

## Σειρά Ασκήσεων 5:

### Εντολές Συγκρίσεων και Διακλαδώσεων

#### Περίληψη Συγκρίσεων, Διακλαδώσεων, και Αλμάτων στον MIPS

Οι εντολές μεταφοράς ελέγχου (CTI, control transfer instructions) καθορίζουν να εκτελεστεί σαν επόμενη εντολή --πάντοτε ή υπό ορισμένες συνθήκες μόνο-- μία έντολη άλλη από την "επόμενη από κάτω" τους εντολή. Όταν η μεταφορά ελέγχου γίνεται υπό συνθήκη, οι εντολές συνήθως ονομάζονται **διακλαδώσεις** (branch). Όταν η μεταφορά γίνεται πάντοτε, οι εντολές συνήθως λέγονται **άλματα** (jump). Επίσης υπάρχουν καλέσματα διαδικασιών, λειτουργικού συστήματος, και επιστροφές από αυτά.

Στον MIPS, η συνθήκη διακλάδωσης μπορεί να έχει περιορισμένες μόνο μορφές, για λόγους ταχύτητας. Οι μόνες συνθήκες διακλαδώσεων που υπάρχουν αφορούν συγκρίσεις ενός καταχωρητή με το μηδέν (δεν θα ασχοληθούμε με αυτές στο "δικό μας" υποσύνολο του MIPS), και συγκρίσεις δύο καταχωρητών *μόνο για ισότητα ή ανισότητα* και όχι για άλλων μορφών σχέσεις (μικρότερος, μεγαλύτερος, κλπ). Οι εντολές αυτές είναι:

- `beq $rs, $rt, label # διακλάδωση εάν: $rs == $rt`
- `bne $rs, $rt, label # διακλάδωση εάν: $rs != $rt`

Στη γλώσσα Assembly, η διεύθυνση προορισμού της διακλάδωσης δηλώνεται απλά με μία ετικέτα (label), και αναλαμβάνει ο Assembler να υπολογίσει και να βάλει τη σωστή δυαδική τιμή. Στη γλώσσα μηχανής, οι εντολές διακλάδωσης ακολουθούν το I-format, και η διεύθυνση προορισμού προκύπτει ως εξής:

$$PC_{new} := (PC_{br} + 4) + 4 * ImmOffset$$

όπου  $PC_{br}$  είναι η διεύθυνση της ίδιας της εντολής διακλάδωσης,  $ImmOffset$  είναι η σταθερή ποσότητα των 16 bits του I-format θεωρούμενη ως προσημασμένος αριθμός σε συμπλήρωμα ως προς 2 (δηλαδή sign-extended), και  $PC_{new}$  είναι η διεύθυνση της εντολής προορισμού σε περίπτωση επιτυχίας της διακλάδωσης. Η αύξηση ( $PC_{br}+4$ ) γίνεται για λόγους ευκολίας του hardware (όλες οι εντολές αυξάνουν τον PC κατά 4). Ο πολλαπλασιασμός του  $ImmOffset$  επί 4 γίνεται για να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι η διεύθυνση όλων των εντολών του MIPS είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του 4, κι έτσι να τετραπλασιάσουμε το "βεληνεκές" των διακλαδώσεων --με άλλα λόγια, ο αριθμός  $ImmOffset$  μετράει πλήθος εντολών μπροστά (θετικός) ή πίσω (αρνητικός), αντί να μετρά πλήθος bytes μπροστά ή πίσω. (στην πραγματικότητα, ο MIPS έχει "καθυστερημένες διακλαδώσεις" (delayed branches), για λόγους καλύτερης εκμετάλλευσης της ομοχειρίας (pipelining) του hardware, αλλά εμείς θα το αγνοήσουμε σε αυτό το μάθημα.

Οι υπόλοιπες μορφές συγκρίσεων, που δεν γίνονται μέσα στις εντολές διακλάδωσης, υλοποιούνται με ειδικές, ξεχωριστές, αριθμητικές εντολές σύγκρισης. Πρόκειται για εντολές ανάλογες προς την πρόσθεση ή την αφαίρεση, μόνο που το αποτέλεσμά τους είναι τύπου Boolean αντί τύπου ακέραιος. Τέτοια αποτελέσματα τύπου Boolean έχουν δύο μόνο δυνατές τιμές: 0 για ψευδές, και 1 για αληθές. Τα αποτελέσματα αυτά γράφονται στους γνωστούς μας, κανονικούς (32μπιτους) καταχωρητές, σαν οι ακέραιοι 0 ή 1, δηλαδή στο LS bit του καταχωρητή, με όλα τα υπόλοιπα bits του καταχωρητή μηδενικά. Οι εντολές σύγκρισης που εμείς θα έχουμε στο δικό μας υποσύνολο του MIPS είναι οι:

- `slt $rd, $rs, $rt # set less than --αριθμητική σύγκριση των καταχωρητών: $rs < $rt. Το αποτέλεσμα, τύπου Boolean, γράφεται στον καταχωρητή $rd.`
- `slti $rd, $rs, imm # set less than immediate --αριθμητική σύγκριση καταχωρητή και προσημασμένης (sign-extended) σταθερής ποσότητας imm: $rs < imm. Το αποτέλεσμα (Boolean) γράφεται στον καταχωρητή $rd.`

Εκτός από τις εντολές διακλάδωσης υπό συνθήκη, το υποσύνολο εντολών του MIPS που χρησιμοποιούμε στο μάθημα περιλαμβάνει και τις παρακάτω άλλες εντολές μεταφοράς ελέγχου:

`j target`

Αλμα (`jump`) χωρίς συνθήκη: επόμενη προς εκτέλεση εντολή είναι η εντολή στη διεύθυνση `target`. Χρησιμοποιεί το J-format, το οποίο φαίνεται στη σελίδα 148 του βιβλίου (επάνω). Η τελική διεύθυνση προορισμού (32 bits) προκύπτει από τα 4 παλαιά MS bits του PC, τα 26 bits του πεδίου προορισμού της εντολής, και από 2 μηδενικά LS bits, όπως εξηγείται στη σελίδα 150 του βιβλίου (κάτω). Στην ίδια σελίδα φαίνεται και η χρήση της εντολής `jump`, μαζί με μία `branch`, για την έμμεση σύνθεση διακλάδωσης υπό συνθήκη σε απόσταση μεγαλύτερη από το βεληνεκές των απλών διακλαδώσεων.

`jr $rs`

Αλμα σε προορισμό που καθορίζεται από καταχωρητή (`jump register`): επόμενη προς εκτέλεση εντολή είναι η εντολή στη διεύθυνση που περιέχεται στον καταχωρητή `rs` (με άλλα λόγια, ο `$rs` περιέχει τη διεύθυνση προορισμού, δηλαδή έναν `pointer` στην επόμενη προς εκτέλεση εντολή). Η εντολή αυτή μας επιτρέπει να μεταφέρουμε τον έλεγχο (την εκτέλεση του προγράμματος) σε αυθαίρετη θέση μνήμης, η οποία μπορεί και να ποικίλει κατά την εκτέλεση του προγράμματος (`run-time variable`) και πιθανόν να εξαρτάται και από τα δεδομένα (`data dependent`). Χρησιμοποιείται για μετάφραση του `switch statement`, όπως περιγράφεται στη σελίδα 94 του βιβλίου (Α' τόμος Ελληνικής έκδοσης), για μεταφορά του ελέγχου οσοδήποτε μακριά (σελίδα 117 κάτω του βιβλίου), και για επιστροφή από διαδικασία όπως περιγράφεται αμέσως παρακάτω.

`jal target`

Αλμα και Σύνδεση (`jump and link`) -- κάλεσμα διαδικασίας: έχει το ίδιο format με την εντολή `jump`, και κάνει τα ίδια με εκείνη (ίδια διεύθυνση προορισμού), συν, επιπλέον, αποθηκεύει τη διεύθυνση της επόμενης της εντολής (παλαιό PC συν 4) στον καταχωρητή 31 (`$ra`, ή `$31`). Χρησιμοποιείται για κάλεσμα διαδικασίας, όπως περιγράφεται στις σελίδες 97-98 του βιβλίου (Α' τόμος Ελληνικής έκδοσης). Η διεύθυνση που αποθηκεύεται μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για επιστροφή από τη διαδικασία, μέσω της εντολής `jr $ra`. Η διεύθυνση επιστροφής αποθηκεύεται πάντα στον `$ra` (`$31`) --το "31" δεν φαίνεται πουθενά μέσα στην εντολή `jal`, απλώς το βάζει το hardware αυτόματα.

### Άσκηση 5.1: Διακλάδωση με Σύγκριση Καταχωρητή-Σταθεράς

Είπαμε ότι, για λόγους ταχύτητας, οι μόνες συνθήκες διακλάδωσης του MIPS που αφορούν δύο αυθαίρετους αριθμούς (όχι έναν αριθμό και το μηδέν) είναι συγκρίσεις ισότητας/ανισότητας και όχι συγκρίσεις μεγαλύτερος/μικρότερος. Όμως, επίσης, οι εντολές αυτές (`beq`, `bne`) υπάρχουν μόνο στη μορφή που δέχεται δύο καταχωρητές σαν τελεστέους, και δεν μπορούν να συγκρίνουν καταχωρητή με σταθερή ποσότητα (`immediate`). Ο λόγος δεν μπορεί να έχει να κάνει με ταχύτητα, αφού η σύγκριση ισότητας/ανισότητας καταχωρητή-σταθεράς είναι τουλάχιστο το ίδιο γρήγορη με την αντίστοιχη σύγκριση δύο καταχωρητών. Γιατί λοιπόν πιστεύετε ότι δεν υπάρχουν τέτοιες εντολές "`beqi`" και "`bnei`" στον MIPS; Δώστε την απάντησή σας σε χαρτί και εξηγήστε.

### Άσκηση 5.2: Εντολές Σύγκρισης και Διακλάδωσης

Έστω ότι η μεταβλητή `i` βρίσκεται στον καταχωρητή `$16`, η μεταβλητή `j` στον καταχωρητή `$17`, και ότι `CONST` σημαίνει μια αυθαίρετη προσημασμένη σταθερή ποσότητα μέχρι και 16 bits. Συνθέστε τις παρακάτω περιπτώσεις κώδικα χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο εντολές μεταξύ των:

`beq, bne, slt, slti, addi`

και καμία άλλη. Όπου χρειάζεστε προσωρινό καταχωρητή, χρησιμοποιήστε τον `$at` (Assembler temporary) ο οποίος είναι ο `$1` (αυτόν χρησιμοποιεί ο Assembler για να συνθέτει τις ψευδοεντολές του). Δώστε τις απαντήσεις σας σε χαρτί.

- i. `if ( i == j ) goto L1;` (ίσο)
- ii. `if ( i != j ) goto L1;` (διάφορο)
- iii. `if ( i < j ) goto L1;` (μικρότερο)
- iv. `if ( i <= j ) goto L1;` (μικρότερο ή ίσο)
- v. `if ( i > j ) goto L1;` (μεγαλύτερο)
- vi. `if ( i >= j ) goto L1;` (μεγαλύτερο ή ίσο)
- vii. `if ( i == CONST ) goto L1;` (ίσο)
- viii. `if ( i != CONST ) goto L1;` (διάφορο)
- ix. `if ( i < CONST ) goto L1;` (μικρότερο)
- x. `if ( i <= CONST ) goto L1;` (μικρότερο ή ίσο)
- xi. `if ( i > CONST ) goto L1;` (μεγαλύτερο)
- xii. `if ( i >= CONST ) goto L1;` (μεγαλύτερο ή ίσο)

**Υπόδειξη:** παίξτε με τη σειρά που βάζετε τους 2 τελεστές πηγής στην εντολή σύγκρισης, με τον καταχωρητή \$0 που περιέχει πάντα μηδέν (ή "ψευδές"), με το είδος της διακλάδωσης (ίσο/άνισο ή ψευδές/αληθές), με τις σταθερές CONST, CONST+1, CONST-1, -CONST, και με τους (πολλούς) συνδυασμούς όλων αυτών. Θα εκτιμήστε το πόσα πολλά μπορεί να κάνει το software, εκμεταλλευόμενο λίγους, προσεκτικά επιλεγμένους δομικούς λίθους hardware, χωρίς απώλεια ταχύτητας!

### Άσκηση 5.3: Μετάφραση Βρόχου "While"

Στην παράγραφο 2.6 του (Ελληνικού) βιβλίου, σελ. 92, υπάρχει ο παρακάτω βρόχος μεταφρασμένος σε Assembly κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε ανακύκλωση να εκτελείται τόσο μία διακλάδωση υπό συνθήκη (branch), όσο και ένα άλμα χωρίς συνθήκη (jump) (η εντολή `sll` είναι η "shift left logical", δηλαδή αριστερή ολίσθηση, εδώ κατά 2 θέσεις (bits)):

<pre>while (save[i] == k) { i = i+1; }</pre>	<pre>Loop: sll \$t1, \$s3, 2      # t1 = 4 * i       add \$t1, \$t1, \$s6   # t1 = διεύθυνση του save[i]       lw \$t0, 0(\$t1)     # t0 = save[i]       bne \$t0, \$s5, Exit # if save[i] != k goto Exit       addi \$s3, \$s3, 1   # i = i+1       j Loop             # επανάληψη: goto Loop Exit: ....              # υπόλοιπο πρόγραμμα</pre>
--	---

Όμως, μόνον οι εξαιρετικά απλοϊκοί μεταφραστές θα έφτιαχναν τέτοιο κώδικα --οι συνηθισμένοι μεταφραστές παράγουν κώδικα που τρέχει πιά γρήγορα στη συνηθισμένη περίπτωση, όταν δηλαδή το πλήθος των ανακυκλώσεων είναι σημαντικά μεγαλύτερο του 1. Ξαναγράψτε το βρόχο σε Assembly, ούτως ώστε **μόνο ένα** branch ή jump να εκτελείται σε κάθε ανακύκλωση. (Κατά την είσοδο ή την έξοδο από το βρόχο επιτρέπεται να εκτελούνται δύο εντολές μεταφοράς ελέγχου --αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να γλυτώνουμε τη μία από αυτές κατά τις υπόλοιπες επαναλήψεις του βρόχου, που αποτελούν και την πλειοψηφία των φορών που αυτός εκτελείται). Έστω ότι ο βρόχος εκτελείται 10 φορές. Πόσες εντολές συνολικά εκτελούνταν με τον παλιό κώδικα, και πόσες συνολικά με τον νέο;