



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Άσκηση 2 - Προηγμένα Θέματα Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών

Γρηγόριος Θανάσουλας

gregthanasoulas@gmail.com

A.M: 03114131

10 Μαΐου 2020

Περιεχόμενα

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Σκοπός | 2 |
| 2 | Πειραματική Αξιολόγηση | 2 |
| 2.1 | Μελέτη εντολών άλματος | 2 |
| 2.2 | Μελέτη των N-bit Predictors | 10 |
| 2.2.1 | Μελέτη για σταθερό αριθμό BHT Entries | 10 |
| 2.2.2 | Μελέτη των N-bit Predictors για σταθερό Hardware overhead | 19 |
| 2.3 | Μελέτη του BTB | 27 |
| 2.4 | Μελέτη του RAS | 36 |
| 2.5 | Μελέτη διαφορετικών Branch Predictors | 44 |

1 Σκοπός

Η άσκηση αυτή αποσκοπεί στη μελέτη της επίδοσης διαφορετικών branch predictors. Για την αξιολόγηση τους γίνεται χρήση του εργαλείου PIN με τα παρακάτω μετροπρογράμματα (SPEC CPU2006 benchmarks):

1. 403.gcc
2. 429.mcf
3. 434.zeusmp
4. 436.cactusADM
5. 445.gobmk
6. 450.soplex
7. 456.hmmer
8. 458.sjeng
9. 459.GemsFDTD
10. 471.omnetpp
11. 473.astar
12. 483.xalancbmk

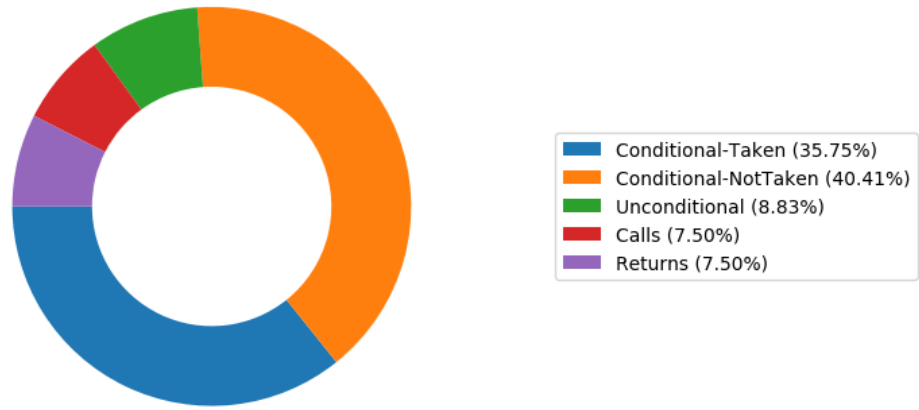
2 Πειραματική Αξιολόγηση

2.1 Μελέτη εντολών άλματος

Στο παρόν τμήμα της εργασίας συλλέγουμε στατιστικά για το είδος εντολών άλματος των benchmarks που θα εκτελέσουμε.

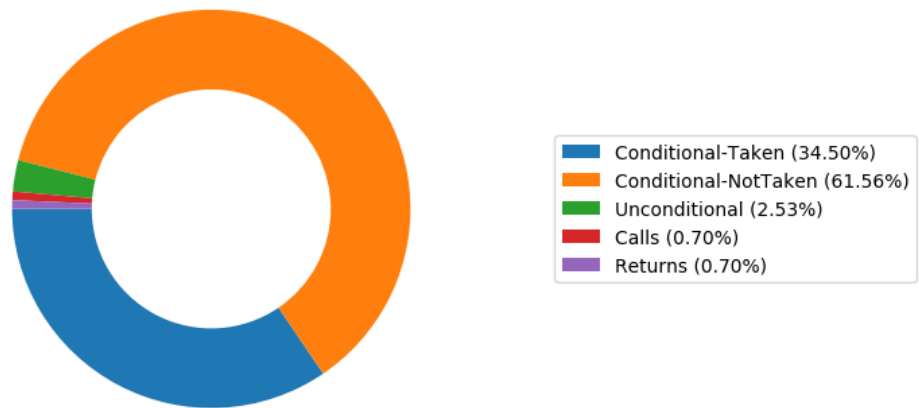
403-gcc

Total Branches: 754271130 - 23.69% of total instructions



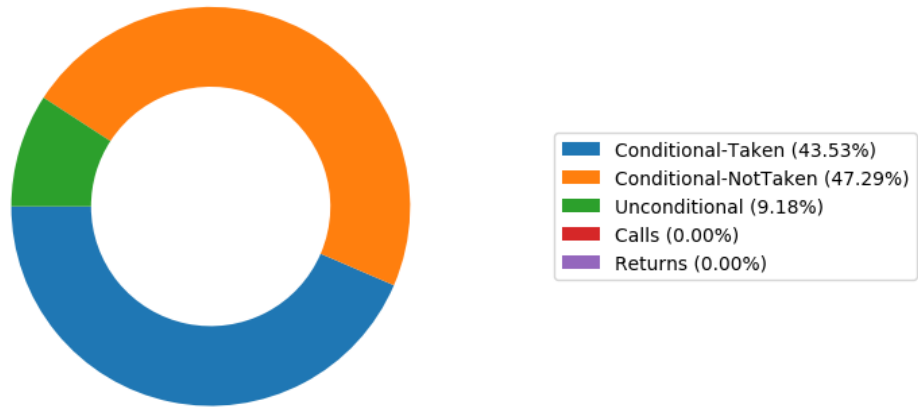
429-mcf

Total Branches: 3862679719 - 21.22% of total instructions



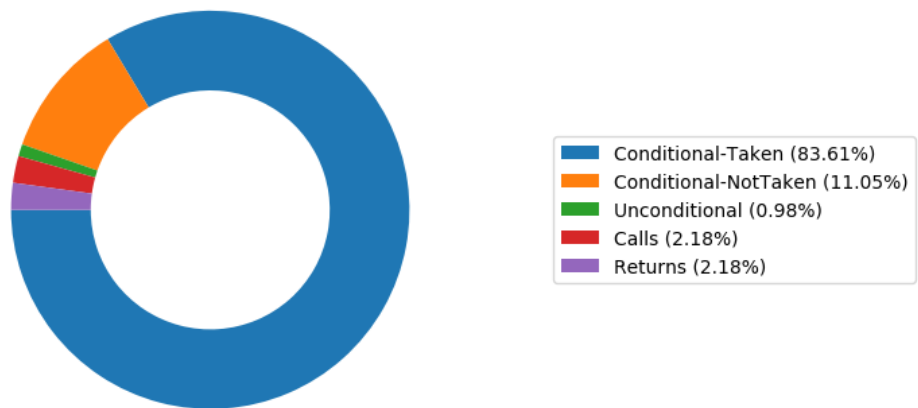
434-zeusmp

Total Branches: 7550195259 - 7.33% of total instructions



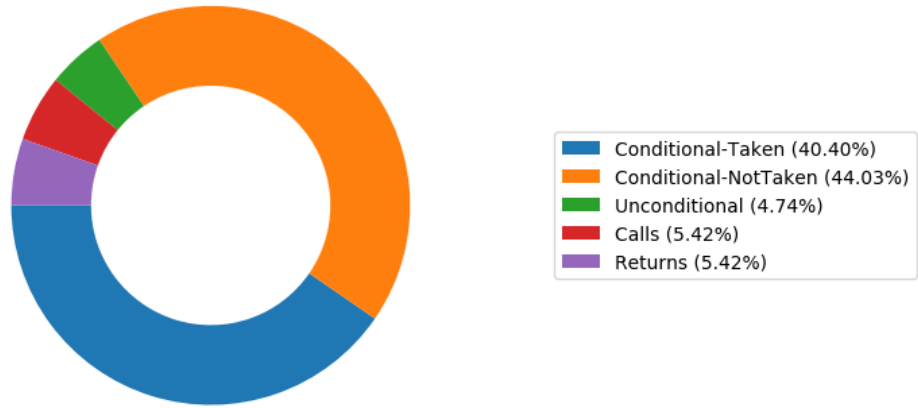
436-cactusADM

Total Branches: 170181784 - 0.21% of total instructions



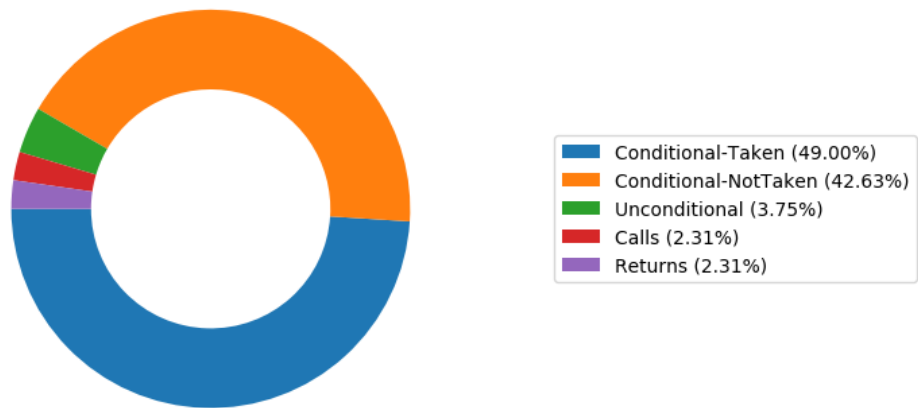
445-gobmk

Total Branches: 3463153780 - 19.66% of total instructions



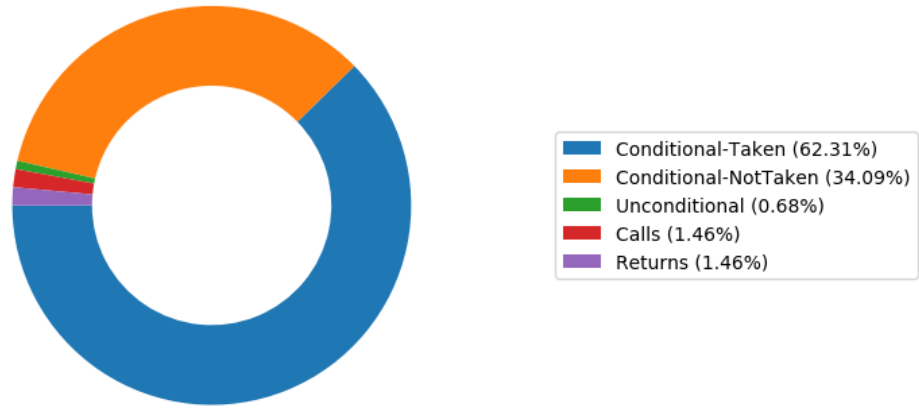
450-soplex

Total Branches: 1833637728 - 20.19% of total instructions



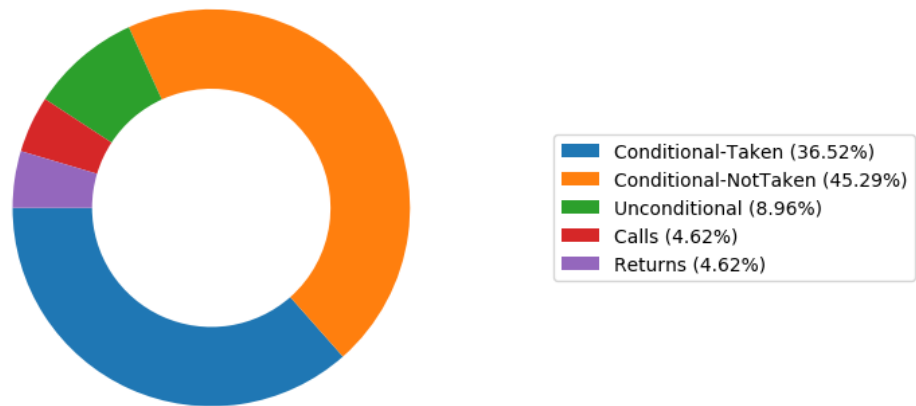
456-hmm

Total Branches: 13914144170 - 5.18% of total instructions



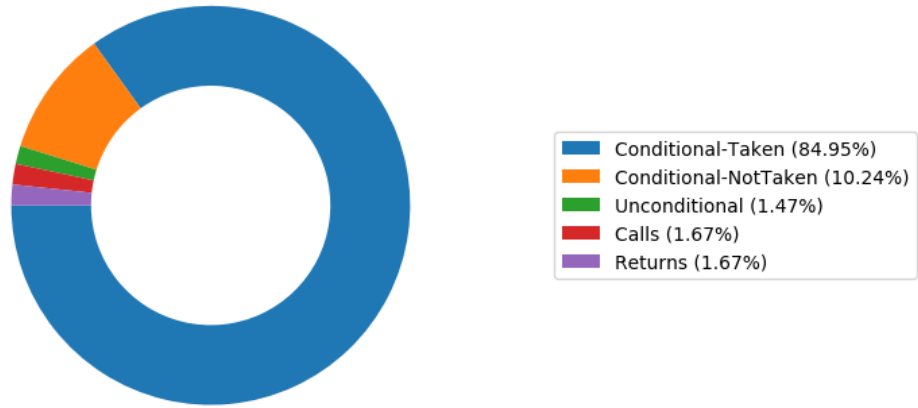
458-sjeng

Total Branches: 100333242483 - 21.92% of total instructions



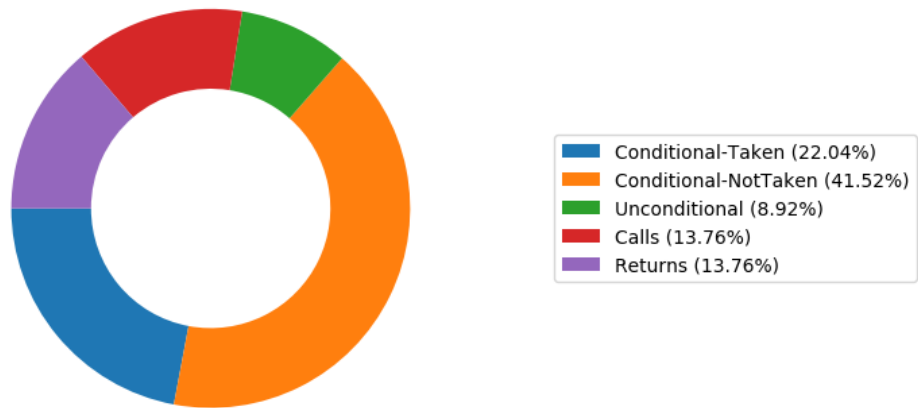
459-GemsFDTD

Total Branches: 3407996134 - 3.13% of total instructions



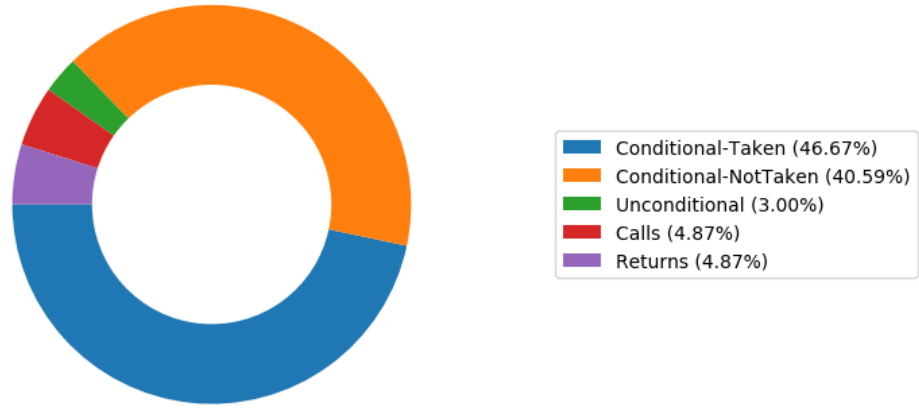
471-omnetpp

Total Branches: 51151322506 - 24.06% of total instructions



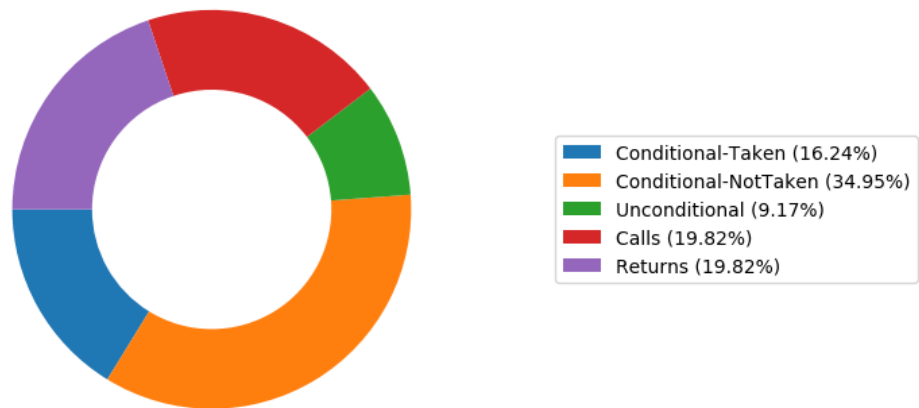
473-astar

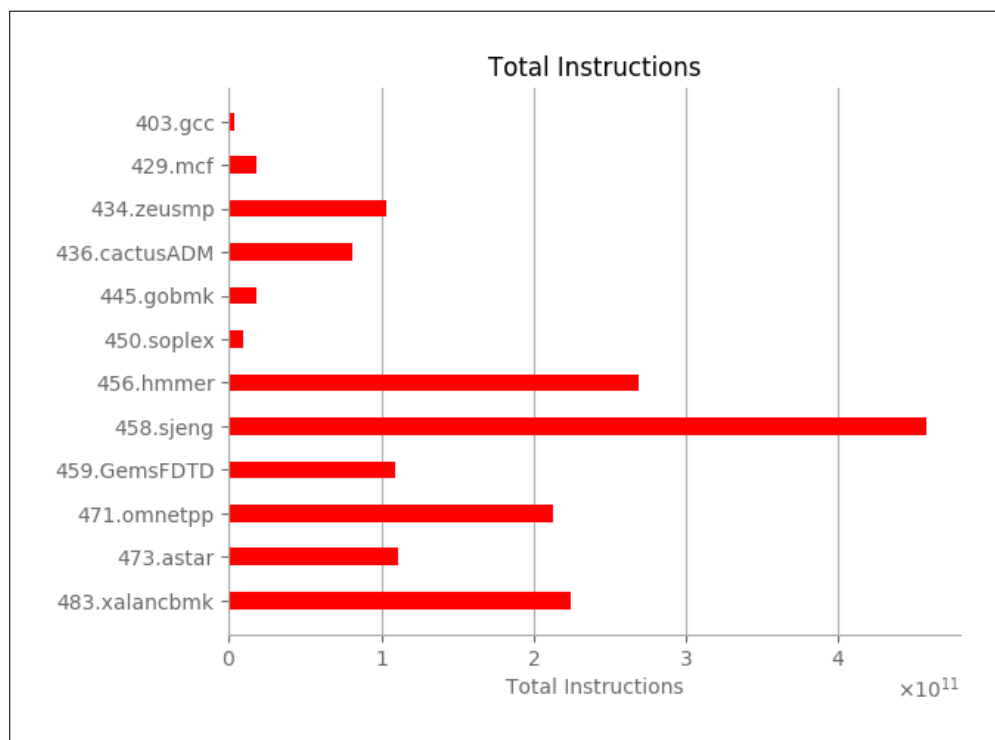
Total Branches: 18049727168 - 16.29% of total instructions



483-xalancbmk

Total Branches: 54603481117 - 24.37% of total instructions





Συμπεράσματα - Σχόλια Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι στα μετροπρογράμματά μας οι εντολές άλματος αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό των συνολικών εντολών που εκτελούνται. Υπάρχουν benchmarks όπου οι εντολές άλματος είναι περίπου το 20%-30% των συνολικών εντολών (403.gcc, 429.mcf, 445.gobmk, 450.soplex, 458.sjeng, 483.xalancbmk, 473.astar) και άλλα όπου οι εντολές άλματος είναι σημαντικά λιγότερες κάτω του 5% των συνολικών (459.GemsFDTD και 436.cactusADM).

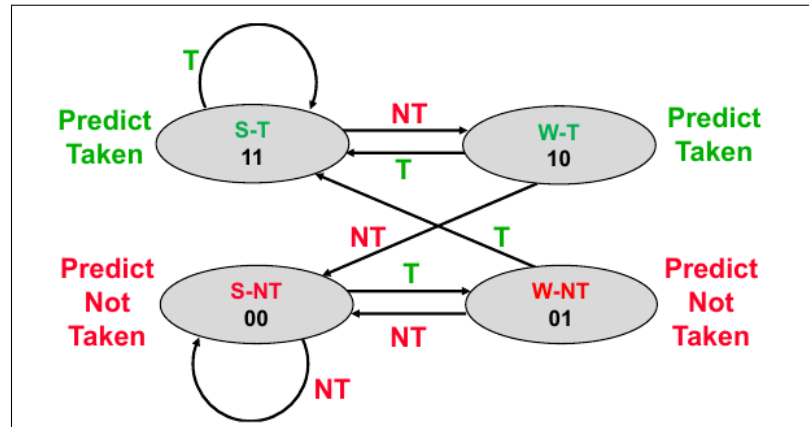
Όσον αφορά την κατηγορία των αλμάτων, τα περισσότερα από αυτά τα είναι είτε Conditional Taken, είτε Conditional NotTaken. Αρκετά λιγότερα (συνολικά περί το 10%) είναι τα Unconditional Branches, Calls, Returns.

Τέλος, για το σύνολο των εντολών, όπως βλέπουμε στο σχετικό ραβδόγραμμα, υπάρχουν benchmarks με μικρό πλήθος εντολών (gcc, mcf, zeusmp, soplex, gobmk) και άλλα με αρκετά μεγάλο πλήθος εντολών τα οποία απαιτούν και μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης (hmmer, sjeng, omnetop).

2.2 Μελέτη των N-bit Predictors

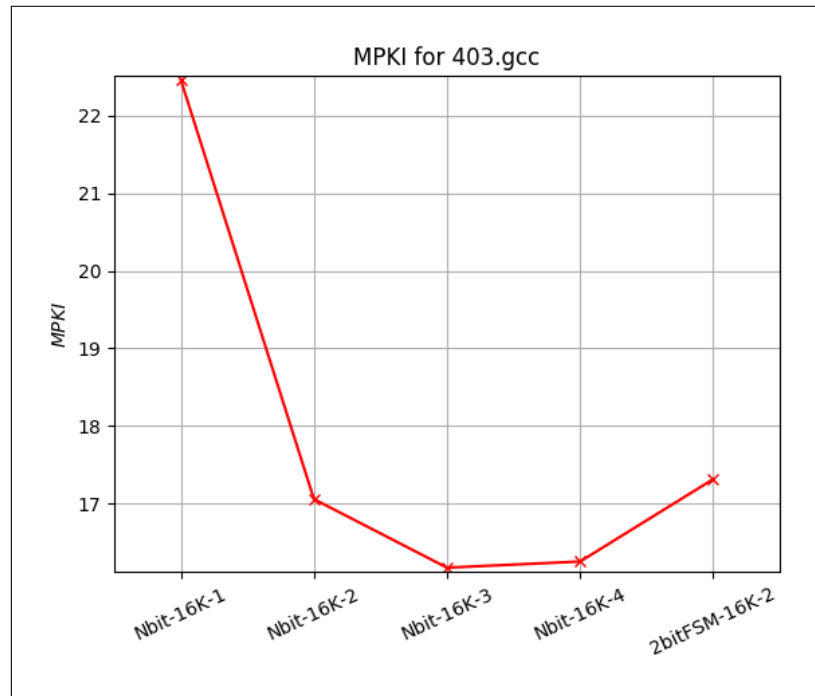
2.2.1 Μελέτη για σταθερό αριθμό BHT Entries

Στο σημείο αυτό μελετάται η απόδοση των N-bit Predictors για διαφορετικές τιμές του $N = 1, 2, 3, 4$, ενώ τα entries διατηρούνται σταθερά και ίσα με 16K. Τα N-bit υλοποιούν ένα saturating up-down counter. Επιπλέον, υλοποιείται ένας predictor με το κάτωθι FSM:

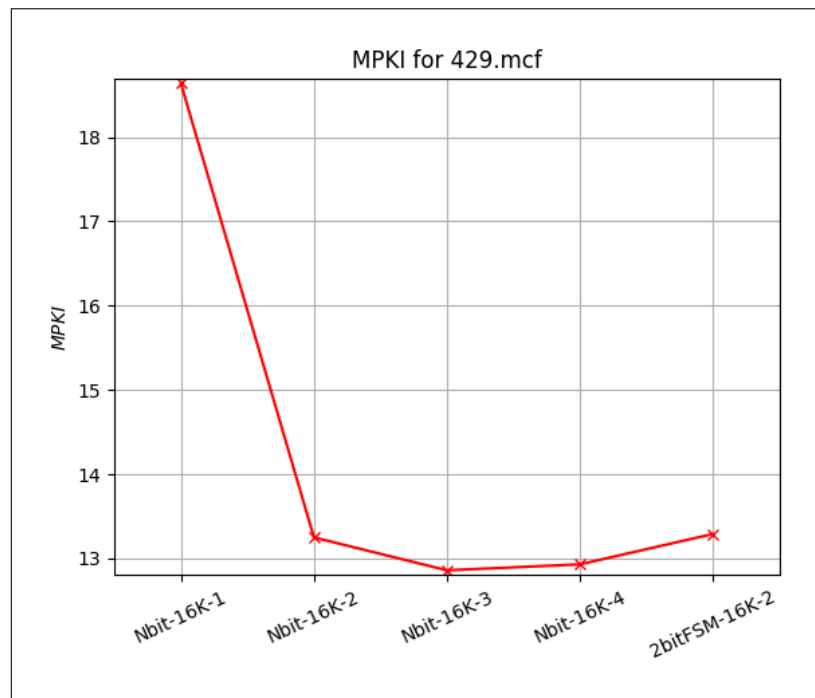


Η σύγκριση των predictors γίνεται με βάση τα direction Mispredictions Per Thousand Instructions (direction MPKI). Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν και ο σχετικός σχολιασμός τους:

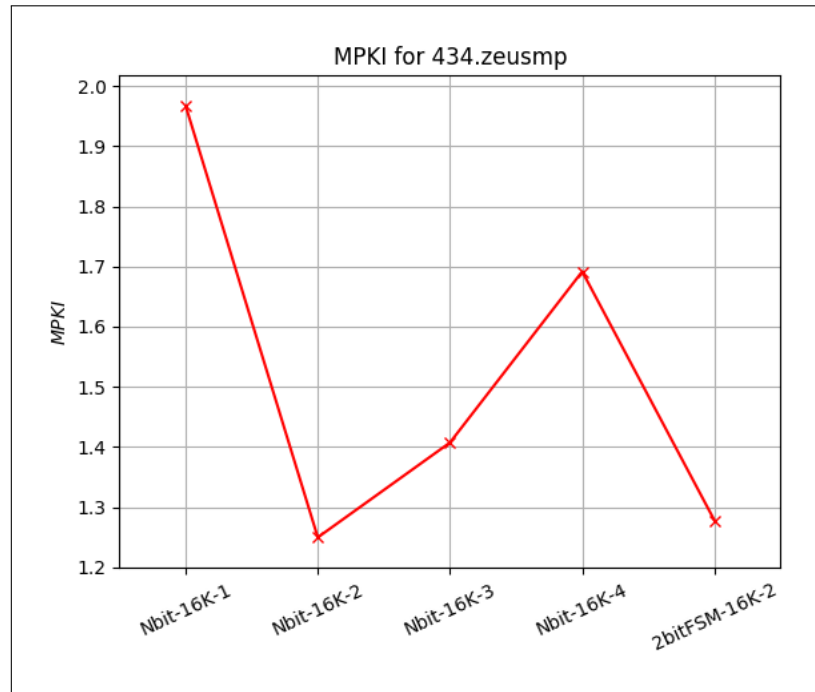
403-gcc



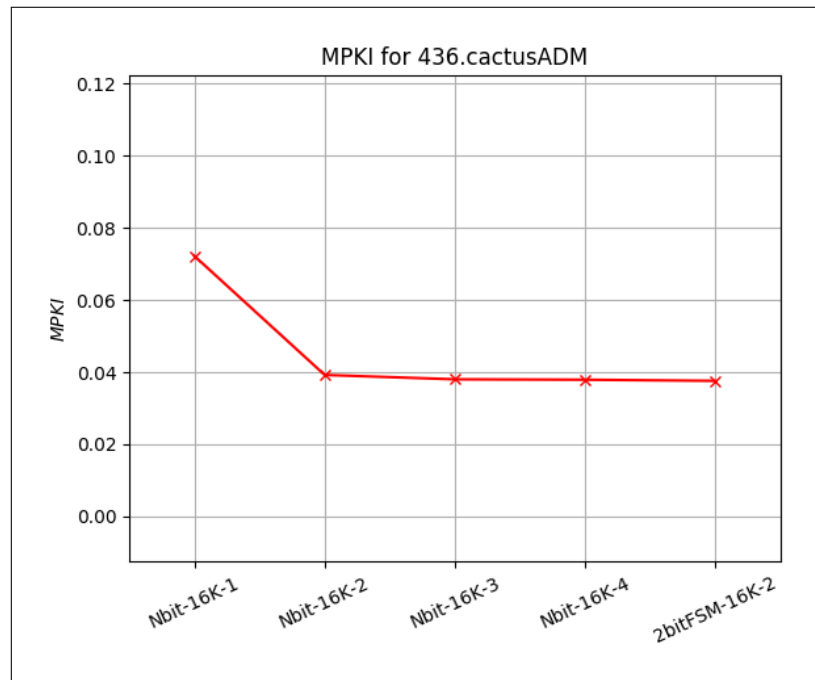
429-mcf



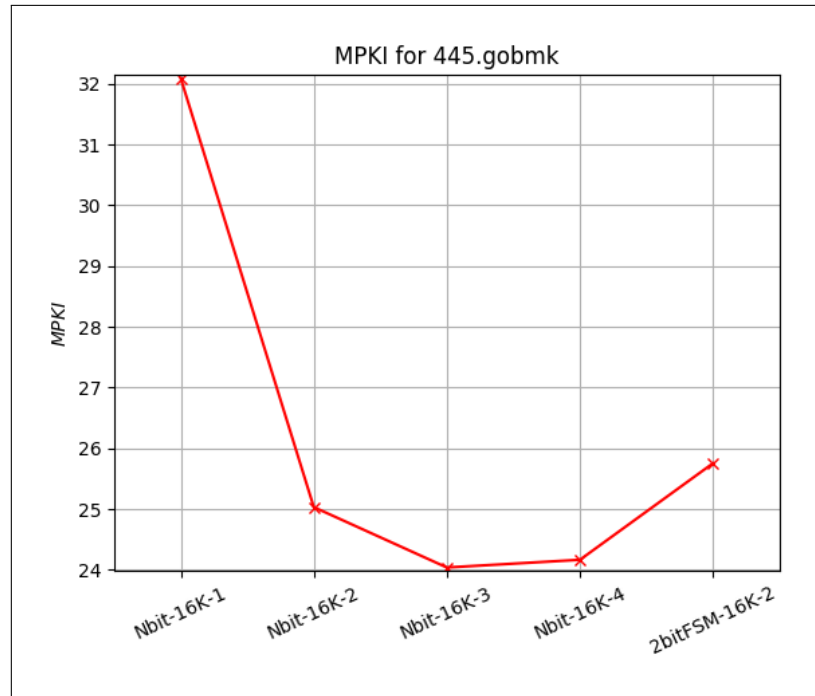
434-zeusmp



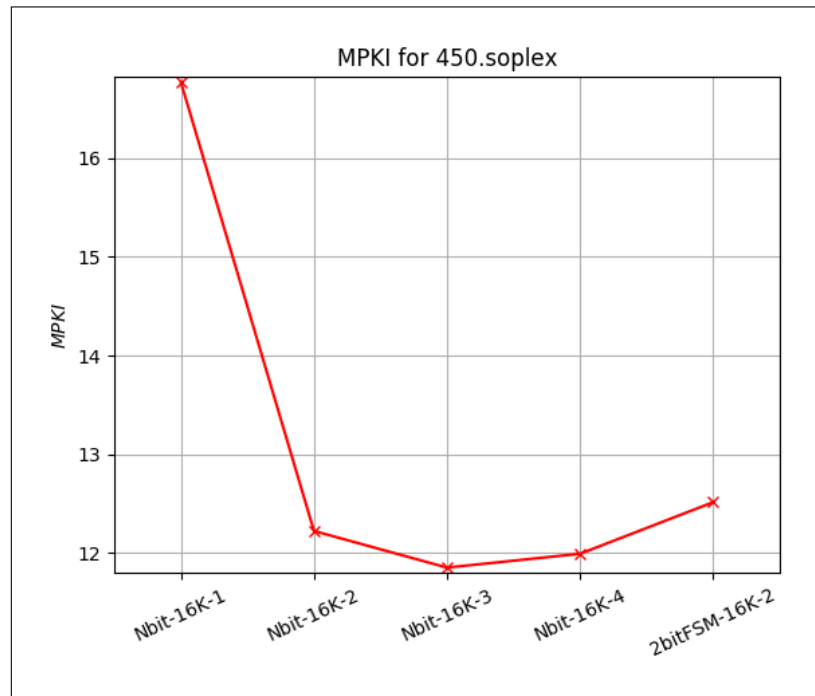
436-cactusADM



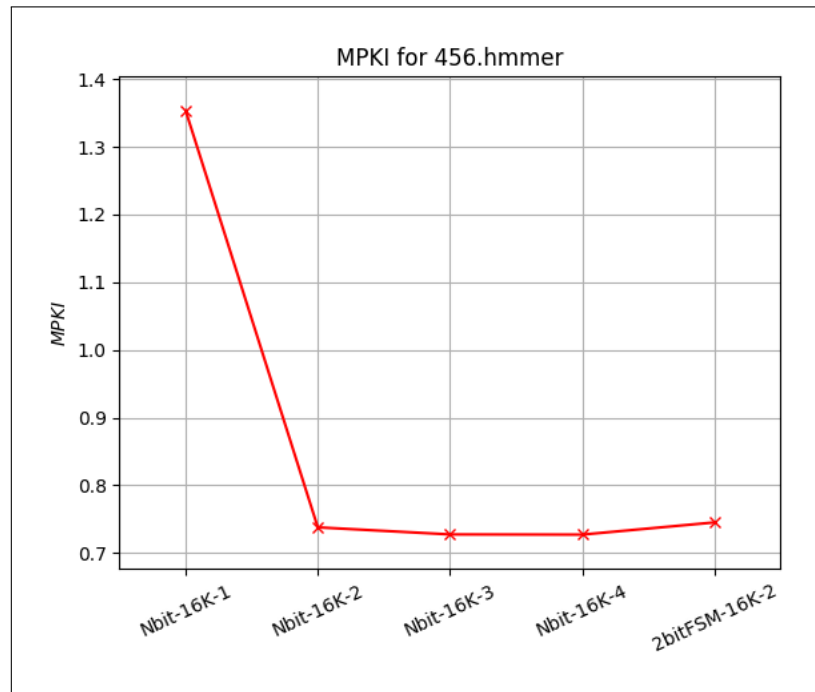
445-gobmk



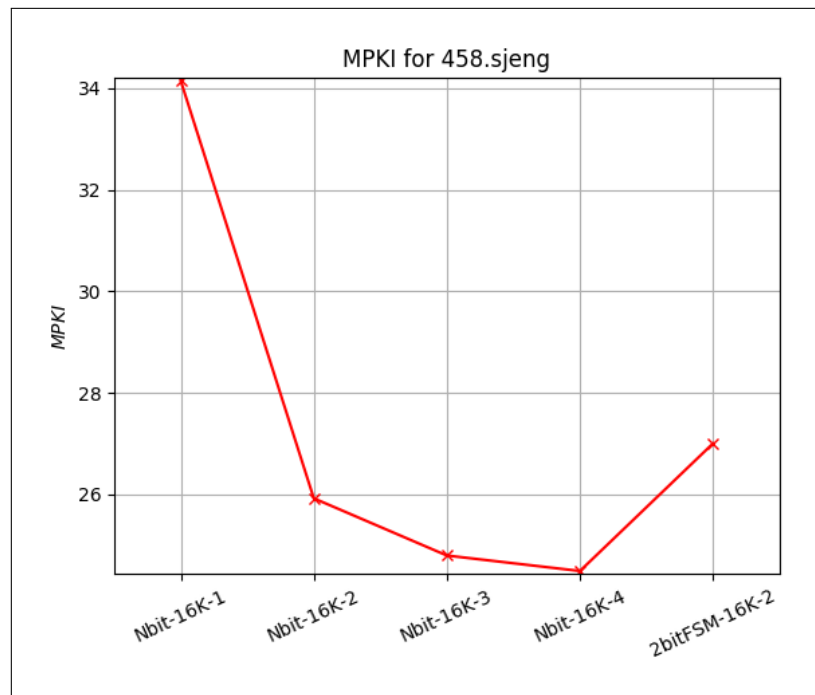
450-soplex



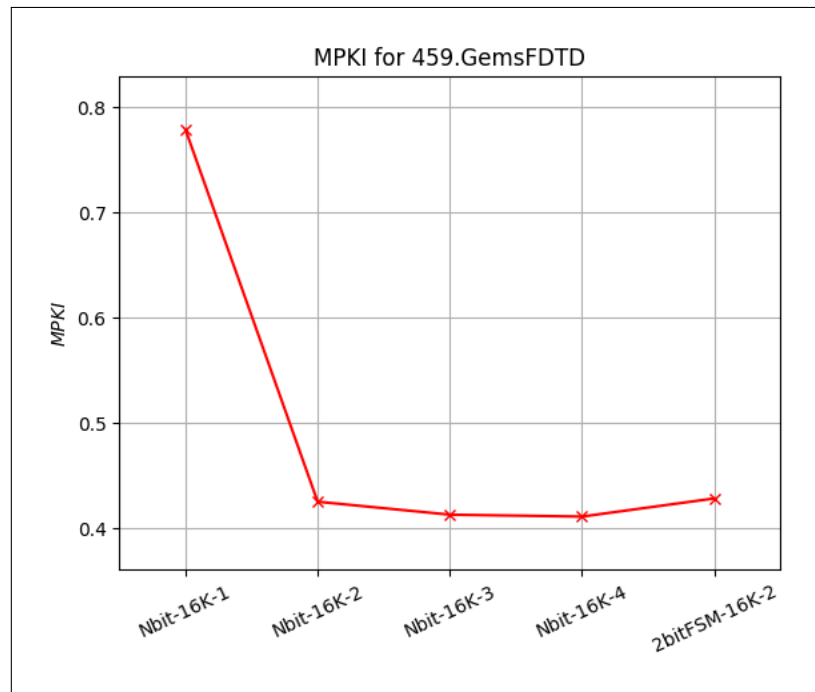
456-hmm



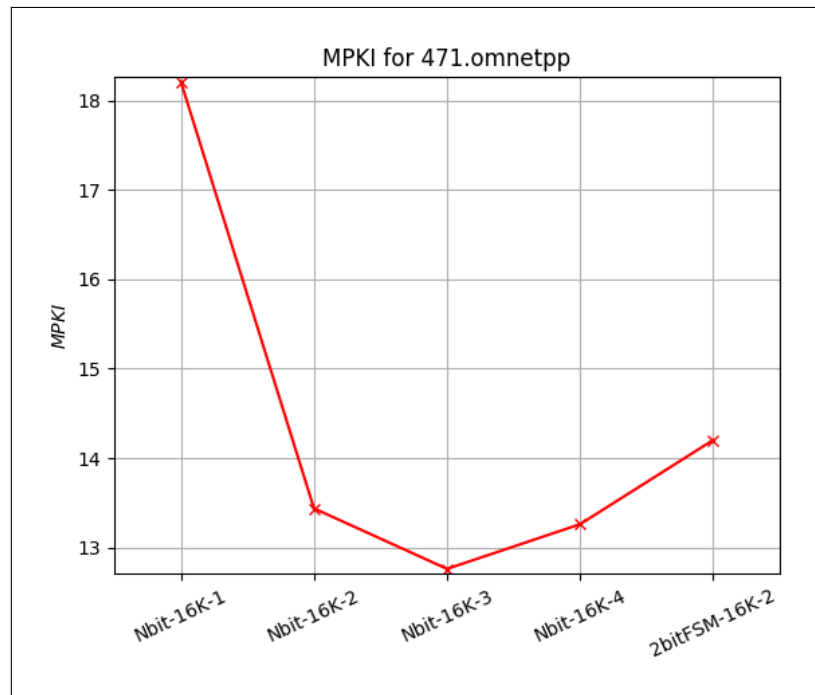
458-sjeng



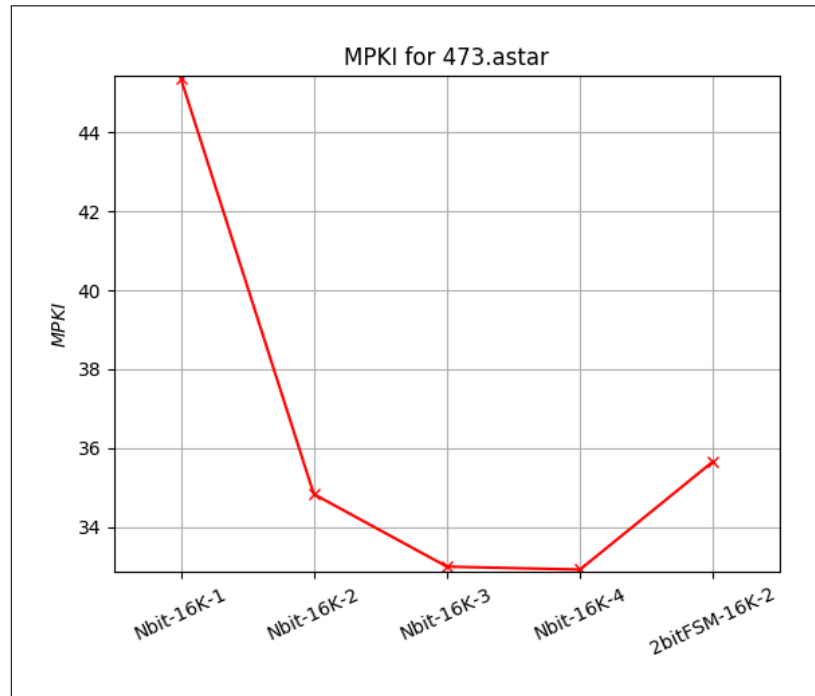
459-GemsFDTD



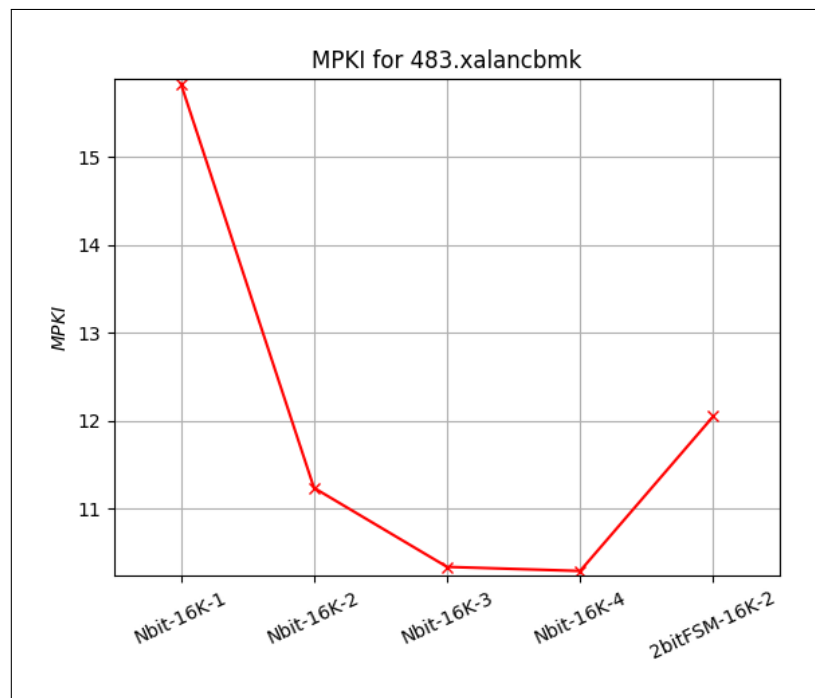
471-omnetpp



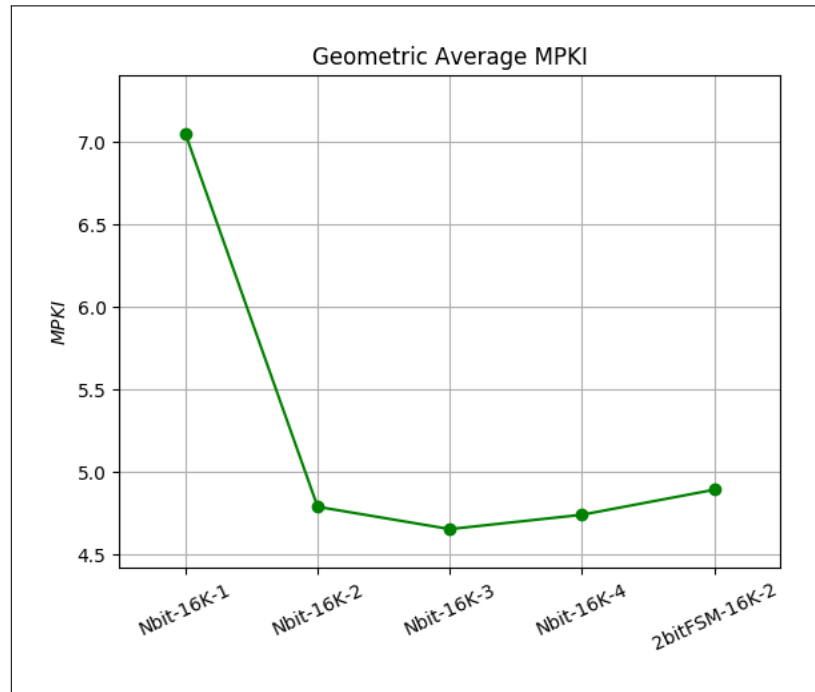
473-astar



483-xalancbmk



Geometric Average



Συμπεράσματα - Σχόλια Από της μορφές των καμπυλών στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως 11 στα 12 benchmarks παρουσιάζουν βελτίωση καθώς το πλήθος των bits του predictor αυξάνει, δηλαδή η μετρική dMPKI φθίνει καθώς τα bits αυξάνονται από 1 σε 2 και από 2 σε 3. Η μετάβαση από 3bit σε 4bit δεν επιφέρει πάντα βελτίωση. Η μόνη διαφορετική ως προς την μορφή καμπύλη αντιστοιχεί στο μετροπρόγραμμα 434.zeusmp για το οποίο το μικρότερο MPKI αντιστοιχεί σε 2-bit predictor. Ωστόσο πρέπει να επισημάνουμε πως για το εν λόγω μετροπρόγραμμα η τιμή του MPKI είναι ήδη αρκετά χαμηλή και η διαφοροποίηση της επίδοσης που επέρχεται με τη χρήση διαφορετικών Nbit-Predictors είναι αρκετά μικρή (εύρος 1.2 έως 2.0 Misses Per KILOInstructions), άρα δεν μας επηρεάζει και πολύ.

Αναφορικά με το FSM που υλοποιήσαμε, αποδίδει καλύτερα μονάχα σε σχέση με τον 1bit Predictor. Ο αντίστοιχος 2bit Predictor που υλοποιείται

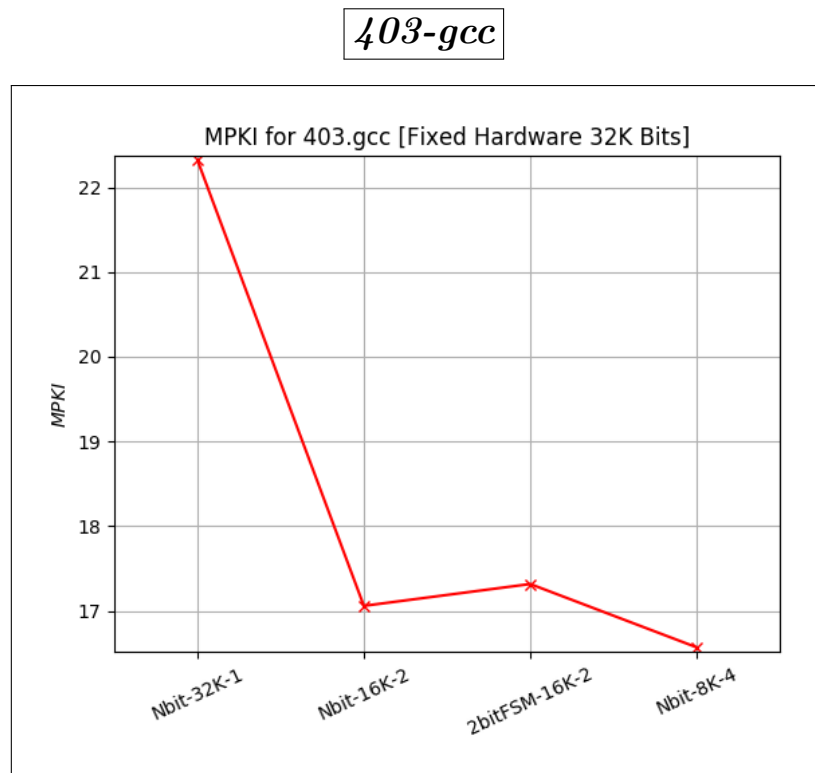
ως saturating up-down counter αποδίδει πάντα καλύτερα σε σχέση με τον 2-bit FSM Predictor.

Μπορούμε επίσης να αποκτήσουμε μία πιο συνολική εικόνα για το σύνολο των benchmarks από το διάγραμμα γεωμετρικών μέσων τιμών, όπου εύκολα επιβεβαιώνουμε τα προηγούμενα συμπεράσματα. Επιπλέον, με βάση το διάγραμμα των μέσων, φαίνεται πως η **καλύτερη επιλογή είναι ο 16K-3-bit Predictor**.

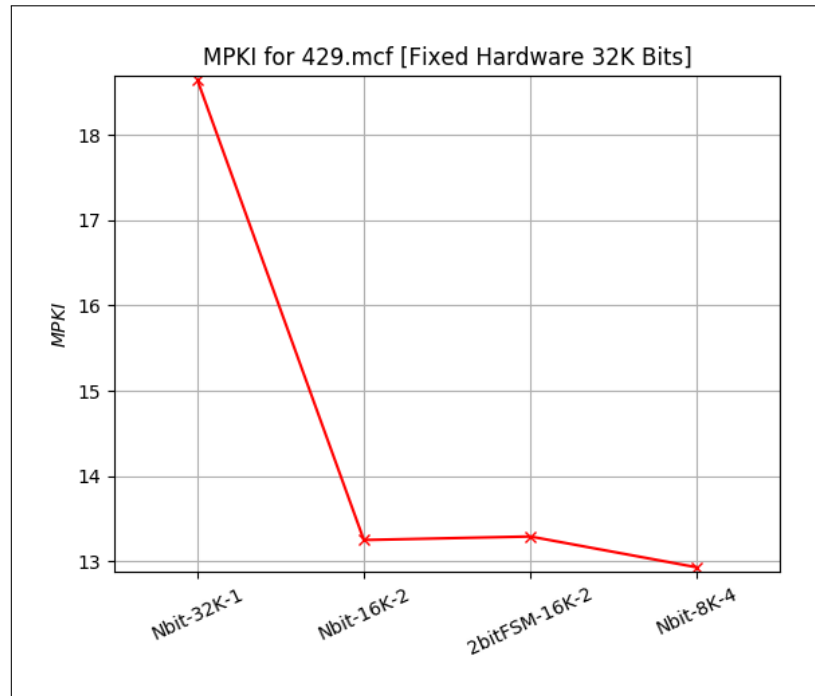
2.2.2 Μελέτη των N-bit Predictors για σταθερό Hardware overhead

Στο σημείο αυτό επαναλαμβάνεται η μελέτη της απόδοσης των N-bit Predictors για διαφορετικές τιμές του $N = 1, 2, 2b, 4$, με τη διαφορά ότι θα μελετήσουμε την επίδοση σε συνδυασμούς που αντιστοιχούν σε σταθερό hardware overhead 32K.

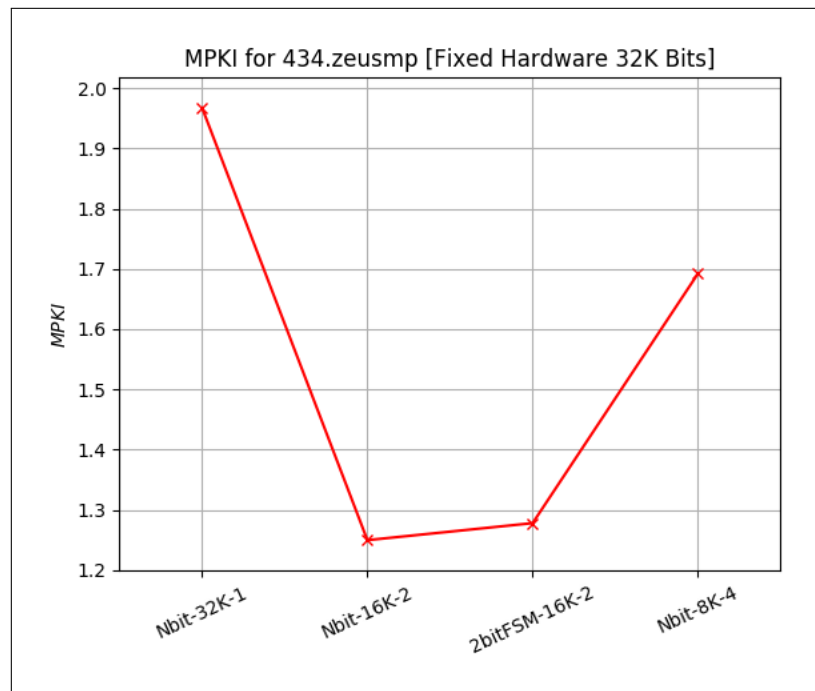
Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν και ο σχετικός σχολιασμός τους:



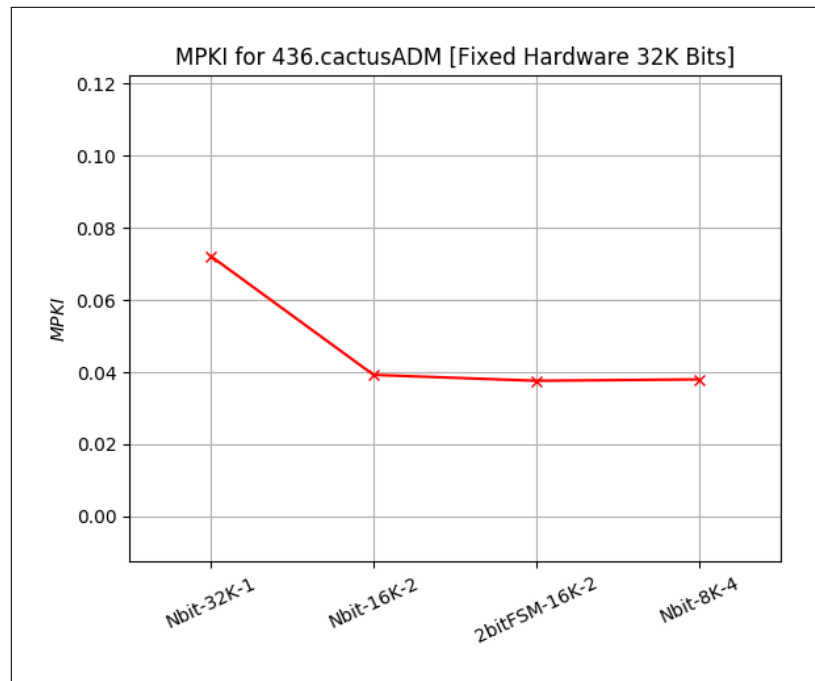
429-mcf



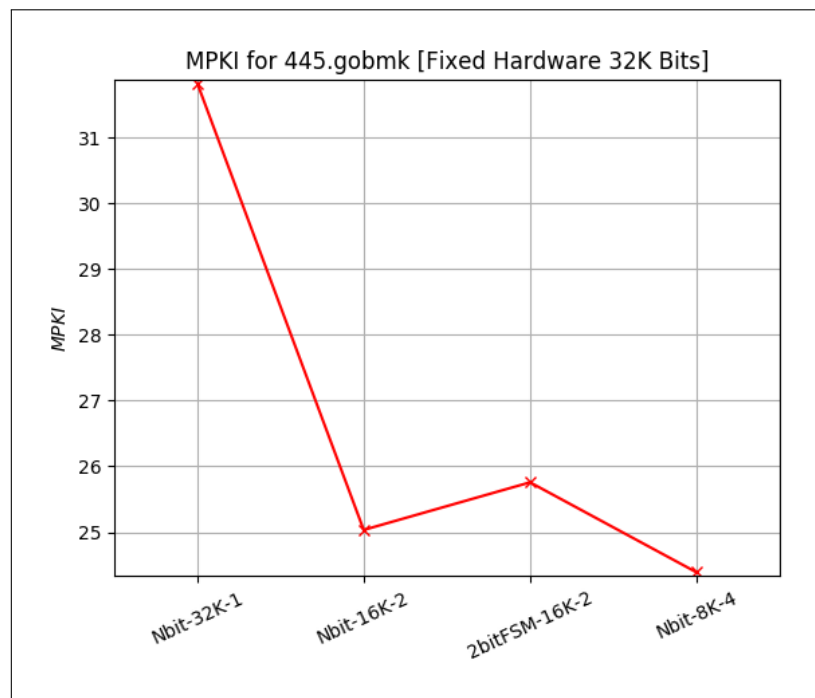
434-zeusmp



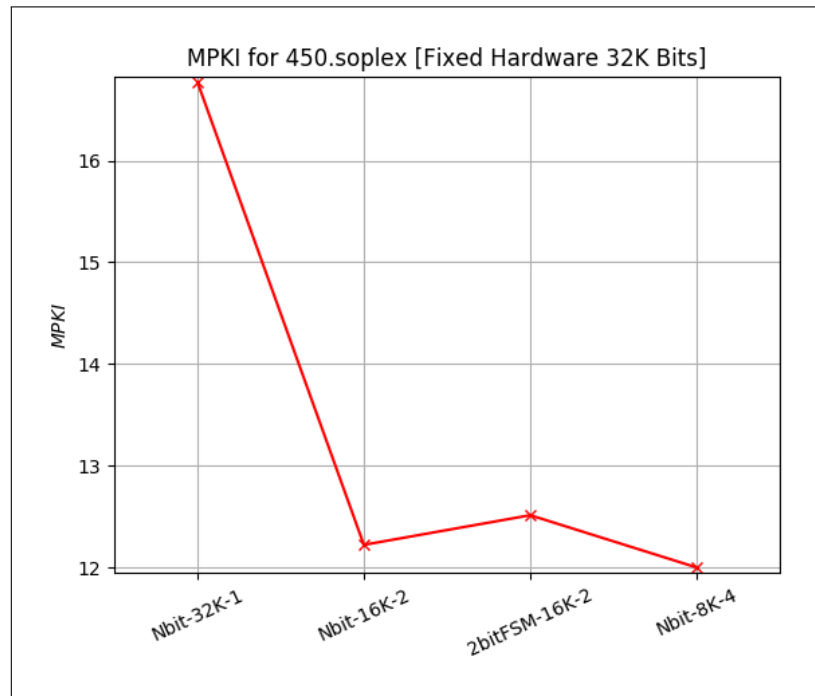
436-cactusADM



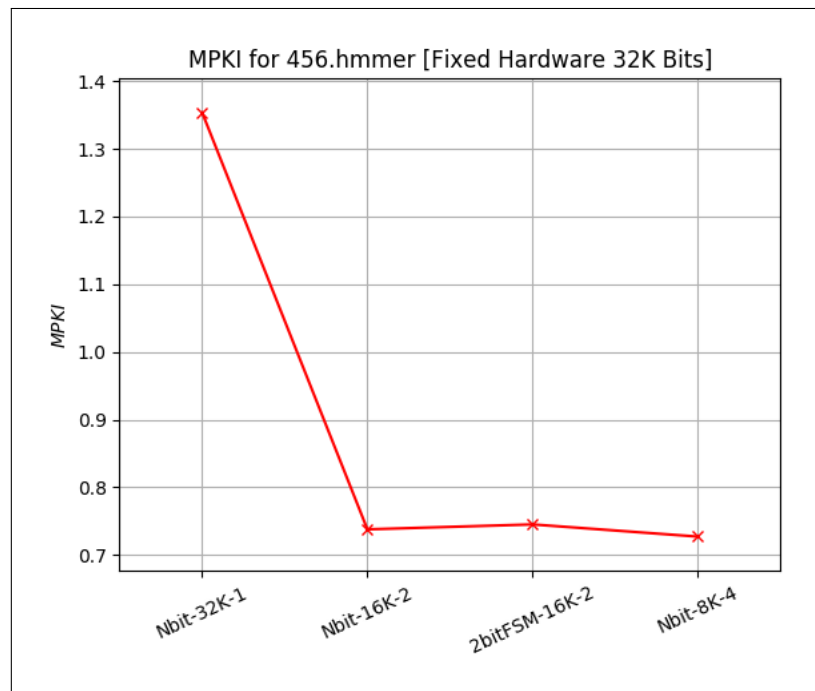
445-gobmk



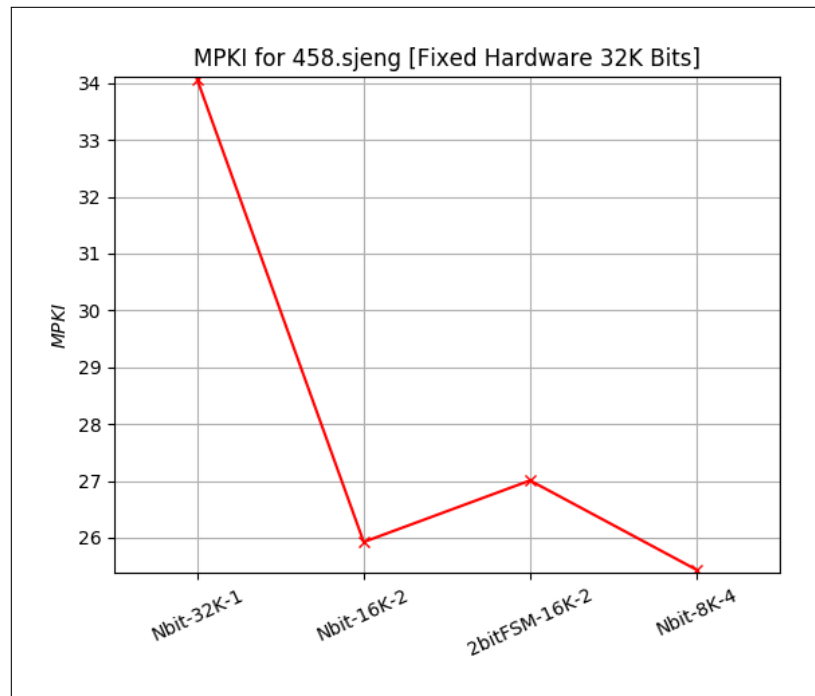
450-soplex



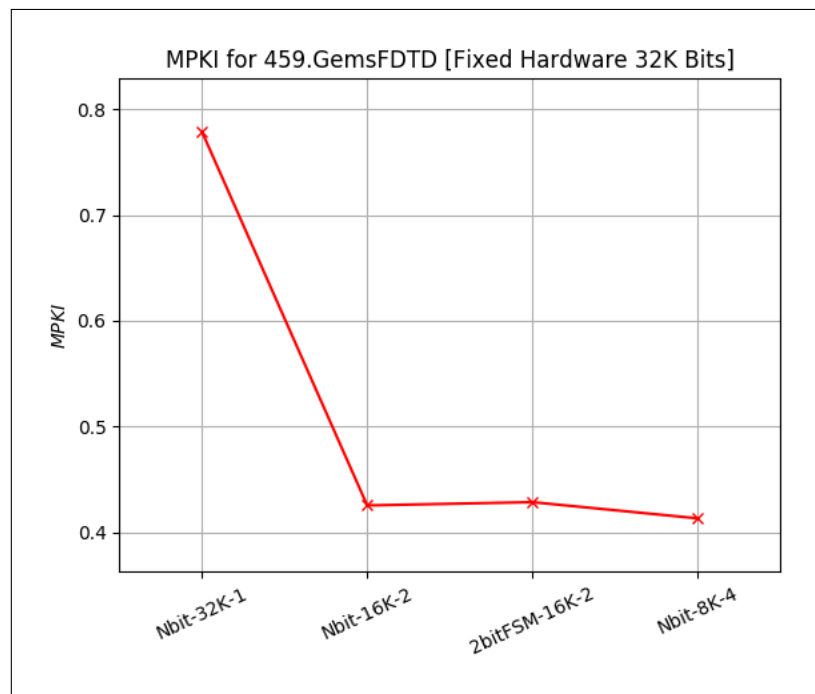
456-hmmer



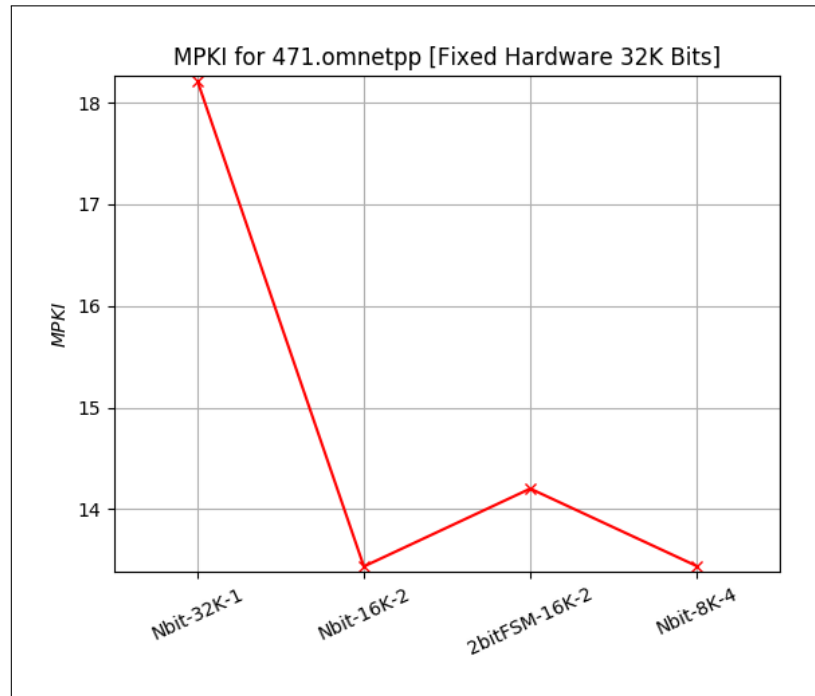
458-sjeng



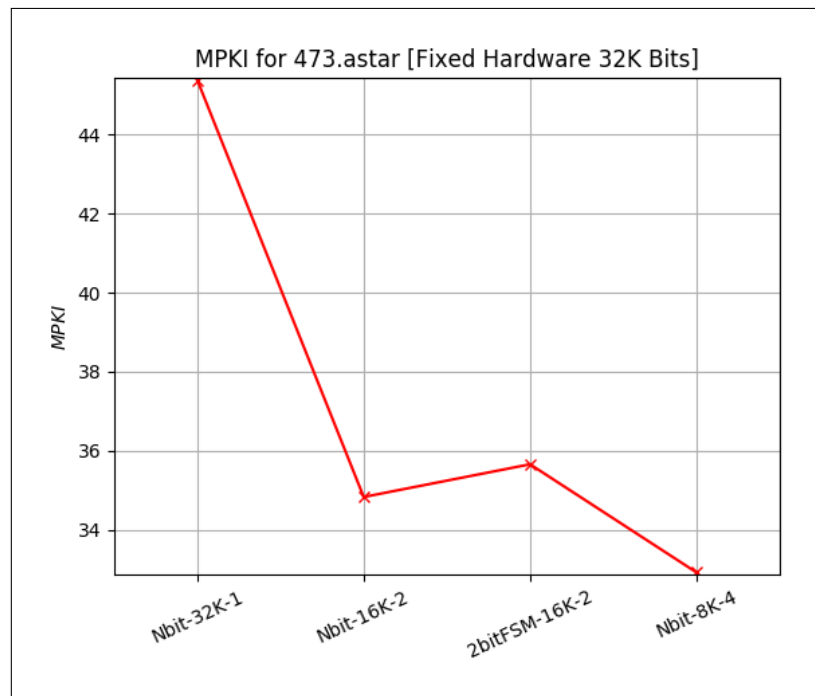
459-GemsFDTD



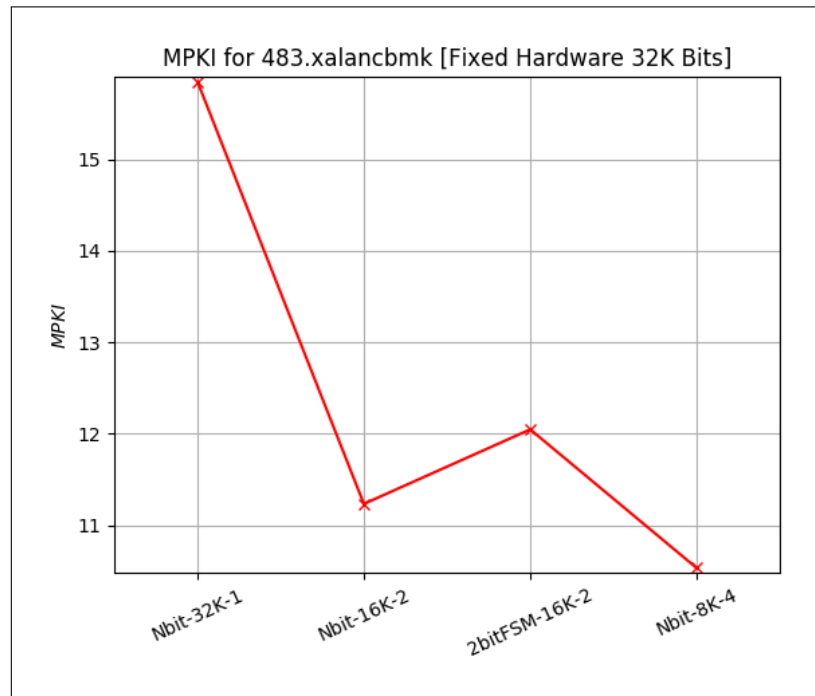
471-omnetpp



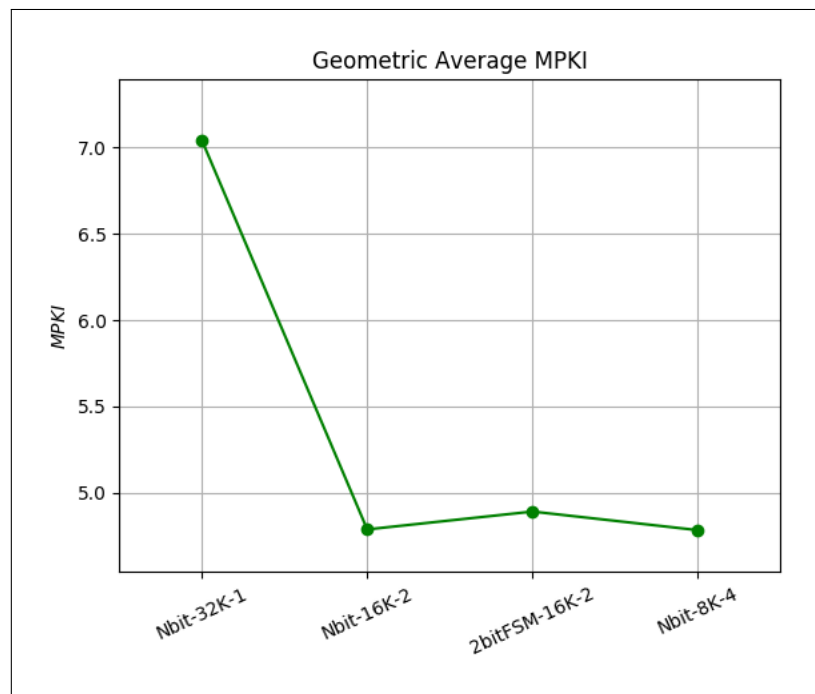
473-astar



483-xalancbmk



Geometric Average



Συμπεράσματα-Σχόλια Παρατηρούμε πως και στους νέους συνδυασμούς για σταθερό υλικό, η καμπύλες μοιάζουν με του προηγούμενου ερωτήματος και τα συμπεράσματα είναι ανάλογα.

Από της μορφές των καμπυλών στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως 11 στα 12 benchmarks παρουσιάζουν βελτίωση καθώς το πλήθος των bits του predictor αυξάνει, δηλαδή η μετρική dMPKI φθίνει καθώς τα bits αυξάνονται, παρά την μείωση του πλήθους των predictors. Η μόνη διαφορετική ως προς την μορφή καμπύλη αντιστοιχεί στο μετρόπρόγραμμα 434.zeusmp για το οποίο το μικρότερο MPKI αντιστοιχεί σε 2-bit predictor.

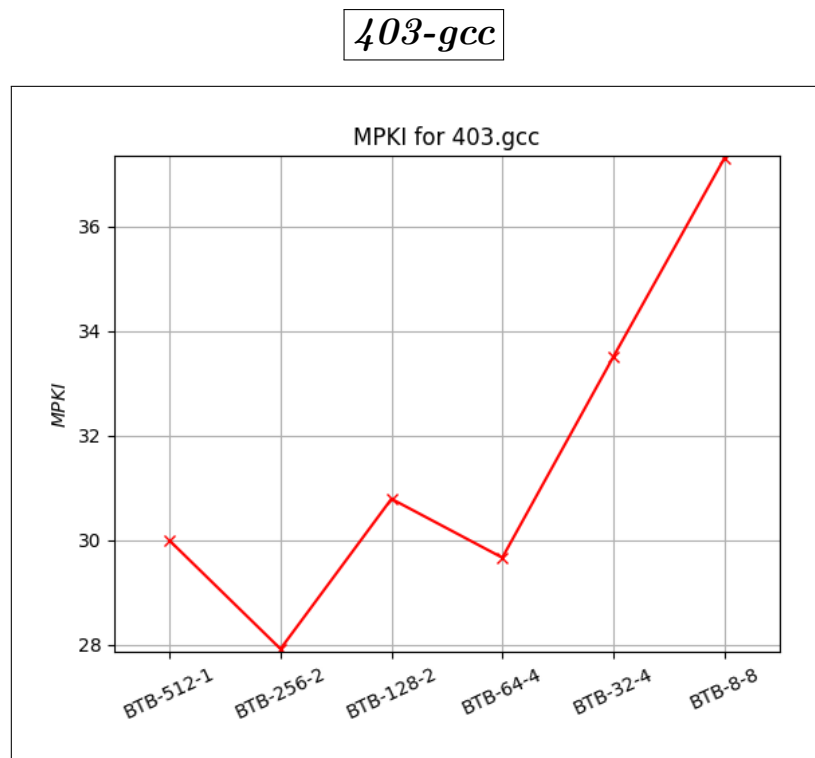
Λαμβάνοντας υπ'όψιν το διάγραμμα των γεωμετρικών μέσων, αλλά και την επίδοση με βάση τα επιμέρους διαγράμματα, μπορούμε να αποφανθούμε πως **καλύτερη επιλογή είναι ο 4-bit Predictor με 8K entries**. Εναλλακτικά θα μπορούσε να επιλεγεί και ο 2-bit Predictor με 16K entries, αφού αποδίδει επίσης σχετικά καλά.

2.3 Μελέτη του BTB

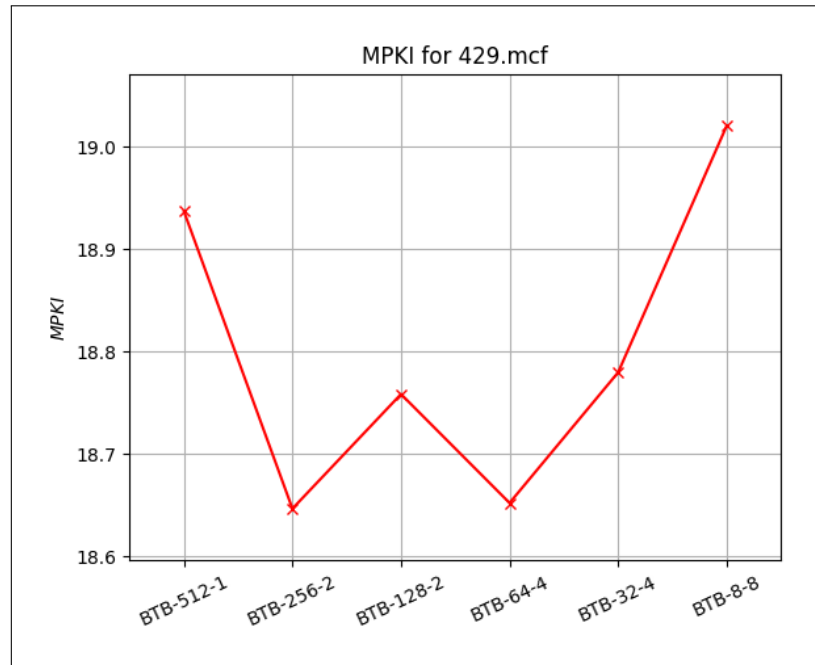
Στο σημείο αυτό μελετάμε την απόδοση του BTB για διαφορες τιμές entries. Συγκεκριμένα έχουμε τους εξής συνδυασμούς:

- 512 lines, associativity 1
- 256 lines, associativity 2
- 128 lines, associativity 4
- 64 lines, associativity 8
- 32 lines, associativity 4
- 8 lines, associativity 8

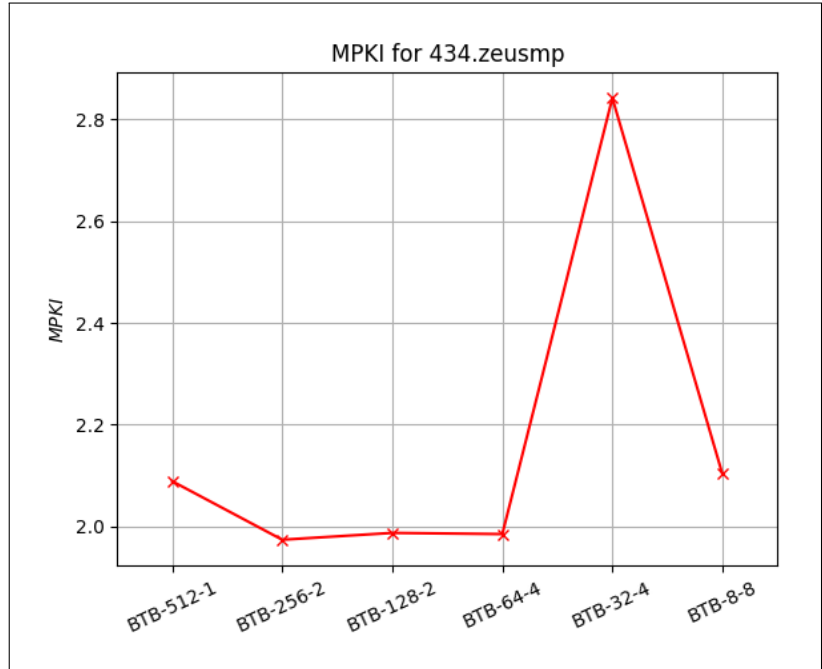
Ακολουθούν τα διαγράμματα και ο σχετικός σχολιασμός:



429-mcf

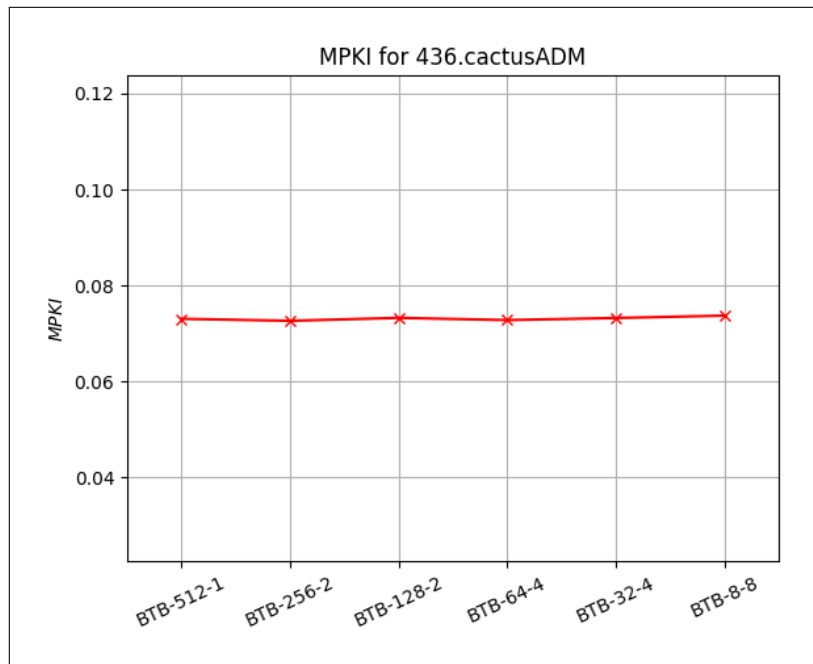


434-zeusmp

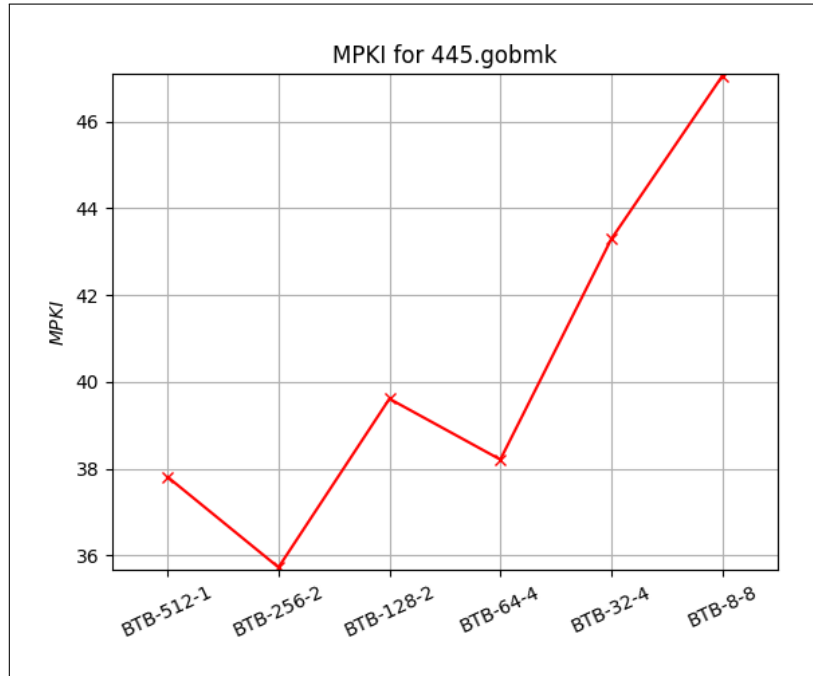


4

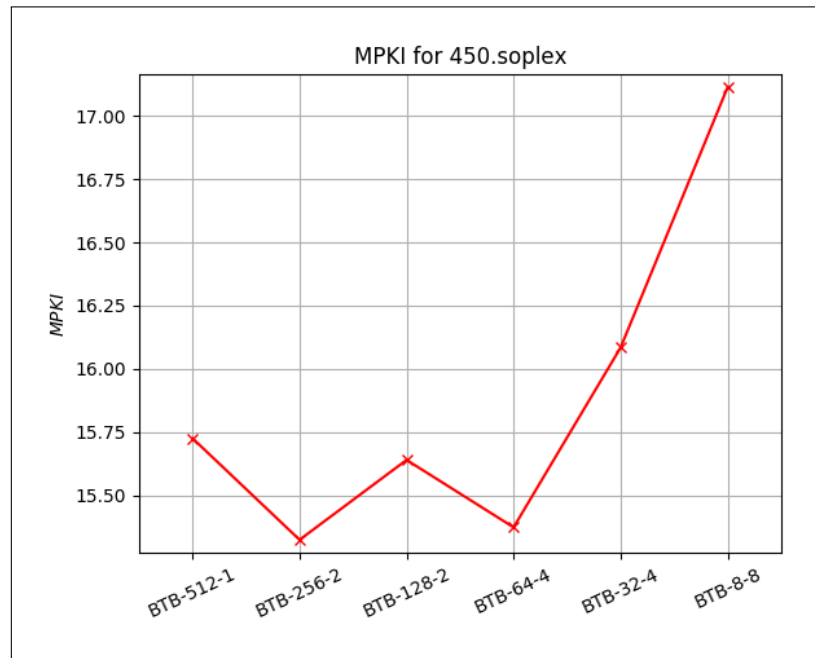
436-cactusADM



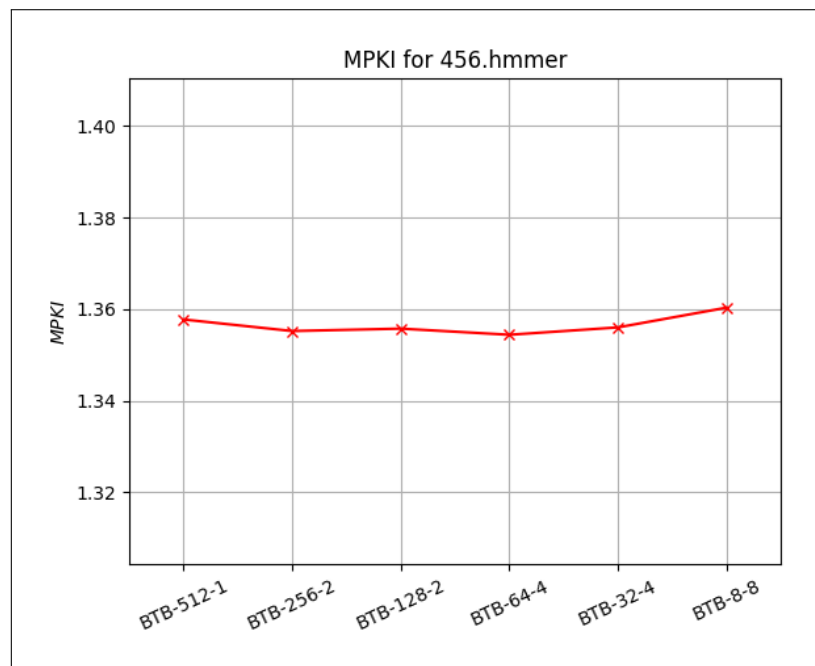
445-gobmk



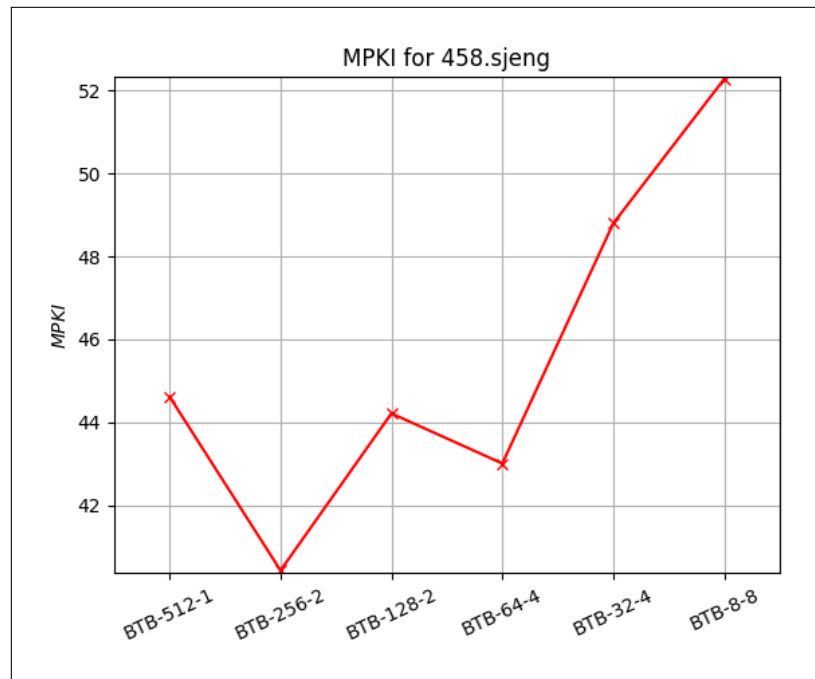
450-soplex



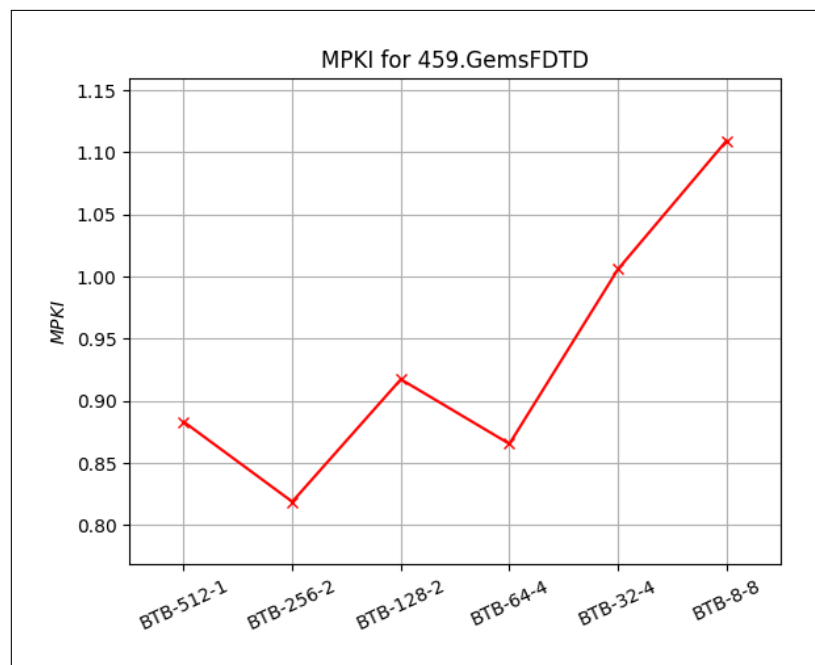
456-hmmer



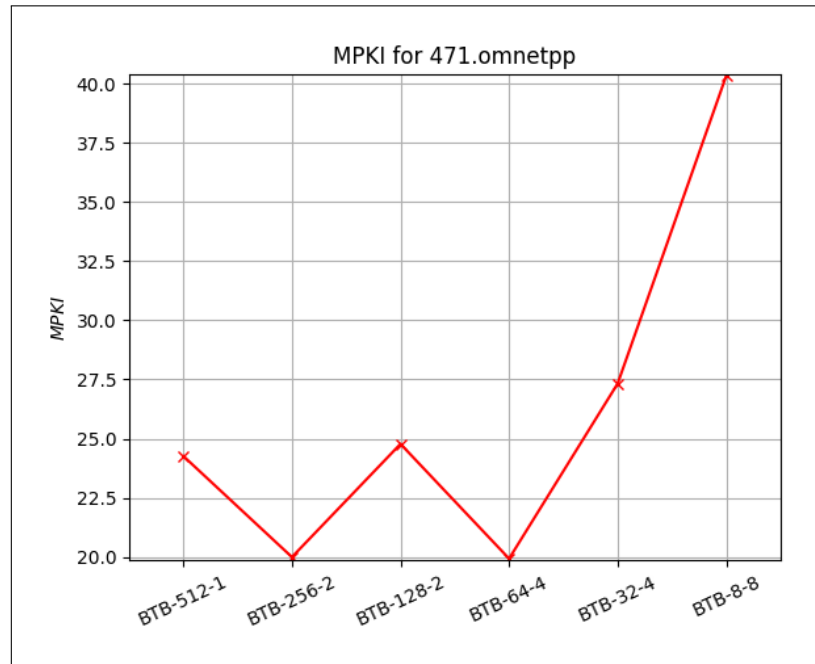
458-sjeng



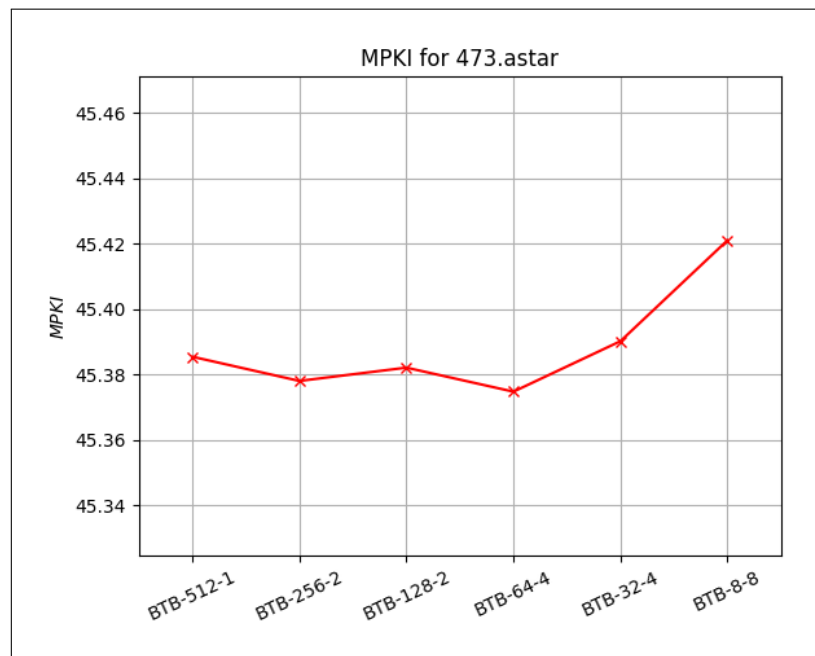
459-GemsFDTD



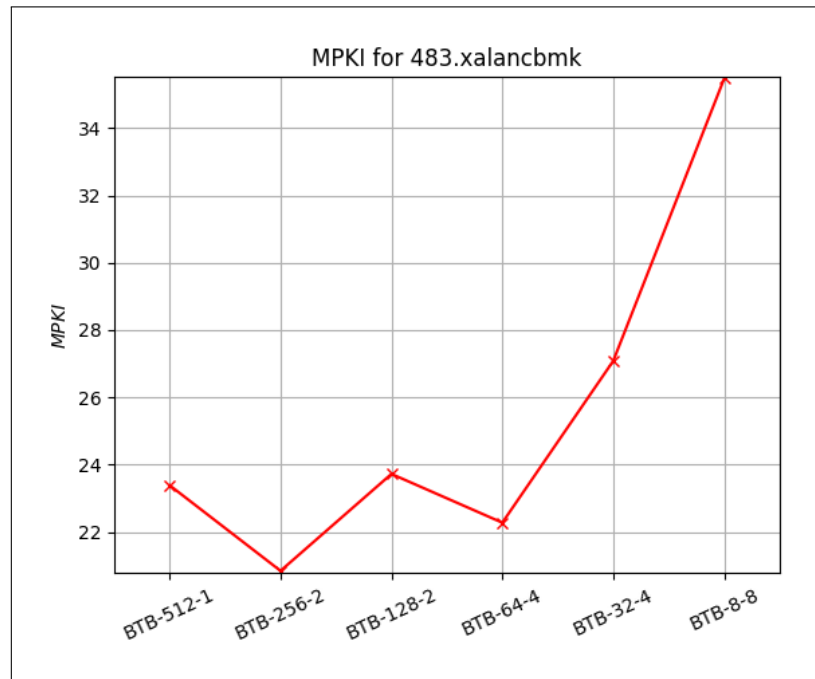
471-omnetpp



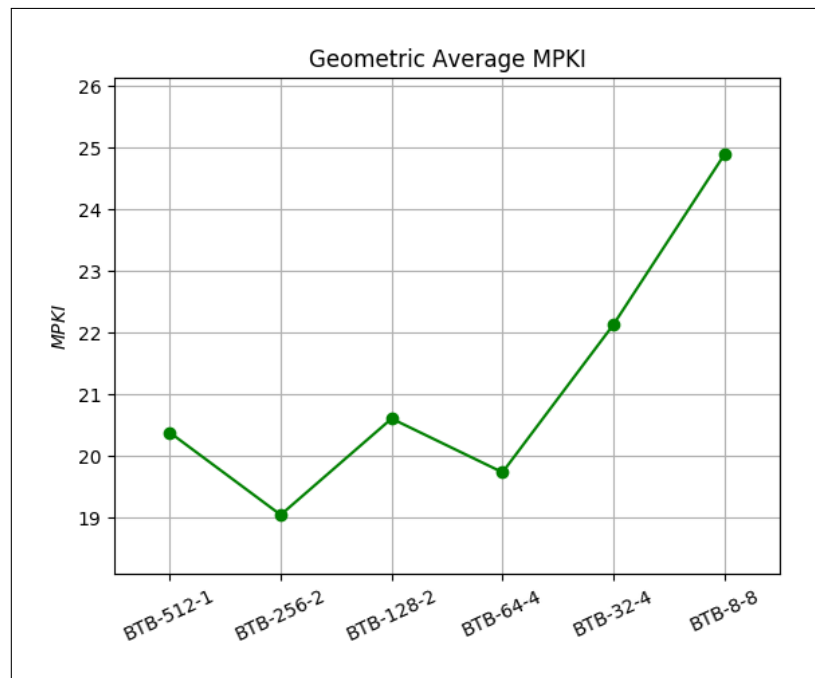
473-astar



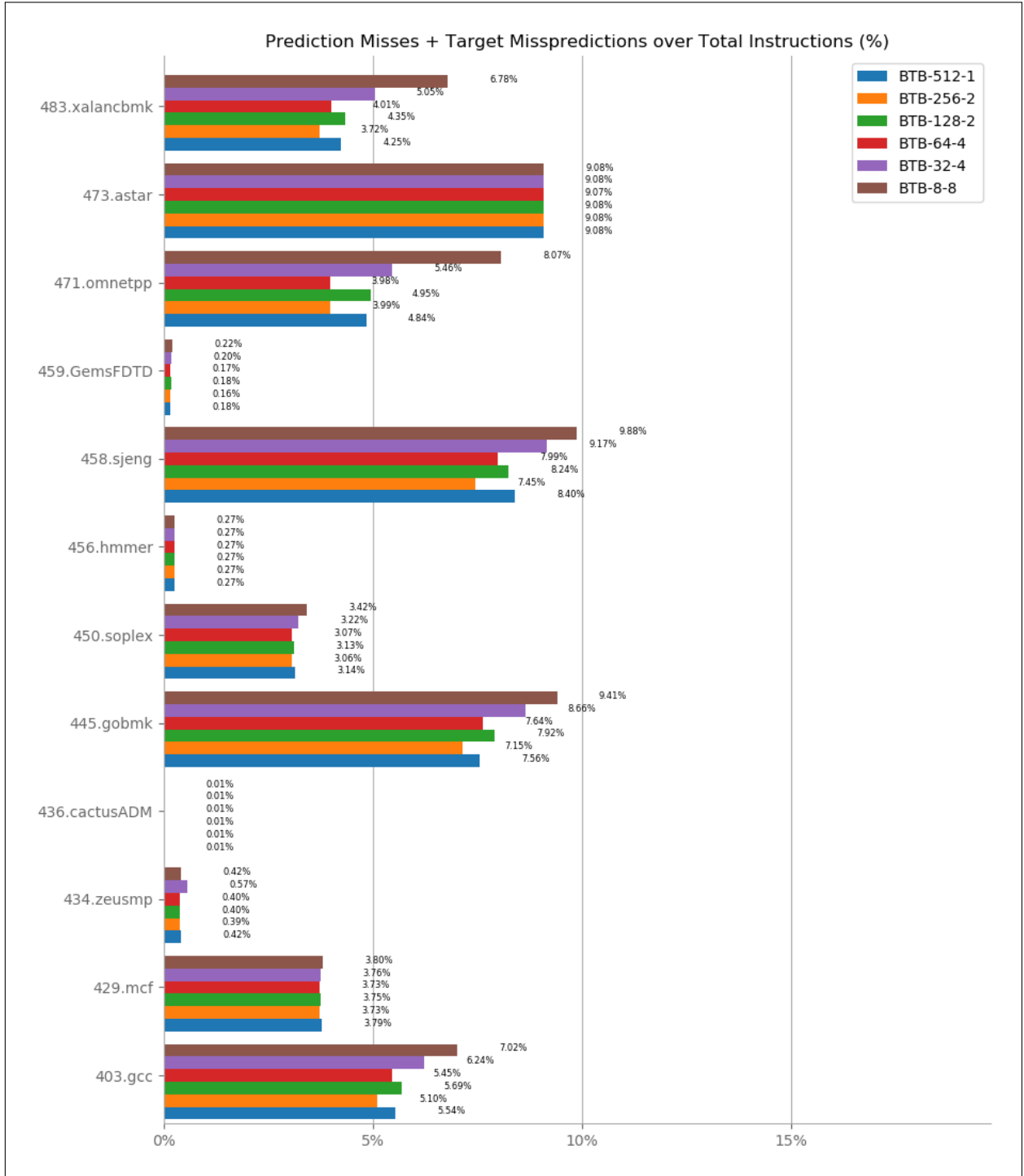
483-xalancbmk



Geometric Average of MPKI



Benchmarks Overview



Συμπεράσματα-Σχόλια Στα παραπάνω διαγράμματα χρησιμοποιούμε ως μετρική τα επιμέρους prediction misses + target misspredictions per KILOInstructions.

Από τα επιμέρους διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι για σταθερό πλήθος entries (table lines x associativity) η αύξηση του associativity επιφέρει βελτίωση. Την μικρότερη τιμή misses επιτυγχάνουν οι συνδυασμοί BTB-256-2 και BTB-64-4. Μάλιστα ο BTB-256-2 φαίνεται να έχει καθολικό προβάδισμα στην απόδοση όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα των γεωμετρικών μέσων.

Αξίζει να σημειώσουμε πως ο συνδυασμός BTB-8-8 έχει τη χειρότερη απόδοση, και άρα η υπερβολική αύξηση του associativity μειώνοντας τα table lines μετά από ένα όριο δε δρα βελτιωτικά.

Τέλος από το ραβδόγραμμα Benchmarks Overview, όπου φαίνονται συγκριτικά όλα τα παραπάνω και παρουσιάζονται τα total misspredictions per total instructions (%), μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ξανά ότι ο BTB-256-2 έχει την καλύτερη επίδοση. Να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο ότι στο διάγραμμα αυτό κάποια μετροπρογράμματα φαίνονται να έχουν υπερβολικά καλή επίδοση (hmmer, cactusADM, etc), όμως αυτό οφείλεται εν μέρει και στο ότι γενικότερα έχουν μικρό ποσοστό branches, όπως είδαμε στο πρώτο τμήμα της παρούσας άσκησης.

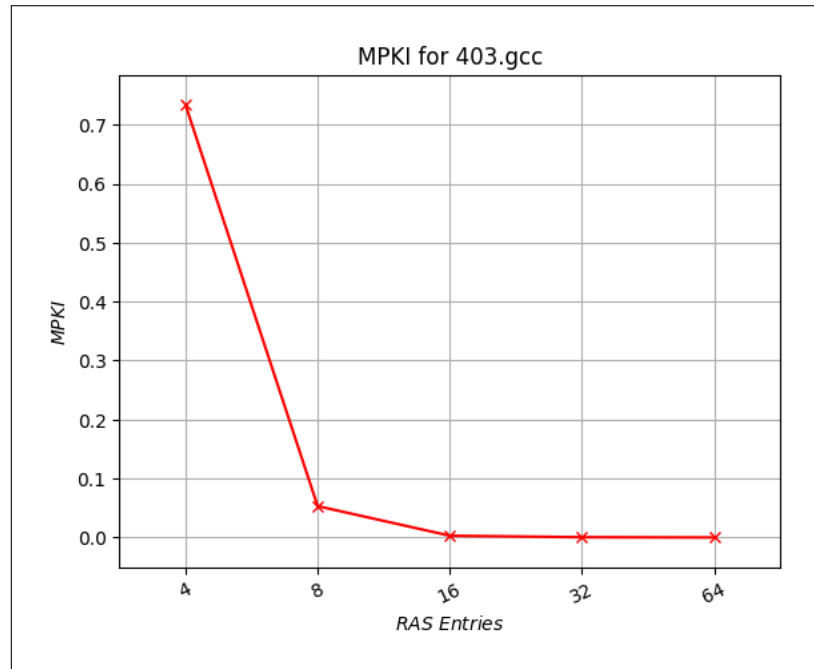
Συνοπτικά, καλύτερη επιλογή είναι ο BTB Predictor με 512 entries, οργανωμένα σε 256 lines και associativity 2.

2.4 Μελέτη του RAS

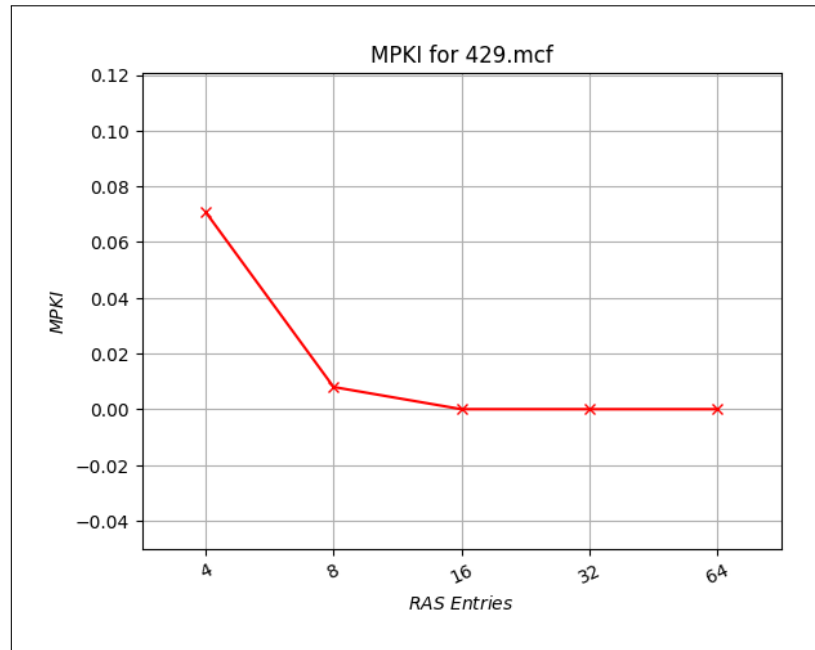
Στο σημείο αυτό μελετάμε την απόδοση του RAS για διαφορες τιμές entries.

Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν και ο σχετικός σχολιασμός τους:

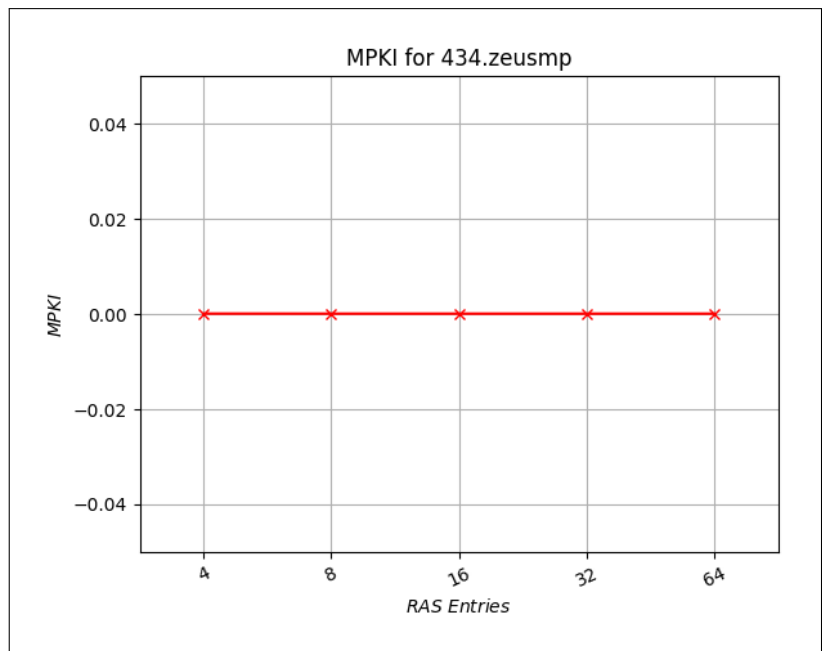
403-gcc



429-mcf

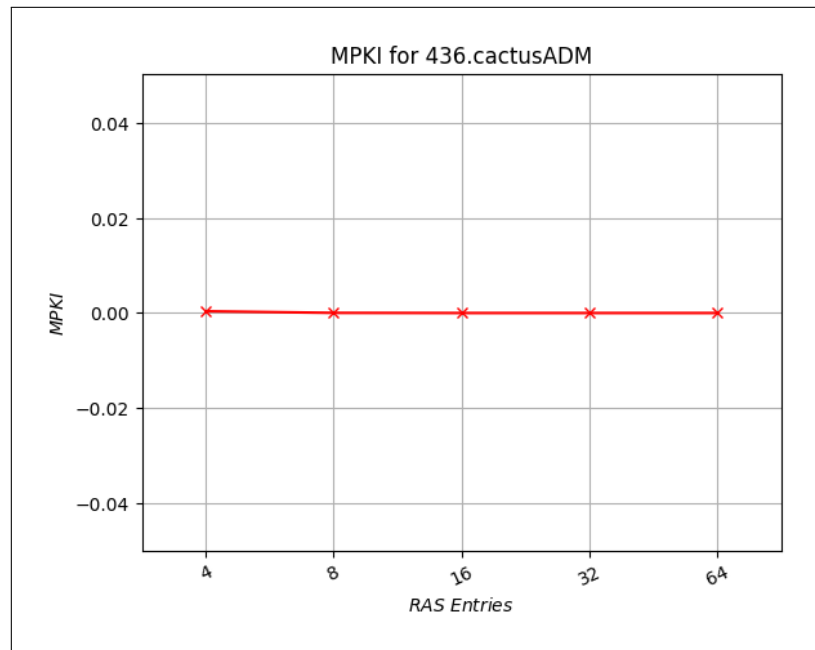


434-zeusmp

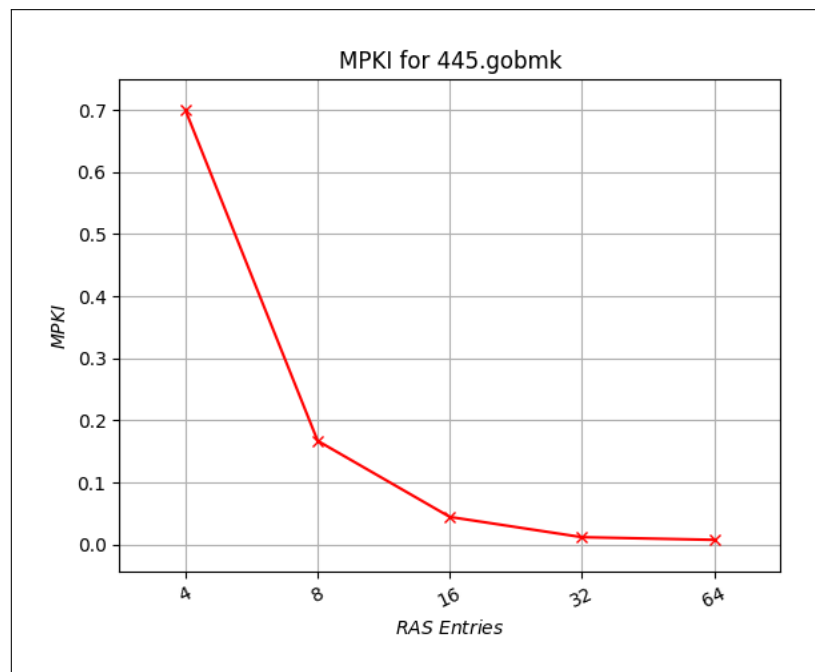


4

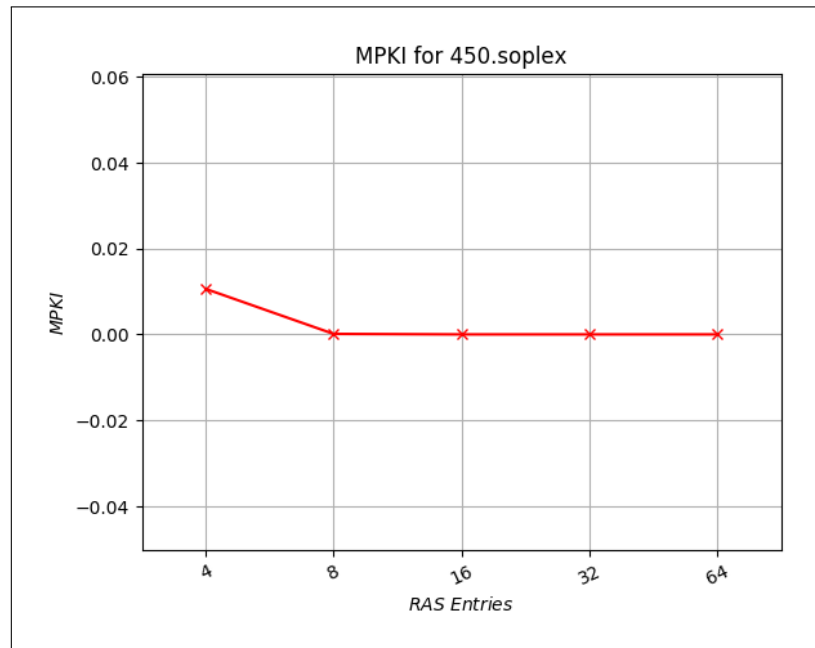
436-cactusADM



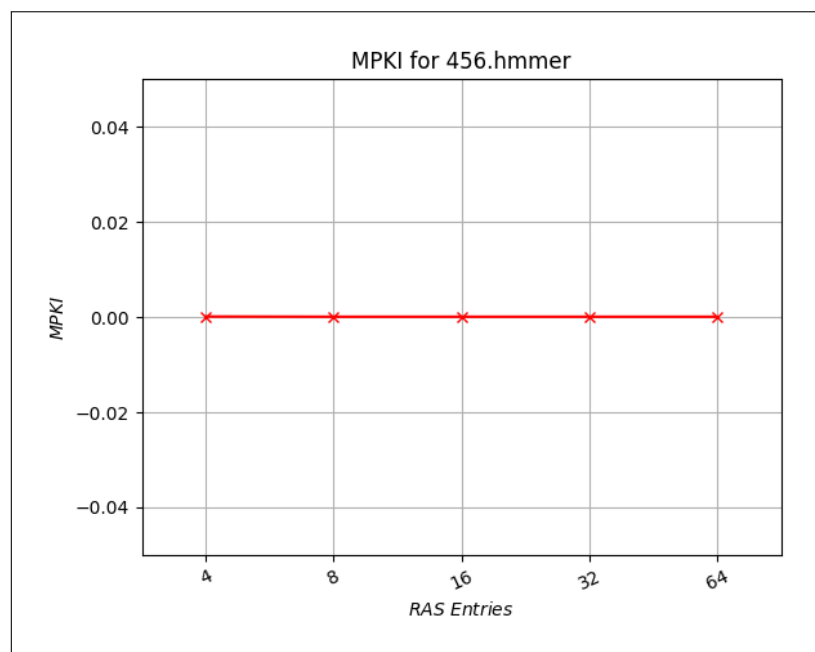
445-gobmk



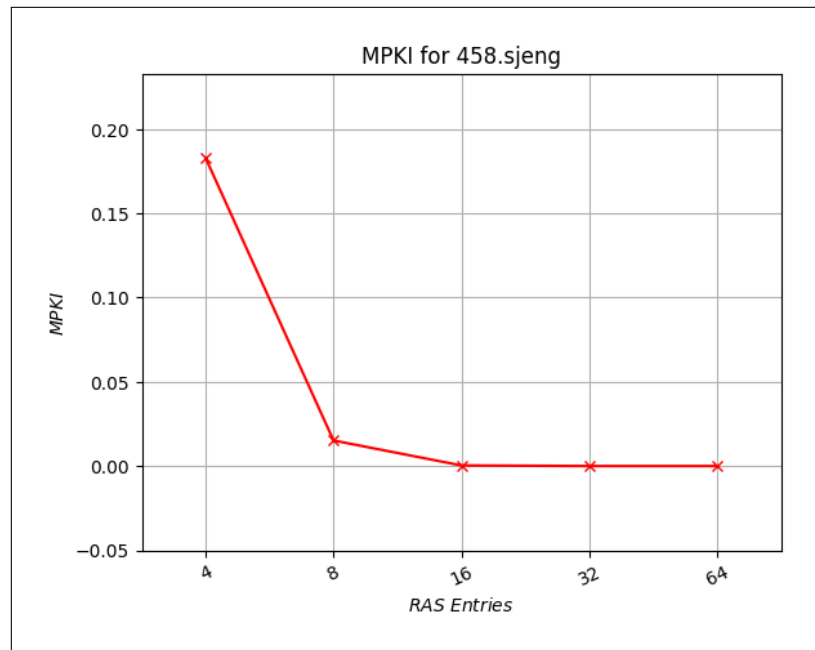
450-soplex



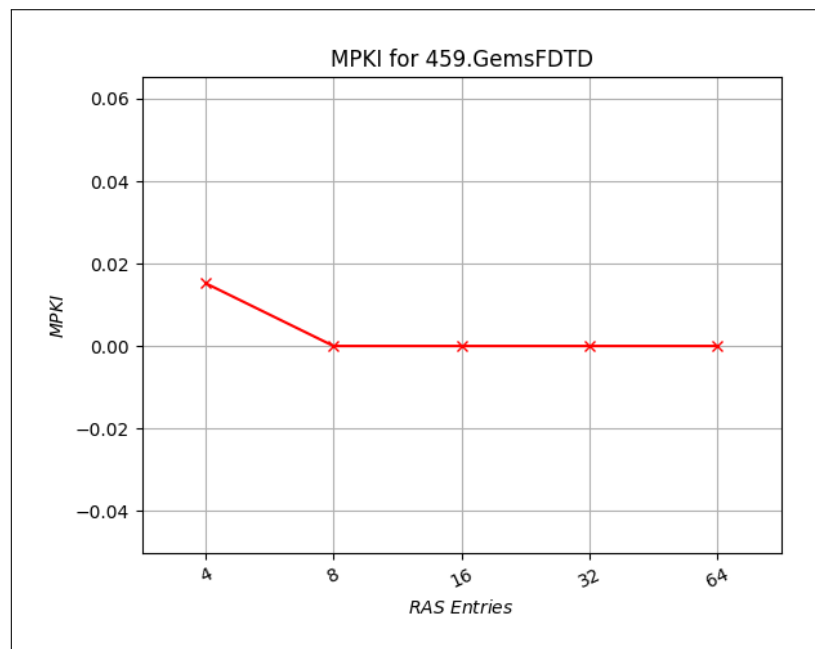
456-hmmer



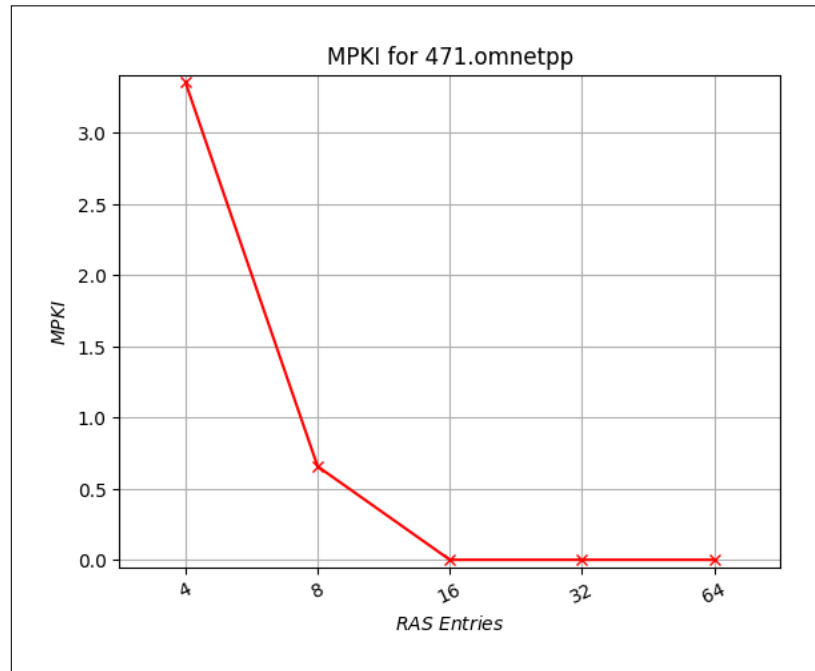
458-sjeng



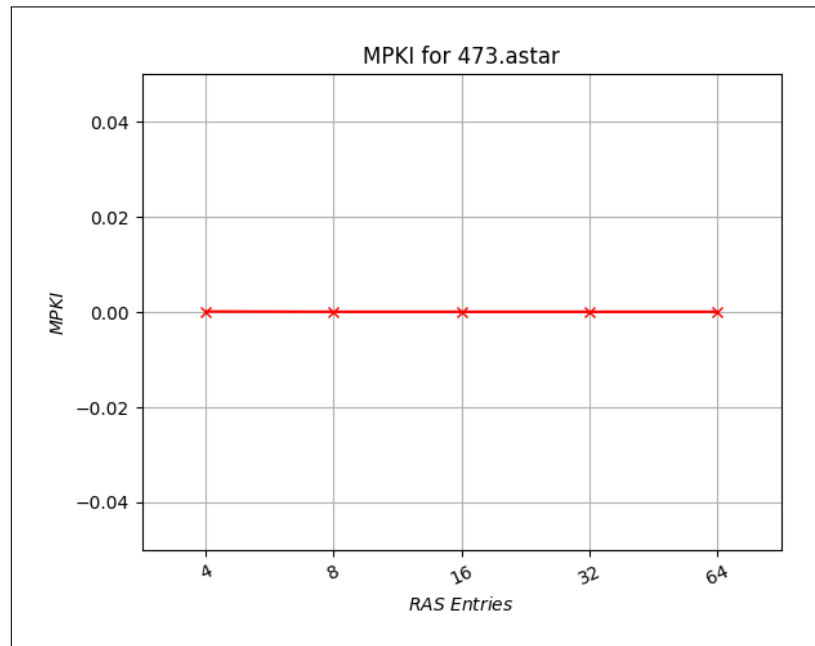
459-GemsFDTD



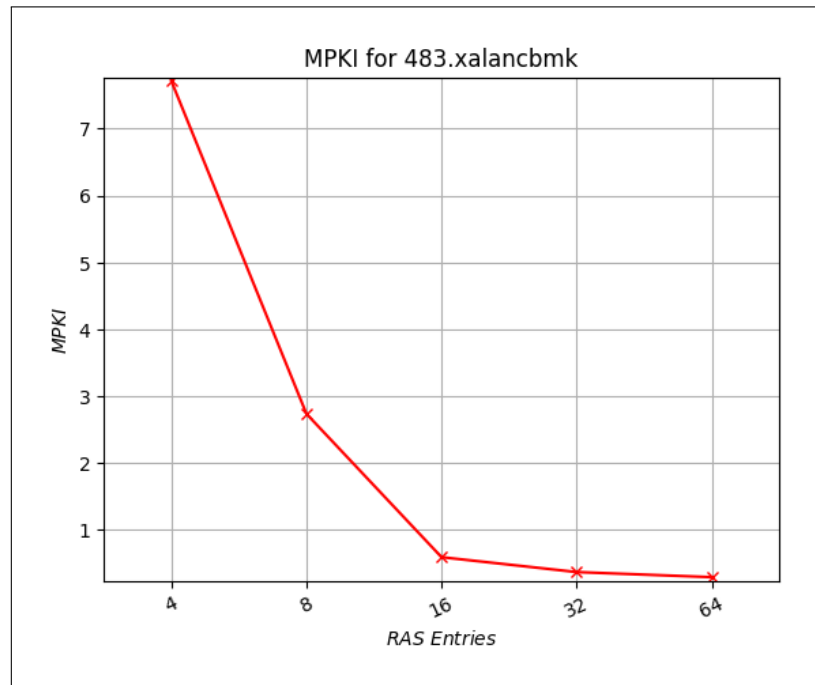
471-omnetpp



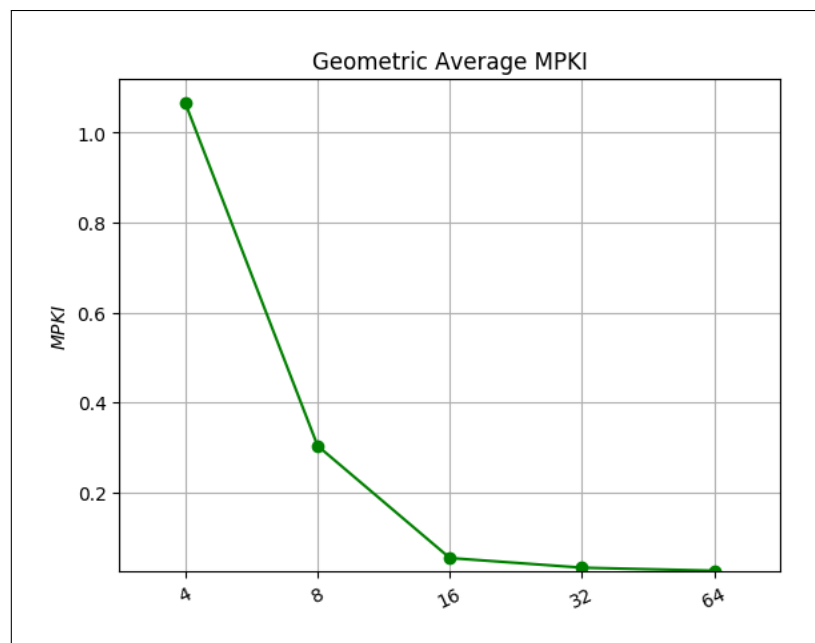
473-astar



483-xalancbmk



Geometric Average of MPKI



Συμπεράσματα-Σχόλια Για αριθμό εγγραφών στη RAS ίσο με 1, παρατηρούμε σε σχεδόν όλα τα benchmarks πολύ υψηλό MPKI. Μόλις το RAS κάνει χρήση 2 εγγραφών, είναι εμφανής η σημαντική μείωση του MPKI. Για μεταβολή από 2 σε 4 εγγραφές, παρατηρούμε και πάλι σχεδόν σε όλα τα μετρο-προγράμματα μείωση του MPKI, όπως είναι επιθυμητό. Για παραπάνω entries, τα MPKI είτε μειώνονται με αρκετά μικρότερο ρυθμό, είτε παραμένουν σχεδόν σταθερά. Σε κάθε περίπτωση με την αύξηση των εγγραφών οδηγούμαστε σε βελτίωση της επίδοσης, ωστόσο από ένα σημείο και πέρα η περεταίρω αύξηση δεν έχει νόημα καθώς η επίδοση δεν βελτιώνονται σημαντικά αναλογικά με την αύξηση του υλικού που πραγματοποιούμε.

Με βάση τα παραπάνω, οι επιλογή 16 ή 32 ή 64 εγγραφών έχει τη βέλτιστη επίδοση με κριτήριο αποκλειστικά το MPKI. Ωστόσο, δεν είναι σοφό να σπαταλήσουμε extra υλικό (που μεταφράζεται σε κόστος), όταν αυτή η δαπάνη υλικού δεν μεταφράζεται σε ανάλογη βελτίωση της απόδοσης. Συνεπώς θα επιλέξουμε το ελάχιστο υλικό που επιφέρει την καλύτερη απόδοση. Με βάση το κριτήριο αυτό, θα επιλέγαμε τις 16 εγγραφές RAS, καθώς η επίδοση είναι η βέλτιστη χωρίς να σπαταλάται hardware. Σε διαφορετική περίπτωση θα μπορούσαμε να επιλέξουμε και τις 8 εγγραφές RAS, με σχετικά μικρή επίπτωση στην απόδοση.

Συνοπτικά, καλύτερη επιλογή είναι 16 εγγραφές στην RAS.

2.5 Μελέτη διαφορετικών Branch Predictors

Στο σημείο αυτό μελετάμε την απόδοση διαφορετικών predictors στο σύνολο των μετροπρογραμμάτων. Οι Predictors που συγκρίνονται είναι οι παρακάτω:

1. Static Always Taken Predictor
2. Static BTFNTPredictor (BackwardTaken-ForwardNotTaken)
3. Nbit-8K-4bit
4. Pentium-M
5. LocalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHT(2K, 8bit)
6. LocalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHT(4K, 4bit)
7. GlobalHistory-PHT(16K, 2bit)-BHR(5bit)
8. GlobalHistory-PHT(8K, 4bit)-BHR(5bit)
9. GlobalHistory-PHT(8K, 4bit)-BHR(10bit)
10. GlobalHistory-PHT(16K, 2bit)-BHR(10bit)
11. Tournament-1K-Entries
 - P_0 : Nbit-8K-2bit
 - P_1 : Nbit-4K-4bit
12. Tournament-2K-Entries
 - P_0 : GlobalHistory-PHT(4K, 4bit)-BHR(2bit)
 - P_1 : Nbit-8K-2bit
13. Tournament-1K-Entries
 - P_0 : GlobalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHR(2bit)
 - P_1 : LocalHistory-PHT(2K, 4bit)-BHT(4K, 2bit)
14. Tournament-1K-Entries

- P_0 : Nbit-8K-2bit
- P_1 : GlobalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHR(5bit)

15. Tournament-2K-Entries

- P_0 : Nbit-8K-2bit
- P_1 : GlobalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHR(5bit)

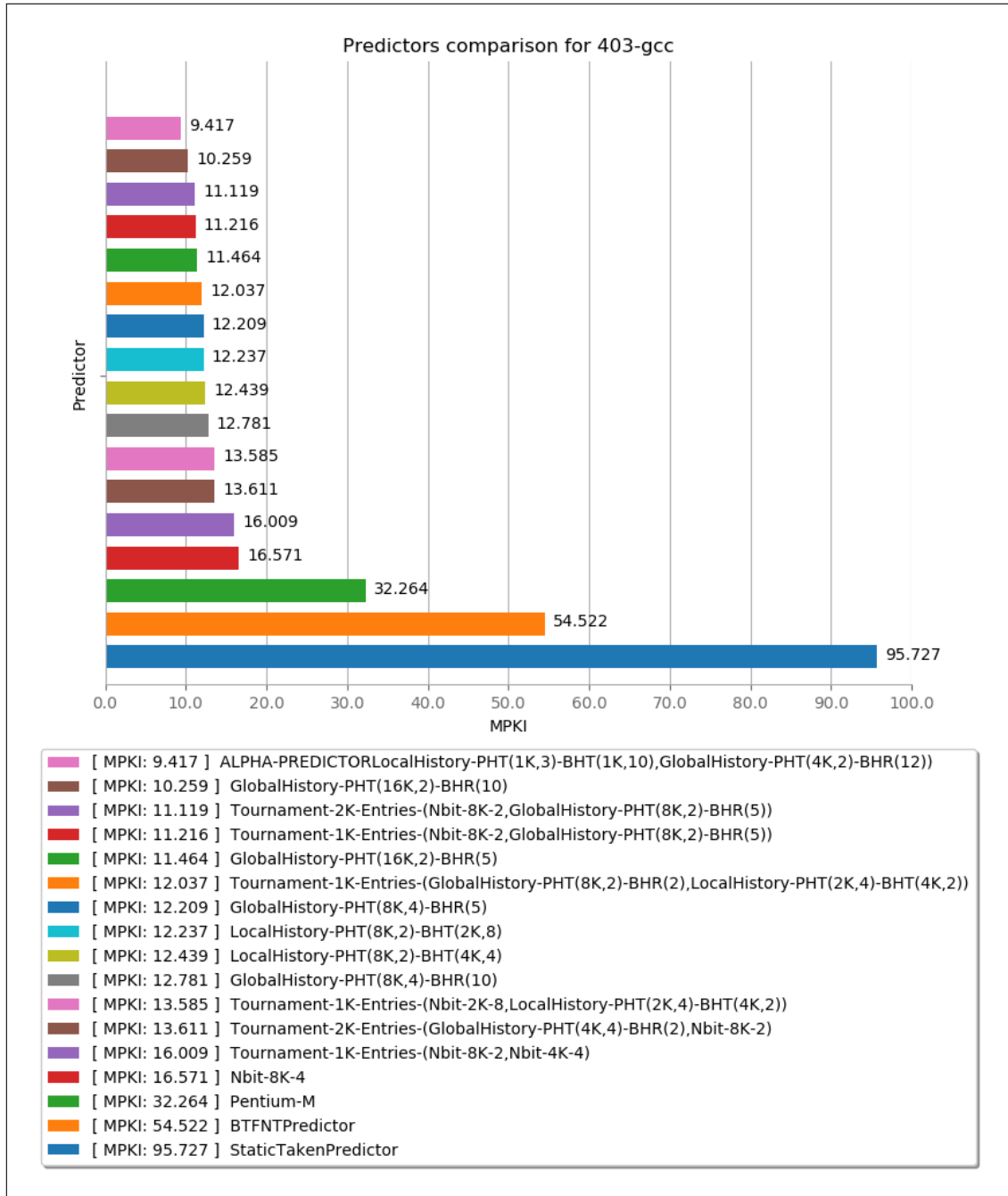
16. Tournament-1K-Entries

- P_0 : Nbit-2K-8
- P_1 : LocalHistory-PHT(2K, 4bit)-BHT(4K, 2bit)

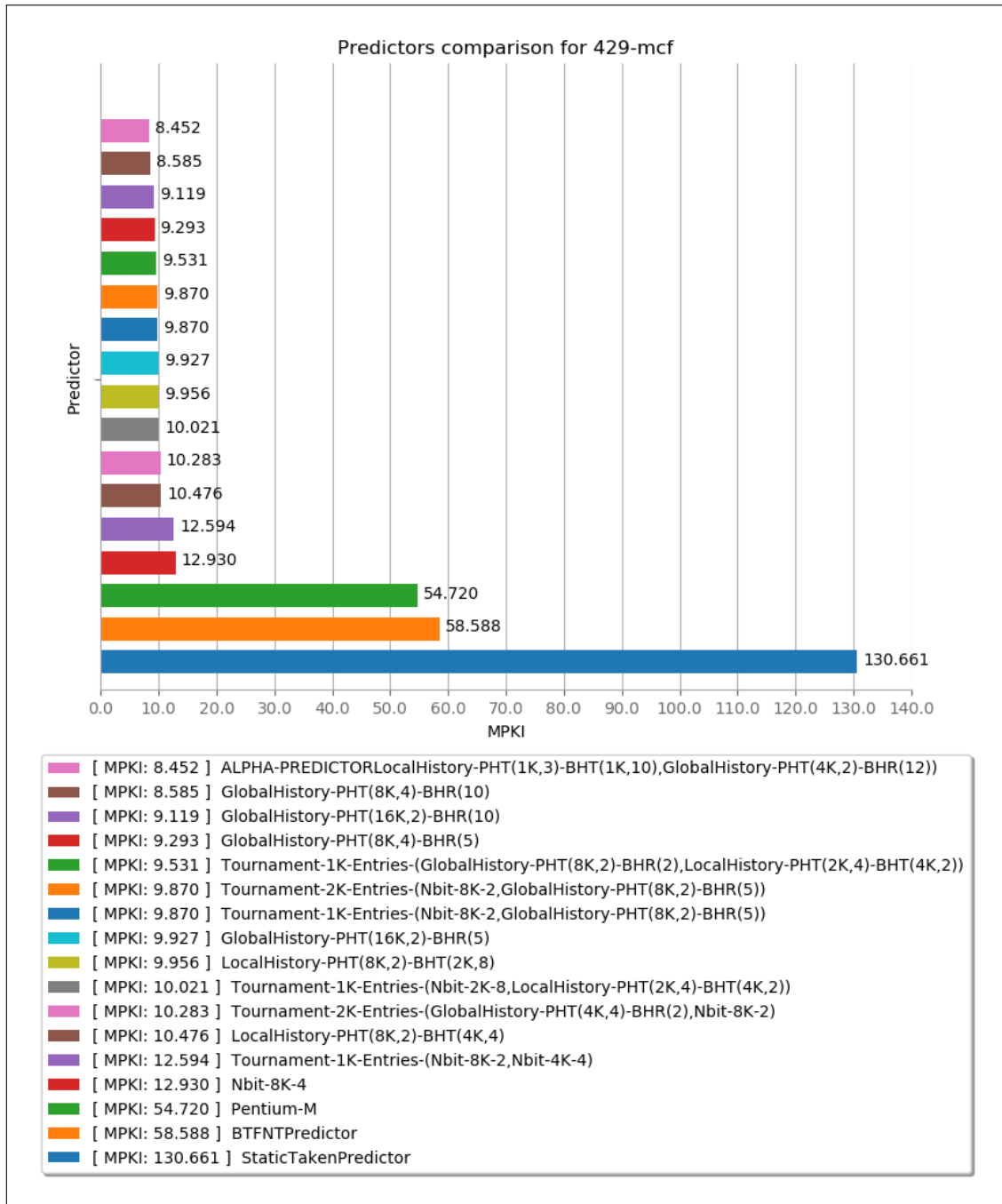
17. Alpha Predictor

Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν και ο σχετικός σχολιασμός τους:

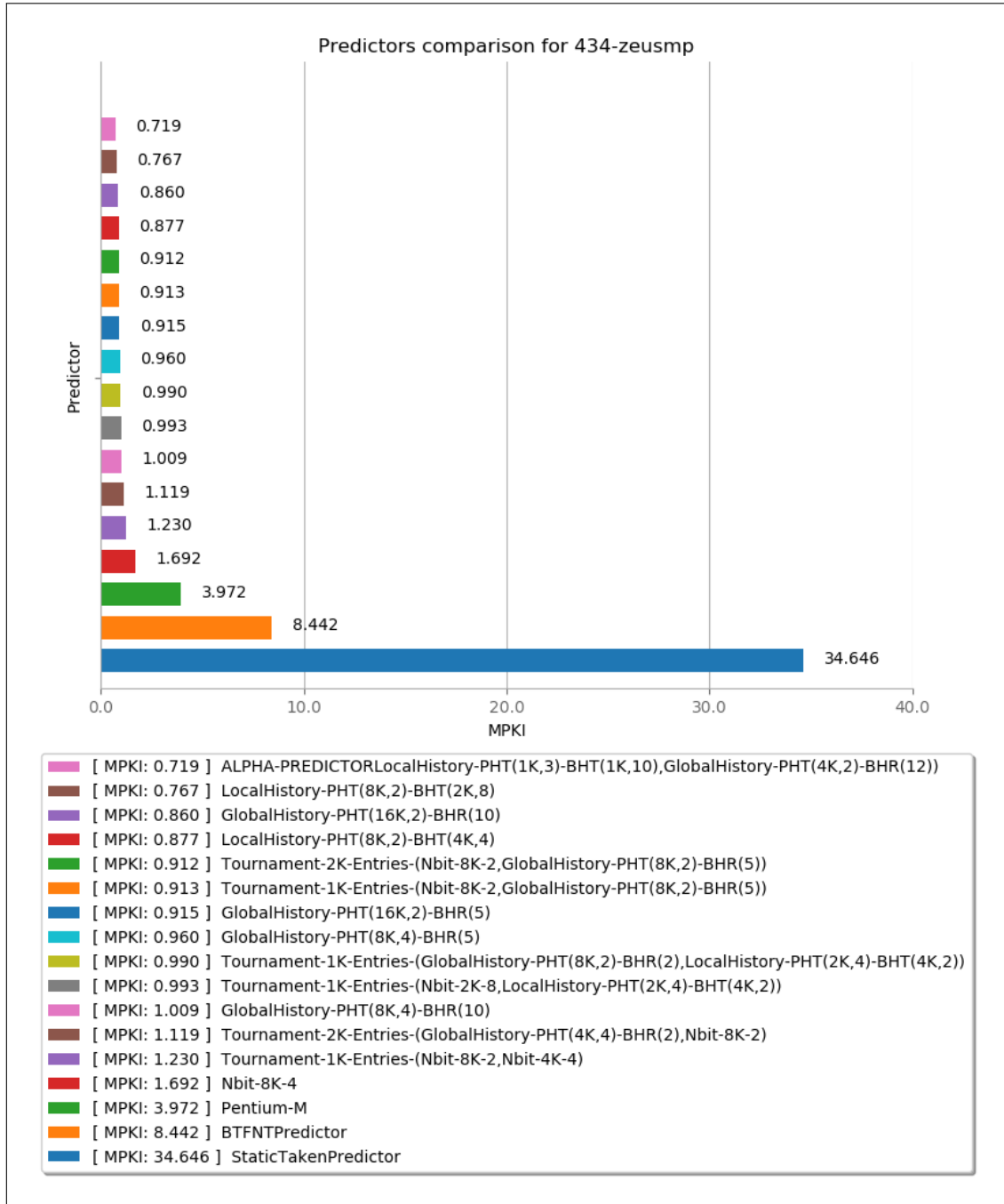
403-gcc



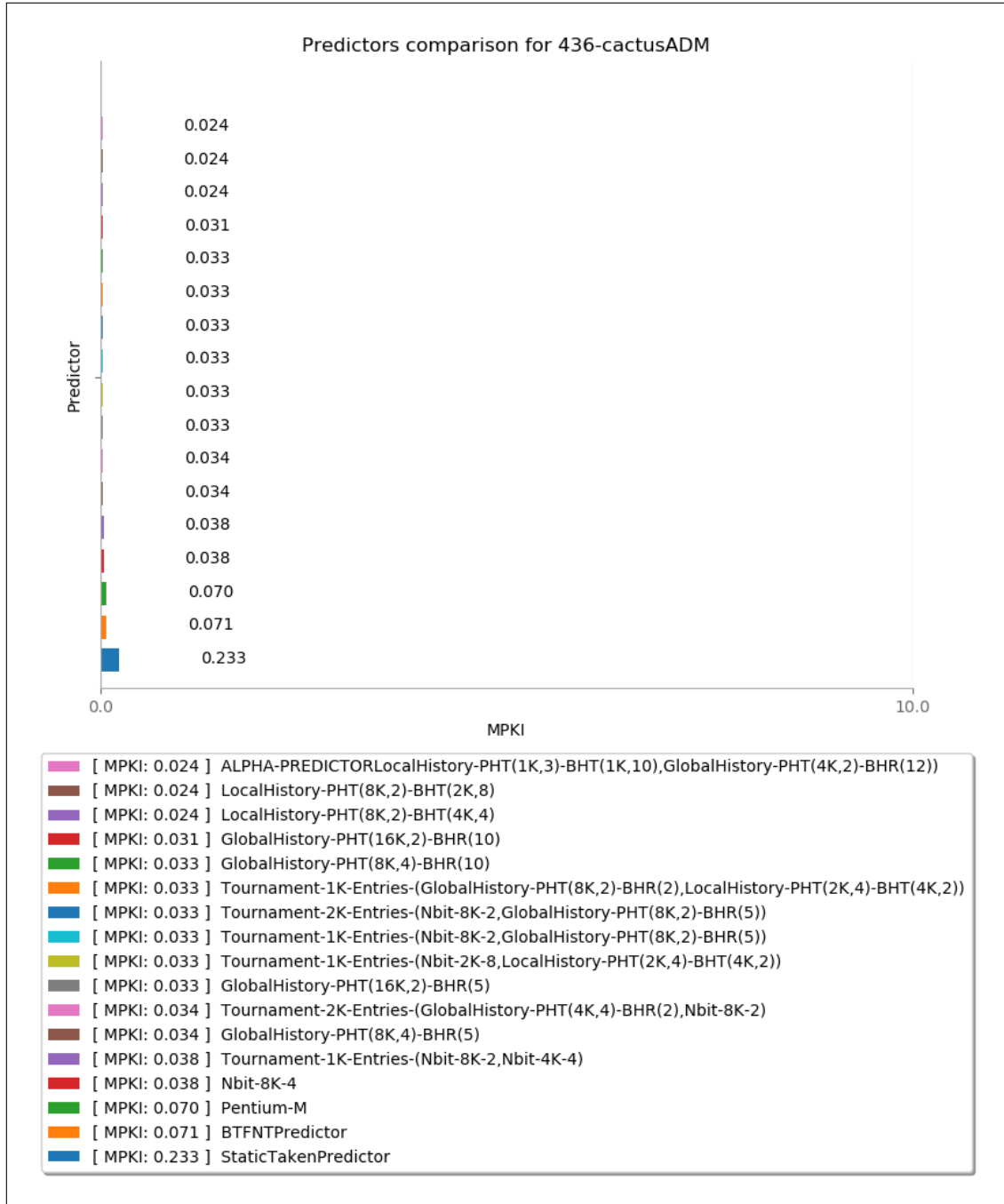
429-mcf



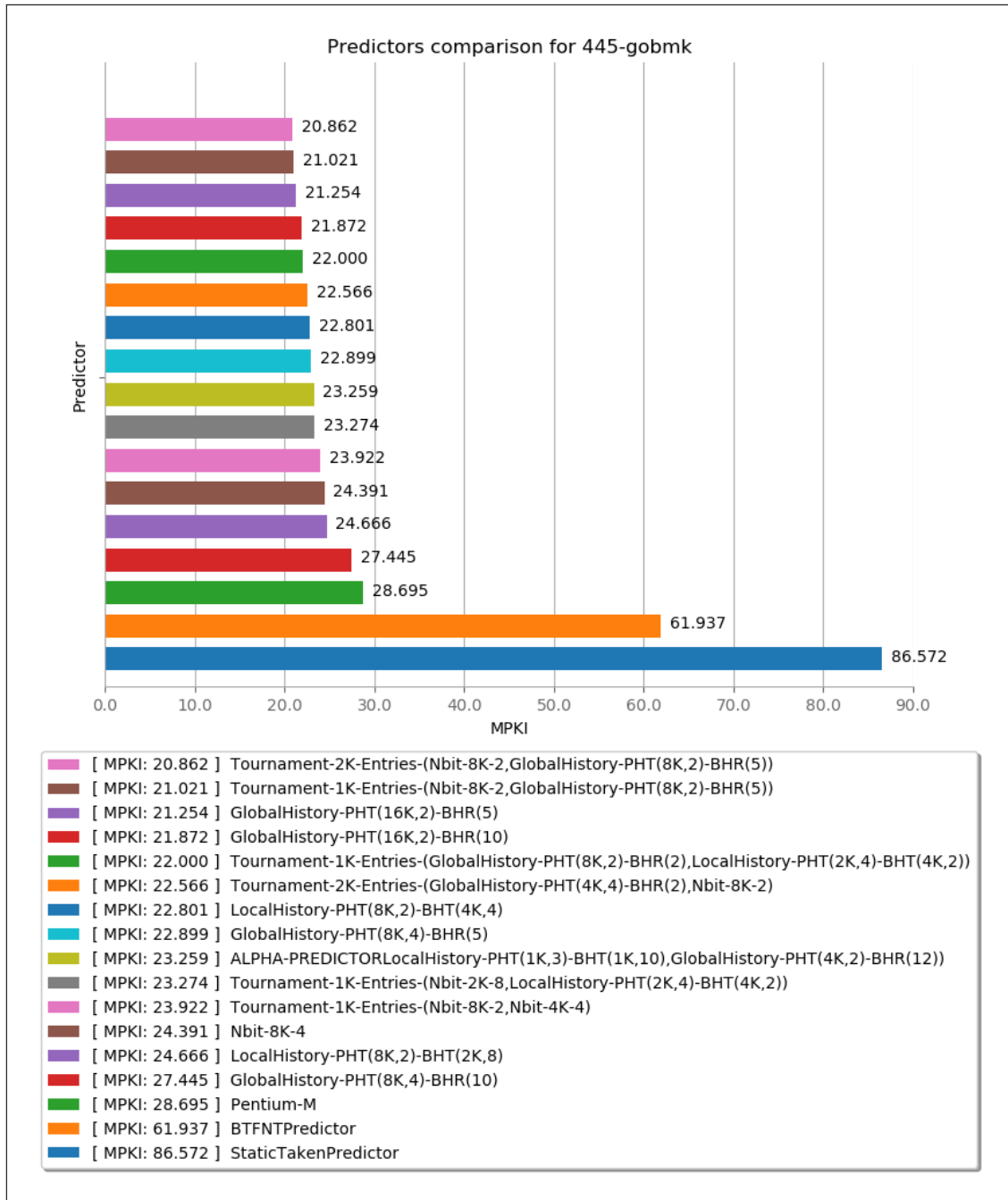
434-zeusmp



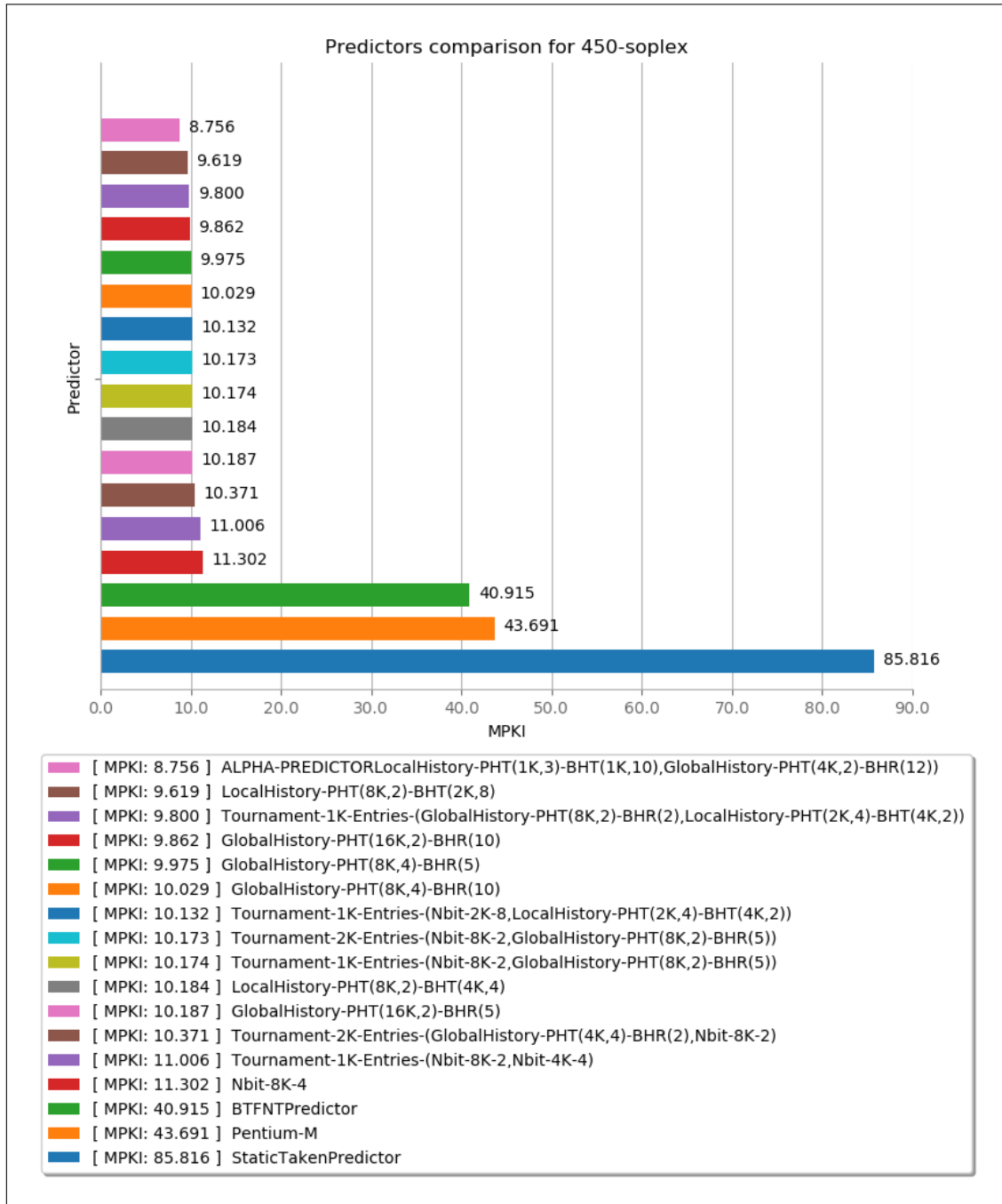
436-cactusADM



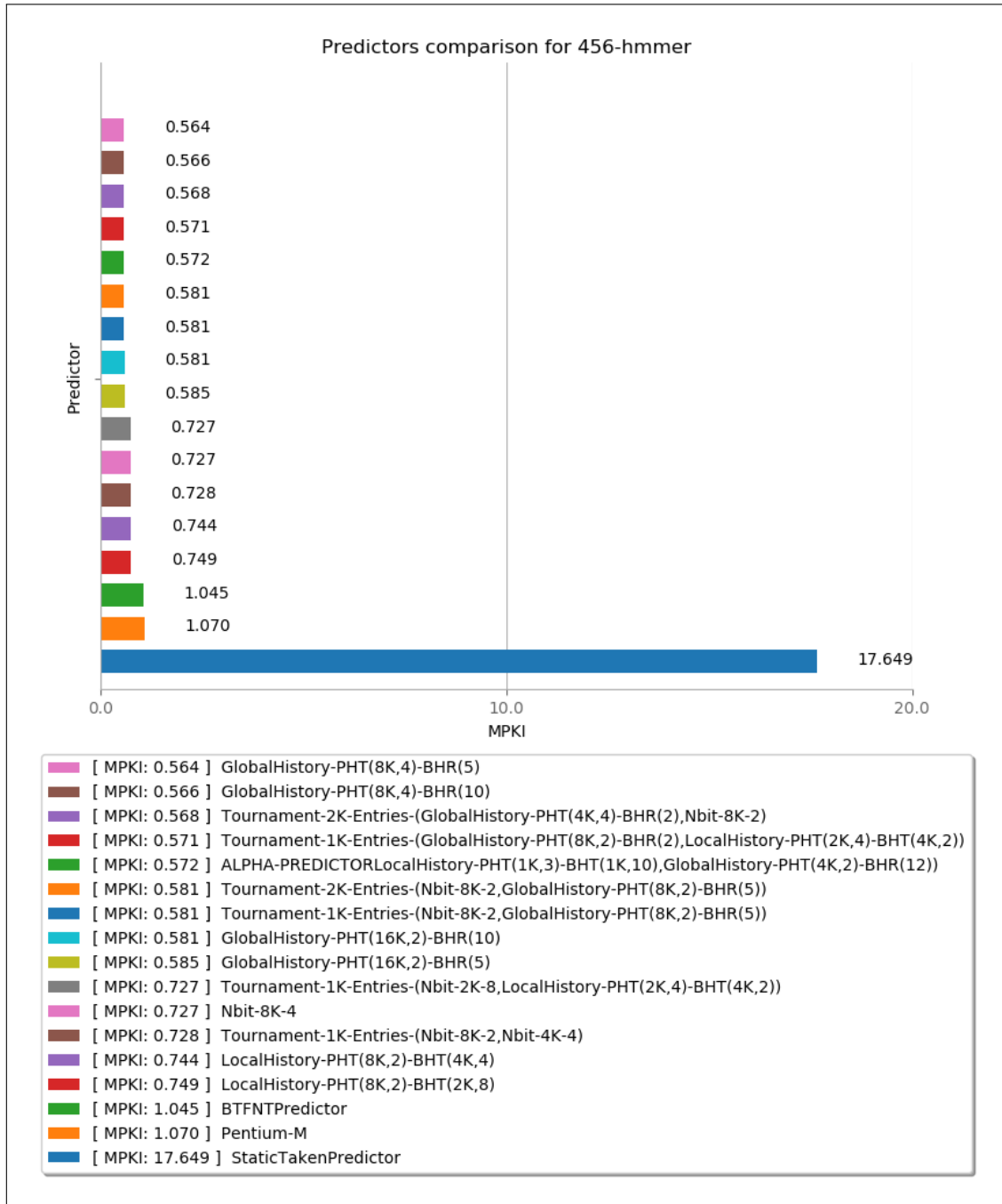
445-gobmk



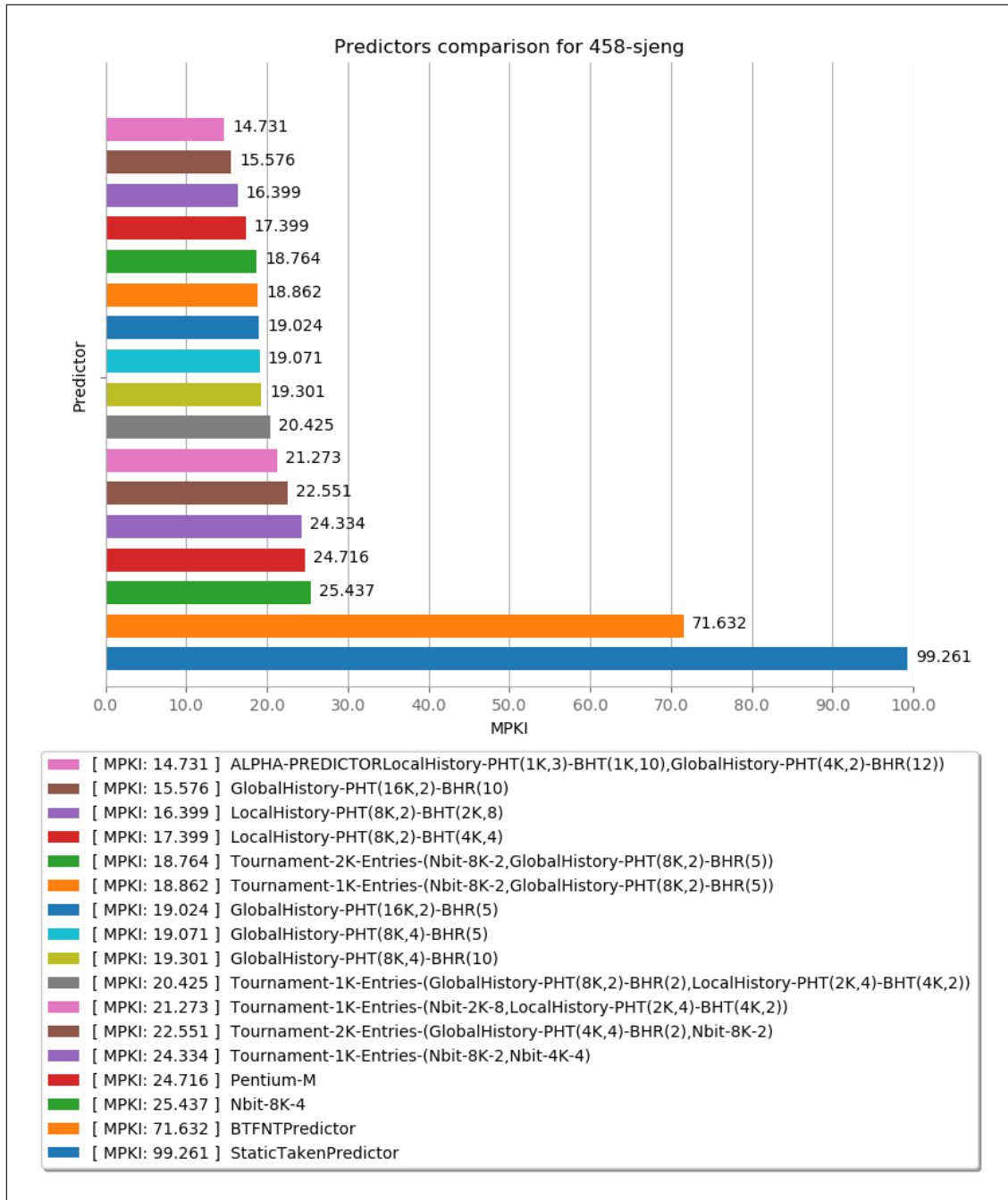
450-soplex



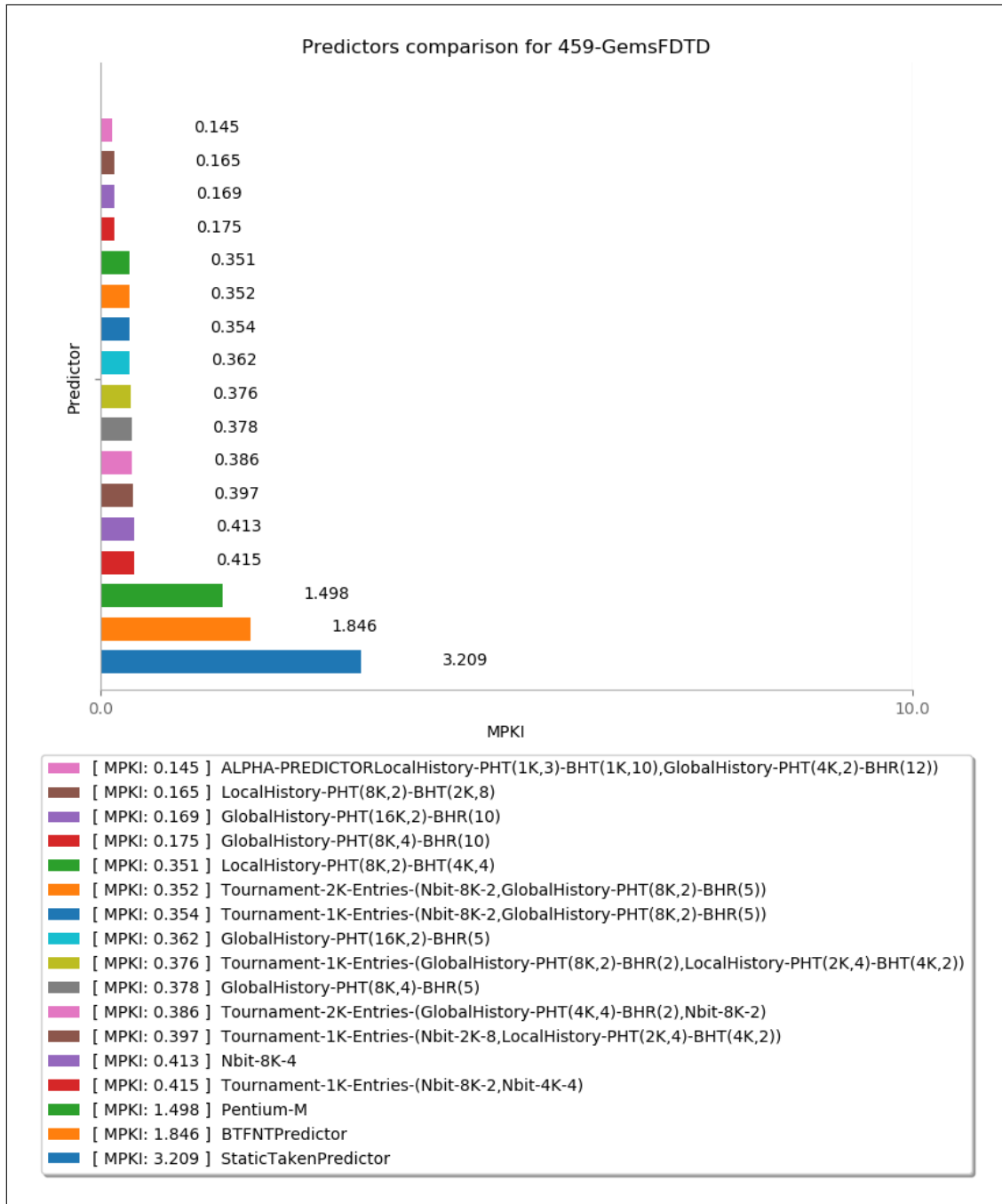
456-hmm



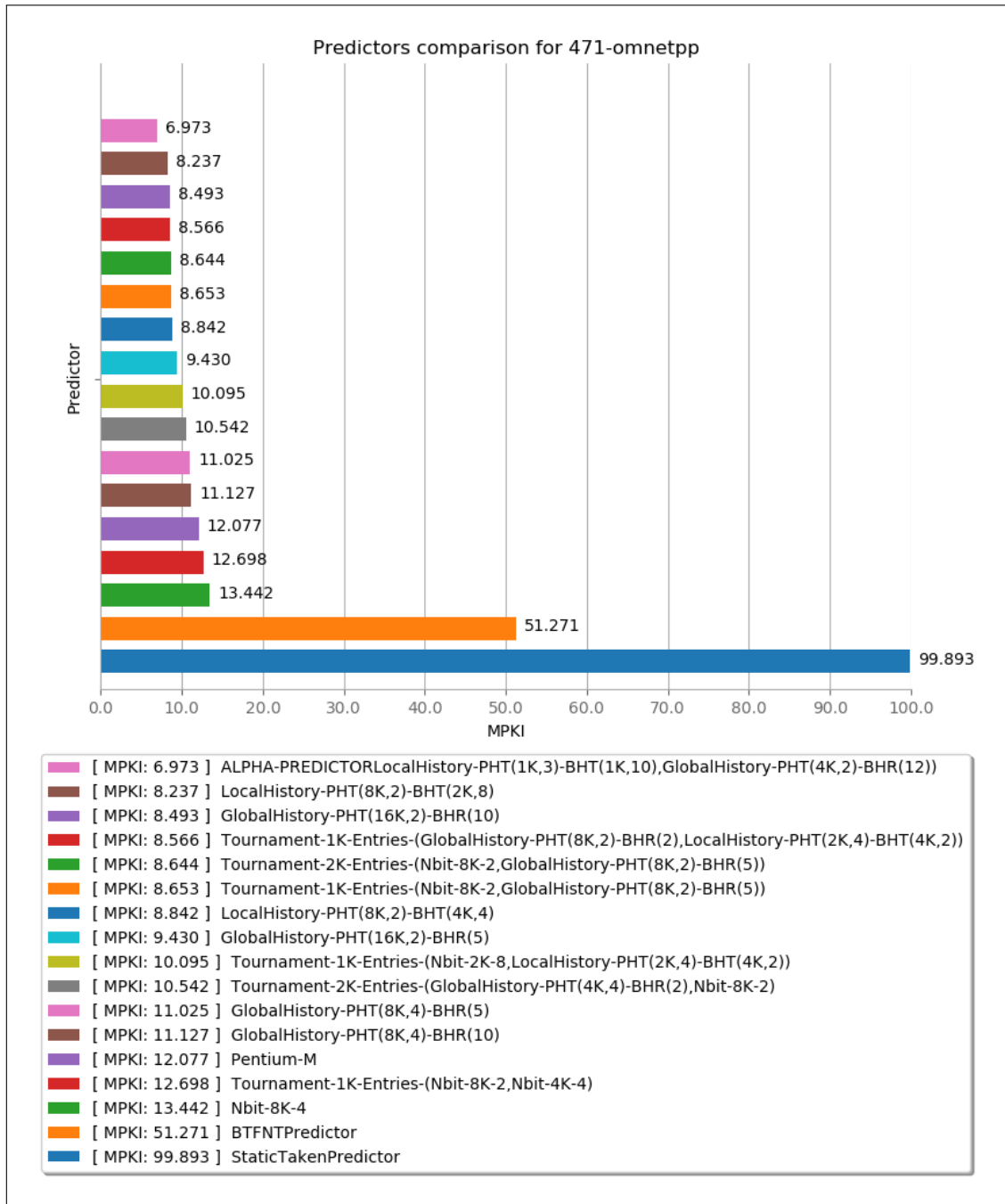
458-sjeng



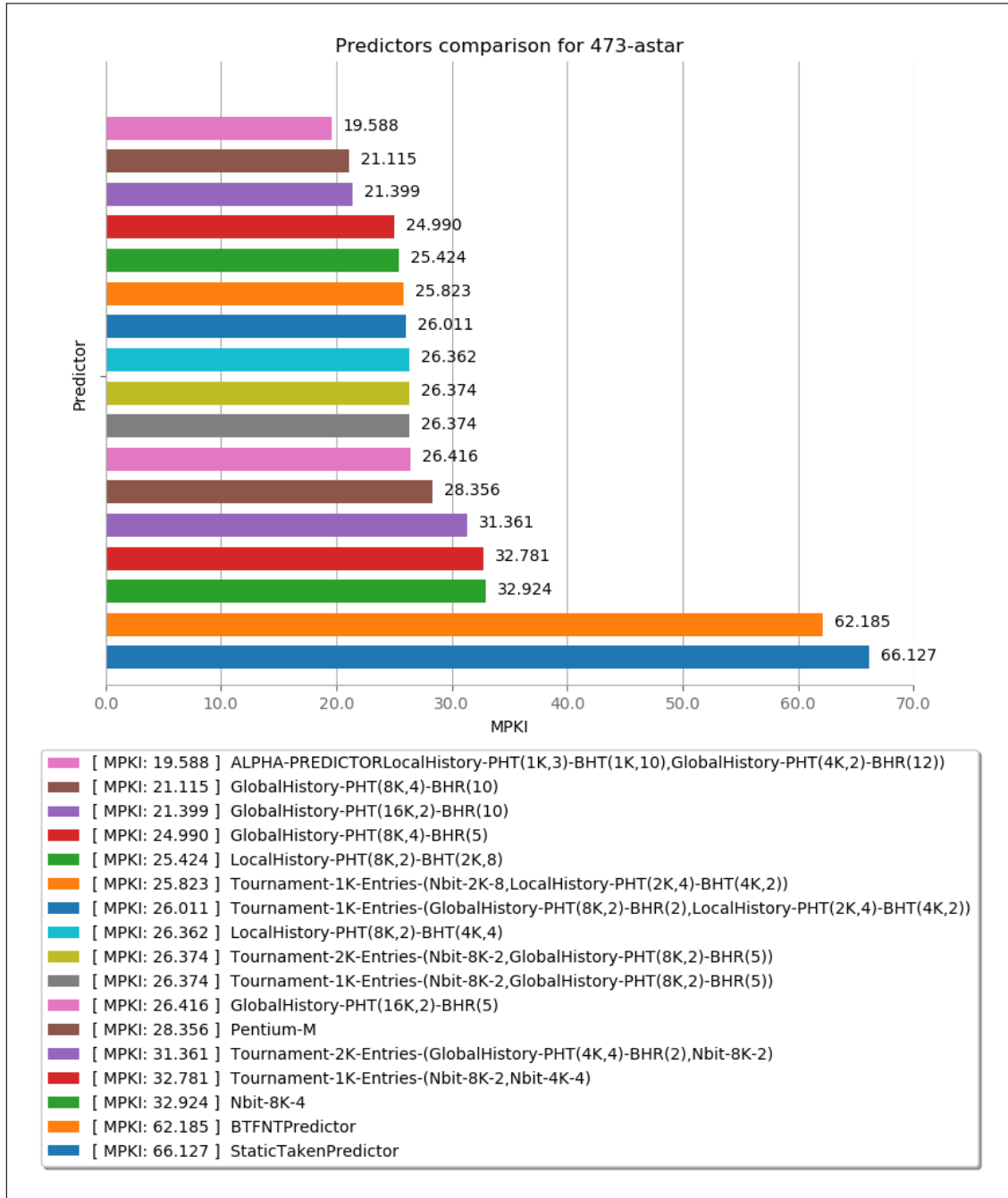
459-GemsFDTD



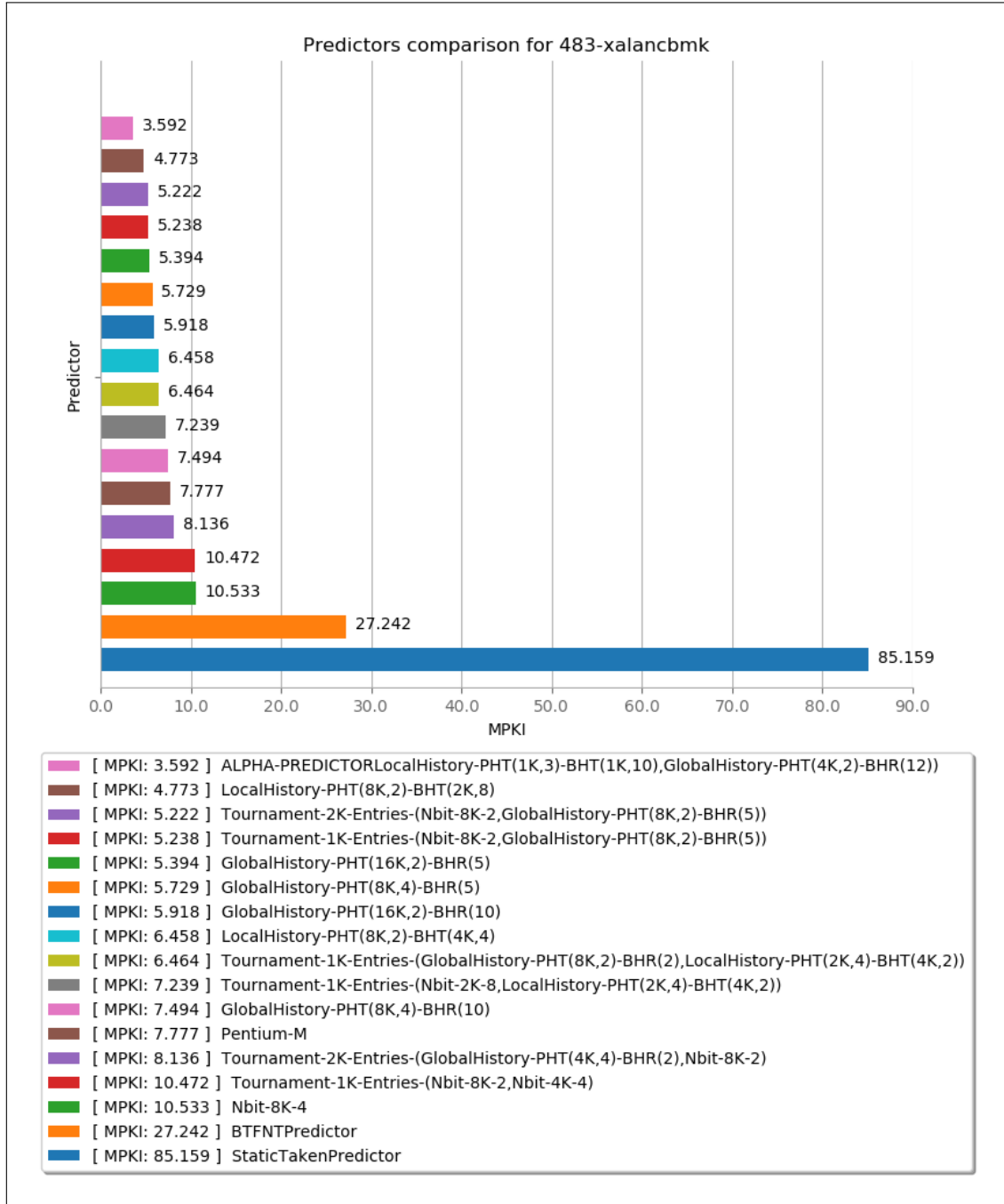
471-omnetpp



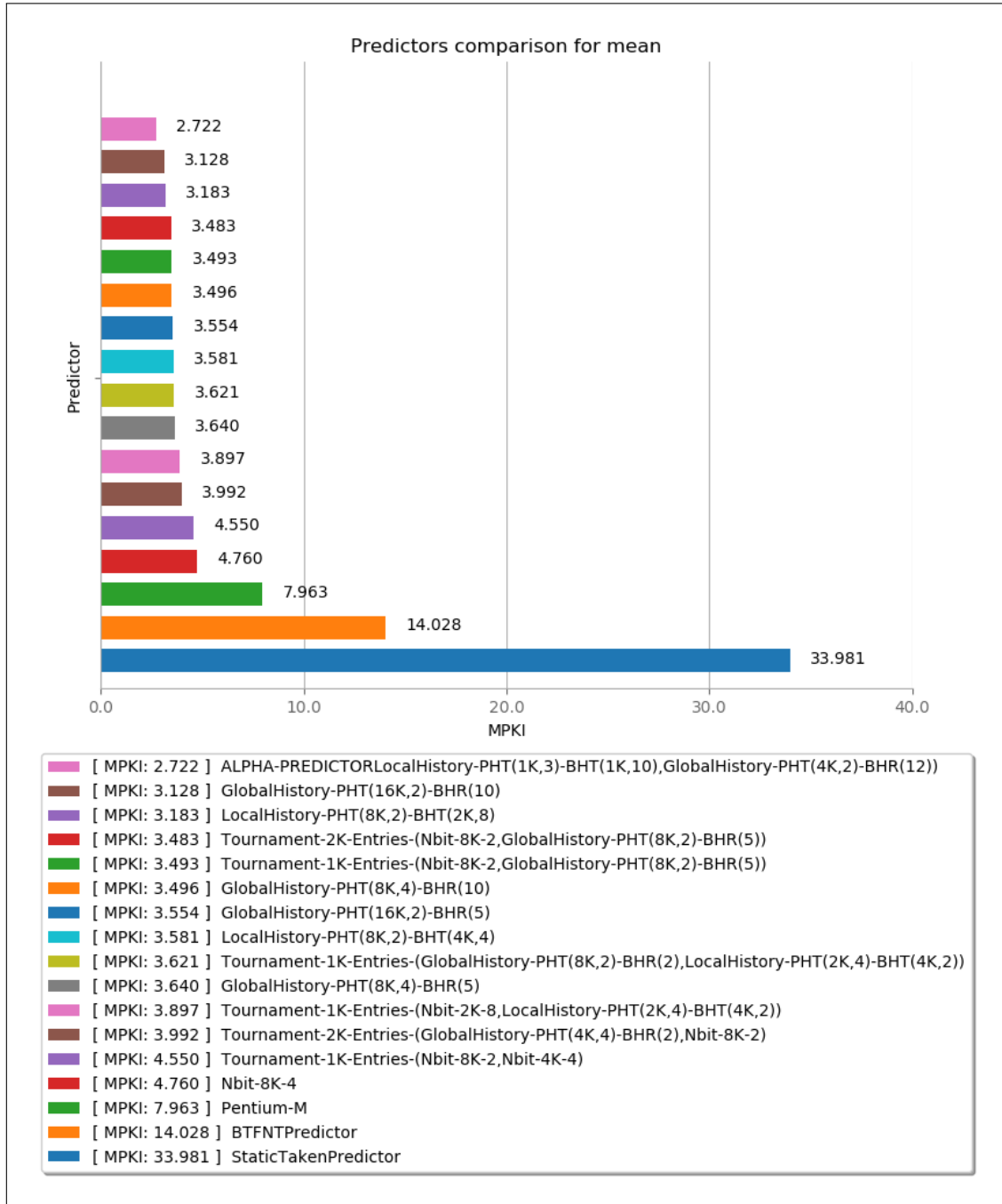
473-astar



483-xalancbmk



Geometric Average of MPKI



Συμπεράσματα-Σχόλια Όπως είναι αναμενόμενο, ο Static Always Taken Predictor έχει τη χειρότερη επίδοση σε όλα τα μετροπρογράμματα. Επόμενος χειρότερος predictor είναι ο BTFNT, εξίσου αναμενόμενο αφού πρόκειται για static predictor, με ελαφρά ωστόσο καλύτερη επίδοση από τον Always Taken. Ακολουθεί ο Pentium Predictor.

Όσον αφορά την επιλογή ενός συγκεκριμένου predictor, θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν την χρήση που θα κάνει το σύστημα. Αν το προφίλ της χρήσης κάνει align με ένα ή περισσότερα benchmarks τότε θα διαλέξουμε τον predictor που τα πηγαίνει καλύτερα σε αυτήν την χρήση. Επειδή στη μελέτη αυτή όμως δε δίνεται έμφαση σε ένα συγκεκριμένο benchmark, θα κρίνουμε με βάση τη συνολική επίδοση των 12 προηγούμενων benchmarks κατά μέσο όρο. Για τη συνολική αυτή εποπτεία, παραθέτουμε το τελευταίο διάγραμμα, των γεωμετρικών μέσων όρων. Με βάση το διάγραμμα αυτό, και επιβεβαιώνοντας από τα επιμέρους διαγράμματα των benchmarks, συμπεραίνουμε πως ο **Alpha Predictor** έχει κατά μέσο όρο την καλύτερη επίδοση (χαμηλό MPKI) συνολικά, αλλά και την καλύτερη επίδοση σε κάθε ένα από τα benchmarks. Εξίσου καλά ωστόσο αποδίδουν και οι GlobalHistory-PHT(16K, 2bit)-BHR(10bit) LocalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHT(2K, 8bit).

Συνολικά, με βάση τις γεωμετρικές μέσες τιμές, οι predictors σε σειρά φθίνουσας επίδοσης είναι:

1. Alpha Predictor
2. GlobalHistory-PHT(16K, 2bit)-BHR(10bit)
3. LocalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHT(2K, 8)
4. Tournament-2K-Entries-(Nbit-8K-2, GlobalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHR(5bit))
5. Tournament-1K-Entries-(Nbit-8K-2, GlobalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHR(5bit))
6. GlobalHistory-PHT(8K, 4bit)-BHR(10bit)
7. GlobalHistory-PHT(16K, 2bit)-BHR(5bit)
8. LocalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHT(4K, 4bit)
9. Tournament-1K-Entries-(GlobalHistory-PHT(8K, 2bit)-BHR(2bit), LocalHistory-PHT(2K, 4bit)-BHT(4K, 2bit))
10. GlobalHistory-PHT(8K, 4bit)-BHR(5bit)
11. Tournament-1K-Entries-(Nbit-2K-8, LocalHistory-PHT(2K, 4bit)-BHT(4K, 2bit))

12. Tournament-2K-Entries-(GlobalHistory-PHT(4K, 4bit)-BHR(2bit), Nbit-8K-2bit)
13. Tournament-1K-Entries-(Nbit-8K-2, Nbit-4K-4bit)
14. Nbit-8K-4bit
15. Pentium-M
16. BTFNTPredictor
17. StaticTakenPredictor

Άρα, θα επέλεγα για συνολικά καλύτερη επίδοση, τον Alpha Predictor.