



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Άσκηση 3 - Προηγμένα Θέματα Αρχιτεκτονικής Υπολογιστών

Γρηγόριος Θανάσουλας

gregthanasoulas@gmail.com

A.M: 03114131

10 Ιουνίου 2020

Περιεχόμενα

1	Σκοπός	2
2	Πειραματική Αξιολόγηση	2
2.1	Ερώτημα i	2
2.2	Ερώτημα ii	5
2.3	Ερώτημα iii	10
2.4	Ερώτημα iv	19

1 Σκοπός

Η άσκηση αυτή αποσκοπεί στη μελέτη των χαρακτηριστικών των σύγχρονων superscalar, out-of-order επεξεργαστών και του τρόπου με τον οποίο αυτά επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, την κατανάλωση ενέργειας καθώς και το μέγεθος του chip του επεξεργαστή. Για την αξιολόγηση τους γίνεται χρήση του εργαλείου Sniper Multicore Simulator με τα παρακάτω μετροπρόγραμματα (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 Ερώτημα i

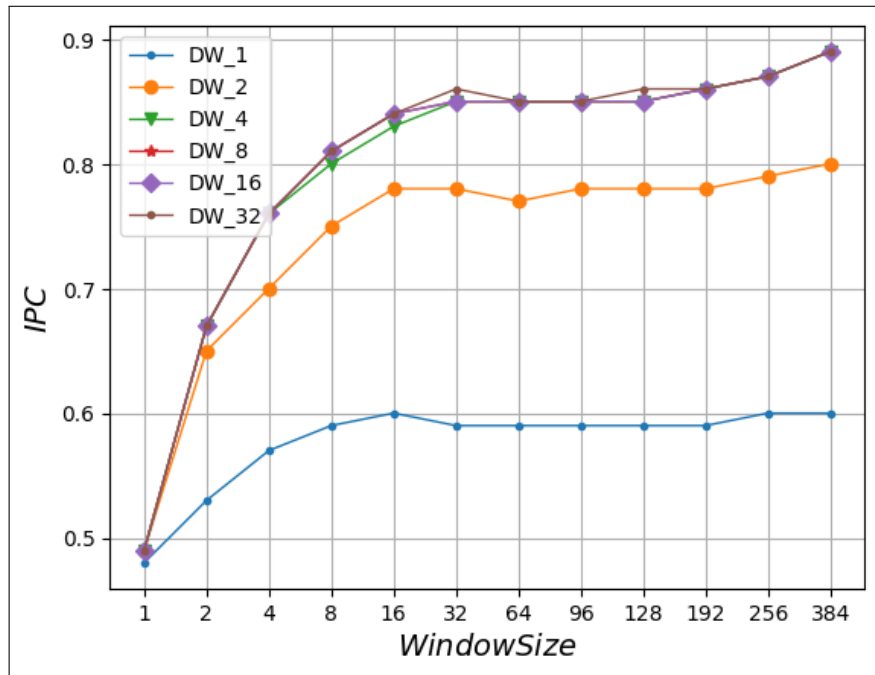
Ζητείται να εκτελέσουμε όλα τα benchmarks για κάθε διαφορετικό επεξεργαστή που προκύπτει από το συνδυασμό των παρακάτω τιμών για τις παραμέτρους `dispatch_width` και `window_size`:

dispatch_width	1	2	4	8	16	32						
window_size	1	2	4	8	16	32	64	96	128	192	256	384

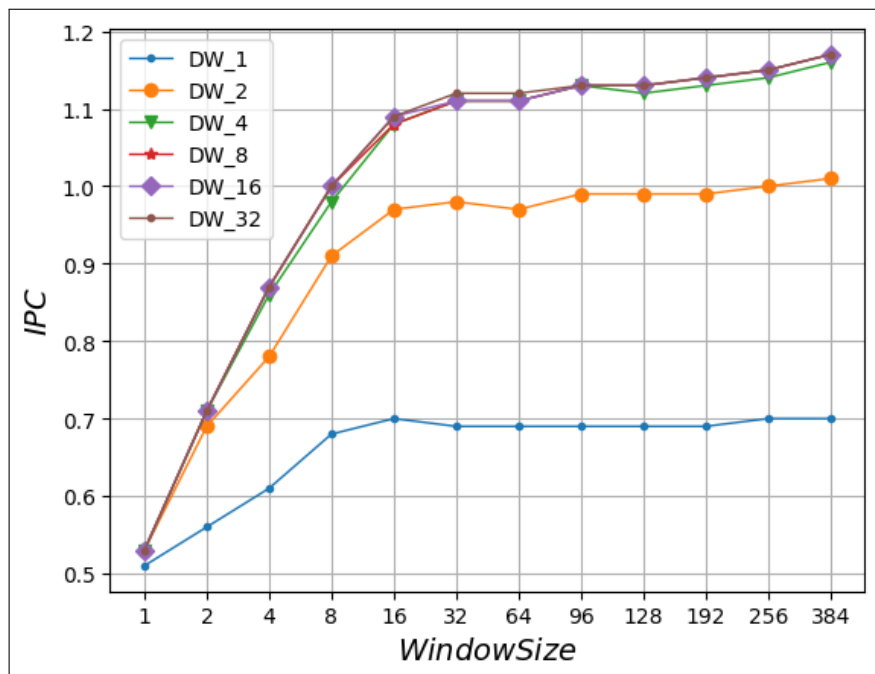
Από τους παραπάνω $6 \times 12 = 72$ δυνατούς συνδυασμούς νόημα έχουν μόνο εκείνοι για τους οποίους ισχύει $window_size \geq dispatch_width$. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί θεωρητικά ως εξής: για να γίνει μία εντολή issue πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη θέση στον ROB. Επομένως, είναι χωρίς νόημα να κάνουμε dispatch παραπάνω εντολές από όσες μπορούν να χωρέσουν στον Reorder Buffer, γιατί απλά αυτές θα περιμένουν μέχρι να υπάρξει ελεύθερη θέση στον ROB και άρα η επίδοση δε θα βελτιωθεί καθόλου. Με βάση αυτό αγνοούμε για οικονομία χρόνου στις προσομοιώσεις τους συνδυασμούς για τους οποίους $window_size < dispatch_width$ και εκτελούμε τους υπόλοιπους 57 συνδυασμούς.

Την παρατήρηση αυτή μπορούμε να επιβεβαιώσουμε και πειραματικά. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η μετρική Instructions Per Cycle για τα μετροπρογράμματα gcc και sjeng για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Παρατηρούμε πως για κάθεμία από τις καμπύλες των διαγραμμάτων (που αντιστοιχεί σε ορισμένο dispatch width), η απόδοση (μετρική IPC) για τις τιμές windows_size που είναι μικρότερες από το dispatch width είναι πάντα χαμηλότερη από την επίδοση στους υπόλοιπους συνδυασμούς.

403-gcc



458-sjeng



2.2 Ερώτημα ii

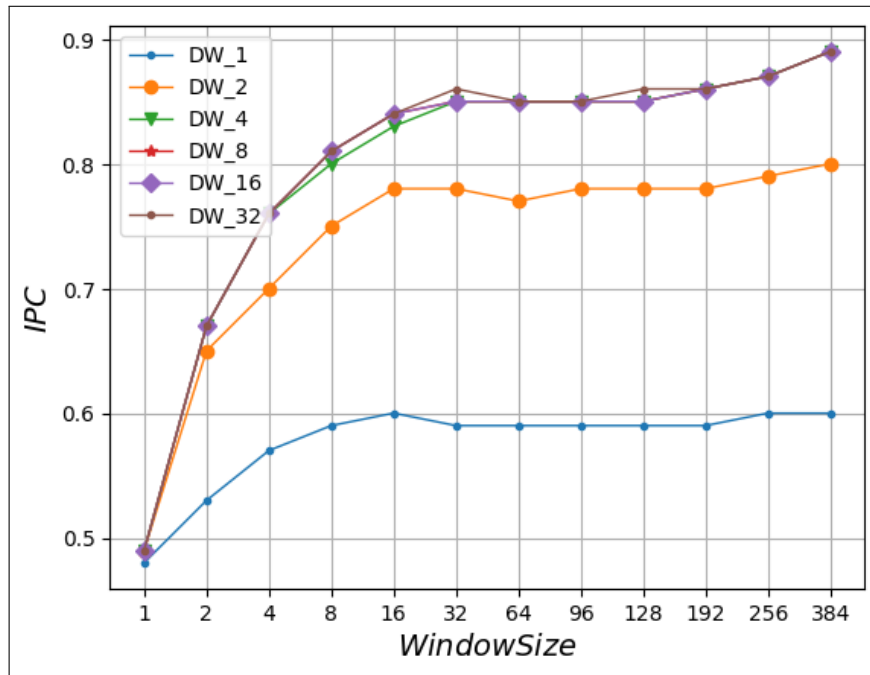
Για την μελέτη των χαρακτηριστικών εκτελέσαμε τα 12 παραπάνω benchmarks για τους συνδυασμούς χαρακτηριστικών επεξεργαστή που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο ερώτημα. Ωστόσο, πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι ορισμένα από τα benchmarks εμφάνιζαν errors κατά την εκτέλεση με αποτέλεσμα η προσομοίωση να εκτελείται για μικρό αριθμό εντολών, γεγονός που σημαίνει ότι δεν είναι αξιόπιστη η "εικόνα" της προσομοίωσης αυτής. Λαμβάνοντας υπ' όψιν βάσει της εκφώνησης της εργαστηριακής άσκησης ότι το κάθε pinball περιέχει περίπου 1 billion εντολές, και βάσει των αποτελεσμάτων στα αρχεία sim.out βρέθηκε για το κάθε benchmark ότι εκτελούνται τα παρακάτω ποσοστά εντολών:

```
gregth@Dellis ex3/scripts master ./get_instructions_count.sh
Outputs to be processed located in: /home/gregth/workspace/advcomparch/ex3/outputs
*Benchmark* *Instructions Run* *Percentage %*
astar      3932266      0.39
cactusADM  1000003023   100.00
gcc        166605946    16.66
GemsFDTD   890240332    89.02
gobmk      140748144    14.07
hmmer      12770222     1.27
mcf        1000003004   100.00
omnetpp    14099        0.00
sjeng      234366580    23.43
soplex     859741       0.08
xalancbmk  90394        0.00
zeusmp     1000002961   100.00
```

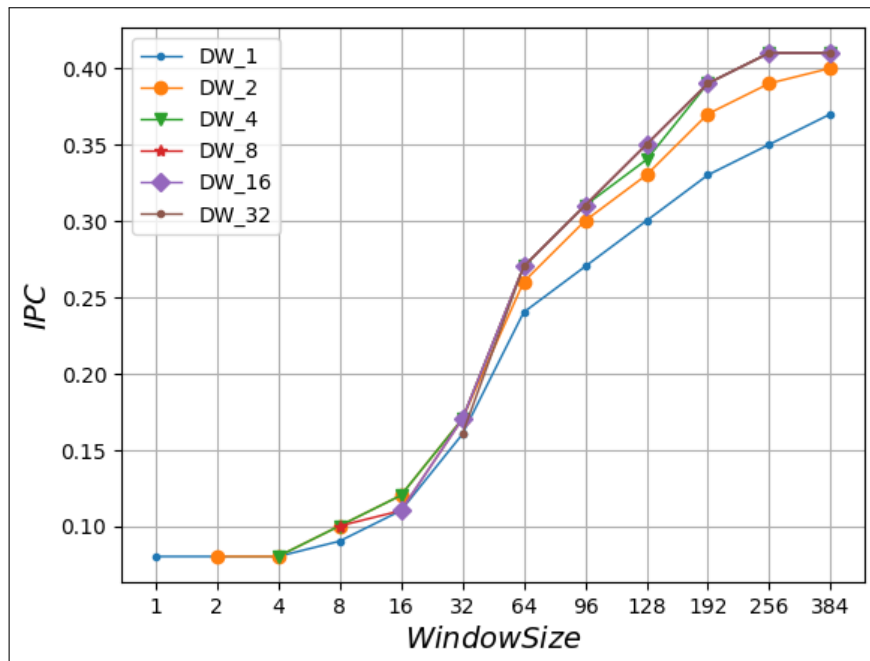
Από τα benchmarks αυτά, και βάσει των διευκρινήσεων που δόθηκαν θα κρατήσουμε τις προσομοιώσεις όπου έχει εκτελεστεί παραπάνω από το 10 % του pinball. Συνεπώς, δεν έχει νόημα να μελετήσουμε 5 από τα 12 benchmarks, και συγκεκριμένα τα astar, hmmer, soplex, xalancbmk, omnetpp.

Ακολουθούν τα διαγράμματα και ο σχολιασμός τους:

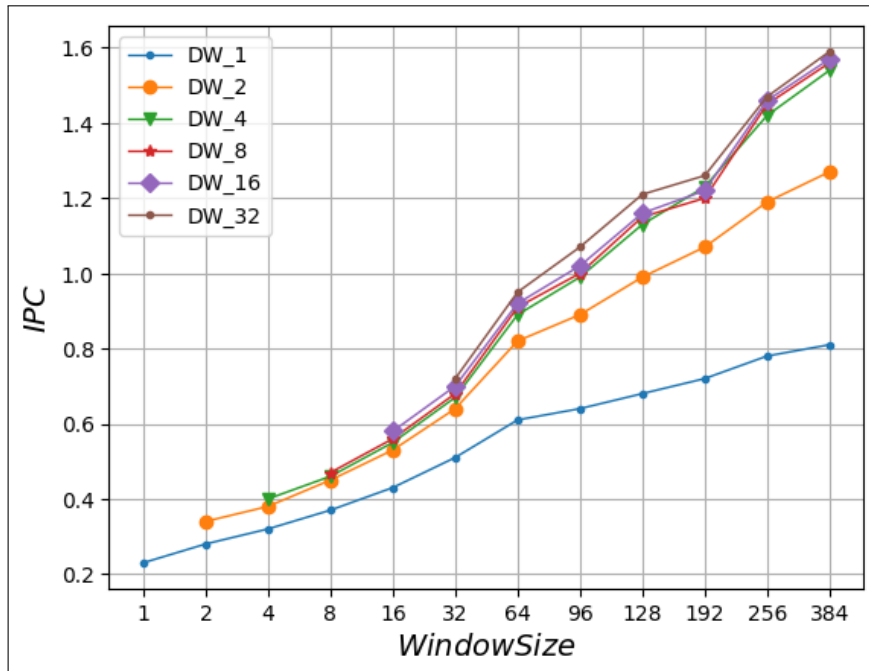
403-gcc



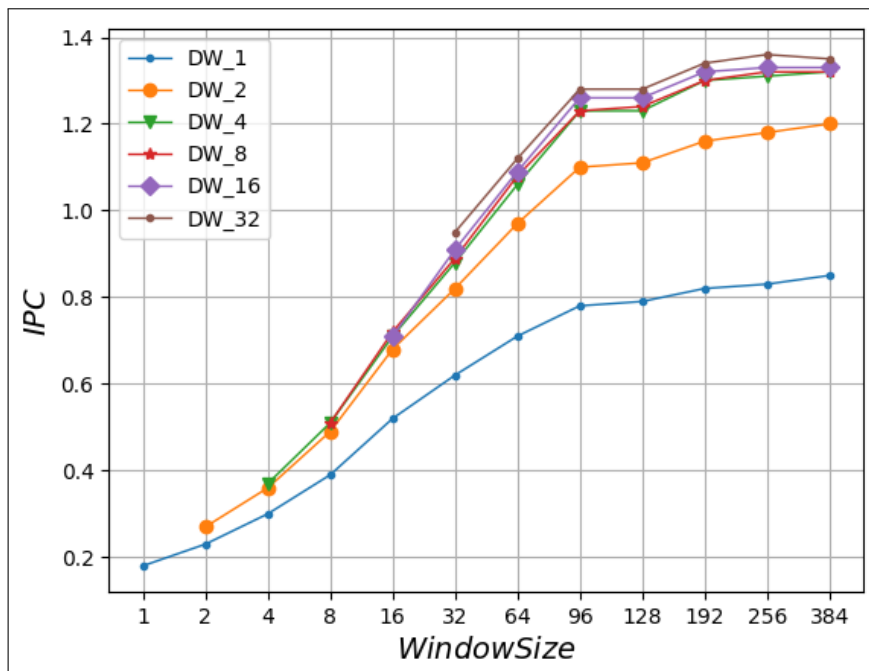
429-mcf



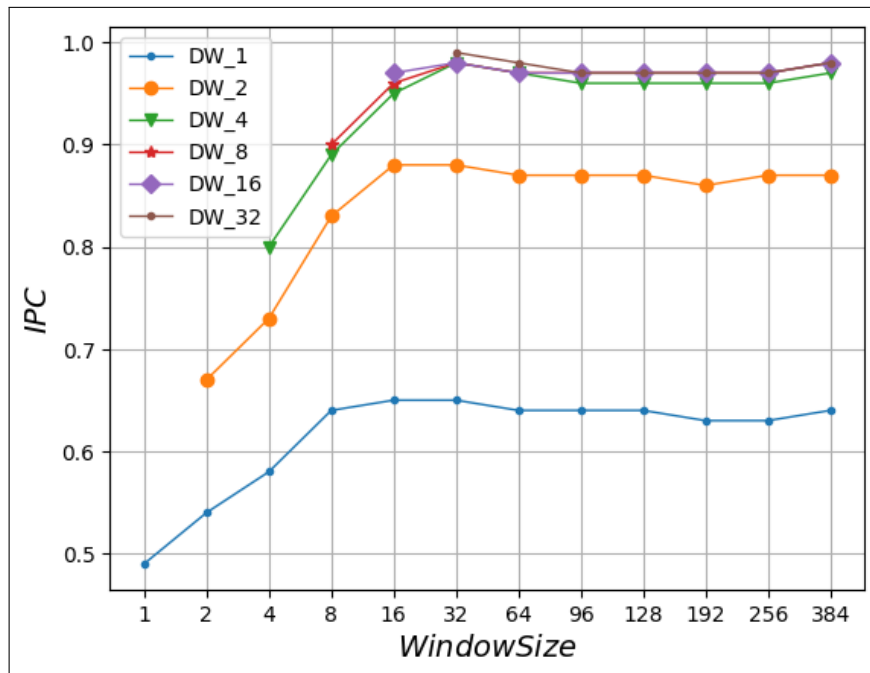
434-zeusmp



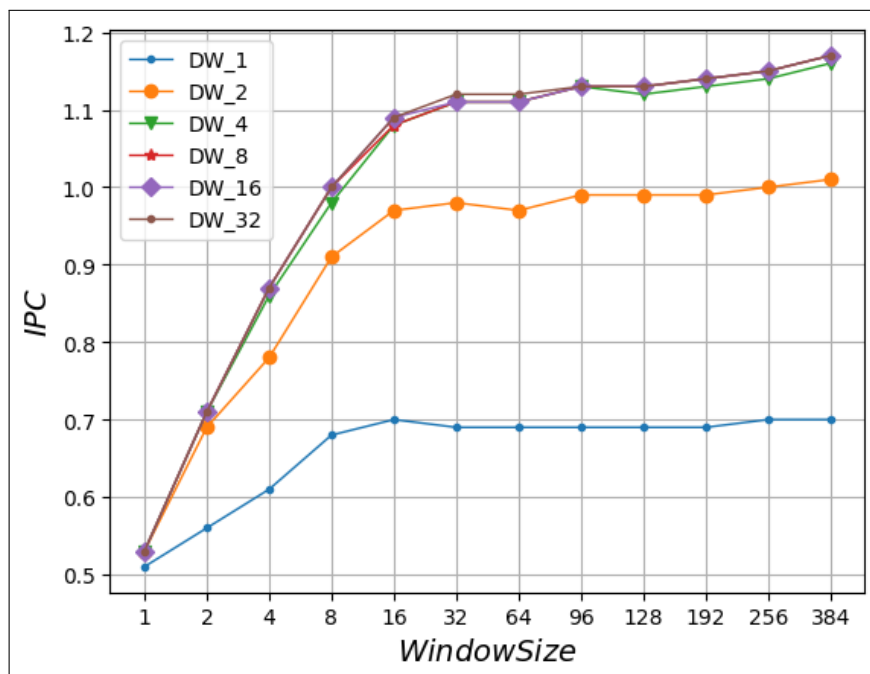
436-cactusADM



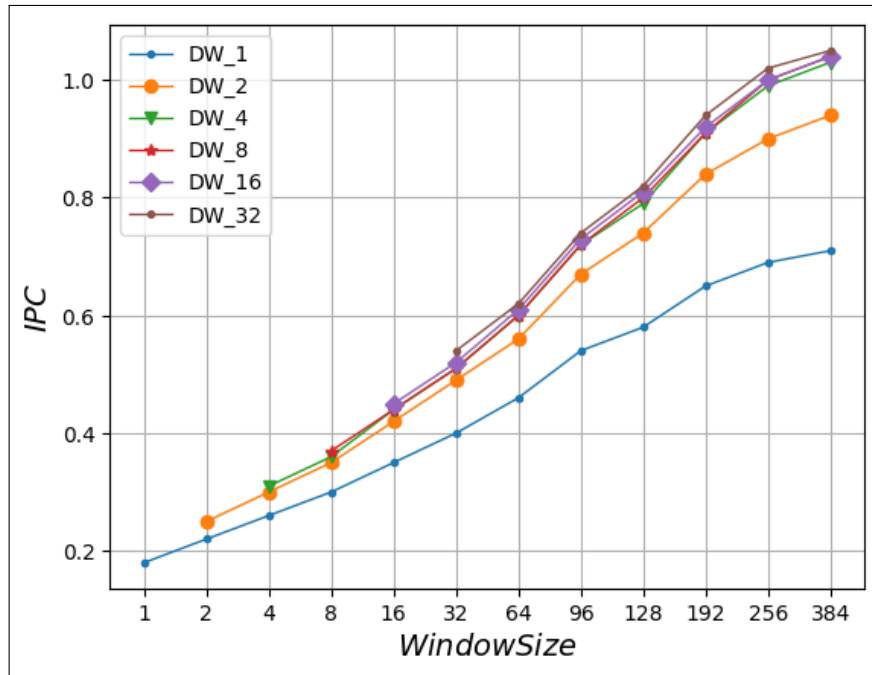
445-gobmk



458-sjeng



459-GemsFDTD



Συμπεράσματα - Σχόλια Από τις παραπάνω γραφικές του IPC συναρτήσεϊ των dispatch width και window size μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι η αύξηση του dispatch width από 1 σε 2 και από 2 σε 4 εντολές επιφέρει σημαντική βελτίωση της επίδοσης. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση σε του dispatch width σε 8, 16 ή και 32 εντολές δεν επιφέρει σημαντική αλλαγή στην επίδοση (οι γραφικές για τις τιμές αυτές είναι ως επί το πλείστον επικαλυπτόμενες) και άρα δεν έχει νόημα. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί λόγω των περιορισμών του ILP (Instruction Level Parallelism) του κώδικα που εκτελείται. Δηλαδή, είναι δύσκολο να υπαρξουν και να γίνουν issue μεγάλες πλειάδες εντολών (κάθε πλειάδα πάνω από 4 εντολές) που να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ώστε να μπορούν να γίνουν process παράλληλα και να επιτύχουμε με ικανοποιητικό ipc.

Όσον αφορά το window size, δηλαδή το μέγεθος του Reorder Buffer, βλέπουμε πως καθώς αυξάνεται, αυξάνεται συνήθως και το ipc. Αναλυτικότερα, υπάρχουν benchmarks (gemsFDTD, cactusADM, zeusmp, mcf) που αυτή η αύξηση συνεχίζεται διαρκώς καθώς αυξάνεται το μέγεθος του ROB, λαμβάνοντας μέγιστη τιμή για το μεγαλύτερο window size = 384 και άλλα benchmarks

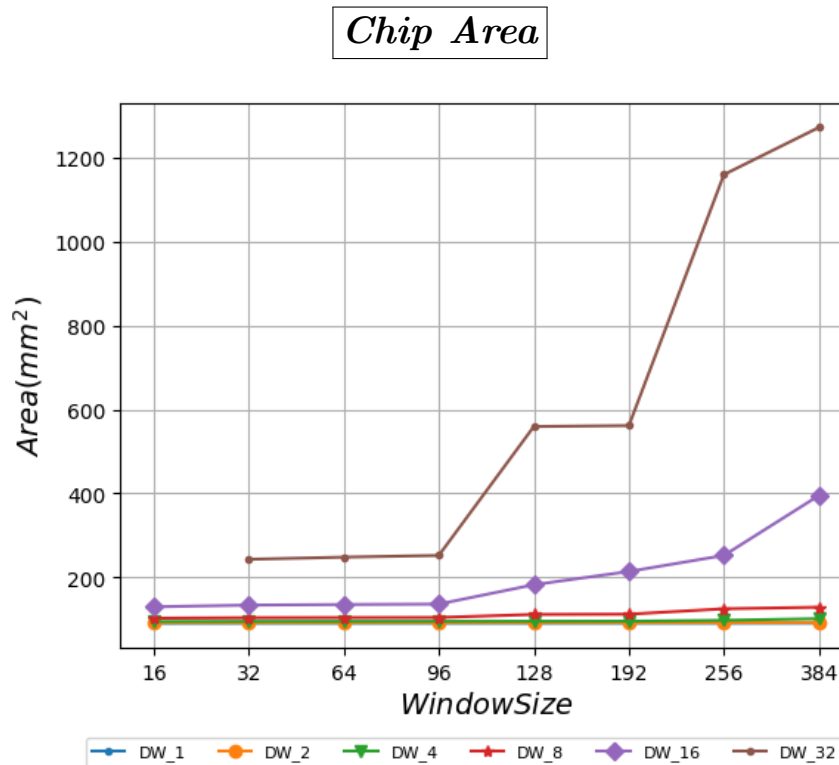
(sjeng, gobmk, gcc) για τα οποία η αύξηση είναι σημαντική (μεγάλη κλίση) μέχρι ενός ορίου windows size = 32 με 64 περίπου, και από το σημείο αυτό και πέρα η αύξηση του ipc δεν είναι τόσο σημαντική (μικρότερη κλίση).

Αξίζει επίσης να σημειώσουμε ότι στα benchmarks zeusmp, cactusADM, sjeng, GemsFDTD το IPC καταφέρνει να ξεπεράσει τη μονάδα για dispatch width = 4 και αρκούντως μεγάλο window size.

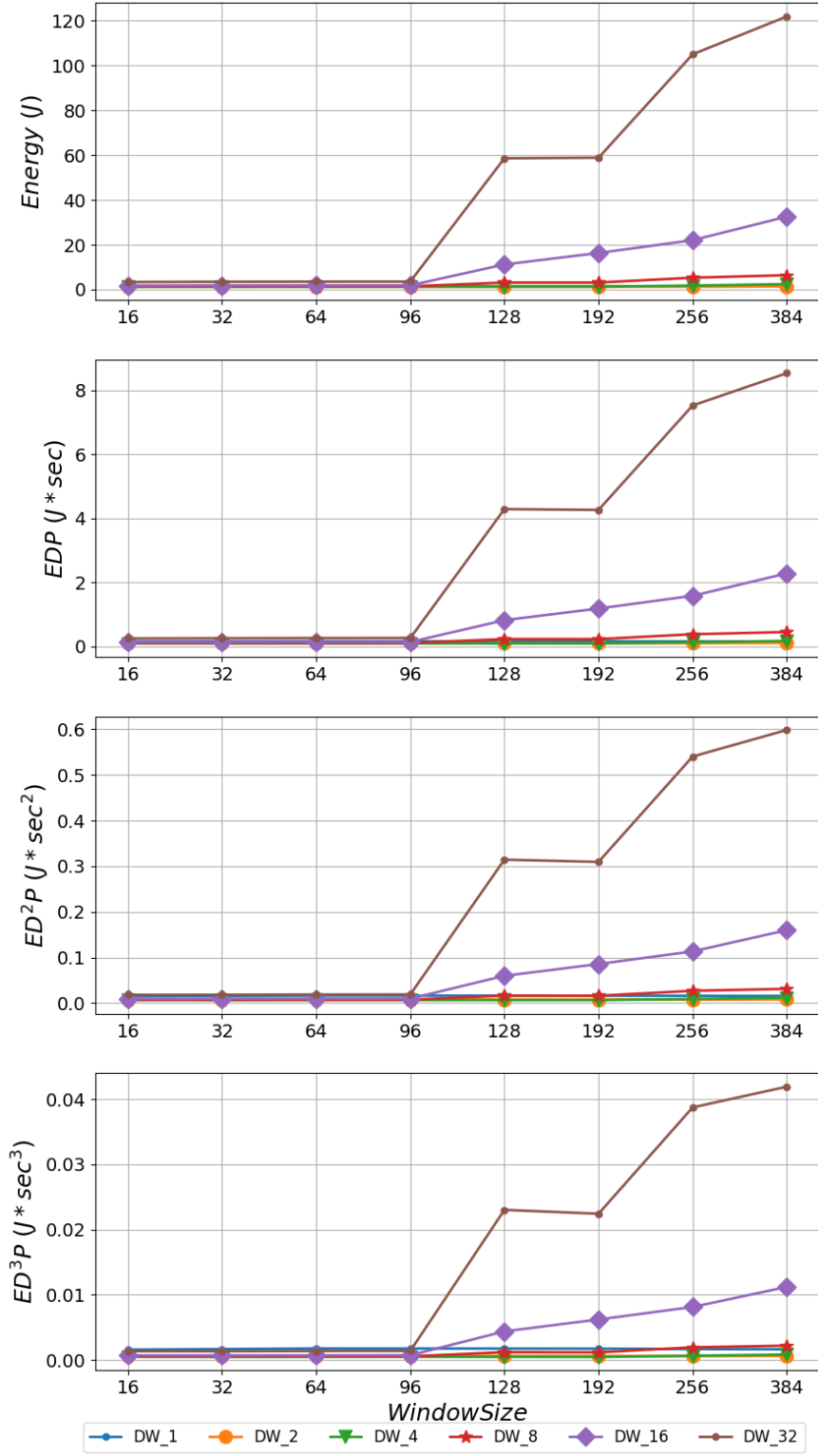
Βάσει των παραπάνω, για την κατασκευή θα επιλέγαμε πιθανότατα dispatch width = 4 (ή εναλλακτικά 8) και ένα αρκετά μεγάλο window size, το οποίο θα μας υπαγόρευαν άλλοι περιορισμοί, όπως η ενέργεια και το κόστος.

2.3 Ερώτημα iii

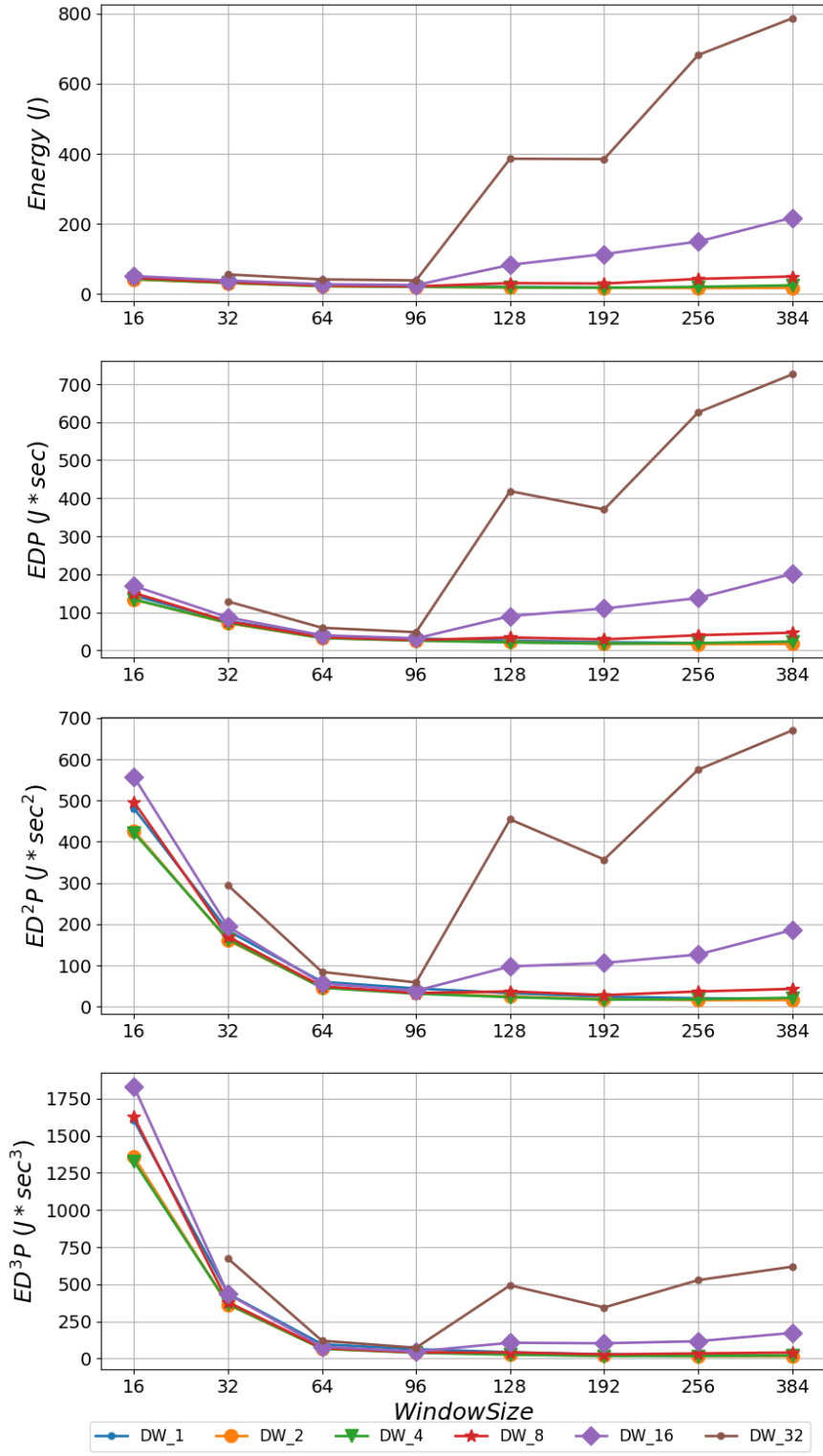
Ακολουθούν διαγράμματα για το μέγεθος του επεξεργαστή και κατανάλωση ενέργειας.



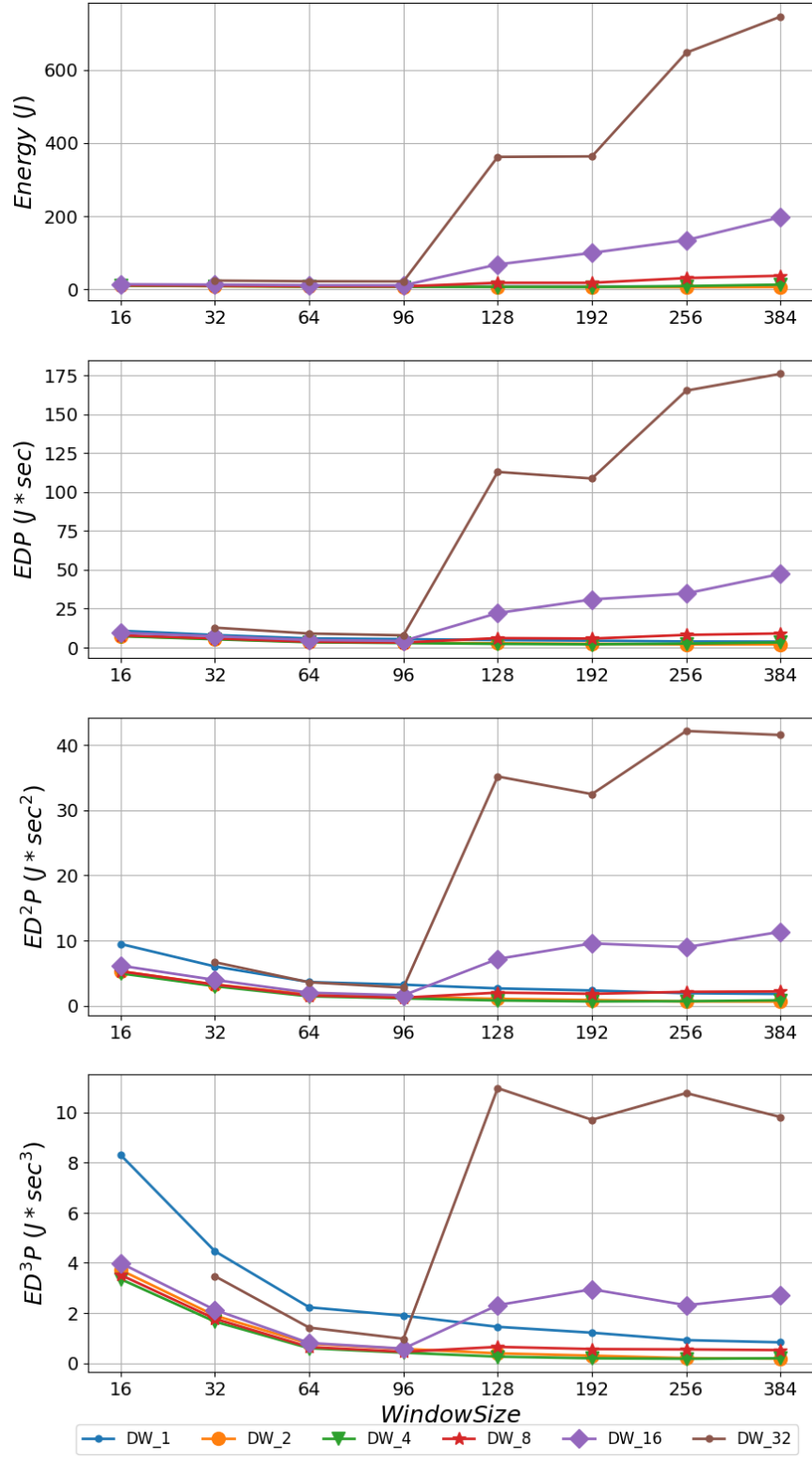
403-gcc



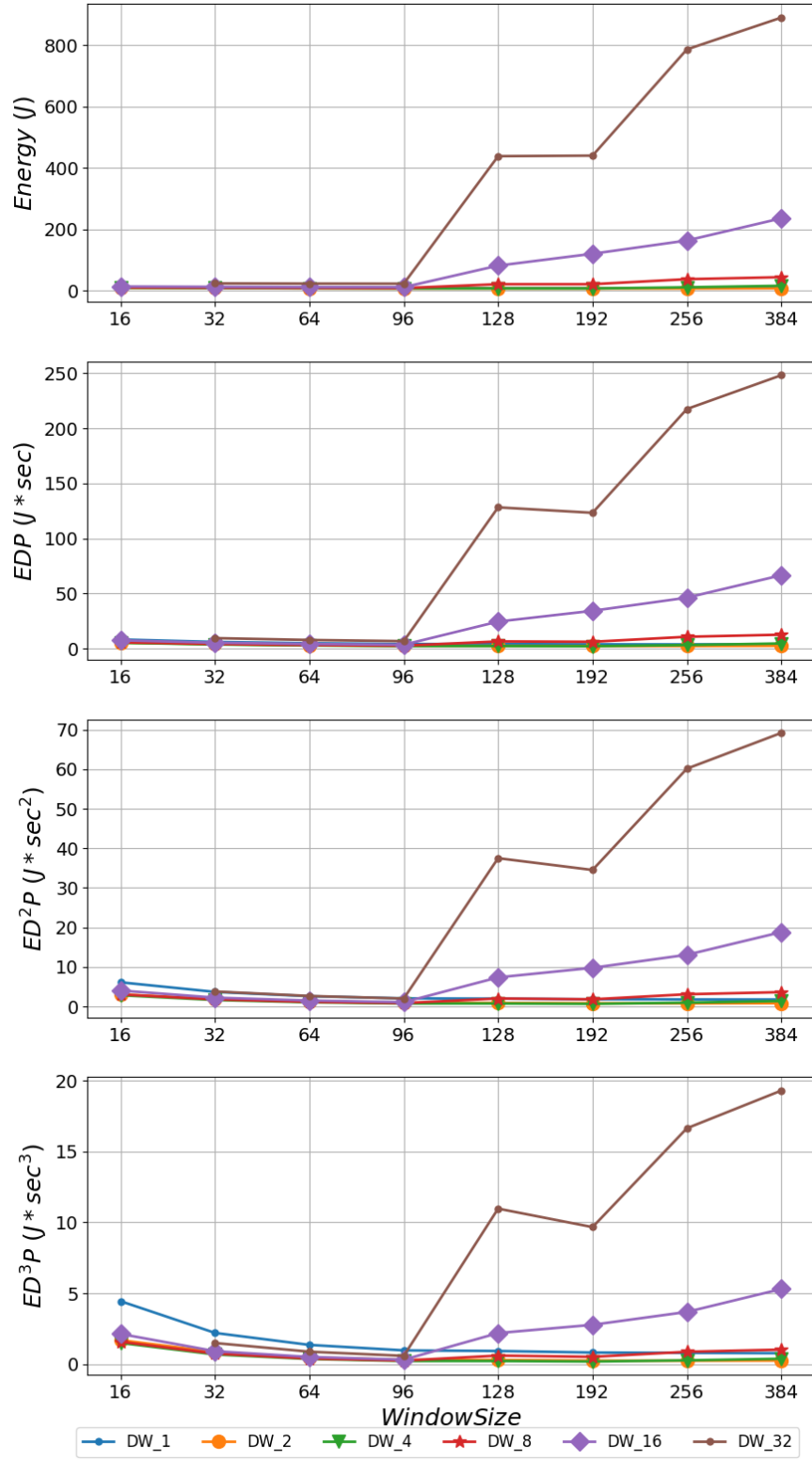
429-mcf



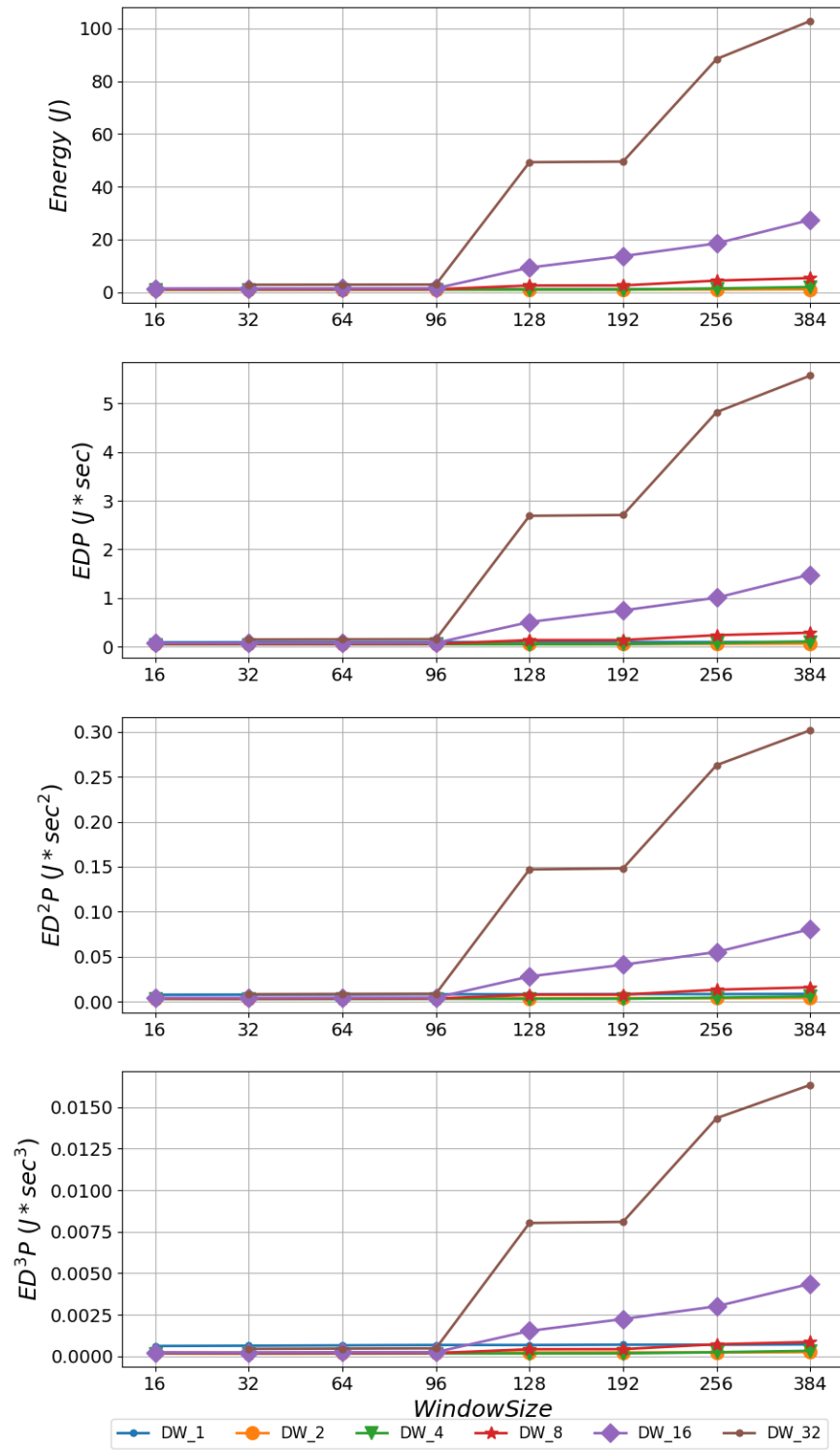
434-zeusmp



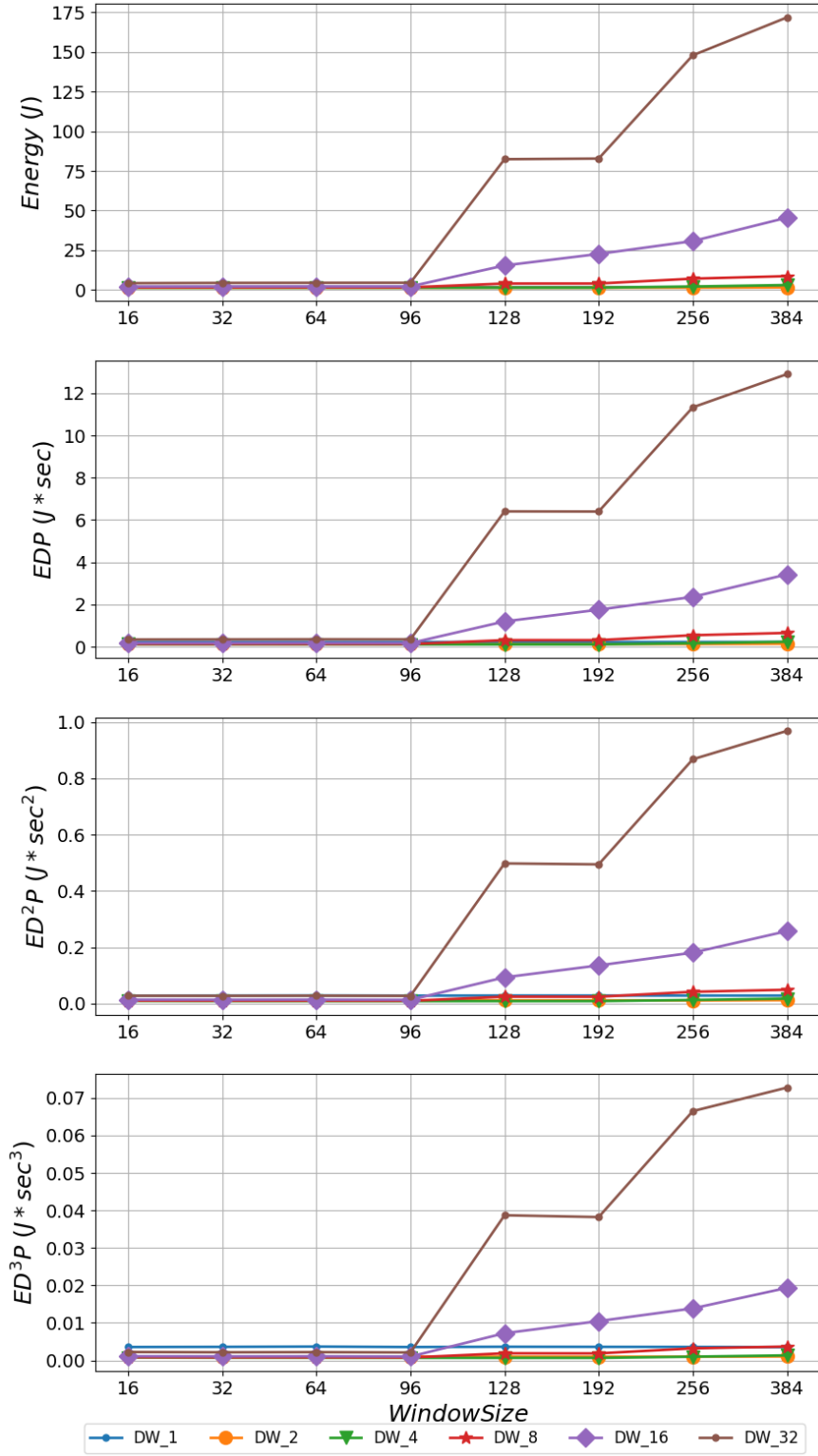
436-cactusADM



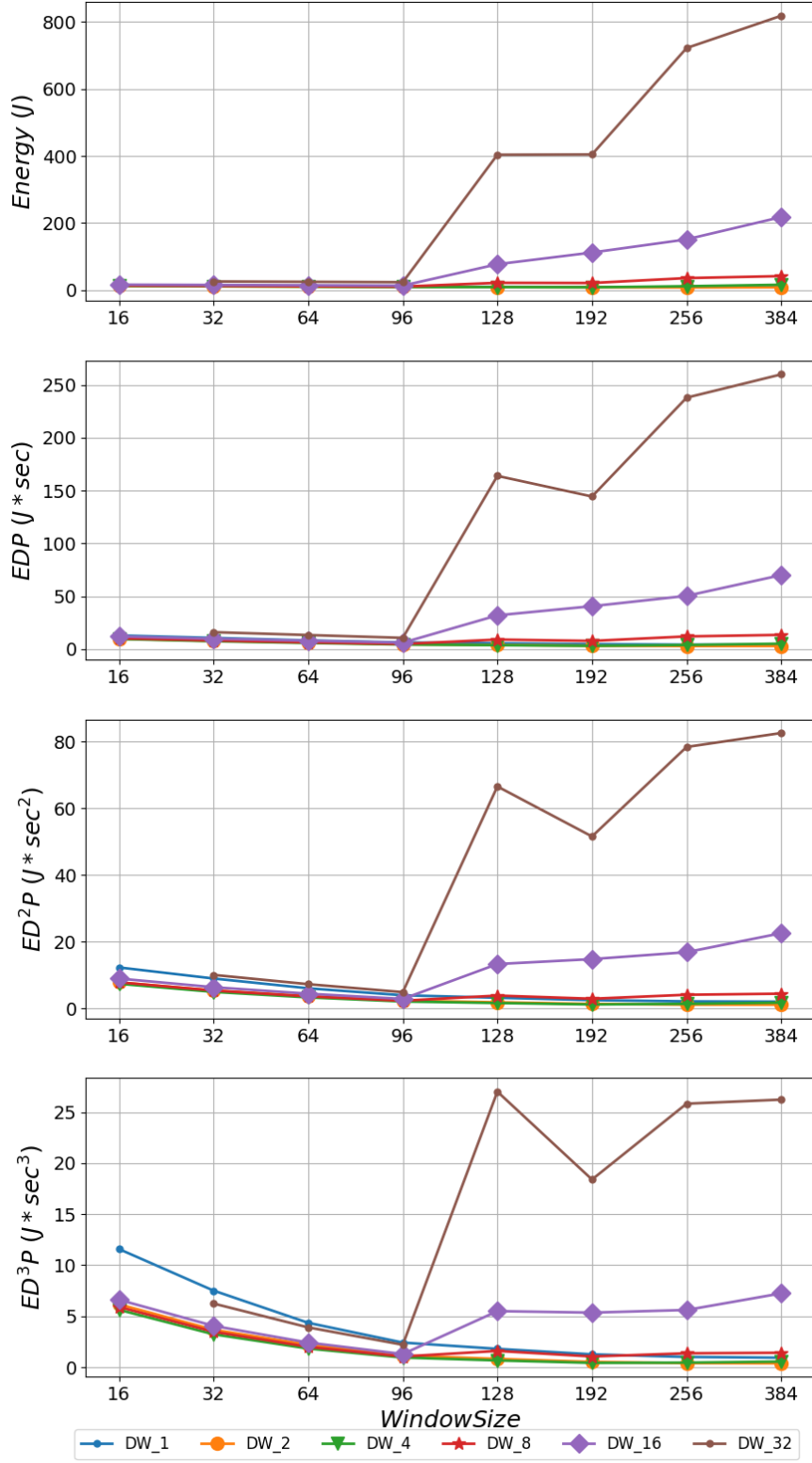
445-gobmk



458-sjeng



459-GemsFDTD



Συμπεράσματα - Σχόλια Αναφορικά με το μέγεθος του chip, παρατηρούμε πως δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ επεξεργαστών με dispatch width 1, 2, 4 και 8 εντολών (ανεξαρτήτως window size). Συγκεκριμένα, για τις τιμές αυτές του dispatch width το μέγεθος είναι περί τα 100 με 150 mm^2 και όπως αναφέραμε δεν μεταβάλλεται σημαντικά καθώς το window size αυξάνει. Ωστόσο, για dispatch width 16 και 32 το μέγεθος αυξάνει δραματικά και επηρεάζεται από το window size. Αξίζει να σημειώσουμε πως για dispatch width 32 και window size 384 το chip αποκτά αρκετά μεγάλο μέγεθος ίσο με 1300 mm^2 .

Ως προς την **ενέργεια** που καταναλώνεται, απεικονίζουμε στα σχετικά διαγράμματα τόσο την ενέργεια αλλά και τις μετρικές EDP ($Energy * Runtime$), ED^2P ($Energy * Runtime^2$), ED^3P ($Energy * Runtime^3$). Οι μετρικές αυτές μας δίνουν μια καλύτερη αντίληψη της ενέργειας λαμβάνοντας υπόψιν και την επίδοση (runtime). Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερος είναι ο εκθέτης του runtime τόσο μεγαλύτερο το βάρος που δίνεται στην επίδοση.

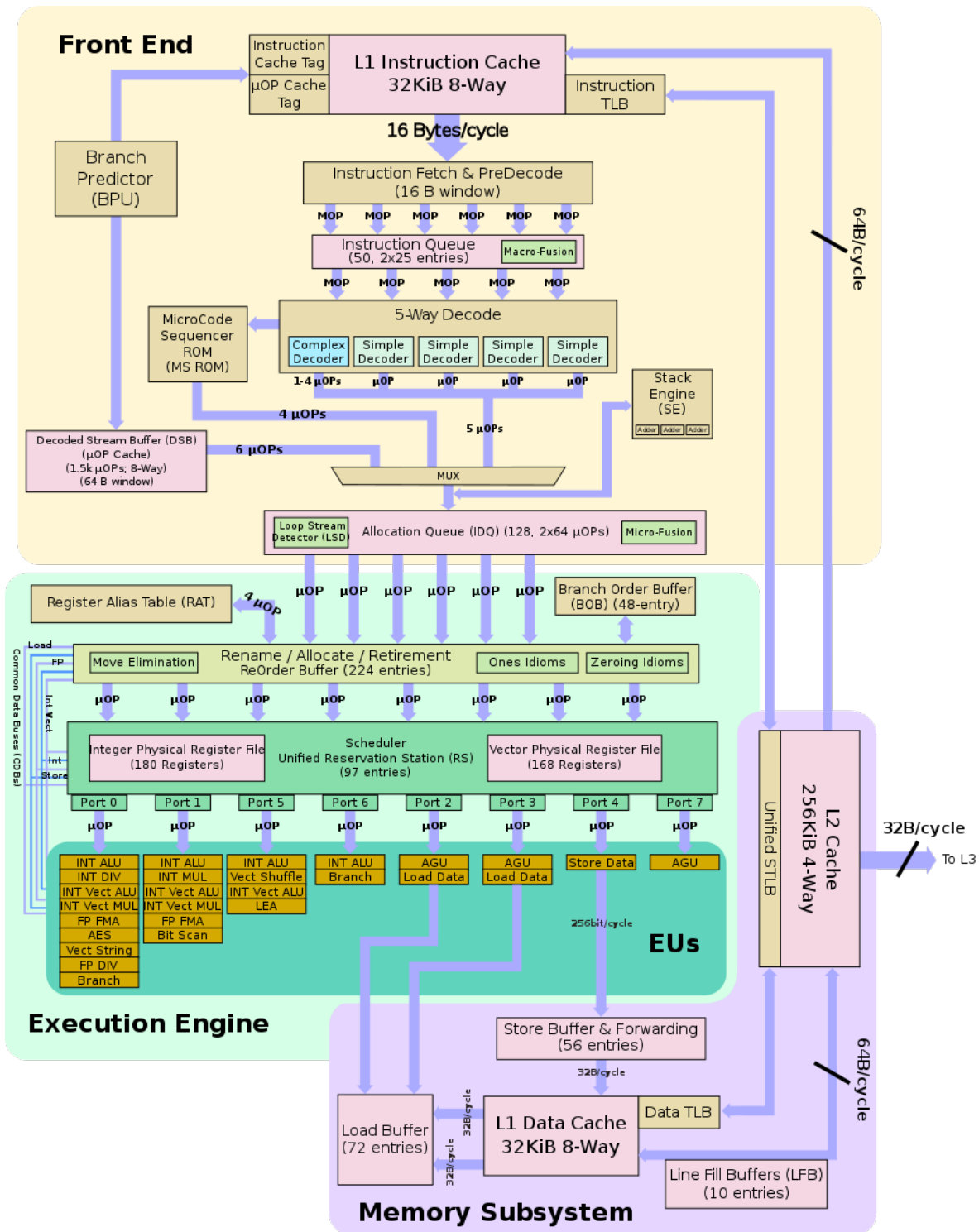
Παρατηρούμε ότι σε όλα τα benchmarks οι επιμέρους γραφικές για dispatch width 1, 2, 4 και 8 είναι παραπλήσιες, και άρα η ενέργεια που καταναλώνεται είναι περίπου ίδια για ίδιο window size και dispatch width 1, 2, 4 ή 8. Παρατηρούμε επίσης πως υπάρχουν και ορισμένα benchmarks (mcf, zeus, cactusADM, GemsFDTD) στα οποία για τις παραπάνω τιμές dispatch width και μικρές τιμές window size = 16 ή 32 η ενέργεια και οι μετρικές EDP έχουν πιο μεγάλη τιμή σε σχέση με αυτές που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερο window size (η καμπύλη είναι φθίνουσα). Η ελάχιστη ενέργεια στις περιπτώσεις αυτές φαίνεται να αντιστοιχεί σε window size 192 ή 256. Ωστόσο και για μεγαλύτερα window size δεν υπάρχει σοβαρή επίπτωση.

Η επιλογή dispatch width 16 και 32 αυξάνει δραστικά την ενέργεια που καταναλώνεται καθώς και την επίδοση, όπως φαίνεται και από μετρικές EDP. Μάλιστα, για τις τιμές αυτές του dispatch width η ενέργεια αυξάνει σημαντικά καθώς αυξάνεται το window size.

Με βάση την ανάλυση αυτή αλλά και λαμβάνοντας υπόψιν την ανάλυση για την επίδοση στα προηγούμενα ερωτήματα, θα επέλεγα τελικώς **dispatch width = 4** (ή και 8) και **window size = 192 ή 256**, δεδομένου ότι γι' αυτή την επιλογή χαρακτηριστικών επεξεργαστή τόσο η ενέργεια και το EDP έχουν την ελάχιστη τους τιμή.

2.4 Ερώτημα iv

Kaby Lake Microarchitecture



Για τον προσωπικό μου υπολογιστή, ο επεξεργαστής του Intel Core **i7-8550U** χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική Kaby Lake. (https://en.wikichip.org/wiki/intel/microarchitectures/kaby_lake).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η αρχιτεκτονική Kaby Lake χρησιμοποιεί **ReOrder Buffer με 224 entries** (window size) και **Dispatch Width = 6 εντολές**. Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, η επιλογή των χαρακτηριστικών αυτών είναι απολύτως λογική και δικαιολογητέα, αφού επιτυγχάνει αρκετά καλή απόδοση λαμβάνοντας υπ' όψιν το περιορισμένο μέγεθος chip και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, εφόσον μάλιστα πρόκειται για επεξεργαστή προορισμένο για χρήση σε laptop.