές μοντέλο μας. Δηλαδή, ένας χρήστης που προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το καθαρό του όφελος δεν θα περιοριζε το ρυθμό αιτήσεων του για να μειώσει το κόστος που αυτές επιφέρουν στους υπόλοιπους χρήστες. Με άλλα λόγια, κάθε χρήστης i θα προτιμούσε ιδανικά να κορυφώσει το ρυθμό αιτήσεων του r_i και να μειώσει (στο μηδέν) τη συνεισφορά του σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα περιεχομένου f_i και έτσι, στο σημείο ισορροπίας οι ρυθμοί αιτήσεων θα ήταν πολύ υψηλοί και το πλήθος διαμοιραζομένων

αρχείων πολύ μικρό, σε σχέση με τα βέλτιστα επίπεδα.

Ας το εκφράσουμε αυτό αυστηρά. Ο χρήστης i επιθυμεί να μεγιστοποιήσει το καθαρό όφελος του: $\max_{\{r_i, f_i\}} b_i(\mathbf{r}, \mathbf{f})$, έχοντας ως δεδομένο τους ρυθμούς αιτήσεων και τα διαμοιραζόμενα αρχεία όλων των υπόλοιπων χρηστών. Ένα σημείο ισορροπίας Nash αποτελείται από διανύσματα ρυθμών αιτήσεων και διαμοιραζομένων αρχείων τέτοια ώστε όλοι οι χρήστες να μεγιστοποιούν ταυτόχρονα το καθαρό τους όφελος. Οι συνθήκες πρώτης παραγώγου για το πρόβλημα μεγιστοποίησης του χρήστη i είναι

$$\frac{\partial u_i(r_i, \sum_{j=1}^n f_j)}{\partial r_i} - \frac{\partial c_i(\sum_{j=1}^n r_j, f_i)}{\partial r_i} \leq 0 \quad r_i \geq 0, \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial u_i(r_i, \sum_{j=1}^n f_j)}{\partial f_i} - \frac{\partial c_i(\sum_{j=1}^n r_j, f_i)}{\partial f_i} \leq 0 \quad f_i \geq 0. \quad (6.4)$$

Συμβολίζουμε τις επιλογές του χρήστη i στο σημείο ισορροπίας ως \hat{r}_i και \hat{f}_i .

Ο σχεδιαστής του συστήματος θα ήθελε να επιλέξει τους ρυθμούς \mathbf{r} και το πλήθος αρχείων \mathbf{f} ώστε να μεγιστοποιήσει το συνολικό καθαρό όφελος των χρηστών:

$$S \equiv \max_{\mathbf{r}, \mathbf{f}} \sum_{i=1}^n \left[u_i \left(r_i, \sum_j f_j \right) - c_i \left(\sum_j r_j, f_i \right) \right].$$

Οι βέλτιστοι ρυθμοί αιτήσεων και το βέλτιστο πλήθος διαμοιραζομένων αρχείων δίνονται από τις συνθήκες πρώτης παραγώγου

$$\frac{\partial u_i(r_i, \sum_j f_j)}{\partial r_i} - \sum_j \frac{\partial c_j(\sum_k r_k, f_j)}{\partial r_i} \leq 0 \quad r_i \geq 0, \quad (6.5)$$

$$\sum_j \frac{\partial u_j(r_j, \sum_k f_k)}{\partial f_i} - \frac{\partial c_i(\sum_j r_j, f_i)}{\partial f_i} \leq 0 \quad f_i \geq 0 \quad (6.6)$$

για $i = 1, \dots, n$. Συμβολίζουμε τις τιμές αυτές ως r_i^* και f_i^* .

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των σχέσεων (6.3)/(6.4) και (6.5)/(6.6) είναι η παρουσία εξωτερικότητας στις τελευταίες, οι οποίες μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με τα παρακάτω αθροίσματα

$$-\sum_{j \neq i} \frac{\partial c_j(\sum_k r_k, f_j)}{\partial r_i}, \quad \sum_{j \neq i} \frac{\partial u_j(r_j, \sum_k f_k)}{\partial f_i}.$$

Δηλαδή, όταν ο χρήστης i αυξάνει τον r_i επιφέρει ένα κόστος $\sum_{j \neq i} \frac{\partial c_j(\sum_k r_k, f_j)}{\partial r_i}$ σε όλους τους υπόλοιπους χρήστες (η εξωτερικότητα είναι αρνητική), ενώ αυξάνοντας το f_i όλοι οι υπόλοιποι χρήστες λαμβάνουν όφελος $\sum_{j \neq i} \frac{\partial u_j(r_j, \sum_k f_k)}{\partial f_i}$ και συνεπώς η εξωτερικότητα είναι θετική. Τότε, οι υποθέσεις που έχουμε κάνει για τις συναρτήσεις $u_i(\cdot, \cdot)$ και $c_i(\cdot, \cdot)$ οδηγούν φυσικά στην προηγούμενη μας παρατήρηση: χωρίς την ύπαρξη κάποιου συγκεκριμένου μηχανισμού κινήτρων, στα πλαίσια του μοντέλου μας, η κοινωνική ευημερία στο σημείο ισορροπίας θα είναι σχεδόν μηδέν καθώς το f θα τείνει στο μηδέν. Στην επόμενη ενότητα, αναλύουμε διαφορετικές εναλλακτικές προσεγγίσεις για να εξασφαλίσουμε ότι οι χρήστες θα λαμβάνουν υπόψη τους τις εξωτερικότητες αυτές όταν αποφασίζουν για τον ρυθμό αιτήσεων τους και το πλήθος των αρχείων που θα διαμοιράζονται στη μονάδα του χρόνου.

6.3 Τιμές Lindahl

6.3.1 Βέλτιστες τιμές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κλασική οικονομική προσέγγιση για το πρόβλημα των εξωτερικοτήτων είναι η τοποθέτηση τιμών (Lindahl) οι οποίους γεφυρώνουν το χάσμα ανάμεσα στα προσωπικά και τα κοινωνικά κίνητρα. Η σύγκριση των σχέσεων (6.3)–(6.6) δείχνει ότι οι κατάλληλες τιμές είναι οι εξής:

$$p_i^r = \sum_{j \neq i} \frac{\partial c_j(\sum_k r_k^*, f_j^*)}{\partial r_i}, \quad (6.7)$$

$$p_i^f = - \sum_{j \neq i} \frac{\partial u_j(r_j^*, \sum_k f_k^*)}{\partial f_i}, \quad (6.8)$$

έτσι ώστε ο χρήστης i να χρεώνεται p_i^r για τον ρυθμό αιτήσεων του και εισπράττει p_i^f για κάθε αρχείο που διαμοιράζεται. Οι τιμές αυτές είναι ακριβώς οι συνολικές εξωτερικότητες (αρνητικές και θετικές) που προκαλούνται από τον χρήστη i σε όλους τους υπόλοιπους χρήστες. Έτσι, τώρα ο κάθε χρήστης θα αποφασίζει για το ρυθμό αιτήσεων και τη συνεισφορά του σύμφωνα με την ακόλουθη βελτιστοποίηση

$$\text{maximize}_{r_i, f_i} \left[u_i \left(r_i, \sum_{j=1}^n f_j \right) - p_i^r r_i + p_i^f f_i - c_i \left(\sum_{j=1}^n r_j, f_i \right) \right]. \quad (6.9)$$

Παρατηρήστε ότι οι τιμές δεν είναι ομοιόμορφες: εν γένει, $p_i^r \neq p_j^r$ για $i \neq j$ (και ομοίως για τις p_i^f).

6.3.2 Προσεγγιστικά βέλτιστες ομοιόμορφες τιμές

Στην ενότητα αυτή, δείχνουμε ότι όταν το διομότιμο σύστημα είναι αρκετά μεγάλο, οι προσωποποιημένες βέλτιστες τιμές μπορούν να προσεγγιστούν από ομοιόμορφες τιμές. Κάνουμε πρώτα την ακόλουθη υπόθεση.

Υπόθεση 1 (Φραγμένη ετερογένεια) Υπάρχουν $\bar{b}, \underline{b}, \bar{c}$ και \underline{c} , όπου $0 < \underline{x} \leq \bar{x} < +\infty$, $x \in \{b, c\}$ τέτοια ώστε

$$\sup_{f \in \mathbb{R}_+, r \in \mathbb{R}_+} \frac{\partial u_i(r, f)}{\partial f} \in [\underline{b}, \bar{b}],$$

$$\sup_{f \in \mathbb{R}_+, r \in \mathbb{R}_+} \frac{\partial c_i(r, f)}{\partial r} \in [\underline{c}, \bar{c}]$$

για όλα τα i .

Ορισμός 2 Έστω

$$p^r \equiv \sum_{j=1}^n \frac{\partial c_j(\sum_k r_k^*, f_j^*)}{\partial r},$$

$$p^f = - \sum_{j=1}^n \frac{\partial u_j(r_j^*, \sum_k f_k^*)}{\partial f}.$$

Σημειώστε ότι οι τιμές p^r και p^f είναι ομοιόμορφες. Δηλαδή, δεν εξαρτώνται από την ταυτότητα των χρηστών.

Πρόταση 1 Για δεδομένες τιμές των $\bar{b}, \underline{b}, \bar{c}$ και \underline{c} , και για μία σταθερά $\epsilon > 0$, υπάρχει ένα κρίσιμο πλήθος χρηστών \bar{n} τέτοιο ώστε για πλήθος χρηστών $n > \bar{n}$,

$$\frac{|p_i^x - p^x|}{p^x} < \epsilon, \quad x \in \{r, f\}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Απόδειξη. Η απόδειξη θα γίνει για την p^r και τον χρήστη i : ένα πανομοιότυπο επιχείρημα ισχύει για τους υπόλοιπους χρήστες και την p^f . Σημειώστε ότι $|p_i^r - p^r| = \frac{\partial c_i(\sum_k r_k, f_i)}{\partial r_i}$.

Επομένως $|p_i^r - p^r| \leq \bar{c}$. Επιπλέον, $p^r \geq n\bar{c}$. Συνεπώς

$$\frac{|p_i^r - p^r|}{p^r} \leq \frac{\bar{c}}{n\bar{c}}.$$

Ορίζουμε $\bar{n} \equiv \bar{c}/\epsilon\bar{c}$. Από την υπόθεση 1, για n αρκετά μεγάλο, $n > \bar{n}$ και άρα $(|p_i^r - p^r|)/p^r < \epsilon$. □

Το αποτέλεσμα αυτό σημαίνει ότι αν είχαμε τη δυνατότητα να χρεώνουμε τους χρήστες για την κατανάλωση τους και να τους ανταμοίβουμε για τη συνεισφορά τους θα μπορούσαμε να μεγιστοποιήσουμε την κοινωνική ευημερία χωρίς την ανάγκη να εφαρμόσουμε διαφορετικές τιμές για διαφορετικούς χρήστες υπολογίζοντας καλές προσεγγίσεις των βέλτιστων ομοιόμορφων τιμών ακόμα και όταν δεν είναι διαθέσιμη η προσωπική πληροφορία των χρηστών (δείτε το παράδειγμα στην Ενότητα 6.4.4 παρακάτω). Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η ύπαρξη ενός διαχειριστή ο οποίος θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να καταγράφει όλες τις συναλλαγές των χρηστών και να είναι υπεύθυνος για την αξιόπιστη μεταφορά των αντίστοιχων χρηματικών ποσών τα οποία σημειωτέον θα μπορούσαν να τον οδηγήσουν σε έλλειμμα. Συνεπώς, ο διαχειριστής του συστήματος θα πρέπει να επιθυμεί να χρηματοδοτήσει την αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

6.4 Ανταποδοτικοί κανόνες

Στην περίπτωση ρεαλιστικών διομήτιμων συστημάτων είναι σημαντικό να αναπτύξουμε μηχανισμούς κινήτρων που να μη βασίζονται στην τιμολόγηση. Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε τη χρήση απλών κανόνων του συστήματος τους οποίους οφείλουν να τειρούν (και πιθανόν να επιβάλλουν) οι χρήστες.

6.4.1 Βέλτιστοι κανόνες

Ένας απλός κανένας θα πρέπει να έχει τη μορφή $r = \rho(f)$. Δηλαδή, ο ρυθμός με τον οποίο ένας συμμετέχοντας μπορεί να ζητάει αρχεία είναι μία συνάρτηση του πλήθους των αρχείων που διαμοιράζεται ο ίδιος. Η συνάρτηση $\rho: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ είναι, ιδανικά, ανεξάρτητη από την ταυτότητα των χρηστών και μπορεί γενικά να πάρει οποιαδήποτε μορφή. Ως πρώτο βήμα της ανάλυσης μας υποθέστε ότι η $\rho(\cdot)$ είναι μια συνεχώς παραγωγίσιμη συνάρτηση. Κάθε χρήστης συνεπώς επιλέγει το πλήθος των αρχείων που διαμοιράζεται (το οποίο στη συνέχεια θα καθορίσει το ρυθμό με τον οποίο θα μπορεί να ζητάει αρχεία) σύμφωνα με τη συνθήκη

πρώτης παραγώγου (για τον χρήστη i):

$$\left(\frac{\partial u_i(\rho(f_i), \sum_j f_j)}{\partial f_i} - \frac{\partial c_i(\sum_j \rho(f_j), f_i)}{\partial f_i} \right) + \left(\frac{\partial u_i(\rho(f_i), \sum_j f_j)}{\partial r_i} - \frac{\partial c_i(\sum_j \rho(f_j), f_i)}{\partial r_i} \right) \rho'(f_i) = 0 \quad (6.10)$$

για $i = 1, \dots, n$, όπου $\rho'(\cdot)$ συμβολίζει την πρώτη παράγωγο της $\rho(\cdot)$. Η διαφορική αυτή εξίσωση δεν είναι εν γένει επιλύσιμη. Μία διέξοδος είναι να μαντέψουμε μία λύση· για παράδειγμα, υποθέστε ότι η $\rho(\cdot)$ είναι γραμμική. Δηλαδή,

$$r_i \leq \alpha_i + \beta_i f_i$$

όπου α_i και β_i είναι σταθερές, οι οποίες προς το παρόν ας υποθέσουμε ότι θα μπορούσαν να είναι διαφορετικές για τον κάθε χρήστη i .

Υποθέστε επίσης για απλότητα ότι ο κανόνας είναι ακριβής για όλους του χρήστες έτσι ώστε για τον κάθε χρήστη i να ισχύει ότι $r_i = \alpha_i + \beta_i f_i$. Ο χρήστης i λοιπόν έχει να λύσει το ακόλουθο πρόβλημα μεγιστοποίησης

$$\max_{f_i} u_i \left(\alpha_i + \beta_i f_i, \sum_j f_j \right) - c_i \left(\alpha_i + \beta_i f_i + \sum_{j \neq i} r_j, f_i \right).$$

Η συνθήκη πρώτης παραγώγου για τη μεγιστοποίηση είναι

$$\left(\frac{\partial u_i(\alpha_i + \beta_i f_i, \sum_j f_j)}{\partial f_i} - \frac{\partial c_i(\alpha_i + \beta_i f_i + \sum_{j \neq i} r_j, f_i)}{\partial f_i} \right) + \beta_i \left(\frac{\partial u_i(\alpha_i + \beta_i f_i, \sum_j f_j)}{\partial r_i} - \frac{\partial c_i(\alpha_i + \beta_i f_i + \sum_{j \neq i} r_j, f_i)}{\partial r_i} \right) = 0. \quad (6.11)$$

Σύμφωνα με την (6.11), είναι εύκολο να δεί κανείς ότι

$$\beta_i = \frac{- \left(\frac{\partial u_i(r_i^*, \sum_k f_k^*)}{\partial f_i} - \frac{\partial c_i(\sum_k r_k^*, f_i^*)}{\partial f_i} \right)}{\frac{\partial u_i(r_i^*, \sum_k f_k^*)}{\partial r_i} - \frac{\partial c_i(\sum_k r_k^*, f_i^*)}{\partial r_i}},$$

και στο σημείο ισορροπίας κανέναν χρήστη δεν έχει το κίνητρο να αποκλίνει από τη βέλτιστη στρατηγική, (r_i^*, f_i^*) —δείτε την Ενότητα 6.4.5 για τη σταθερότητα του συστήματος με χρήση γραμμικών κανόνων. Επιπλέον, από τις συνθήκες πρώτης παραγώγου του (6.9) παίρνουμε ότι $p_i^r = \frac{\partial u_i(r_i^*, \sum_k f_k^*)}{\partial r_i} - \frac{\partial c_i(\sum_k r_k^*, f_i^*)}{\partial r_i}$ και $p_i^f = -\frac{\partial u_i(r_i^*, \sum_k f_k^*)}{\partial f_i} - \frac{\partial c_i(\sum_k r_k^*, f_i^*)}{\partial f_i}$.

Επομένως, αν επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε την κοινωνική ευημερία, η β_i θα πρέπει να έχει την τιμή

$$\beta_i = \frac{p_i^f}{p_i^r}, \quad (6.12)$$

όπου p_i^f και p_i^r είναι όπως στις (6.7) και (6.8) αντίστοιχα. Τότε

$$\alpha_i = r_i^* - \beta_i f_i^*. \quad (6.13)$$

Συνεπώς, ένας γραμμικός κανόνας της μορφής $r_i = \beta_i f_i + \alpha_i$ για κάθε χρήστη i είναι πράγματι αρκετός για να μεγιστοποιήσει την κοινωνική ευημερία. Ωστόσο, δεν έχουμε ικανοποιήσει την απαίτηση μας για έναν ομοιόμορφο κανόνα σύμφωνα με την οποία θα πρέπει να σχεδιάσουμε μία μοναδική συνάρτηση $\rho: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ έτσι ώστε $r_i \leq \rho(f_i), \forall i$.

6.4.2 Προσεγγιστικά βέλτιστοι ομοιόμορφοι κανόνες

Ιδανικά, όπως στην περίπτωση των τιμών, θα θέλαμε να υπολογίσουμε μοναδικούς συντελεστές α και β για τους οποίους ο γραμμικός κανόνας $r_i = \alpha + \beta f_i, \forall i$ θα οδηγούσε σε ένα προσεγγιστικά βέλτιστο σημείο ισορροπίας. Μέσω ενός παρόμοιου επιχειρήματος με αυτό που χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως προκύπτει ότι ένας μοναδικός συντελεστής β μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσει τους βέλτιστους συντελεστές β_i όταν το μέγεθος του συστήματος είναι μεγάλο. (Η απόδειξη είναι όμοια με αυτής της Πρότασης 1 και έτσι παραλείπεται.)

Πρόταση 2 Έστω

$$\beta \equiv \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\partial u_j(r_j^*, \sum_k f_k^*)}{\partial f}}{\sum_{j=1}^n \frac{\partial c_j(\sum_k r_k^*, f_j^*)}{\partial r}} = \frac{p^f}{p^r}. \quad (6.14)$$

Για δεδομένες τιμές των $\bar{b}, \underline{b}, \bar{c}$ και \underline{c} , και για μία σταθερά $\epsilon > 0$, υπάρχει ένα κρίσιμο πλήθος

χρήστων \bar{n} τέτοιο ώστε για πλήθος χρηστών $n > \bar{n}$,

$$\frac{|\beta_i - \beta|}{\beta} < \epsilon, \quad i = 1, \dots, n.$$

Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την (6.14) για να υπολογίσουμε το μοναδικό συντελεστή β ενός ομοιόμορφου γραμμικού κανόνα $\rho(\cdot)$. Αντίθετα, καθώς ο υπολογισμός των α_i εξαρτάται από τον πραγματικό ρυθμό αιτήσεων και τα διαμοιραζόμενα αρχεία του κάθε μεμονωμένου χρήστη ($\alpha_i = r_i^* - \beta_i f_i^*$) και όχι από το άθροισμα τους (όπως στην περίπτωση των β_i), ένας μοναδικός συντελεστής α δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός από την πολύ ειδική περίπτωση όπου όλα τα σημεία $(r_i^*, f_i^*)_{\{i=1, \dots, n\}}$ βρίσκονται στην ίδια ευθεία με κλίση β . Συνεπώς, εν γένει, ο σχεδιαστής του συστήματος θα πρέπει να θέσει $n+1$ συντελεστές για να υλοποιήσει προσεγγιστικά βέλτιστους κανόνες. Αυστηρά, σύμφωνα με την (6.10) η συνάρτηση $\rho(\cdot)$ θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες $2n$ εξισώσεις:

$$\rho'(f_i^*) = \frac{\sum_{j \neq i} \frac{\partial u_j(r_j^*, \sum_k f_k^*)}{\partial f_i}}{\frac{\partial u_i(r_i^*, \sum_k f_k^*)}{\partial r_i} - \frac{\partial c_i(\sum_k r_k^*, f_i^*)}{\partial r_i}}; \quad (6.15)$$

$$\rho(f_i^*) = r_i^*, \quad (6.16)$$

το οποίο σημαίνει ότι μία γραμμική ομοιόμορφη συνάρτηση $\rho(\cdot)$ δεν θα ήταν εν γένει αρκετή για να μεγιστοποιήσουμε την κοινωνική ευημερία του συστήματος.

Ένα παράδειγμα δύο χρηστών

Ένα συγκεκριμένο πολύ απλό θεωρητικό παράδειγμα θα βοηθήσει να καταλάβουμε τη δυσκολία υπολογισμού προσεγγιστικά βέλτιστων ομοιόμορφων (και γραμμικών) κανόνων. Υποθέστε ότι υπάρχουν $n = 2$ χρήστες και ότι οι συναρτήσεις καθαρού οφέλους των χρηστών είναι της μορφής

$$b_i(f_1, f_2, r_1, r_2) = v_i(f_1 + f_2 + r_i^2) - k_i((r_1 + r_2) + f_i^2)$$

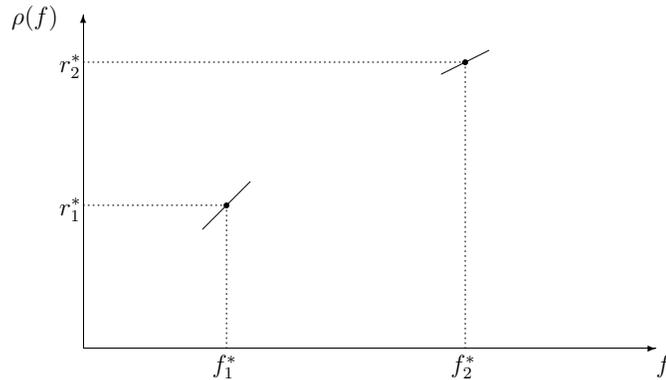
όπου v_i και c_i είναι αυστηρά θετικές σταθερές. Στην απλή αυτή περίπτωση,

$$\begin{aligned} f_1^* &= \frac{v_1 + v_2}{2k_1}, & f_2^* &= \frac{v_1 + v_2}{2k_2}, \\ r_1^* &= \frac{k_1 + k_2}{2v_1}, & r_2^* &= \frac{k_1 + k_2}{2v_2}. \end{aligned}$$

Οι εξισώσεις (6.15) και (6.16) γίνονται

$$\begin{aligned} \rho'\left(\frac{v_1 + v_2}{2k_1}\right) &= \frac{v_2}{k_2}, & \rho'\left(\frac{v_1 + v_2}{2k_2}\right) &= \frac{v_1}{k_1}, \\ \rho\left(\frac{v_1 + v_2}{2k_1}\right) &= \frac{k_1 + k_2}{2v_1}, & \rho\left(\frac{v_1 + v_2}{2k_2}\right) &= \frac{k_1 + k_2}{2v_2}. \end{aligned}$$

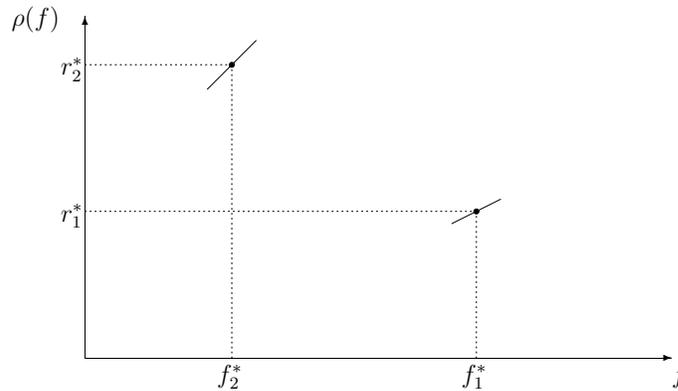
Υποθέστε πρώτα ότι $v_1 > v_2$, $k_1 > k_2$ και $v_1/k_1 < v_2/k_2$. Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης με τη μεγαλύτερη αξία (ο χρήστης 1) υφίσταται και το μεγαλύτερο κόστος και έχει τη μικρότερη αναλογία οφέλους/κόστους. Τότε η σχετική πληροφορία για τη συνάρτηση $\rho(\cdot)$ φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Είναι φυσικό στην περίπτωση αυτή να κάνουμε την $\rho(\cdot)$ μία κοίλη



Σχήμα 6.1: Η συνάρτηση $\rho(\cdot)$ όταν $v_1 > v_2$, $k_1 > k_2$ και $v_1/k_1 < v_2/k_2$.

συνάρτηση του f : αυτό θα εξασφαλίσει ότι η συνθήκη πρώτης παραγώγου της (6.10) είναι αναγκαία και ικανή για να καθορίσει ένα εσωτερικό μέγιστο.

Υποθέστε τώρα ότι $v_1 > v_2$ και $k_1 < k_2$, έτσι ώστε $v_1/k_1 > v_2/k_2$. Η σχετική πληροφορία για τη συνάρτηση $\rho(\cdot)$ στην περίπτωση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Είναι φανερό ότι μία απλή κοίλη συνάρτηση δεν ικανοποιεί τις εξισώσεις για την $\rho(\cdot)$. Και έτσι δεν μπορεί να βρεθεί στην περίπτωση αυτή συνάρτηση που να ικανοποιεί τις συνθήκες δεύτερης παραγώγου



Σχήμα 6.2: Η συνάρτηση $\rho(\cdot)$ όταν $v_1 > v_2$ και $k_1 < k_2$.

που απαιτούνται ώστε η εξίσωση (6.10) να καθορίζει τη βέλτιστη λύση.

6.4.3 Ευρετικοί κανόνες

Αν, ωστόσο, ο σχεδιαστής ήθελε οπωσδήποτε να χρησιμοποιήσει έναν ομοιόμορφο γραμμικό κανόνα και να υπολογίσει τους συντελεστές α και β , τότε θα έπρεπε να το κάνει σύμφωνα με το ακόλουθο πρόβλημα

$$\max_{\alpha \in \mathbb{R}, \beta \in \mathbb{R}} \sum_{j=1}^n \left[u_j \left(\alpha + \beta f_j, \sum_k f_k \right) - c_j \left(\sum_k (a + \beta f_k), f_j \right) \right]$$

υπό τον περιορισμό (6.17)

$$f_i = \arg \max_{f \in \mathbb{R}_+} u_i \left(\alpha + \beta f, f + \sum_{j \neq i} f_j \right) - c_i \left(\alpha + \beta f + \sum_{j \neq i} r_j, f \right).$$

Το πρόβλημα αυτό είναι σαφώς ορισμένο έτσι ώστε ένα μέγιστο να υπάρχει σίγουρα. Είναι όμως πολύ δύσκολο να υπολογίσουμε τη λύση του στην πράξη ακόμα και αριθμητικά. Παρατηρείστε ότι στην περίπτωση του μοντέλου του Κεφαλαίου 4 λύσαμε ένα παρόμοιο πρόβλημα για να υπολογίσουμε το βέλτιστο ομοιόμορφο κανόνα (τον μηχανισμό προκαθορισμένης συνεισφοράς), ο οποίος έχει αποδειχθεί [30] ότι ασυμπτωτικά επιτυγχάνει τη δεύτερη καλύτερη αποδοτικότητα. Δυστυχώς, στο μοντέλο του κεφαλαίου αυτού θα πρέπει κανείς να συμβιβαστεί με απλούς ευρετικούς κανόνες για τον υπολογισμό ενός μοναδικού α , όπως είναι ο υπολογισμός ενός μέσου α με χρήση της πληροφορίας της κατανομής των συντελεστών χρησιμότητας

και κόστους των χρηστών όπως κάναμε για λόγους σύγκρισης στην Ενότητα 4.5.1.

6.4.4 Ένα αριθμητικό παράδειγμα

Παρουσιάζουμε στη συνέχεια ένα συγκεκριμένο αριθμητικό παράδειγμα για να δείξουμε πώς η αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται με χρήση τέτοιων ευρετικών κανόνων επηρεάζεται από την ετερογένεια των χρηστών. Υποθέστε ότι υπάρχουν n χρήστες· και ότι οι συναρτήσεις τους καθαρού οφέλους είναι της μορφής

$$b_i(\mathbf{f}, \mathbf{r}) = v_i(\sqrt{r_i} + \sum_j f_j) - k_i(\sum_j r_j + f_i^2)$$

όπου v_i και k_i είναι αυστηρά θετικές σταθερές. Το σημείο ισορροπίας δίνεται από την

$$\hat{f}_i = \frac{v_i}{2k_i}, \quad \hat{r}_i = \frac{v_i^2}{4k_i^2},$$

ενώ η βέλτιστη λύση δίνεται από την

$$f_i^* = \frac{\sum_j v_j}{2k_i}, \quad r_i^* = \frac{v_i^2}{4\left(\sum_j k_j\right)^2},$$

για $i = 1, \dots, n$. Οι βέλτιστες προσωποποιημένες τιμές και οι προσεγγιστικά βέλτιστες ομοιόμορφες τιμές της Ενότητας 6.3.2 είναι

$$\begin{aligned} p_i^r &= \sum_{j \neq i} k_j, & p_i^f &= -\sum_{j \neq i} v_j \\ p^r &= \sum_j k_j, & p^f &= -\sum_j v_j. \end{aligned}$$

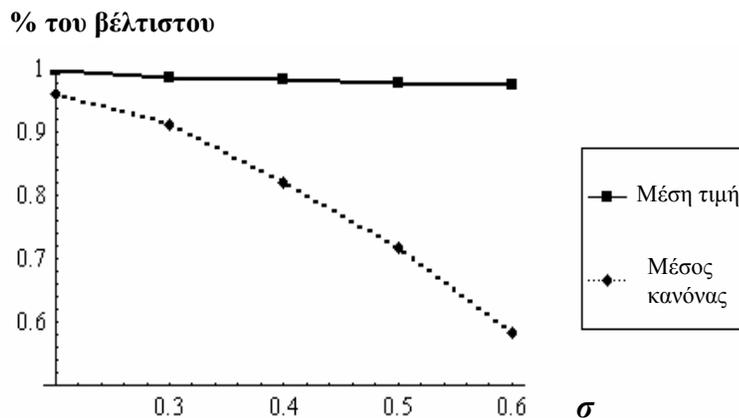
Οι εξισώσεις (6.12) και (6.13) δίνουν

$$\beta_i = \frac{\sum_{j \neq i} v_j}{\sum_{j \neq i} k_j}, \quad \alpha_i = \frac{1}{2\sum_j k_j} \left(\frac{v_i^2}{2\sum_j k_j} + \frac{(\sum_j v_j)^2}{2k_i} \right).$$

Ο ομοιόμορφος συντελεστής β (βλ. Πρόταση 2) είναι

$$\beta = \frac{\sum_j v_j}{\sum_j k_j}.$$

Επομένως, ένας απλός ευρετικός κανόνας είναι να χρησιμοποιήσουμε την παραπάνω τιμή για τον συντελεστή β και να υπολογίσουμε μία μέση τιμή των βέλτιστων a_i με βάση την κατανομή που ακολουθούν οι τιμές των $\{v_i, k_i\}$. Ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε λεπτομερώς στην Ενότητα 4.5.2 για να υπολογίσουμε αριθμητικά με βάση το απλό παράδειγμα της ενότητας αυτής την απώλεια σε αποδοτικότητα από τη χρήση των μέσων προσεγγιστικών ομοιόμορφων τιμών και κανόνων ως συνάρτηση της ετερογένειας των χρηστών. Υποθέσαμε ότι οι συντελεστές $\{v_i, k_i\}$ ακολουθούν τις λογαριθμικές κανονικές κατανομές $V(0.5, \sigma)$ και $K(1, \sigma)$ αντίστοιχα και υπολογίσαμε την απώλεια σε αποδοτικότητα για διαφορετικές τιμές της κοινής τους διασποράς, σ , η οποία εκφράζει διαφορετικά επίπεδα ετερογένειας των χρηστών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, και όπως αναμενόταν, η απόδοση του ομοιόμορφου κανόνα μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνεται η ετερογένεια, ενώ η απόδοση της μέσης τιμής μένει πολύ κοντά στο βέλτιστο σημείο αποδοτικότητας.



Σχήμα 6.3: Απώλεια σε αποδοτικότητα από τη χρήση των μέσων προσεγγιστικών ομοιόμορφων τιμών και κανόνων για διαφορετικές τιμές της διασποράς, σ , και για $n = 100$.

6.4.5 Σταθερότητα με χρήση κανόνων

Στην ενότητα αυτή μελετάμε τη σταθερότητα του απλού μας μοντέλου όταν γραμμικοί κανόνες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της συμπεριφορά των χρηστών. Ο λόγος που η σταθερότητα είναι ένα σημαντικό ζήτημα είναι ότι οι χρήστες επιλέγουν πώς να ανανεώσουν τα επίπεδα κατανάλωσης και συνεισφοράς τοπικά, και οι αποφάσεις τους επηρεάζουν αυτές των υπολοίπων χρηστών. Θα αποδείξουμε την σταθερότητα του συστήματος¹ όταν κάθε χρήστης

¹θα το κάνουμε χρησιμοποιώντας την πιο ακριβή συνάρτηση καθαρού οφέλους για τον χρήστη i , $u_i(r_i, \sum_{j \neq i} f_j) - c_i(f_i, \sum_{j \neq i} r_j)$.

ανανεώνει το f_i υποθέτοντας έναν κανόνα της μορφής $r_i = \alpha_i + \beta_i f_i$. Τότε, το καθαρό του όφελος γίνεται

$$g_i = u_i(\alpha_i + \beta_i f_i, \sum_{j \neq i} f_j) - c_i(f_i, \sum_{j \neq i} [\alpha_j + \beta_j f_j]),$$

και θα πρέπει να αυξήσει το f_i σύμφωνα με την παράγωγο

$$\phi_i = \frac{\partial g_i}{\partial f_i} = \frac{\partial u_i}{\partial r_i} \beta_i - \frac{\partial c_i}{\partial f_i}.$$

Υποθέτουμε ότι ως συνάρτηση του χρόνου, $\dot{f}_i = \phi_i$, και επιλέγουμε ως μία πιθανή συνάρτηση Liapunov την $V = \sum_i \phi_i^2$. Τώρα²,

$$\dot{\phi}_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} \beta_i^2 \phi_i + \sum_{j \neq i} \frac{\partial^2 u_i}{\partial r \partial f} \beta_i \phi_j - \frac{\partial^2 c_i}{\partial f^2} \phi_i - \sum_{j \neq i} \frac{\partial^2 c_i}{\partial r \partial f} \beta_j \phi_j.$$

Τότε

$$\dot{V} = \sum_i 2\phi_i \dot{\phi}_i = 2 \sum_i \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} \beta_i^2 - \frac{\partial^2 c_i}{\partial f^2} \right] \phi_i^2 + \sum_i \sum_{j \neq i} \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial r \partial f} \beta_i - \frac{\partial^2 c_i}{\partial r \partial f} \beta_j \right] \phi_i \phi_j.$$

Έστω

$$A_{ii} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} \beta_i^2 - \frac{\partial^2 c_i}{\partial f^2}, \quad A_{ij} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial r \partial f} \beta_i - \frac{\partial^2 c_i}{\partial r \partial f} \beta_j.$$

Τότε

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \dot{V} &= \sum_i A_{ii} \phi_i^2 + \sum_i \sum_{j \neq i} A_{ij} \phi_i \phi_j \\ &\leq -\min |A_{ii}| \sum_i \phi_i^2 + \max |A_{ij}| \sum_i \sum_{j \neq i} \phi_i \phi_j \\ &\leq -\min |A_{ii}| \sum_i \phi_i^2 + \max |A_{ij}| (n-1) \sum_i \phi_i^2. \end{aligned}$$

Επομένως, μία επαρκής συνθήκη για σταθερότητα είναι η

$$\min |A_{ii}| > (n-1) \max |A_{ij}|.$$

²σε ό,τι ακολουθεί συμβολίζουμε με r και f το πρώτο και δεύτερο (δεύτερο και πρώτο) όρισμα των συναρτήσεων u_i (c_i) αντίστοιχα.

Η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται αν η επίδραση των f και r στις συναρτήσεις χρησιμότητας και κόστους έχει μικρή αλληλοσυσχέτιση, ενώ η $u(\cdot)$ και η $c(\cdot)$ είναι αυστηρά κοίλη και κυρτή αντίστοιχα (αν η επίδραση είναι ανεξάρτητη, τότε $|A_{ij}| = 0$).

6.4.6 Ένα μοντέλο με ποιότητα υπηρεσίας

Στην ενότητα αυτή ορίζουμε μία απλή επέκταση του μοντέλου μας όπου οι χρήστες επιλέγουν την ποιότητα υπηρεσίας που παρέχουν στους υπόλοιπους χρήστες. Έστω λοιπόν $u_i(\{Q_j\}, \{r_{ij}\})$ ο ρυθμός χρησιμότητας που απολαμβάνει ο χρήστης i όταν ο ρυθμός αιτήσεων για υπηρεσία που κατευθύνει προς τον χρήστη j είναι r_{ij} ($r_i = (r_{i1}, \dots, r_{in})$), και αυτές εξυπηρετούνται από τον χρήστη j με ποιότητα Q_j ($Q = (Q_1, \dots, Q_n)$).

Οι προσωποποιημένες αιτήσεις υπηρεσιών μοντελοποιούν ένα σύστημα διαμοιρασμού αρχείων στο οποίο κάθε χρήστης διαμοιράζεται συγκεκριμένο περιεχόμενο και επομένως οι προσωπικές προτιμήσεις ενός χρήστη μεταβάλλουν την αξία του περιεχομένου διαφορετικών χρηστών για τον ίδιο ή ένα σύστημα διαμοιρασμού ασύρματης πρόσβασης στο οποίο οι χρήστες ενός συγκεκριμένου κόμβου έχουν διαφορετικές ανάγκες για υπηρεσίες πρόσβασης σε διαφορετικές τοποθεσίες ανάλογα με την κινητικότητα τους. Το μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια είχε αρχικά προταθεί για την εφαρμογή διαμοιρασμού ασύρματης πρόσβασης [9] (δείτε επίσης την Ενότητα 3.4.2 για μία σύντομη περιγραφή) αλλά είναι επίσης εφαρμόσιμο σε διομήτιμα συστήματα διαμοιρασμού αρχείων με την υπόθεση ότι δεν είναι όλο το περιεχόμενο το ίδιο χρήσιμο για κάθε χρήστη (όπως στο μοντέλο που προτείνεται στο [17]).

Στο μοντέλο μας λοιπόν, ο χρήστης i ελέγχει το ρυθμό αιτήσεων που κάνει στους ομοτίμους του χρήστες. Ο ρυθμός κόστους του χρήστη i συμβολίζεται ως $c_i(Q_i, \sum_k r_{ki})$, όπου Q_i είναι το επίπεδο της ποιότητας που διατηρείται κατά την εξυπηρέτηση αιτήσεων, όταν αυτές πραγματοποιούνται με συνολικό ρυθμό $\sum_k r_{ki}$ (για να απλοποιήσουμε το συμβολισμό, θεωρούμε όπως και στα προηγούμενα μοντέλα μας ότι το άθροισμα είναι για όλα τα k , συμπεριλαμβανομένου του i). Το κόστος αυτό είναι μία συνάρτηση των πόρων που δεσμεύονται από τον χρήστη i για να εξυπηρετήσει τους υπόλοιπους χρήστες με ποιότητα Q_i . Σε πολλές περιπτώσεις η ποσότητα των πόρων αυτών είναι γνωστή μόνο στον χρήστη i . Για το λόγο αυτό γράφουμε το κόστος ως συνάρτηση των παραμέτρων r_{ki} και Q_i οι οποίες είναι ορατές σε εξωτερικούς παρατηρητές. Τότε το καθαρό όφελος του χρήστη i είναι $u_i(\{Q_j\}, \{r_{ij}\}) - c_i(Q_i, \sum_k r_{ki})$ και

η κοινωνική ευημερία ισούται με

$$SW = \sum_i [u_i(\{Q_j\}, \{r_{ij}\}) - c_i(Q_i, \sum_k r_{ki})]. \quad (6.18)$$

Πρώτος στόχος μας είναι να αναζητήσουμε τις τιμές με χρήση των οποίων επιτυγχάνεται το μέγιστο της (6.18). Παραγωγίζοντας την ως προς Q_i και r_{ki} και θέτοντας τις σχέσεις που προκύπτουν ίσες με το μηδέν παίρνουμε

$$\sum_{j \neq i} \frac{\partial u_j}{\partial Q_i} - \frac{\partial c_i}{\partial Q_i} = 0, \quad (6.19)$$

και

$$\frac{\partial u_j}{\partial r_{ji}} - \frac{\partial c_i}{\partial r} = 0. \quad (6.20)$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις αυτές, παρόμοια με το απλούστερο μοντέλο που αναλύσαμε παραπάνω, για να μεγιστοποιήσουμε την κοινωνική ευημερία στο σημείο ισορροπίας, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τιμές Lindahl, για την ποιότητα και τον ρυθμό αιτήσεων (διαφορετικές για κάθε χρήστη i) ως εξής:

$$p_i^q = \sum_{j \neq i} \frac{\partial u_j}{\partial Q_i}, \quad p_i^r = \frac{\partial c_i}{\partial r}, \quad (6.21)$$

όπου οι παράγωγοι υπολογίζονται στο βέλτιστο της (6.18). Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές, ένας χρήστης i που προσφέρει ποιότητα υπηρεσίας Q_i και κάνει αιτήσεις με ρυθμό r_i , εισπράττει $p_i^q Q_i$ μονάδες και πληρώνει $\sum_{j \neq i} r_{ij} p_j^r$ μονάδες.

Οι τιμές αυτές δίνουν το κίνητρο για τη χρήση ενός κανόνα για τον χρήστη i της μορφής

$$Q_i \geq \sum_{j \neq i} \beta_{ij} r_{ij} + \alpha_i, \quad (6.22)$$

όπου το διάνυσμα $\{\beta_{ij}, \alpha_i\}$ ορίζεται για τον κάθε χρήστη i με χρήση των βέλτιστων τιμών όπως κάναμε στην Ενότητα 6.4.1 παραπάνω για το αρχικό μας μοντέλο.

Πιο συγκεκριμένα, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι για

$$\alpha_{ij} = \frac{p_j^r}{p_i^q}, \quad \beta_i = Q_i^* - \frac{\sum_{j \neq i} p_j^r r_{ij}^*}{p_i^q} \quad (6.23)$$

οι παραπάνω κανόνες καθιστούν το βέλτιστο της (6.18) το σημείο ισορροπίας του συστήματος. Μπορούμε επίσης να αποδείξουμε, όπως στην Ενότητα 6.4.5, ότι υπό τις κατάλληλες συνθήκες

για τις δεύτερες παραγώγους των συναρτήσεων χρησιμότητας και κόστους το σημείο ισορροπίας αυτό είναι σταθερό.

6.5 Περίληψη και συζήτηση

Στο κεφάλαιο αυτό, ορίσαμε ένα πιο λεπτομερές οικονομικό μοντέλο για να συμπεριλάβουμε το κόστος αναφόρτωσης στο κόστος διαμοιρασμού αρχείων. Στη συνέχεια εισαγάγαμε μία γενική κατηγορία ανταποδοτικών κανόνων για την επιβολή των βέλτιστων επιπέδων συνεισφοράς και κατανάλωσης από τους χρήστες σύμφωνα με το μοντέλο αυτό. Η έννοια της ανταποδοτικότητας είναι πολύ θεμελιώδης στα διομότιμα συστήματα καθώς θεωρείται γενικά μία δίκαιη και ρεαλιστική εναλλακτική λύση (αντί για τη χρήση τιμών) για τη δημιουργία των κατάλληλων κινήτρων ώστε οι χρήστες να συνεισφέρουν τους πόρους τους στο σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο απλούστερος τέτοιος κανόνας είναι αυτός που εξισώνει τη συνεισφορά με την κατανάλωση και ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας των οικονομικών των διομότιμων συστημάτων μελετάει ζητήματα που σχετίζονται με την επιβολή του σε ένα επισφαλές διομότιμο περιβάλλον. Στο τμήμα αυτό όμως της εργασίας μας αναζητούμε ανταποδοτικούς κανόνες οι οποίοι θα μεγιστοποιούσαν την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος σύμφωνα με το πιο λεπτομερές μοντέλο μας. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη σχέση μεταξύ συνεισφοράς και κατανάλωσης για κάθε χρήστη εξαρτάται εν γένει από τις συναρτήσεις χρησιμότητας και κόστους των συμμετεχόντων και δεν είναι απαραίτητα 1-1.

Δείξαμε ότι ένας γραμμικός κανόνας μπορεί να μεγιστοποιήσει την κοινωνική ευημερία αλλά ο υπολογισμός των συντελεστών του απαιτεί πλήρη πληροφόρηση και αυτοί θα ήταν εν γένει διαφορετικοί για κάθε χρήστη, γεγονός που καθιστά μη ρεαλιστική την εφαρμογή του ακόμα και σε κεντροποιημένα συστήματα. Επομένως, θα πρέπει κανείς να συμβιβαστεί όσον αφορά την αποδοτικότητα του συστήματος αν επιθυμεί την επιβολή ενός ομοιόμορφου κανόνα. Μάλιστα, ο βέλτιστος ομοιόμορφος κανόνας με ελλιπή πληροφόρηση στα πλαίσια αυτά δεν είναι γνωστός και μόνο απλοί ευρετικοί κανόνες θα μπορούσαν να εξετασθούν για την απόδοση τους, οι οποίοι αν και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα ενός διομότιμου συστήματος, έχουν περιορισμένο θεωρητικό ενδιαφέρον.

Ωστόσο, ένας κανόνας που ορίζει μία οποιαδήποτε σχέση μεταξύ συνεισφοράς και κατανάλωσης, ακόμα και αν ήταν ομοιόμορφος, θα ήταν πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί σε ένα ρεαλιστικό διομότιμο σύστημα, ειδικά όταν οι χρήστες μπορούν να αλλάζουν εύκολα ταυτότητα (ψευδώνυμο). Για παράδειγμα, ο πιο προφανής μηχανισμός για την εξίσωση της συνεισφοράς

και της κατανάλωσης είναι η χρήση εικονικού συναλλάγματος (για παράδειγμα κουπόνια), ο οποίος απαιτεί την ύπαρξη αξιόπιστων ταυτοτήτων ή την επιβολή κόστους για τη δημιουργία μιας νέας ταυτότητας. Διαφορετικά, οι χρήστες θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν συνεχώς το αρχικό ποσό κουπονιών που είναι απαραίτητο να δίνεται στους νέους χρήστες (απλά αλλάζοντας ταυτότητα) και έτσι να μη συνεισφέρουν καθόλου στο σύστημα. Επιπλέον, είναι εύκολο να δει κανείς ότι οποιαδήποτε άλλη αναλογία ανταλλαγής κουπονιών σε κάθε καταφόρτωση εκτός από 1-1 θα οδηγούσε σε πληθωρισμό ή υποτίμηση του εικονικού συναλλάγματος και τη σταδιακή κατάρρευση της εικονικής αγοράς. Έτσι, τεχνικές βασισμένες σε κουπόνια ή γενικότερα εικονικό συνάλλαγμα, ακόμα και αν υλοποιηθούν επιτυχώς δεν είναι αρκετές για να επιβάλλουν διαφορετικές από 1-1 σχέσεις μεταξύ καταφορτώσεων και αναφορτώσεων. Για να το επιτύχει κανείς αυτό θα έπρεπε να υπάρχει κάποιος τρόπος να επιβάλλει ανεξάρτητα την αποδοτική ποσότητα κατανάλωσης και συνεισφοράς για τον κάθε χρήστη, το οποίο είναι ένα ακόμα πιο δύσκολο πρόβλημα.

Παρατηρείστε ωστόσο ότι ακόμα και αν το σημείο ισορροπίας που θα επιτύγχαναν οι ομοίομορφοι ανταποδοτικοί κανόνες ήταν μη αποδοτικό, υπό την υπόθεση ότι η αναφόρτωση επιφέρει σημαντικό κόστος στους χρήστες, τέτοιοι κανόνες αποτελούν ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τη δημιουργία κινήτρων για συνεισφορά. Μάλιστα, στο βασικό μέρος της εργασίας μας, έχουμε θεωρήσει ότι το κόστος αναφόρτωσης είναι αμελητέο (όπως και η πλειονότητα των σχετικών εργασιών στη βιβλιογραφία) και δείξαμε ότι ένας ανταποδοτικός κανόνας χωρίς μνήμη του οποίου σκοπός είναι να επιβάλλει ένα αποδοτικό επίπεδο συνεισφοράς κατά τη διάρκεια της κατανάλωσης πόρων, μπορεί να επιτύχει επίπεδα διαθεσιμότητας περιεχομένου τα οποία είναι συγκρίσιμα με τα βέλτιστα υπό ορισμένες υποθέσεις. Ακόμα πιο σημαντικά, σε αντίθεση με τους ανταποδοτικούς κανόνες που εξισώνουν την κατανάλωση με τη συνεισφορά, η συνεισφορά που επιβάλλει ο μηχανισμός μας υπολογίζεται με βάση συγκεκριμένες παράμετρους του συστήματος όπως το μέγεθος του και την κατανομή των τύπων των χρηστών και έτσι κάποιου είδους ρύθμιση υλοποιείται ώστε να μεγιστοποιηθεί η κοινωνική ευημερία (βλ. Κεφάλαιο 5).

Επομένως, σε κάθε περίπτωση, οι ανταποδοτικοί κανόνες που συσχετίζουν με κάποιο τρόπο την κατανάλωση με τη συνεισφορά θα εξαναγκάζαν τους χρήστες να συνεισφέρουν μία ορισμένη ποσότητα πόρων με σκοπό να ικανοποιήσουν την προσωπική τους ζήτηση και έτσι επιτυγχάνεται ένα ορισμένο επίπεδο διαθεσιμότητας περιεχομένου.

Κεφάλαιο 7

Ένα μοντέλο αγοράς

Μέχρι στιγμής έχουμε εξερευνήσει μηχανισμούς κινήτρων για την παροχή περιεχομένου και την αύξηση της διαθεσιμότητας των χρηστών σε ένα διομότιμο σύστημα διαμοιρασμού αρχείων με σκοπό να επιτύχουμε αποδοτικά επίπεδα διαθεσιμότητας περιεχομένου. Στο κεφάλαιο αυτό επιθυμούμε να καταδείξουμε την αρνητική επίδραση της σχετικά φθηνής διανομής περιεχομένου μεταξύ των μελών μιας διομότιμης κοινότητας στα κίνητρα για την απόκτηση και εισαγωγή ακριβών (είτε για την αγορά είτε για την καταφόρτωση τους) αντικειμένων στην κοινότητα. Ορίζουμε ένα κατάλληλο μοντέλο αγοράς για διανομή περιεχομένου και δείχνουμε ότι σε πολλές περιπτώσεις συγκεκριμένα δικαιώματα θα πρέπει να εξασφαλιστούν σε ορισμένους χρήστες ώστε να είναι συμφέρον για αυτούς να αποκτήσουν και να διαμοιραστούν ακριβά αντικείμενα περιεχομένου. Δείτε επίσης το [6].

7.1 Εισαγωγή

Σε αντίθεση με τα κεντροποιημένα ή ιεραρχικά συστήματα διανομής περιεχομένου όπως η πολυμετάδοση, τα δίκτυα διανομής περιεχομένου (Content Distribution Networks –CDNs), και το caching, στη διομότιμη αρχιτεκτονική το περιεχόμενο μεταδίδεται με πλήρως κατανεμημένο τρόπο: κάθε χρήστης αφού παραλάβει το περιεχόμενο μπορεί να λειτουργήσει ο ίδιος ως διανομέας του, καθιστώντας έτσι τη διανομή του περιεχομένου πολύ πιο αποδοτική. Καθώς η αποστολή περιεχομένου μεταξύ των μελών μιας διομότιμης κοινότητας έχει εν γένει πολύ μικρό κόστος οι χρήστες που επιθυμούν ένα συγκεκριμένο αντικείμενο πάντα θα το αποκτήσουν και θα το διαθέτουν και στους υπόλοιπους. Το περιεχόμενο όμως μπορεί να μην είναι τόσο εύκολο να το αποκτήσει κανείς από μία εξωτερική (του διομότιμου συστήματος) πηγή, είτε λόγω κόστους

μεταφοράς είτε λόγω τιμολόγησης του περιεχομένου καθαυτού. Για παράδειγμα, φανταστείτε έναν χρήστη που είναι αναγκασμένος να καταφορτώσει ένα πολύ μεγάλο αρχείο από μία απομακρυσμένη πηγή, υποφέροντας τη μεγάλη καθυστέρηση, και στη συνέχεια το περιεχόμενο αυτό να γίνεται εύκολα προσβάσιμο στους υπόλοιπους χρήστες τους ίδιου τοπικού δικτύου.

Αν τέτοιου είδους κόστη είναι σημαντικά και οι χρήστες δεν έχουν τον τρόπο να τα αποσβέσουν, μπορεί τελικά να μην καταφέρουν να εισάγουν ακριβό περιεχόμενο στη διομότιμη κοινότητά τους. Ένας μηχανισμός αγοράς θα μπορούσε να λύσει το πρόβλημα αυτό και να μειώσει την άσκοπη σπατάλη πόρων που προκύπτει όταν χρήστες αποκτούν περιεχόμενο το οποίο έχει μικρότερη αξία για αυτούς από το κόστος που δημιουργεί στους υπόλοιπους. Σε μία αγορά, οι χρήστες μοντελοποιούνται ως ανεξάρτητες οντότητες έχοντας κίνητρο να μεγιστοποιήσουν το καθαρό όφελός τους από τη διανομή του περιεχομένου. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα κοινό κόστος W για να φέρει κανείς το περιεχόμενο σε μία διομότιμη ομάδα, το οποίο θα μπορούσε να αντιστοιχεί στο κόστος των πνευματικών δικαιωμάτων ή το κόστος μεταφοράς από μία εξωτερική πηγή. Υποθέτουμε επίσης ότι υπάρχει κάποιο κόστος (πολύ μικρότερο) για τη μεταφορά του περιεχομένου μεταξύ των χρηστών της ομάδας, διαφορετικό για κάθε ζευγάρι επικοινωνίας και για την κάθε κατεύθυνση μεταφοράς. Από τη στιγμή που ένας χρήστης έχει καταφορτώσει ένα αντικείμενο από την πηγή του, όλοι οι υπόλοιποι χρήστες της ομάδας του θα έχουν τη δυνατότητα να το καταφορτώσουν επίσης πληρώνοντας μόνο το εσωτερικό κόστος και αποφεύγοντας το πιθανώς πολύ μεγαλύτερο αρχικό κόστος.

Κάθε φορά που ένας χρήστης κάνει μία αίτηση για περιεχόμενο υποθέτουμε ότι υπάρχει μία υπηρεσία αναζήτησης που παρέχει πληροφορία για την τιμολόγηση και το κόστος της σχετικής μεταφοράς και μπορεί να ελέγξει το πλήθος των ανταγωνιστικών προσφορών ανά αίτηση. Συγκρίνουμε δύο διαφορετικές πολιτικές της υπηρεσίας αναζήτησης:

1. Ένα μοντέλο *ελεγχόμενου ανταγωνισμού*, όπου το πολύ d χρήστες επιλέγονται τυχαία από το σύνολο S όλων των υποψήφιων παρόχων του περιεχομένου. Αυτό είναι ένα μοντέλο ολιγοπωλείου, όπου οι τιμές θα εξαρτώνται από το πλήθος d των ανταγωνιζομένων χρηστών.
2. Ένα μοντέλο *εξασφάλισης αποκλειστικών δικαιωμάτων διανομής*, όπου στον πρώτο χρήστη που θα αποκτήσει το περιεχόμενο και επομένως θα πληρώσει το αρχικό κόστος W εξασφαλίζεται το δικαίωμα να είναι ο μοναδικός μεταπωλητής του μέσα στην ομάδα. Ο χρήστης αυτός έτσι έχει τη δύναμη ενός μονοπωλείου και μπορεί να εφαρμόσει προσωποποιημένη χρέωση.

Επιθυμούμε να μελετήσουμε την επίδραση τέτοιου είδους περιορισμών στη διάδοση του περιεχομένου δεδομένου ότι οι χρήστες επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν το καθαρό τους όφελος και ότι υπάρχει ένα αρχικό κόστος για την απόκτηση του περιεχομένου. Όταν το κόστος αυτό είναι υψηλό, μπορεί τελικά να εμποδίσει την απόκτηση του περιεχομένου από τα μέλη της διομότιμης κοινότητας. Προτείνουμε ένα απλό οικονομικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του τις διαφορετικές παράμετρους του προβλήματος και οδηγεί σε αναλυτικές λύσεις των αντίστοιχων παιγνίων που προκύπτουν. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ευαισθησίας ορισμένων κριτηρίων αποδοτικότητας όπως είναι η κοινωνική ευημερία και το αναμενόμενο καθαρό όφελος των χρηστών ως συνάρτηση παραμέτρων όπως το αρχικό κόστος, η αξία και η δημοτικότητα του περιεχομένου, η διαθέσιμη πληροφορία, τα εσωτερικά κόστη μεταφοράς, κ.ά. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τις τιμές και το αναμενόμενο καθαρό όφελος των χρηστών που κατ'επέκταση επηρεάζει τις αποφάσεις τους και συνεπώς την τελική διανομή του περιεχομένου.

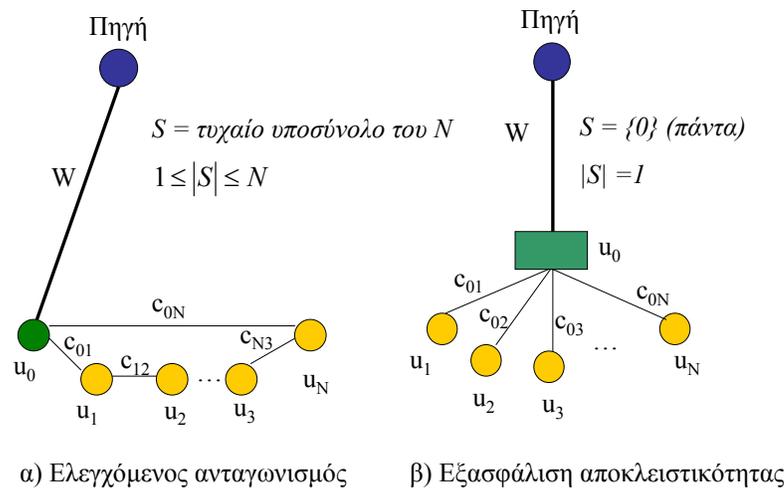
Θα πρέπει να τονίσουμε ότι στην προσέγγιση μας δεν εξετάζουμε την αποδοτική διανομή του περιεχομένου στο εσωτερικό της διομότιμης ομάδας (ούτε σε ό,τι αφορά την οικονομική της διάσταση ούτε ως προς την βέλτιστη χρήση των πόρων του συστήματος). Για το πρόβλημα αυτό υπάρχει εκτενέστατη βιβλιογραφία η οποία χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες: 1) την αποδοτική διανομή ενός συγκεκριμένου αντικειμένου [58] [21] [15] [23] [24] [50] [19] [83] [20] [26] και 2) την αποδοτική τοποθέτηση ενδιάμεσων κόμβων στο δίκτυο για την διανομή του περιεχομένου [67] [70] [86] [33] ή/και των αντικειμένων περιεχομένου στους κόμβους του δικτύου [69] [65] [60] [63] [14] [74] με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς και της συνολικής καθυστέρησης. Στην εργασία αυτή μελετάμε την παροχή κατάλληλων κινήτρων για την εισαγωγή νέων αντικειμένων σε μία κοινότητα από μία εξωτερική πηγή, υποθέτοντας ότι το κόστος διανομής του περιεχομένου μεταξύ των μελών της κοινότητας είναι προκαθορισμένα και πολύ μικρότερα από το αρχικό κόστος απόκτησης του περιεχομένου από την εξωτερική του πηγή.

7.2 Ένα απλό μοντέλο αγοράς για διομότιμη διανομή περιεχομένου

Ας θεωρήσουμε μία ομάδα από N ομότιμους χρήστες, όπου κάθε χρήστης i αποκτά αξία u_i χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο αντικείμενο περιεχομένου, όπου η μεταβλητή u_i είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο $[0, V]$. Υποθέτουμε ότι αρχικά το περιεχόμενο ανήκει σε έναν

ανεξάρτητο πωλητή ο οποίος χρεώνει ένα σημαντικό ποσό W , αρκετά υψηλό σε σύγκριση με το V , σε κάθε χρήστη που θα επιθυμήσει να το αποκτήσει. Έτσι, από τη στιγμή που ένας χρήστης θα αποκτήσει το περιεχόμενο, είναι λογικό αυτός να το μεταπωλήσει σε μικρότερες τιμές μέσα στην ομάδα με σκοπό να αποσβέσει το κόστος του, και ίσως να ωφεληθεί, αντί περισσότεροι από ένας χρήστες να πληρώσουν το υψηλό αυτό κόστος στον εξωτερικό πωλητή. Το πιθανό κέρδος από τη μεταπώληση είναι που επιτρέπει σε χρήστες με $u_i - W < 0$ να πάρουν το ρίσκο και να αγοράσουν το περιεχόμενο. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της ομάδας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μέγιστη αξία $\max_i \{u_i - W\}$, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα μιας τέτοιας απόφασης. Φανερά, η απόφαση αυτή εξαρτάται από τον υπολογισμό του αναμενόμενου κέρδους από τη μεταπώληση και στην ανοχή των χρηστών ως προς το ρίσκο.

Στο επίπεδο αυτό προκύπτει ένα ενδιαφέρον παίγνιο. Κάθε χρήστης περιμένει κάποιον άλλο χρήστη να κάνει την πρώτη κίνηση και να πληρώσει το ποσό W . Αυτή η παραλλαγή του προβλήματος της ανέξοδης συμμετοχής μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγήσει στη μείωση της πιθανότητας να αποκτηθεί το περιεχόμενο. Συζητάμε στη συνέχεια το τμήμα του μοντέλου μας που περιγράφει την εσωτερική αγορά της διομότιμης κοινότητας, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέσου οφέλους από τη μεταπώληση του περιεχομένου.



Σχήμα 7.1: Διανομή περιεχομένου με βάση τη διαθέσιμη πληροφορία

Ένα σημαντικό συστατικό του μοντέλου μας είναι το κόστος που σχετίζεται με τη μεταφορά του περιεχομένου. Συμβολίζουμε ως c_{ij} το κόστος για τη μεταφορά του περιεχομένου από τον χρήστη i στον χρήστη j . Αυτό μπορεί να είναι είτε άμεσο κόστος επικοινωνίας όπως η

καθυστέρηση, η απώλεια πληροφορίας ή το κόστος του εύρους ζώνης, είτε έμμεσο κόστος που προκύπτει από τη μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης πρόσβασης για τον χρήστη που αναφορτώνει το περιεχόμενο. Το κόστος αυτό θα προστεθεί στην τιμή του περιεχομένου και θα χρεωθεί στον χρήστη-αγοραστή. Θα μπορούσε να υποθέσει κανείς ότι το κόστος c_{ij} είναι γνωστό από πριν μόνο στον χρήστη j , ή μόνο στον i , ή και στους δύο. Για παράδειγμα, ο χρήστης j μπορεί να ενημερωθεί από το σύστημα για την ταυτότητα του χρήστη i και το μέσο ρυθμό απόστολης δεδομένων της μεταξύ τους σύνδεσης, ενώ ο χρήστης i μπορεί να γνωρίζει μόνο ότι υπάρχει ένας πιθανός πελάτης. Αυτή η αβεβαιότητα και ασυμμετρία σχετικά με το κόστος εξασφαλίζει την ύπαρξη θετικού κέρδους από τη μεταπώληση. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν δύο πιθανοί πωλητές i και k του περιεχομένου που επιθυμεί ο χρήστης j , όπου $c_{ij} = c_{kj} = 0$, τότε η τιμή στο σημείο ισορροπίας είναι μηδέν (δείτε το [91])! Επίσης, αν το κόστος είναι γνωστό σε όλους τους συμμετέχοντες και $c_{ij} > c_{kj}$, τότε ο χρήστης k θα κερδίσει δημοσιεύοντας την τιμή $c_{ij} - c_{kj}$. Αν η κατανομή του κόστους αυτού είναι τυχαία με βάση μία γνωστή κατανομή, τότε μπορεί κανείς να υπολογίσει το αναμενόμενο κέρδος από μία τέτοια συναλλαγή. Το μοντέλο μας επιτρέπει διαφορετικού είδους ασυμμετρία στην πληροφόρηση: το κόστος μπορεί να είναι τυχαίο και γνωστό μόνο στους πελάτες ή ο κάθε πωλητής να γνωρίζει μόνο το προσωπικό του κόστος.

Ανάλογα με τις υποθέσεις που θα κάνει κανείς, προκύπτουν διαφορετικά παίγνια. Ένας πωλητής κάνει μία προσφορά (ορίζει την τιμή του περιεχομένου) προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει το αναμενόμενο καθαρό του όφελος. Η στρατηγική του λαμβάνει υπόψη της την πληροφορία για την κατανομή της αξίας του περιεχομένου στον αγοραστή, την κατανομή του κόστους μεταφοράς των ανταγωνιστών του, και το πλήθος των ανταγωνιστών αυτών. Θα συζητήσουμε μερικά από τα πιο απλά παίγνια που μπορεί κανείς να λύσει και τα οποία εκφράζουν τις πιο σημαντικές πτυχές του προβλήματος. Είναι φανερό ότι το αναμενόμενο κέρδος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από από το μέγεθος του ανταγωνισμού. Όσο πιο έντονος είναι ο ανταγωνισμός (όσο περισσότερη πληροφορία διαθέτει το σύστημα σχετικά με τους πιθανούς αγοραστές) τόσο μικρότερες θα είναι οι τιμές και τα κέρδη, αυξάνοντας έτσι το ρίσκο της απόφασης να πληρώσει κάποιος το υψηλό κόστος W και να εισάγει το περιεχόμενο στην ομάδα.

Υπάρχουν και άλλες σημαντικές παράμετροι όπως η δημοτικότητα του περιεχομένου, η οποία μπορεί να μοντελοποιηθεί ως η πιθανότητα ένας χρήστης να ζητήσει το περιεχόμενο ή ως το πλήθος των χρηστών που συνολικά θα ζητήσουν το περιεχόμενο. Η φήμη μπορεί να μοντελοποιηθεί θεωρώντας διαφορετική αξία για ένα περιεχόμενο ανάλογα με τον πωλητή του.

Για παράδειγμα, η αξία του περιεχομένου για τον χρήστη i , όταν πωλητής είναι ο χρήστης j , θα είναι u_{ij} .

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να μελετήσουμε την επίδραση των διαφορετικών πολιτικών διάθεσης της πληροφορίας στη διάδοση του περιεχομένου. Υπάρχουν περιπτώσεις (για ορισμένες τιμές των παραμέτρων μας) όπου ο περιορισμός της πληροφορίας και η εξασφάλιση αποκλειστικών δικαιωμάτων για τη μεταπώληση του περιεχομένου μπορεί να έχει θετικό αποτέλεσμα. Υποψιάζεται κανείς ότι αυτό μπορεί να ισχύει όταν το περιεχόμενο δεν είναι πολύ δημοφιλές αλλά έχει μεγάλη αξία για τους χρήστες που το επιθυμούν. Παρόμοια, αν το περιεχόμενο είναι περισσότερο δημοφιλές αλλά $W \gg V$, ο έντονος ανταγωνισμός μπορεί και πάλι να εμποδίσει την αποδοτική διανομή του περιεχομένου. Από την άλλη πλευρά, αν το περιεχόμενο είναι πολύ δημοφιλές και το W σχετικά κοντά στο V , μπορεί να υπάρχει σημαντική πιθανότητα ότι τουλάχιστον ένας χρήστης με τόσο υψηλή χρησιμότητα θα επιλέξει να αγοράσει το περιεχόμενο, ακόμα και αν το κέρδος από την μεταπώληση δεν είναι υψηλό. Το άνω φράγμα για το αναμενόμενο κέρδος προκύπτει για $N \rightarrow \infty$. Όσο το πλήθος των χρηστών μεγαλώνει, η πιθανότητα ένας χρήστης να κερδίσει στη δημοπρασία τείνει στο μηδέν, και αν ο ανταγωνισμός είναι ανεξέλεγκτος οι τιμές επίσης τείνουν στο μηδέν.

7.2.1 Υπολογισμός της κοινωνικής ευημερίας και του αναμενόμενου κέρδους

Συζητάμε στη συνέχεια τα μοντέλα αγοράς και τις αντίστοιχες τιμές και κέρδη ανάλογα με το επίπεδο του ανταγωνισμού. Όπως δείχνουμε, το επίπεδο του ανταγωνισμού επηρεάζει τις αποφάσεις των χρηστών και την κοινωνική ευημερία του συστήματος. Στόχος μας είναι να πείσουμε τον αναγνώστη ότι το μοντέλο μας οδηγεί σε πολλές ενδιαφέρουσες περιπτώσεις σε αναλυτικά επιλύσιμες σχέσεις, οι οποίες ελπίζουμε ότι παρέχουν μία βαθύτερη κατανόηση ως προς την ευαισθησία της απόδοσης του συστήματος ως συνάρτηση των βασικών του παραμέτρων όπως αυτές ορίστηκαν παραπάνω.

Η περίπτωση εξασφάλισης αποκλειστικών δικαιωμάτων διανομής

Αυτή είναι η ακραία περίπτωση του μονοπωλείου, όπου ο χρήστης 0 (αυτός που αποφασίζει να αγοράσει το περιεχόμενο από την εξωτερική του πηγή) έχει την αποκλειστικότητα στη μεταπώληση του περιεχομένου. Ο χρήστης αυτός, δεδομένης της διαθέσιμης πληροφορίας, θα πρέπει να επιλέξει τη βέλτιστη τιμή w με την οποία θα χρεώνει για το περιεχόμενο με σκοπό

να μεγιστοποιήσει το αναμενόμενο κέρδος του \bar{R}_m από την μεταπώληση. Αν το αναμενόμενο αυτό κέρδος είναι μεγαλύτερο από τη διαφορά $W - u_0$ τότε θα αποφασίσει όντως να αγοράσει το περιεχόμενο.

Το απλό αυτό κριτήριο έχει νόημα όταν ο χρήστης δεν διστάζει να ρισκάρει. Γενικότερα, μία τέτοια απόφαση θα εξαρτάται από τις διακυμάνσεις της τυχαίας μεταβλητής R_m . Σε ένα πιο εξελιγμένο σενάριο η απόφαση του χρήστη μπορεί να είναι μία πιθανότητα η οποία θα αντιστοιχεί στη βέλτιστη στρατηγική του στο αντίστοιχο παίγνιο όπου όλοι οι χρήστες είναι αντιμέτωποι με τις ίδιες αποφάσεις. Τέλος, παρατηρείστε ότι ακόμα και αν ένας χρήστης μπορεί να έχει θετικό αναμενόμενο καθαρό όφελος επιλέγοντας να είναι ο μοναδικός πωλητής, μπορεί να επιλέξει να περιμένει κάποιος άλλος χρήστης να πάρει το ρίσκο αυτό. Ο λόγος είναι ότι τότε θα μπορεί να αγοράσει το περιεχόμενο σε πολύ μικρότερη τιμή από W , πιθανά εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο καθαρό όφελος. Αυτό είναι ένα στιγμιότυπο του προβλήματος της ανέξοδης συμμετοχής: υπάρχει η πιθανότητα κανένας χρήστης να μην αποφασίσει να πάρει το ρίσκο και έτσι όλοι να καταλήξουν σε μηδενικό όφελος.

Περιγράφουμε εν συντομία πώς μπορεί κανείς να υπολογίσει το αναμενόμενο κέρδος από τη μεταπώληση. Έστω ότι c_i είναι το κόστος μεταφοράς του περιεχομένου από τον χρήστη θ στον χρήστη i . Υποθέτουμε για απλότητα ότι τα c_{ij} είναι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανομημένα στο διάστημα $[0, C]$. Υποθέτουμε επίσης ότι η τιμή του c_i γίνεται γνωστή μόνο όταν ο χρήστης i κάνει αίτηση για το περιεχόμενο ενώ στον χρήστη θ είναι γνωστή μόνο η κατανομή της. Παρόμοια, η τιμή της αξίας του περιεχομένου u_i για τον χρήστη i είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, V]$. Έστω w η τιμή που επιλέγει ο χρήστης θ να αποσταλεί στον χρήστη i αφού κάνει αίτηση για το συγκεκριμένο περιεχόμενο. Αν $u_i < w + c_i$, τότε ο χρήστης i δεν θα δεχθεί να αγοράσει το περιεχόμενο και ο χρήστης θ δεν θα αποκομίσει κανένα κέρδος από τη συναλλαγή αυτή. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα πρέπει να λύσει ο χρήστης θ έχει ως εξής:

$$\max_w R(w) = wP[u > c + w], \quad (7.1)$$

όπου για απλότητα έχουμε απαλείψει τον υποδείκτη i . Λύνοντας το (7.1) παίρνουμε ότι

$$0 \leq C \leq 2V/3 \quad : \quad w^* = V/2 - C/4, \quad R^* = \frac{[V - C/2]^2}{4V}, \quad (7.2)$$

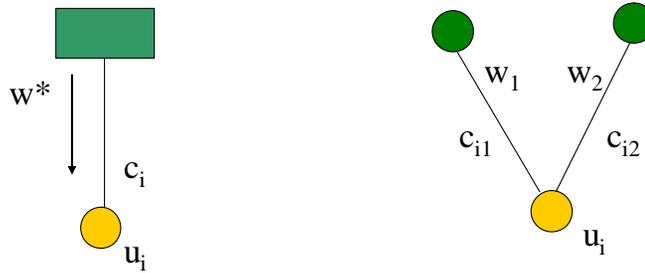
$$2V/3 \leq C \leq V \quad : \quad w^* = V/3, \quad R^* = 2V^2/27C. \quad (7.3)$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε τώρα το συνολικό μέσο κέρδος $\bar{R}_m(N)$ πολλαπλασιάζοντας το R^* με το πλήθος των χρηστών N .

Για να υπολογίσουμε την κοινωνική ευημερία πρέπει να υπολογίσουμε την μέση αξία ενός χρήστη που αποδέχεται μία τέτοια προσφορά και στη συνέχεια να την πολλαπλασιάσουμε με το μέσο πλήθος των χρηστών αυτών. Για να το κάνουμε αυτό πρέπει να υπολογίσουμε την δεσμευμένη κατανομή της αξίας ενός χρήστη δεδομένου ότι έχει αποδεχθεί την τιμή w^* . Αυτό μπορεί να υπολογισθεί αναλυτικά. Για παράδειγμα, αν $C \leq 2V/3$, η αναμενόμενη τιμή του u_i ισούται με $\frac{7C^2+12CV-36V^2}{24(C-2V)}$. Το μέσο πλήθος των χρηστών που τελικά θα αποδεχθούν την προσφορά είναι $NP[u > c + w^*]$. Επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε την αναμενόμενη κοινωνική ευημερία, SW_m , δεδομένου ότι το περιεχόμενο εισάγεται στην ομάδα:

$$SW_m = NP[u > c + w^*] \frac{7C^2 + 12CV - 36V^2}{24(C - 2V)}, \quad (7.4)$$

για $C \leq 2V/3$, και ομοίως για $V \geq C \geq 2V/3$. Πολλαπλασιάζοντας με την πιθανότητα ότι τουλάχιστον ένας χρήστης θα αποφασίσει να αγοράσει αρχικά το περιεχόμενο, $P_b = [1 - (1 - P[u > W + \bar{R}_m(N)])^N]$, μπορούμε να υπολογίσουμε την αναμενόμενη κοινωνική ευημερία $S\bar{W}_m = P_b SW_m$.



(α') Εξασφάλιση αποκλειστικότητας: Ο χρήστης i αγοράζει το περιεχόμενο αν $u_i > c_i + w^*$.

(β') Ελεγχόμενος ανταγωνισμός (για $d = 2$): Ο χρήστης i επιλέγει $\min_j (c_{ij} + w_j)$ έτσι ώστε $u_i > c_{ij} + w_j$, $j = 1, 2$.

Σχήμα 7.2: Τα δύο μοντέλα πληροφορίας

Η περίπτωση του ελεγχόμενου ανταγωνισμού

Στην περίπτωση αυτή επιτρέπουμε σε d χρήστες να ανταγωνιστούν για κάθε αίτηση για περιεχόμενο. Αυτοί επιλέγονται τυχαία ανάμεσα στους χρήστες που έχουν ήδη αγοράσει το περιεχόμενο. Θεωρούμε την ενδεικτική περίπτωση όπου $d = 2$. Για να απλοποιήσουμε

το συμβολισμό θεωρείστε την περίπτωση όπου οι χρήστες 1 και 2 ανταγωνίζονται για μία συγκεκριμένη αίτηση ενός τρίτου χρήστη. Έστω c_i και w_i , $i = 1, 2$, το κόστος και η τιμή που αντιστοιχεί στον κάθε πωλητή.

Οι τιμές w_i είναι οι λύσεις του ακόλουθου παιγνίου. Θεωρείστε τον χρήστη 1. Υποθέτοντας ότι ο χρήστης 2 έχει επιλέξει την τιμή w_2 , επιλέγει την τιμή του $w_1(w_2)$ με σκοπό να μεγιστοποιήσει το αναμενόμενο κέρδος του $R_1(w_1) = w_1 P[w_1 + c_1 < w_2 + c_2 \wedge w_1 + c_1 < u]$. Για απλότητα υποθέστε ότι $V \gg C$ οπότε μπορούμε να αγνοήσουμε το δεύτερο γεγονός στον υπολογισμό της παραπάνω πιθανότητας, και επομένως θα υπολογίσουμε μία προσέγγιση (μεγαλύτερη) της βέλτιστης τιμής. Απλοί υπολογισμοί δείχνουν ότι $w_1^* = \frac{C+w_2}{3}$ και καθώς στο σημείο ισορροπίας και οι δύο χρήστες θα δημοσιεύσουν την ίδια τιμή, θα έχουμε ότι $w_1^* = w_2^* = \frac{C}{2}$. Αυτό σημαίνει ότι κάθε πωλητής έχει την ίδια πιθανότητα να κερδίσει ανάλογα με το εάν η σύνδεσή του προκαλεί μικρότερο κόστος στον αγοραστή σε σύγκριση με τον ανταγωνιστή του. Με άλλα λόγια, κάθε ένας από αυτούς θα πουλήσει το περιεχόμενο με πιθανότητα 1/2 (π.χ. για τον χρήστη 2, η πιθανότητα του ενδεχομένου $c_{i1} > c_{i2}$). Επομένως

$$w_1^* = \frac{C}{2}, \quad R_1(w_1^*) = \frac{C}{4} P[w_1^* + c < u] = \frac{C(V - C)}{4V}. \quad (7.5)$$

Παρατηρείστε ότι και πάλι στην περίπτωση αυτή το περιεχόμενο δεν θα πουληθεί πάντα, παρόλο που η τιμή θα είναι χαμηλότερη από αυτή της περίπτωσης της (7.1). Η πιθανότητα να πουληθεί το αντικείμενο αν το C είναι μικρό σε σύγκριση με το V , αν $C \leq 2V/3$, είναι $P_u = (V - C)/V$.

Ας υπολογίσουμε τώρα το κέρδος του χρήστη 0. Την πρώτη φορά που θα μεταπωλήσει το περιεχόμενο θα χρησιμοποιήσει την (7.1) καθώς θα είναι ο μοναδικός χρήστης που μπορεί να το πουλήσει. Εν συνεχεία θα χρησιμοποιεί πάντα την τιμή w_1^* . Ποιό θα είναι το συνολικό του κέρδος; Υποθέτοντας ότι οι χρήστες επιλέγονται τυχαία από το σύνολο S των υποψήφιων πωλητών, η πιθανότητα ότι ο χρήστης 0 θα επιλεγεί στο ζευγάρι που θα ανταγωνιστεί είναι $2/|S|$.

Δεσμευμένο στο γεγονός ότι M χρήστες θα αγοράσουν τελικά το περιεχόμενο, όπου το M ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή με παράμετρο P_u , το αναμενόμενο κέρδος του χρήστη 0 στην περίπτωση αυτή του δυοπωλείου είναι

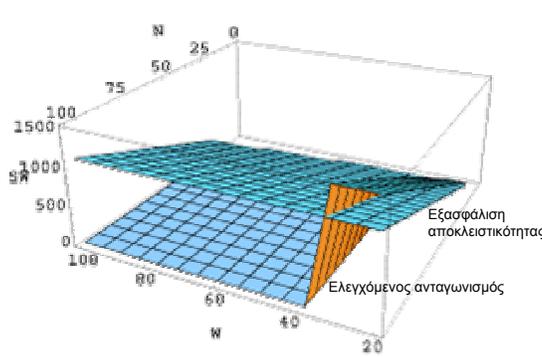
$$\bar{R}_d(M) = \frac{[V - C/2]^2}{4V} + \frac{C}{2} \frac{1}{2} \sum_{k=2}^M \frac{2}{k} \approx \frac{[V - C/2]^2}{4V} + \frac{C}{2} [\gamma + \ln M - 1], \quad (7.6)$$

όπου γ είναι η σταθερά Euler-Mascheroni και $M = NP[w_1^* + c < u]$. Από την (7.6) μπορούμε να υπολογίσουμε ένα άνω φράγμα για το συνολικό αναμενόμενο κέρδος του χρήστη 0 στην περίπτωση του ελεγχόμενου ανταγωνισμού:

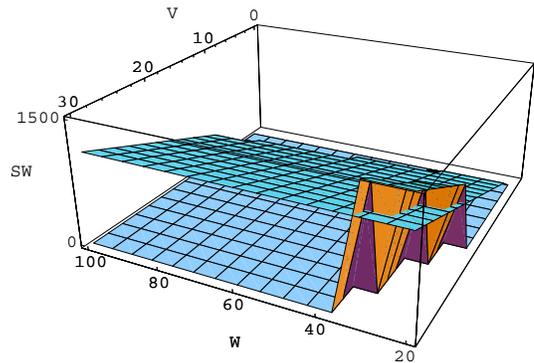
$$\bar{R}_d(N) = \frac{[V - C/2]^2}{4V} + \frac{C}{2}[\gamma + \ln[NP_u] - 1]. \quad (7.7)$$

Παρόμοια με την περίπτωση της εξασφάλισης αποκλειστικών δικαιωμάτων διανομής μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική κοινωνική ευημερία. Για παράδειγμα, για την περίπτωση όπου $C \leq 2V/3$, $SW_d = N \frac{13C^2 - 12V^2}{24V}$ και επομένως

$$S\bar{W}_d = [1 - (1 - \frac{V - W + \bar{R}_d(M)}{V})^N]SW_d. \quad (7.8)$$



(α') Ως συνάρτηση των (W,N), για $V = 30$



(β') Ως συνάρτηση των (W,V), για $N = 100$

Σχήμα 7.3: Σύγκριση της αναμενόμενης κοινωνικής ευημερίας για τα δύο μοντέλα πληροφορίας

Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζουμε τη σύγκριση των δύο μοντέλων αυτών με βάση την παραπάνω ανάλυση. Όπως δείχνουν και οι δύο γραφικές παραστάσεις, όταν το V δεν είναι κοντά στο W , η πιθανότητα ότι ένας χρήστης θα αποφασίσει να πάρει το ρίσκο και να αγοράσει το περιεχόμενο στην περίπτωση του ελεγχόμενου ανταγωνισμού είναι σχεδόν μηδέν όπως είναι επίσης και το αναμενόμενο κέρδος. Έτσι, όταν οι τιμές των παραμέτρων είναι τέτοιες, το σενάριο της εξασφάλισης της αποκλειστικότητας στη διανομή είναι το μόνο βιώσιμο και η κοινωνική ευημερία που προκύπτει αυξάνεται με το πλήθος των συμμετεχόντων, καθώς το αναμενόμενο κέρδος του χρήστη 0 και η συνολική αξία αυξάνεται, όπως επίσης και η πιθανότητα της αρχικής αγοράς.

Αντίθετα, όταν το W είναι κοντά στο V (όταν δηλαδή στο συγκεκριμένο αριθμητικό παράδειγμα είναι μικρότερο από 40 όταν το V ισούται με 30) η πιθανότητα αυτή γίνεται θετική και στο σενάριο του ελεγχόμενου ανταγωνισμού, και καθώς οι τιμές είναι πολύ χαμηλότερες στην περίπτωση αυτή, περισσότεροι χρήστες θα αγοράσουν τελικά το περιεχόμενο και άρα θα είναι μεγαλύτερη η κοινωνική ευημερία που θα επιτευχθεί συγκριτικά με το σενάριο της εξασφάλισης της αποκλειστικότητας, με αυξανόμενη διαφορά καθώς τα N και V αυξάνονται.

7.3 Συζήτηση και μελλοντική εργασία

Το μοντέλο αγοράς που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο αυτό ίσως μοιάζει μη εφαρμόσιμο σε ένα ρεαλιστικό πρόβλημα διανομής περιεχομένου στο Διαδίκτυο σήμερα. Το πιο σημαντικό συστατικό του που καθιστά μία τέτοια κριτική δικαιολογημένη είναι το γεγονός ότι απαιτεί την υλοποίηση όλης της απαραίτητης λειτουργικότητας για την υποστήριξη μίας κατανεμημένης αγοράς. Επίσης, εκτός από τα δύσκολα ερευνητικά προβλήματα που προκύπτουν σχετικά με την υλοποίηση της αγοράς, οι δυναμικές χρεώσεις είναι γενικά ανεπιθύμητες από τους χρήστες, και ειδικά στο Διαδίκτυο, οι οποίο προτιμούν εν γένει προβλεπόμενο κόστος και ποιότητα υπηρεσίας στις συναλλαγές τους. Τέλος, σε περιπτώσεις όπου το αρχικό κόστος W σχετίζεται με την αγορά περιεχομένου με κατοχυρωμένα πνευματικά δικαιώματα, η αναδιανομή του περιεχομένου αυτού υπόκειται σε νομικές κυρώσεις, ειδικά εφόσον η υλοποίηση του μηχανισμού αγοράς απαιτεί την ύπαρξη έμπιστων οντοτήτων οι οποίες θα ήταν ευάλωτες σε μηνύσεις από τους κατόχους των πνευματικών δικαιωμάτων.

Ωστόσο, πιστεύουμε ότι το παίγνιο που προκύπτει είναι θεωρητικά ενδιαφέρον και είναι πιθανόν να υπάρξουν συνθήκες στο μέλλον που να καθιστούν την ανάλυση μας χρήσιμη. Παρατηρείστε ότι έχουμε ουσιαστικά να λύσουμε ένα πρόβλημα διαμοιρασμού κόστους, παρόμοιο με το διαμοιρασμό κόστους στην πολυμετάδοση και την κατασκευή ενός κοινού αγαθού (όπως στο μοντέλο του Κεφαλαίου 4 με την επιπλέον υπόθεση ότι η ποσότητα του αγαθού είναι καθορισμένη). Πιο συγκεκριμένα, οι χρήστες θα πρέπει να αποφασίσουν πώς να μοιράσουν το κόστος ενός ακριβού αντικειμένου, το οποίο από τη στιγμή που θα αγοραστεί από έναν από αυτούς μπορεί να γίνει διαθέσιμο και στους υπολοίπους με μικρό κόστος. Υπάρχουν όμως επίσης ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του παιγνίου που ορίσαμε στο κεφάλαιο αυτό.

Πρώτον, το αγαθό (στην περίπτωση μας το περιεχόμενο) δεν μπορεί να διατεθεί ταυτόχρονα σε όλους τους χρήστες (όπως στην περίπτωση της πολυμετάδοσης για παράδειγμα). Στην πράξη, αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι τεχνικά μόνο ένας χρήστης μπορεί να

αποκτήσει το αντικείμενο ή επειδή η συμμετοχή στην κοινότητα αλλάζει με το χρόνο (ή επειδή οι χρήστες είναι ανώνυμοι). Έτσι, στο δικό μας παίγνιο ένας μόνο χρήστης είναι υπεύθυνος να πάρει το ρίσκο για την αρχική αγορά του αντικειμένου ελπίζοντας ότι θα αποσβέσει το κόστος του και επομένως τελικά θα το μοιραστεί με τα υπόλοιπα μέλη της κοινότητας. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες δεν μπορούν να συνεργαστούν για να αποφασίσουν από κοινού αν θα αγοράσουν το αγαθό και τι θα πρέπει να πληρώσει ο καθένας τους όπως υποθέτουν οι κλασικοί μηχανισμοί παροχής και κατανομής πόρων της θεωρίας των οικονομικών.

Δεύτερον, στο παίγνιο μας έχουμε υποθέσει ότι το κόστος διανομής του περιεχομένου μεταξύ των χρηστών της ομάδας δεν είναι μηδενικό. Το χαρακτηριστικό αυτό εκτός του ότι δικαιολογεί τη σειριακή αγορά του περιεχομένου καθιστά επίσης την υλοποίηση ενός μηχανισμού αγοράς μία λογική προσέγγιση όπως έχουμε ήδη εξηγήσει. Ασφαλώς, οι υποθέσεις σχετικά με τη διαθέσιμη πληροφορία για τα κόστη αυτά παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τις ιδιότητες του παιγνίου που προκύπτει. Για παράδειγμα, διαφορετικά από την παραπάνω ανάλυση, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι το εσωτερικό κόστος διανομής είναι επίσης ορατό στους πωλητές του περιεχομένου. Στην περίπτωση αυτή, το περιεχόμενο θα το πουλούσε ο χρήστης με το μικρότερο κόστος καθώς θα μπορούσε να δημοσιεύσει μία τιμή που να ισούται με το μικρότερο κόστος των ανταγωνιστών του. Τότε, ο χρήστης 0 θα μπορούσε να μεταπωλεί το περιεχόμενο μέχρι ένας χρήστης με μικρότερο κόστος το αγοράσει. Και πάλι, θα μπορούσε κανείς να πραγματοποιήσει παρόμοιους υπολογισμούς με την παραπάνω ανάλυση για να εκτιμήσει την κοινωνική ευημερία που επιτυγχάνεται σε διαφορετικά σενάρια περιορισμού του ανταγωνισμού.

Κεφάλαιο 8

Επίλογος

8.1 Περίληψη

Αν και οι βασικές αρχές των διομήτιμων συστημάτων δεν είναι πραγματικά καινούργιες έννοιες, τα συστήματα αυτά έχουν προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον στην ερευνητική και διαδικτυακή κοινότητα τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων των προσωπικών υπολογιστών και της επέκτασης των ευρυζωνικών δικτύων πρόσβασης που έχουν δώσει τη δυνατότητα για την επεκτάσιμη υλοποίηση πολλών ενδιαφέρουσων εφαρμογών. Ωστόσο, μέχρι σήμερα ο διαμοιρασμός αρχείων παραμένει η πιο δημοφιλής διομήτιμη εφαρμογή και η μόνη που έχει αναπτυχθεί σε ευρεία κλίμακα ανάμεσα σε μία μεγάλη ποικιλία πιθανών εφαρμογών με σκοπό την εκμετάλλευση τοπικών πόρων διαφορετικού τύπου όπως είναι η υπολογιστική ισχύς, η μνήμη, το εύρος ζώνης πρόσβασης ή υπηρεσίες όπως η προώθηση πακέτων, η προώθηση κλήσεων, κ.ά. Η θεμελιώδης διαφορά από τα παραδοσιακά κατανεμημένα συστήματα είναι ότι στα διομήτιμα συστήματα οι κόμβοι παίρνουν τις αποφάσεις τους με βάση το προσωπικό τους συμφέρον (και όχι έναν κοινό σκοπό) αφού οι πόροι τους βρίσκονται υπό τον έλεγχό τους και φανερά ένας σχεδιαστής με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος θα πρέπει να το λάβει αυτό υπόψη του.

Το γεγονός λοιπόν ότι η ιδιοτελής συμπεριφορά θα μπορούσε σε πολλές περιπτώσεις να είναι καταστροφική για τη γενικότερη αποδοτικότητα του συστήματος καθιστά την παροχή των κατάλληλων κινήτρων στους χρήστες, ώστε να ενεργούν με κριτήριο το κοινό καλό, ένα πολύ σημαντικό και δύσκολο πρόβλημα. Η θεωρία των οικονομικών αναζητάει απαντήσεις εδώ και πολλές δεκαετίες ακριβώς σε τέτοιου είδους ερωτήματα αλλά υπάρχουν πολλά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των διομήτιμων συστημάτων που προσδίδουν νέο ενδιαφέρον στο πρόβλημα

αυτό.

Οι πόροι και οι ενέργειες όμως που σχετίζονται με τη συμμετοχή ενός χρήστη σε μία διομότιμη κοινότητα σχηματίζουν ένα περίπλοκο πρόβλημα μοντελοποίησης και θα ήταν αδύνατον ένα επιλύσιμο μοντέλο να καταφέρει να εκφράσει όλες τις λεπτομέρειες της λειτουργίας του συστήματος. Επομένως, ένα σημαντικό μέρος της εργασίας μας ήταν να θεωρήσουμε τις πιο σημαντικές παραμέτρους της συμπεριφοράς των χρηστών σε ένα διομότιμο σύστημα, να κατανοήσουμε και να κατηγοριοποιήσουμε τις βασικές έννοιες και τη σχετική βιβλιογραφία σε ό,τι αφορά την παροχή κατάλληλων κινήτρων, και στη συνέχεια να κάνουμε τις σωστές αφαιρέσεις ώστε να ορίσουμε ένα οικονομικό μοντέλο το οποίο να είναι συγχρόνως ενδιαφέρον και επιλύσιμο.

Εστίασαμε στις εφαρμογές διομότιμου διαμοιρασμού αρχείων και προσδιορίσαμε το κοινό αγαθό που παρέχεται (τη διαθεσιμότητα του περιεχομένου) ως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό τους, το οποίο πιστεύουμε ότι είναι επίσης το κυριότερο χαρακτηριστικό και άλλων διομότιμων εφαρμογών όπως τα επιστημονικά πλέγματα και ο διομότιμος διαμοιρασμός ασύρματης πρόσβασης υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Τρία χαρακτηριστικά των διομότιμων συστημάτων που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ανάλυση μας ήταν τα εξής: το μεγάλο πλήθος των συμμετεχόντων, ο υψηλός βαθμός ετερογένειας, και οι σημαντικοί περιορισμοί και απαιτήσεις της υλοποίησης εξαιτίας του πλήρως κατανεμημένου και επισφαλούς περιβάλλοντος. Το τελευταίο μάλιστα είναι και αυτό που προσδίδει νέο ενδιαφέρον σε αυτό το κλασικό, και ιδιαίτερα δύσκολο, πρόβλημα στη βιβλιογραφία της οικονομικής επιστήμης.

Το μεγάλο μέγεθος του συστήματος μειώνει, εν γένει, τα κίνητρα των χρηστών να συνεισφέρουν την απαιτούμενη ποσότητα πόρων για την παροχή ενός αγαθού κοινής ωφέλειας. Ωστόσο, όταν είναι δυνατός ο αποκλεισμός κάποιων συμμετεχόντων, όπως προκύπτει από πρόσφατα σημαντικά ασυμπτωτικά αποτελέσματα (δείτε το [30] και τις αναφορές που περιλαμβάνονται σε αυτό), ένας μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς, ο οποίος απαιτεί από όλους τους συμμετέχοντες να προσφέρουν την ίδια —προκαθορισμένη— ποσότητα πόρων επιτυγχάνει τιμή κοινωνικής ευημερίας που απέχει $O(1/n)$ από αυτή που είναι δυνατό να επιτευχθεί από τον θεωρητικά βέλτιστο μηχανισμό για το ίδιο πρόβλημα. Καταδείξαμε τις πολύ ελκυστικές ιδιότητες του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς στα πλαίσια του μοντέλου μας για το διαμοιρασμό αρχείων σε σύγκριση με άλλους εναλλακτικούς μηχανισμούς και συζητήσαμε ορισμένα θεωρητικά θέματα πρακτικού ενδιαφέροντος όπως η σημασία της ετερογένειας στη δημοτικότητα των αρχείων, οι συνθήκες που απαιτούνται ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος, και πιθανούς τρόπους για τον υπολογισμό παραμέτρων του που είχαμε

αρχικά υποθέσει ότι είναι γνωστοί.

Η απόδοση του μηχανισμού προκαθορισμένης συνεισφοράς, ωστόσο, μειώνεται όσο περισσότερο ετερογενείς είναι οι προτιμήσεις των χρηστών. Συνεπώς, η κατηγοριοποίηση τους σε διαφορετικές ομάδες θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη. Έτσι, μελετήσαμε υπό ποιές υποθέσεις θα μπορούσε κανείς να εκμεταλλευτεί την επιπλέον αυτή διαθέσιμη πληροφορία και τα κίνητρα που χρειάζεται να δοθούν στους χρήστες ώστε είτε να συμφωνήσουν να έχουν διαφορετική αντιμετώπιση είτε να δηλώνουν την κατηγορία στην οποία πραγματικά ανήκουν όταν αυτό δεν μπορεί να διαπιστωθεί βάσει αντικειμενικών χαρακτηριστικών.

Επιπλέον, το πλήρως κατανεμημένο και επισφαλές περιβάλλον των διομήτιμων συστημάτων καθιστά ακόμα και έναν τόσο απλό μηχανισμό (όπως είναι ο μηχανισμός προκαθορισμένης συνεισφοράς) πολύ δύσκολο να επιβληθεί στην πράξη καθώς απαιτείται κάποιου είδους μέτρηση και καταγραφή της συνεισφοράς των χρηστών στο χρόνο. Για να ξεπεράσουμε το εμπόδιο αυτό, προτείναμε έναν μηχανισμό επιβολής χωρίς χρήση μνήμης ο οποίος εξασφαλίζει ότι οι ομότιμοι χρήστες συνεισφέρουν στο σύστημα σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα περιεχομένου ενόσω καταναλώνουν πόρους προς όφελος τους επιβάλλοντας έναν προκαθορισμένο (όχι πολύ υψηλό) ρυθμό αναφόρτωσης δεδομένων για όλους τους χρήστες. Παρουσιάσαμε τις βασικές απαιτήσεις για την υλοποίηση της απαραίτητης λειτουργικότητας και ορίσαμε ένα κατάλληλο οικονομικό μοντέλο. Στη συνέχεια αξιολογήσαμε την επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού ως προς την οικονομική αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται, η οποία για ορισμένες τιμές των παραμέτρων του συστήματος μπορεί να είναι συγκρίσιμη με τη βέλτιστη.

Επιπρόσθετα, το μοντέλο αυτό παρέχει τις προϋποθέσεις για να συγκρίνουμε τον μηχανισμό μας με άλλους μηχανισμούς που παρέχουν κίνητρα για συνεισφορά θέτοντας περιορισμούς στην κατανάλωση πόρων, όπως ο δημοφιλής στη βιβλιογραφία κανόνας που απαιτεί τον ισοσκελισμό των αναφορτώσεων και καταφορτώσεων που πραγματοποιούνται από τον κάθε ομότιμο χρήστη. Δείξαμε λοιπόν ότι καθώς στον προτεινόμενο μηχανισμό μπορούμε να ρυθμίσουμε κατάλληλα την κρίσιμη παράμετρο του (το χρόνο που απαιτείται να παραμένουν οι χρήστες συνεδεδεμένοι για κάθε καταφόρτωση) οδηγούμαστε σε αυξημένη αποδοτικότητα σε σύγκριση με αυτή που επιτυγχάνεται από τον κανόνα που εξισώνει τις αναφορτώσεις και τις καταφορτώσεις ανά χρήστη. Επιπλέον, η ελαστικότητα του μηχανισμού μας σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη αναλογία αναφορτώσεων και καταφορτώσεων ανά χρήστη εξασφαλίζει μεγαλύτερη σταθερότητα για το σύστημα.

Πιστεύουμε ότι αυτό το τμήμα της συνεισφοράς μας παρέχει μία τεκμηριωμένη βάση για την κατανόηση των θεωρητικών και πρακτικών ζητημάτων σχετικών με την παροχή κινήτρων για

τη συνεισφορά πόρων στα διομότιμα συστήματα που έχουν χαρακτηριστικά ενός κοινού αγαθού, όπως είναι ο διομότιμος διαμοιρασμός αρχείων. Οι συγκεκριμένες λύσεις που προτάθηκαν για την βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος οδηγούν σε μερικές ενδιαφέρουσες και πρακτικές προσεγγίσεις για την παροχή κινήτρων ως προς τη διαθεσιμότητα περιεχομένου. Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια των πρώτων μας προσπαθειών μοντελοποίησης προτείναμε δύο ακόμα ενδιαφέροντα οικονομικά μοντέλα εστιάζοντας σε διαφορετικές διαστάσεις της λειτουργίας ενός διομότιμου συστημάτων διαμοιρασμού αρχείων.

Πρώτον, προτείναμε ένα πιο λεπτομερές οικονομικό μοντέλο το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος αναφόρτωσης στο κόστος διαμοιρασμού αρχείων. Στα πλαίσια του μοντέλου αυτού εισαγάγαμε μία γενική κατηγορία ανταποδοτικών κανόνων για την επιβολή μίας επιθυμητής σχέσης ανάμεσα στην κατανάλωση και τη συνεισφορά πόρων και καταδείξαμε τις δυσκολίες που προκύπτουν εξαιτίας της πιο λεπτομερούς αυτής μοντελοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, δείξαμε ότι μία γραμμική τέτοια σχέση θα μπορούσε να μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα του συστήματος αλλά για τον υπολογισμό των συντελεστών της θα χρειαζόμασταν πλήρη πληροφόρηση σε ό,τι αφορά τον τύπο των χρηστών και, πιο σημαντικά, οι συντελεστές αυτοί θα έπρεπε να είναι εν γένει διαφορετικοί για τον κάθε χρήστη.

Τέλος, περιγράψαμε ένα ενδιαφέρον παίγνιο διάδοσης περιεχομένου σχετικό με το διαμοιρασμό αντικειμένων σε μία διομότιμη κοινότητα των οποίων η απόκτηση επιφέρει σημαντικό κόστος και ορίζουμε ένα κατάλληλο μοντέλο αγοράς για διάδοση περιεχομένου το οποίο οδηγεί σε χρήσιμα αναλυτικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο αυτό για να μελετήσουμε υπό ποιές συνθήκες συγκεκριμένα προνόμια, και τι είδους, θα πρέπει να εκχωρηθούν στους χρήστες που επιλέγουν να αποκτήσουν και να διαμοιραστούν αντικείμενα μεγάλου κόστους, ώστε να είναι επωφελές για αυτούς να το κάνουν.

8.2 Μελλοντική εργασία

Εκτός από τις πιθανές επεκτάσεις του μοντέλου αγοράς για διάδοση περιεχομένου που έχουν αφεθεί ως θέματα για μελλοντική έρευνα, και τα οποία αναλύσαμε λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, πιστεύουμε ότι υπάρχουν δύο σημαντικές κατευθύνσεις για μελλοντική εργασία με αφετηρία τη διατριβή αυτή.

Η πρώτη είναι η περαιτέρω μελέτη των θεωρητικών και πρακτικών ζητημάτων που προκύπτουν στα πλαίσια του μοντέλου μας για τη διαθεσιμότητα περιεχομένου και τους προτεινόμενους μηχανισμούς κινήτρων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας ενός διομότιμου συστήματος.

Ένα σημαντικό πρακτικό, αλλά και θεωρητικό, ζήτημα που δεν έχουμε αντιμετωπίσει είναι το δυναμικό περιβάλλον των διομοτίμων συστημάτων. Θα μπορούσε λοιπόν κανείς να μελετήσει τη σχεδίαση κατάλληλων αλγορίθμων, οι οποίοι θα παίρνουν ως είσοδο μετρήσεις για τη συμμετοχή των χρηστών και τη δραστηριότητά τους και θα ρυθμίζουν δυναμικά τις βασικές παραμέτρους του συστήματος (όπως για παράδειγμα την τιμή ενός καθορισμένου ρυθμού αναφόρτωσης) με σκοπό το σύστημα να φτάσει σε αποδοτικά σημεία ισορροπίας.

Επιπλέον, είναι απαραίτητη η σε βάθος μελέτη πιο ρεαλιστικών μοντέλων συμπεριφοράς ώστε να ελέγξει κανείς την εγγυρότητα ορισμένων σημαντικών απλουστευτικών υποθέσεων που έγιναν κατά τη διάρκεια της ανάλυσής μας και να αποφασίσει για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις ενός πραγματικού συστήματος που θα υλοποιεί τους προτεινόμενους μηχανισμούς κινήτρων. Στο πλαίσιο αυτό, θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του και την κοινωνική διάσταση της συμμετοχής των χρηστών σε ένα διομοτίμο σύστημα, η οποία όπως προκύπτει από πραγματικές υλοποιήσεις μπορεί να παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Στην εργασία μας έχουμε προσπαθήσει να μην επηρεάσουμε αρνητικά το συλλογικό πνεύμα που ενυπάρχει στην πλειοψηφία των διομοτίμων εφαρμογών· περισσότερη όμως μελέτη χρειάζεται για να περιγράψει κανείς αυστηρά στο πλαίσιο αυτό έννοιες που σχετίζονται με τις κοινωνικές επιστήμες και να ορίσει κατάλληλα κοινωνικό-οικονομικά μοντέλα που να τις λαμβάνουν υπόψη τους.

Η δεύτερη βασική κατεύθυνση για μελλοντική εργασία είναι η εφαρμογή των βασικών ιδεών και εννοιών που αναπτύχθηκαν στη διατριβή αυτή στα πλαίσια της εφαρμογής διαμοιρασμού αρχείων για άλλα είδη διομοτίμων συστημάτων. Έχουμε ήδη εντοπίσει τη σύνδεση του μοντέλου μας για κοινά αγαθά με τις εφαρμογές διαμοιρασμού ασύρματης πρόσβασης και τα επιστημονικά πλέγματα. Ορισμένες επεκτάσεις όμως θα πρέπει να γίνουν στο μοντέλο μας ώστε να λαμβάνει υπόψη του τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των διαφορετικών εφαρμογών όπως για παράδειγμα η ύπαρξη συμφόρησης κατά την κατανάλωση των πόρων του συστήματος. Τέλος, θα μπορούσε κανείς να εντοπίσει εφαρμογές (υπάρχουσες ή μελλοντικές) στις οποίες θα μπορούσε να εφαρμοστεί με επιτυχία ένας μηχανισμός επιβολής της συνεισφοράς κατά την κατανάλωση αλλά και να επινοήσει τεχνικές ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της συνεισφοράς των χρηστών συνολικά προς το σύστημα ενώ καταναλώνουν πόρους για προσωπικό τους όφελος (όπως ο μηχανισμός που σκιαγραφήθηκε στην Ενότητα 5.5.1 για την παροχή κινήτρων για προώθηση κινήτρων στα αυθόρμητα δίκτυα).

Βιβλιογραφία

- [1] E. Adar and B. A. Huberman. Free riding on gnutella. *First Monday*, 5(10), 2000.
- [2] N. I. Al-Najjar and R. Smorodinsky. Pivotal players and the characterization of influence. *Journal of Economic Theory*, 92(2):318–342, 2000.
- [3] K. G. Anagnostakis and M. B. Greenwald. Exchange-based Incentive Mechanisms for Peer-to-Peer File Sharing. In *Proceedings of ICDCS'04: 24th IEEE International Conference on Distributed Computing*, 2004.
- [4] N. Andrade, M. Mowbray, A. Lima, G. Wagner, and M. Ripeanu. Influences on Cooperation in Bittorrent Communities. ACM SIGCOMM Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, 2005.
- [5] J. Andreoni. Warm-glow versus cold-prickle: The effects of positive and negative framing on cooperation in experiments. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(1):1–21, 1995.
- [6] P. Antoniadis and C. Courcoubetis. Market models for P2P content distribution. In *Proceedings of AP2PC'02, Bologna, Italy*, 2002.
- [7] P. Antoniadis, C. Courcoubetis, E. C. Efstathiou, R. Mason, T. G. Papaioannou, G. C. Polyzos, V. Siris, G. D. Stamoulis, B. Strulo, and R. Weber. Specification of Market Management Models for Peer-to-Peer Services (Final Version). MMAPPS deliverable, 2003.
- [8] P. Antoniadis, C. Courcoubetis, E. C. Efstathiou, G. C. Polyzos, and B. Strulo. The case for peer-to-peer wireless lan consortia, 2003. 12th IST Summit on Mobile and Wireless Communications, Aveiro, Portugal.
- [9] P. Antoniadis, C. Courcoubetis, E. C. Efstathiou, G. C. Polyzos, and B. Strulo. Peer-to-Peer Wireless Consortia: Economic Modelling and Architecture. In *Proceedings of Third IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P 2003)*, 2003.

- [10] P. Antoniadis, C. Courcoubetis, and R. Mason. Comparing Economic Incentives in Peer-to-Peer Networks. *Special Issue on Network Economics, Computer Networks, Elsevier*, 45(1):133–146, 2004.
- [11] P. Antoniadis, C. Courcoubetis, and B. Strulo. Incentives for Content Availability in Memory-less Peer-to-Peer File Sharing Systems. *ACM SIGecom Exchanges*, 5(4):11–20, 2005.
- [12] P. Antoniadis, C. Courcoubetis, and R. Weber. An Asymptotically Optimal Scheme for P2P File Sharing. 2nd Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, Harvard University, 2004.
- [13] J. Axelrod. The evolution of cooperation. *N.Y.: Basic Books*, 1984.
- [14] I. D. Baev and R. Rajaraman. Approximation algorithms for data placement in arbitrary networks. In *Proceedings of the 10th Annual Symposium on Discrete Algorithms (ACM-SIAM SODA)*, 2001.
- [15] S. Banerjee, B. Bhattacharjee, and C. Kommareddy. Scalable application layer multicast. In *Proceedings of ACM SIGCOMM, Pittsburgh, PA, USA*, 2002.
- [16] F. Benevenuto, J. Ismael Jr, and J. Almeida. Quantitative evaluation of unstructured peer-to-peer architectures, 2004. International Workshop on Hot Topics in Peer-to-Peer Systems (HOT-P2P'04).
- [17] C. Buragohain, D. Agrawal, and S. Suri. A Game Theoretic Framework for Incentives in P2P Systems. In *Proceedings of the Third IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P 2003), Linkoping, Sweden*, 2003.
- [18] M. Castro, P. Druschel, A. Ganesh, A. Rowstron, and D. S. Wallach. Security for Structured Peer-to-Peer Overlay Networks. In *Proceedings of Multimedia Computing and Networking 2002 (MMCN '02)*, 2002.
- [19] M. Castro, P. Druschel, A.-M. Kermarrec, A. Nandi, A. Rowstron, and A. Singh. Splitstream: High-bandwidth multicast in cooperative environments. In *ACM SOSP, Bolton Landing, NY, USA*, 2003.
- [20] M. Castro, P. Druschel, A.-M. Kermarrec, and A. Rowstron. Scribe: A large-scale and decentralized application-level multicast infrastructure. *IEEE Journal on Selected Areas in Telecommunications*, 20(8):100–110, 2002.
- [21] Y. Chawathe. Scattercast: An architecture for internet broadcast distribution as an infrastructure service, 2000. Ph.D Thesis, University of California, Berkeley.

- [22] A. Cheng and E. Friedman. Sybilproof reputation mechanisms, 2005. ACM SIGCOMM Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems.
- [23] Y. Chu, A. Ganjam, T. S. E. Ng, S. G. Rao, K. Sripanidkulchai, J. Zhan, and H. Zhang. Early experience with an internet broadcast system based on overlay multicast, 2003. Technical Report CMU-CS-03-214, Carnegie Mellon University.
- [24] Y. Chu, S. Rao, and H. Zhang. A case for end system multicast. In *Proceedings of ACM SIGMETRICS, Santa Clara, CA*, 2000.
- [25] Y.-H. Chu, J. Chuang, and H. Zhang. A Case for Taxation in Peer-to-Peer Streaming Broadcast, 2004. ACM SIGCOMM workshop on Practice and Theory of Incentives in Networked Systems.
- [26] B. Cohen. Incentives Build Robustness in BitTorrent. 1st Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, Berkeley, CA, 2003.
- [27] B. F. Cooper and H. Garcia-Molina. Peer-to-peer resource trading in a reliable distributed system. In *Proceedings of the First International Workshop on Peer-to-Peer Systems, Cambridge, MA*, 2002.
- [28] C. Courcoubetis and R. R. Weber. *Pricing Communication Networks : Economics, Technology and Modelling*. Wiley Europe, March 2003.
- [29] C. Courcoubetis and R. R. Weber. Asymptotics for Provisioning Problems of Peering Wireless LANs with a Large Number of Participants. In *Proceedings of WiOpt'04 workshop, University of Cambridge, UK*, 2004.
- [30] C. Courcoubetis and R. R. Weber. Incentives for large p2p systems. IEEE Journal on Selected Areas in Telecommunications, to appear, available at <http://nes.aueb.gr/p2p.html>, 2005.
- [31] L. Cox and B. Noble. Samsara: Honor among thieves in peer-to-peer storage. In *Proceedings of the ACM Symposium on Operating Systems Principles*, 2003.
- [32] P. Cramton, R. Gibbons, and P. Klemperer. Dissolving a partnership efficiently. *Econometrica*, 55:615–632, 1987.
- [33] E. Cronin, S. Jamin, C. Jin, A. R. Kurc, D. Raz, and Y. Shavitt. Constraint mirror placement on the internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(7), 2002.
- [34] J. Crowcroft, R. Gibbens, F. Kelly, and S. Ostring. Modelling incentives for collaboration in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of WiOpt'03: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, 2003.

- [35] V. Kalogeraki D. Zeinalipour-Yazti and D. Gunopulos. Information retrieval techniques for peer-to-peer networks. *Computing in Science and Engineering*, 06(4):20–26, 2004.
- [36] C. Dellarocas. The Digitization of Word-of-Mouth: Promise and Challenges of On-line Reputation Systems - draft. MIRC Workshop Carlson School of Management, University of Minnesota, U.S.A., March 2002.
- [37] C. Dellarocas. Reputation mechanisms. Handbook on Economics and Information Systems, 2005. <http://faculty.haas.berkeley.edu/hender/ISEcon/ISEcon.htm>.
- [38] J. Douceur. The sybil attack. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Peer-to-Peer Systems, Boston, MA*, 2002.
- [39] N. Eagle and A. Pentland. Social serendipity: Mobilizing social software. *IEEE Pervasive Computing*, 4(2):28–34, 2005.
- [40] E. C. Efstathiou, P. A. Frangoudis, and G. C. Polyzos. Stimulating Participation in Wireless Community Networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 2006, Barcelona*, 2006.
- [41] E. C. Efstathiou and G. C. Polyzos. A Peer-to-Peer Approach to Wireless LAN Roaming. In *Proc. 1st ACM International Workshop on Wireless Mobile Applications and Services on WLAN Hotspots (WMASH 2003), San Diego, CA*, 2003.
- [42] E. C. Efstathiou and G. C. Polyzos. Self-Organized Peering of Wireless LAN Hotspots. *European Transactions on Telecommunications (special issue on Self-Organization in Mobile Networking)*, 2005.
- [43] L. M. Feeney. An energy consumption model for performance analysis of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications (MONET)*, 6(3):239–249, 2001.
- [44] L. M. Feeney and M. Nilsson. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pages 1548–1557, Anchorage AK, USA, 2001.
- [45] E. Fehr and S. Gächter. Altruistic Punishment in Humans. *Nature*, 415:137–140, 2002.
- [46] M. Feldman and J. Chuang. The Evolution of Cooperation Under Cheap Pseudonyms. In *Proceedings of the Seventh International IEEE Conference on E-Commerce Technology*, 2005.

- [47] M. Feldman, K. Lai, J. Chuang, and I. Stoica. Quantifying Disincentives for Collaboration in Peer-to-Peer Networks. 1st Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, University of Berkeley, 2003.
- [48] M. Feldman, K. Lai, I. Stoica, and J. Chuang. Robust Incentive Techniques for Peer-to-Peer Networks. ACM E-Commerce Conference (EC'04), 2004.
- [49] M. Feldman, C. Papadimitriou, J. Chuang, and I. Stoica. Free-Riding and Whitewashing in Peer-to-Peer Systems. In *Proceedings of 3rd Annual Workshop on Economics and Information Security (WEIS04)*, 2004.
- [50] P. Francis. Yoid: Extending the internet multicast architecture, 2001. Technical Report, ACIRI.
- [51] E. Friedman and P. Resnick. The Social Cost of Cheap Pseudonyms. *Economics and Management Strategy*, 10(2):173–199, 2001.
- [52] P. Golle, K. Leyton-Brown, I. Mironov, and M. Lillibridge. Incentives for Sharing in Peer-to-Peer Networks. In *Proceedings of WELCOM'01*, 2001.
- [53] D. Hales and S. Patarin. How to Cheat BitTorrent and why nobody does. Technical Report UBLCS-2005-12, University of Bologna, 2005.
- [54] D. Hausheer, N. Liebau, A. Mauthe, R. Steinmetz, and B. Stiller. Token-based Accounting and Distributed Pricing to Introduce Market Mechanisms in a Peer-to-Peer File Sharing Scenario. In *Proceedings 3rd IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing, Linköping, Sweden*, 2003.
- [55] D. Hausheer and B. Stiller. PeerMart: The Technology for a Distributed Auction-based Market for Peer-to-Peer Services. In *Proceedings of the 40th IEEE International Conference on Communications (ICC 2005), Seoul, Korea*, May 2005.
- [56] J. Hindriks and R. Pancs. Free riding on altruism and group size. Working paper No. 436, May 2001.
- [57] M. Jakobsson, J.-P. Hubaux, and L. Buttyan. A Micro-Payment Scheme Encouraging Collaboration in Multi-Hop Cellular Networks. *Financial Cryptography*, 2003.
- [58] J. Jannotti, D. K. Gifford, K. L. Johnson, M. F. Kaashoek, and J. W. O'Toole. Overcast: Reliable multicasting with an overlay network. In *Proceedings of the Fourth Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, 2000.
- [59] A. Josang, S. Hird, and E. Faccar. Simulating the Effect of Reputation Systems on e-Markets. In *Proceedings of the 1st International Conference on Trust Management, Crete, Greece*, 2003.

- [60] K. Kalpakis, K. Dasgupta, and O. Wolfson. Optimal placement of replicas in trees with read, write, and storage costs. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 12(6):628–637, 2001.
- [61] S. D. Kamvar, M. T. Schlosser, and H. Garcia-Molina. EigenRep: Reputation Management in P2P Networks. In *Proceedings of the Twelfth International World Wide Web Conference, Budapest, Hungary, 2003*.
- [62] S. D. Kamvar, M. T. Schlosser, and H. Garcia-Molina. The EigenTrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks. In *Proceedings of the Twelfth International World Wide Web Conference, 2003*.
- [63] J. Kangasharju, J. Roberts, and K. W. Ross. Object replication strategies in content distribution networks. *Computer Communications*, 25(4):376–383, 2002.
- [64] C. Kenyon. Grid Resource Commercialization: Economic Engineering and Delivery Scenarios. In *Grid Resource Management: State of the Art and Research Issues, 2004*. Editors: J. Nabrzyski, J. Schopf and J. Weglarz.
- [65] M. R. Korupolu, C. G. Plaxton, and R. Rajaraman. Placement algorithms for hierarchical cooperative caching. In *Proceedings of the 10th Annual Symposium on Discrete Algorithms (ACM-SIAM SODA), 1999*.
- [66] K. Krauter, R. Buyya, and M. Maheswaran. A Taxonomy and Survey of Grid Resource Management Systems for Distributed Computing. *International Journal of Software: Practice and Experience (SPE)*, 2001.
- [67] P. Krishnan, D. Raz, and Y. Shavit. The cache location problem. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(5):568–581, 2000.
- [68] R. Krishnan, M. Smith, Z. Tang, and R. Telang. The Virtual Commons: why Free-Riding can be Tolerated in Peer-to-Peer Networks. Workshop on Information Systems and Economics, 2003.
- [69] A. Leff, J. L. Wolf, and P. S. Yu. Replication algorithms in a remote caching architecture. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 4(11):1185–1204, 1993.
- [70] 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 Conference on Computer Communications (IEEE Infocom), New York, 1999*.
- [71] J. Liang, R. Kumar, and K. W. Ross. Understanding kazaa. submitted, 2004.

- [72] J. Liang, R. Kumar, Y. Xi, and K. W. Ross. Pollution in P2P File Sharing Systems. In *Proceedings of IEEE Infocom, Miami, FL, USA*, 2005.
- [73] N. Liebau, V. Darlagiannis, A. Mauthe, and R. Steinmetz. Token-based accounting for p2p-systems. In *Proceedings of Kommunikation in Verteilten Systemen KiVS 2005*, pages 16–28, 2005.
- [74] Th. Loukopoulos and I. Ahmad. Static and adaptive distributed data replication using genetic algorithms. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64(11):1270–1285, 2004.
- [75] E. K. Lua, J. Crowcroft, M. Pias, R. Sharma, and S. Lim. A survey and comparison of peer-to-peer overlay network schemes. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 7(2):72–93, 2005.
- [76] M. F. Hellwig. Public-Good Provision with Many Participants. *Review of Economic Studies*, 70:589–614, 2003.
- [77] G. Mailath and A. Postlewaite. Asymmetric information bargaining problems with many agents. *Review of Economic Studies*, 57:351–368, 1990.
- [78] A. Mas-Colell, M. D. Whinston, and J. R. Green. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, New York, 1995.
- [79] T. Moreton and A. Twigg. Trading in Trust, Tokens, and Stamps. 1st Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, University of Berkeley, 2003.
- [80] R. B. Myerson and M. A. Satterthwaite. Efficient mechanisms for bilateral trading. *Journal of Economic Theory*, 29:265–281, 1983.
- [81] P. Norman. Efficient mechanisms for public goods with use exclusions. *Review of Economic Studies*, 7:1163–1188, 2004.
- [82] M. A. Nowak and K. Sigmund. The dynamics of indirect reciprocity. *Journal of Theoretical Biology*, 194:561–574, 1998.
- [83] V. N. Padmanabhan, H. J. Wang, and P. A. Chou. Resilient peer-to-peer streaming. In *IEEE ICNP, Atlanta, GA, USA*, 2003.
- [84] T. G. Papaioannou and G. D. Stamoulis. An Incentives’ Mechanism Promoting Truthful Feedback in Peer-to-Peer Systems. In *Proceedings of IEEE/ACM CCGRID 2005 (Workshop on Global P2P Computing)*, 2005.

- [85] D. Qiu and R. Srikant. Modeling and Performance Analysis of BitTorrent-Like Peer-to-Peer Networks. In *Proceedings of ACM SIGCOMM 2004 Conference, Portland, OR, USA*, 2004.
- [86] L. Qiu, V. Padmanabhan, and G. Voelker. On the placement of web server replicas. In *Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE Infocom), Anchorage, Alaska*, 2001.
- [87] K. Ranganathan, M. Ripeanu, A. Sarin, and I. Foster. To Share or Not to Share: An Analysis of Incentives to Contribute in Collaborative File Sharing Environments. 1st Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, University of Berkeley, 2003.
- [88] P. Resnick, R. Zeckhauser, E. Friedman, and K. Kuwabara. Reputation systems. *Communications of the ACM*, 43(12), 2000.
- [89] M. Richardson, D. Agrawal, and P. Domingos. Trust Management for the Semantic Web. In *Proceedings of the Second International Semantic Web Conference*, 2003.
- [90] S. Saroiu, P. K. Gummadi, and S. D. Gribble. A measurement study of peer-to-peer file sharing systems. In *Proceedings of Multimedia Conferencing and Networking, San Jose*, 2002.
- [91] H. Varian. *Microeconomic Analysis*. Norton, 1992.
- [92] V. Vishnumurthy, S. Chandrakumar, and E. G. Sirer. Karma: A Secure Economic Framework for Peer-to-Peer Resource Sharing. 1st Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, University of Berkeley, 2003.
- [93] R. Wilson. *Reputations in Games and Markets*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1985.
- [94] B. Yang and H. Garcia-Molina. Designing a super-peer network. In *Proc. the 19th International Conference on Data Engineering, Bangalore, India*, 2003.

Ορολογία

Αγγλικά - Ελληνικά

ad-hoc networks	αυθόρμητα δίκτυα
bandwidth	εύρος ζώνης
cheap pseudonym	φθηνό ψευδώνυμο
complete information	πλήρης πληροφόρηση
computational grid	υπολογιστικό πλέγμα
content	περιεχόμενο
content distribution	διάδοση περιεχομένου
cost function	συνάρτηση κόστους
data preservation system	σύστημα διατήρησης δεδομένων
download	καταφορτώνω (καταφόρτωση)
economic model	οικονομικό μοντέλο
efficiency	αποδοτικότητα
enforcement mechanism	μηχανισμός επιβολής
exclusion	αποκλεισμός
externality	εξωτερικότητα
false trading	εικονική συναλλαγή
free market	ελεύθερη αγορά
file sharing	διαμοιρασμός αρχείων
first-best	βέλτιση (αποδοτικότητα)
fixed contribution	προκαθορισμένη συνεισφορά
free riding	ανέξοδη συμμετοχή
game	παίγνιο
game theory	θεωρία παιγνίων
grid	πλέγμα
incomplete information	ελλιπής πληροφόρηση
Internet	Διαδίκτυο
memory	μνήμη

overlay network	υπερκείμενο δίκτυο
peer	ομότιμη οντότητα (χρήστης, κόμβος)
peer-to-peer system	διομότιμο σύστημα, σύστημα ομότιμων οντοτήτων
processing power	υπολογιστική ισχύ
public good	αγαθό κοινής ωφέλειας (κοινό αγαθό)
reciprocity rules	ανταποδοτικοί κανόνες
regulation	ρύθμιση
reputation	φήμη
reputation mechanism	μηχανισμός διαμόρφωσης φήμης
revelation principle	αρχή της αποκάλυψης
second-best	δεύτερη-καλύτερη (αποδοτικότητα)
service discovery	αναζήτηση υπηρεσιών
social network	κοινωνικό δίκτυο
social welfare	κοινωνική ευημερία
sybil attack	επίθεση του σωσία
tag	ετικέτα
upload	αναφορτώνω (αναφόρτωση)
utility function	συνάρτηση χρησιμότητας
whitewashing	ξέπλυμα κακής φήμης

Ελληνικά - Αγγλικά

αγαθό κοινής ωφέλειας	public good
αναζήτηση υπηρεσιών	discovery
αναφορτώνω (αναφόρτωση)	upload
ανέξοδη συμμετοχή	free riding
ανταποδοτικοί κανόνες	reciprocity rules
αποδοτικότητα	efficiency
αποκλεισμός	exclusion
αρχή της αποκάλυψης	revelation principle
αυθόρμητα δίκτυα	ad-hoc networks
βέλτιση (αποδοτικότητα)	first-best
δεύτερη-καλύτερη (αποδοτικότητα)	second-best
Διαδίκτυο	Internet
διάδοση περιεχομένου	content distribution
διαμοιρασμός αρχείων	file sharing
διομότιμο σύστημα	peer-to-peer system
εικονική συναλλαγή	false trading
ελεύθερη αγορά	free market
εξωτερικότητα	externality
επίθεση του σωσία	sybil attack
ετικέτα	tag
εύρος ζώνης	bandwidth
ελλιπής πληροφόρηση	incomplete information
θεωρία παιγνίων	game theory
καταφορτώνω (καταφόρτωση)	download
κοινό αγαθό	public good
κοινωνική ευημερία	social welfare
κοινωνικό δίκτυο	social network
μηχανισμός διαμόρφωσης φήμης	reputation mechanism
μηχανισμός επιβολής	enforcement mechanism
προκαθορισμένη συνεισφορά	fixed contribution
μνήμη	memory
ξέπλυμα κακής φήμης	whitewashing
οικονομικό μοντέλο	economic model
ομότιμη οντότητα (χρήστης, κόμβος)	peer
παίγνιο	game
περιεχόμενο	content
πλέγμα	grid
πλήρης πληροφόρηση	complete information

ρύθμιση	regulation
συνάρτηση κόστους	cost function
συνάρτηση χρησιμότητας	utility function
σύστημα διατήρησης δεδομένων	data preservation system
υπερκείμενο δίκτυο	overlay network
υπολογιστική ισχύ	processing power
υπολογιστικό πλέγμα	computational grid
φήμη	reputation
φθηνό ψευδώνυμο	cheap pseudonym