

## Εργαστηριακή Άσκηση 3

### Τοπικά δίκτυα και μεταγωγείς LAN

Οι υπολογιστές συνήθως συνδέονται σε ένα τοπικό δίκτυο (LAN – Local Area Network) προκειμένου να αποκτήσουν πρόσβαση στο διαδίκτυο. Το τοπικό δίκτυο ιστορικά ήταν ένας *παθητικός* δίαυλος εκπομπής (broadcast channel), συνήθως ένα ομοαξονικό καλώδιο, όπου ήταν συνδεδεμένοι οι υπολογιστές και ο δρομολογητής. Στους διαύλους εκπομπής όλοι μπορούν να μιλήσουν (εκπέμψουν) και ακουστούν από τους άλλους. Οι συγκρούσεις είναι αναπόφευκτες και για αυτό χρησιμοποιήθηκαν διάφορα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Protocols), όπως το Ethernet, token ring, κλπ, προκειμένου να ρυθμίζεται η πρόσβαση στον κοινό δίαυλο. Σήμερα δεν χρησιμοποιούνται πλέον ομοαξονικά καλώδια, αλλά ζεύξεις από σημείο σε σημείο. Το τοπικό δίκτυο σχηματίζεται με τη βοήθεια *ενεργού* εξοπλισμού (hub, γέφυρας ή μεταγωγέα). Το hub (ακτινικός επαναλήπτης ή πλήμνη) είναι συσκευή που λειτουργεί ως επαναλήπτης (repeater) στο φυσικό στρώμα. Υλοποιεί σε μικρογραφία το πρωταρχικό μέσο εκπομπής (όπου όλοι ακούνε τις μεταδόσεις όλων). Τα bit που εισέρχονται στο hub από μια θύρα επαναλαμβάνονται σε όλες τις άλλες θύρες και έτσι όλοι οι σταθμοί ανήκουν στην ίδια επικράτεια συγκρούσεων (collision domain).

Ο όρος γέφυρα (bridge) επινοήθηκε τη δεκαετία του 1980 για να περιγράψει συσκευές που διασυνδέανε δύο τοπικά δίκτυα (LAN), που πιθανώς υλοποιούσαν διαφορετικά πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης (Ethernet, token ring, κλπ). Το κάθε LAN είναι μια επικράτεια συγκρούσεων, όπως και στα hub. Όμως, σε αντίθεση με τα hub που λειτουργούν στο φυσικό στρώμα, οι γέφυρες λειτουργούν στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Αποθηκεύουν και προωθούν τα εκπεμπόμενα *πλαίσια* (πλην των συγκρούσεων) προς τον προορισμό τους, μόνο εάν αυτός βρίσκεται στο άλλο LAN. Σε αντίθεση με τις γέφυρες, ο μεταγωγέας (switch) ήταν μια συσκευή που συνέδεε περισσότερα από δύο τμήματα (segments) τοπικών δικτύων. Σήμερα τα εν χρήσει τοπικά δίκτυα είναι αποκλειστικά τεχνολογίας Ethernet, οπότε έχουμε γέφυρες ή μεταγωγείς Ethernet. Η μόνη διαφορά μεταξύ τους είναι το πλήθος των θυρών τους. Οι γέφυρες έχουν δύο μόνο θύρες, αλλά οι λειτουργίες που εκτελούν δεν διαφέρουν από αυτές του μεταγωγέα. Στη συνέχεια, οι όροι γέφυρα ή μεταγωγέας θα χρησιμοποιηθούν αδιάκριτα.

Οι μεταγωγείς είναι ευρέως διαδεδομένοι στα εταιρικά δίκτυα όπως και στα δίκτυα των πανεπιστημιούπολεων. Χρησιμοποιούνται για να διασυνδέσουν τους εταιρικούς υπολογιστές μεταξύ τους καθώς και με τους δρομολογητές. Συγκεκριμένα, προωθούν *πλαίσια* στον προορισμό τους με βάση τη διεύθυνση MAC αυτών. Για την πρόσβαση των υπολογιστών στο δημόσιο διαδίκτυο χρησιμοποιούνται δρομολογητές. Οι δρομολογητές κάνουν παρόμοια δουλειά, μόνο που προωθούν *πακέτα IP* με βάση τις διευθύνσεις IP αυτών. Στα οικιακά δίκτυα, οι λειτουργίες δρομολόγησης και μεταγωγής συνήθως συνυπάρχουν. Ο οικιακός δρομολογητής λειτουργεί ως μεταγωγέας Ethernet όσον αφορά την εσωτερική κίνηση και ως δρομολογητής για την κίνηση που εξέρχεται από το οικιακό δίκτυο.

### Διευθύνσεις MAC

Τα τοπικά δίκτυα (LAN) λειτουργούν με διευθύνσεις MAC (μήκους 6 byte) και δεν γνωρίζουν τίποτε περί διευθύνσεων IP. Κάθε κάρτα δικτύου διαθέτει μια φυσική διεύθυνση, αυτήν του υποστρώματος MAC. Έχει μήκος 48 bit και η δομή της ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802. Οι φυσικές κάρτες δικτύωσης έχουν παγκόσμια μοναδικές διευθύνσεις MAC, το πρώτο μέρος των οποίων εκχωρείται από το IEEE και προσδιορίζει τον κατασκευαστή της κάρτας ενώ τα τελευταία 24 bit είναι ο αύξων αριθμός της κάρτας. Η διεύθυνση MAC που περιέχει μόνο 1 (δηλαδή “11...1”) υποδηλώνει εκπομπή (broadcast) και χρησιμοποιείται ως διεύθυνση προορισμού για πλαίσια που απευθύνονται προς όλες τις κάρτες του τοπικού δικτύου. Εάν το πρώτο bit της διεύθυνσης είναι 1, με οτιδήποτε άλλα bit (0 και 1) να ακολουθούν, το πλαίσιο υποδηλώνει πολλαπλή διανομή (multicast). Θα εκπεμφθεί μία

φορά, αλλά θα ληφθεί από πολλές κάρτες, όσες έχουν ρυθμισθεί να ακούν στις συγκεκριμένες διευθύνσεις.

## ARP (Address Resolution Protocol)

Για να είναι εφικτή η επικοινωνία δύο υπολογιστών στο τοπικό δίκτυο, πρέπει ο καθένας να γνωρίζει τη διεύθυνση MAC του άλλου. Το πρωτόκολλο που διατυπώνει αυτή την ερώτηση, ρωτάει και λαμβάνει την απάντηση, είναι το ARP. Το ARP αντιστοιχεί μια διεύθυνση MAC με μια διεύθυνση IPv4. Δουλεύει ως εξής: ο A που γνωρίζει τη διεύθυνση  $IP_B$  του B, θέλει να μάθει τη φυσική διεύθυνση ( $MAC_B$ ) του B. Εκπέμπει τότε ένα ARP request που περιέχει τη διεύθυνση  $IP_B$  του B, μηδενικά για την αναζητούμενη διεύθυνση  $MAC_B$  καθώς και τις δικιές του διευθύνσεις  $IP_A$  και  $MAC_A$ . Όλες οι μηχανές στο ίδιο LAN λαμβάνουν το ARP request. Ο B, που αναγνωρίζει την  $IP_B$  διεύθυνσή του στο ARP request, απαντά στον A με ARP reply που περιλαμβάνει τη φυσική του διεύθυνση  $MAC_B$ . Ο A αποθηκεύει το ζεύγος  $\langle IP_B, MAC_B \rangle$  σε πίνακα ARP (ARP cache) μέχρις ότου «παλιώσει» η πληροφορία, δηλαδή, περάσει ορισμένος χρόνος, οπότε και διαγράφεται. Ο B ενημερώνει και αυτός τον πίνακα ARP με τις διευθύνσεις  $\langle IP_A, MAC_A \rangle$  του A (αναμένοντας ότι σύντομα θα κληθεί να επικοινωνήσει με τον A). Εάν δεν υπάρχει υπολογιστής στο τοπικό δίκτυο για να απαντήσει, ο A επαναλαμβάνει το αίτημα και τελικά εγκαταλείπει.

Κάθε υπολογιστής που λαμβάνει ARP request ή reply οφείλει να ενημερώνει τον πίνακα ARP, εάν αυτός ήδη περιέχει τη ζητούμενη διεύθυνση IPv4. Ένας υπολογιστής μπορεί να στείλει ARP request ή reply για τη δικιά του διεύθυνση IPv4. Αυτό το μήνυμα ARP αποκαλείται gratuitous ARP, ARP probe ή ARP announcement, ανάλογα με τη σύνταξή του. Οι άλλες μηχανές στο τοπικό δίκτυο το χειρίζονται σαν να ήταν κανονικό ARP. Με αυτό τον τρόπο ένας υπολογιστής (συνήθως κατά την εκκίνησή του) μπορεί να ανιχνεύσει το κατά πόσον η IPv4 διεύθυνσή του έχει αποδοθεί ή χρησιμοποιείται από άλλη μηχανή (ARP probe) και εάν όχι να τη δεσμεύσει (ARP announcement). Επίσης μπορεί να ενημερώσει τους πίνακες ARP άλλων μηχανημάτων για τη δική του διεύθυνση MAC (gratuitous ARP).

Οι εγγραφές στον πίνακα ARP έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής. Αν δεν γίνει ανανέωσή τους, μετά από κάποιο χρόνο διαγράφονται. Στο FreeBSD ο χρόνος αυτός είναι 20 λεπτά, στα Windows ποικίλει ανάλογα με την έκδοση, στα Windows XP ήταν 10 λεπτά, στις νέες εκδόσεις είναι τυχαίος μεταξύ 15 και 45 δευτερολέπτων. Σημειώνεται ότι η προαναφερθείσα διαδικασία του πρωτοκόλλου ARP, που σχετίζεται με τις διευθύνσεις IPv4 και MAC, ισχύει για την επίλυση διευθύνσεων **αποκλειστικά** μέσα στην τοπική περιοχή εκπομπής (broadcast domain). Μεταξύ διαφορετικών τοπικών περιοχών εφαρμόζονται αλγόριθμοι δρομολόγησης και γίνεται επικοινωνία στο στρώμα δικτύου (IP).

Η εντολή arp χρησιμοποιείται για να δούμε και να επεξεργαστούμε σε ένα σύστημα τα περιεχόμενα του πίνακα ARP, όπου φυλάσσονται οι εγγραφές με τη μορφή  $\langle \text{διεύθυνση IP}, \text{διεύθυνση MAC} \rangle$ . Παρακάτω φαίνονται οι πιο συχνές χρήσεις της εντολής:

arp -a	Εμφανίζει τα περιεχόμενα του πίνακα ARP cache
arp -d x.x.x.x	Διαγράφει την εγγραφή της IPv4 διεύθυνσης x.x.x.x
arp -d -a	Διαγράφει όλες τις εγγραφές του πίνακα ARP cache
arp -s x.x.x.x yy:yy:yy:yy:yy:yy	Προσθέτει στατική εγγραφή στον πίνακα ARP για την IPv4 διεύθυνση x.x.x.x με αντίστοιχη MAC την yy:yy:yy:yy:yy:yy

## Μεταγωγή σε τοπικά δίκτυα LAN

Σε αυτή την εργαστηριακή άσκηση θα δείτε τις βασικές έννοιες μεταγωγής στα τοπικά δίκτυα, δηλαδή πώς προωθούνται τα πλαίσια μεταξύ τμημάτων LAN (LAN segments) και πώς σχηματίζονται οι διαδρομές που αυτά ακολουθούν. Οι γέφυρες είναι «διαφανείς» όσον αφορά τη χρήση τους, με

την έννοια ότι οι υπολογιστές αγνοούν την ύπαρξη τους. Η γέφυρα συνδέεται αμέσως και λειτουργεί (plug-and-play). Δεν χρειάζεται καμιά αρχική ρύθμιση και είναι αυτό-εκπαιδευόμενη. Ο διαχειριστής του τοπικού δικτύου δεν χρειάζεται να ορίσει τις θέσεις των συνδεδεμένων υπολογιστών. Οι γέφυρες δημιουργούν τους πίνακες προώθησης μαθαίνοντας τις θέσεις των υπολογιστών απλώς παρατηρώντας τις μεταδόσεις τους.

Κατά τη διασύνδεση πολλών LAN πάντα υπάρχει το ενδεχόμενο να σχηματισθούν βρόχοι. Μερικές φορές οι εναλλακτικές διαδρομές υπάρχουν για λόγους μεγαλύτερης αξιοπιστίας. Εάν χαλάσει για κάποιο λόγο η μια διαδρομή, θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εναλλακτική. Όταν υπάρχουν πολλές παράλληλες διαδρομές, οι γέφυρες μπορεί να πολλαπλασιάσουν και να προωθούν ένα πλαίσιο για πάντα με αποτέλεσμα το δίκτυο να πλημμυρίζει και τελικά να παύει να λειτουργεί. Οι γέφυρες πρέπει επομένως να εξασφαλίσουν ότι μεταξύ δύο υπολογιστών θα χρησιμοποιείται μία μόνο διαδρομή. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούν ένα πρωτόκολλο επικαλύπτοντος δένδρου (spanning tree protocol). Οι γέφυρες οργανώνονται σε ένα επικαλύπτον δέντρο απομονώνοντας (μπλοκάροντας) ένα υποσύνολο των διεπαφών της αρχικής τοπολογίας προκειμένου να βρεθούν μοναδικές, χωρίς βρόχους, διαδρομές μεταξύ οποιωνδήποτε δύο LAN.

### **Αυτο-εκπαίδευση γεφυρών**

Κάθε γέφυρα διατηρεί ένα πίνακα προώθησης με εγγραφές που προσδιορίζουν τη θύρα στην οποία είναι συνδεδεμένος κάθε κόμβος. Όταν καταφτάνει ένα πλαίσιο, η γέφυρα με βάση τη διεύθυνση MAC προορισμού αναζητεί στον πίνακα τη θύρα όπου είναι συνδεδεμένος ο προορισμός και προωθεί το πλαίσιο εκεί. Εάν ο προορισμός δεν ανευρίσκεται στον πίνακα προώθησης, η γέφυρα εκπέμπει (flooding) το πλαίσιο προς όλες τις θύρες εκτός αυτής από την οποία λήφθηκε.

Οι γέφυρες ενημερώνουν τον πίνακα προώθησης σύμφωνα με έναν αλγόριθμο εκμάθησης που λειτουργεί ως εξής. Η γέφυρα εξετάζει τη διεύθυνση MAC πηγής κάθε πλαισίου που φτάνει σε αυτή και έτσι μαθαίνει αυτομάτως τη θύρα όπου είναι συνδεδεμένος ο αντίστοιχος κόμβος. Αποθηκεύει την αντιστοιχία αυτή (διεύθυνση MAC, θύρα) στον πίνακα προώθησης. Εάν η εγγραφή ήδη υπάρχει, επεκτείνει τη χρονική διάρκεια ισχύος της. Επομένως, όταν αργότερα καταφτάσει πλαίσιο με προορισμό την εν λόγω διεύθυνση MAC, η γέφυρα γνωρίζει που να το προωθήσει. Εκπέμποντας τα πλαίσια με άγνωστο προορισμό προς όλες τις θύρες, η γέφυρα συντόμως θα μάθει τη θύρα όπου είναι συνδεδεμένος ο αντίστοιχος κόμβος, όταν αυτός απαντήσει.

Εάν ένας κόμβος αλλάξει θέση (συνδεθεί σε άλλη θύρα), η γέφυρα μετά από λίγο θα το μάθει. Στο μεσοδιάστημα, τα πλαίσια θα παραδίδονται στην παλιά θέση (θύρα). Ο χρόνος που θα μεσολαβήσει εξαρτάται από την κίνηση στο LAN. Ο πίνακας προώθησης θα ενημερωθεί αμέσως μόλις ο κόμβος που άλλαξε θέση παράγει νέο πλαίσιο. Επιπλέον, οι εγγραφές του πίνακα προώθησης δεν είναι αιώνιες και διαγράφονται εάν δεν χρησιμοποιηθούν για κάποιο χρονικό διάστημα, τυπικά, μερικά λεπτά της ώρας. Με τον τρόπο αυτό το μέγεθος του πίνακα προώθησης διατηρείται μικρό. Περιέχει εγγραφές μόνο για τους πρόσφατα ενεργούς κόμβους, και ταυτόχρονα επιτρέπεται η κινητικότητα (αλλαγή θύρας πρόσβασης) των κόμβων.

Η αναζήτηση στον πίνακα προώθησης της θύρας εξόδου με βάση τη διεύθυνση MAC, υλοποιείται με ειδικές μνήμες CAM (Content Addressable Memory), όπου δοθείσης της διεύθυνσης MAC προορισμού επιστρέφεται η θέση μνήμης (θύρα στην οποία είναι συνδεδεμένος ο προορισμός).

### **Αποφυγή βρόχων**

Επειδή η διαδικασία μάθησης (learning) προβλέπει την εκπομπή (flooding) πλαισίων σε όλες τις θύρες της γέφυρας όταν η διεύθυνση MAC προορισμού είναι άγνωστη, είναι πιθανό τα πλαίσια να προωθούνται αενάως σε κυκλικές διαδρομές. Το πρωτόκολλο επικαλύπτοντος δένδρου (STP – Spanning Tree Protocol) για γέφυρες, γνωστό και ως IEEE 802.1D από το σχετικό πρότυπο, προλαμβάνει τον σχηματισμό τέτοιων βρόχων οργανώνοντας τις γέφυρες σε μια τοπολογία

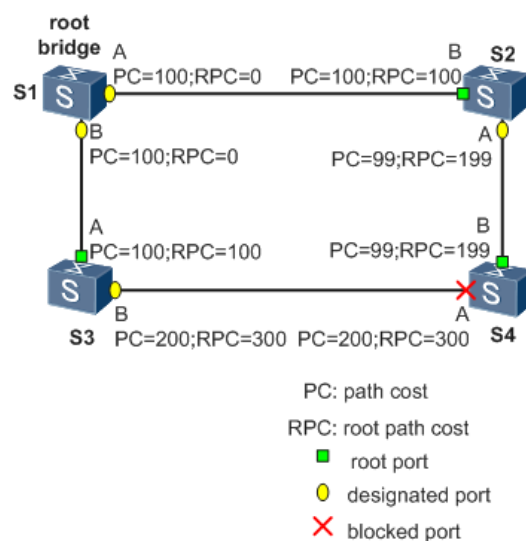
επικαλύπτοντος δέντρου. Σήμερα, όλοι οι σύγχρονοι μεταγωγείς LAN χρησιμοποιούν το Rapid STP (RSTP), μια βελτιωμένη έκδοση του αρχικού STP.

Σε συντομία, το πρωτόκολλο επικαλύπτοντος δέντρου (spanning tree protocol) λειτουργεί ως εξής. Η γέφυρα με τον μικρότερο σειριακό αριθμό επιλέγεται ως η **γέφυρα ρίζα (root bridge)** του δέντρου. Υπολογίζονται οι αποστάσεις των ελάχιστων διαδρομών προς τη ρίζα. Για κάθε LAN προσδιορίζεται η **επιλεγμένη γέφυρα (designated bridge)**, η γέφυρα που είναι πιο κοντά στη ρίζα, και η **επιλεγμένη θύρα (designated port)**, η θύρα της επιλεγμένης γέφυρας μέσω της οποίας φτάνουμε στο LAN αυτό. Για κάθε γέφυρα (πλην ρίζας) προσδιορίζεται η **ριζική θύρα (root port)**, η θύρα της γέφυρας με την καλύτερη διαδρομή προς τη ρίζα. Το επικαλύπτον δένδρο σχηματίζεται συνδέοντας σε κάθε LAN την επιλεγμένη θύρα με τις ριζικές θύρες και απομονώνοντας τις πόρτες που δεν είναι επιλεγμένες ή ριζικές. Το αποτέλεσμα είναι μια τοπολογία δέντρου που δεν περιέχει βρόχους. Η προώθηση των πλαισίων γίνεται κατά μήκος των ακμών του δέντρου και αποφεύγονται πλήρως οι ατέρμονες διαδρομές.

### Το πρωτόκολλο STP

Επιλογή της γέφυρας ρίζας (root bridge): Κάθε γέφυρα έχει μια προτεραιότητα (priority), που μπορεί να αλλάξει από τον διαχειριστή, και μια διεύθυνση MAC που καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Οι δύο αυτοί αριθμοί καθορίζουν την ταυτότητα (Bridge ID) της γέφυρας της μορφής priority.mac-address. Οι γέφυρες διαφημίζουν την ύπαρξή τους αποστέλλοντας περιοδικά πλαίσια BPDUs (Bridge PDU) που μεταξύ άλλων περιέχουν την Bridge ID. Ρίζα είναι η γέφυρα με τη μικρότερη Bridge ID, ήτοι η γέφυρα με τη μικρότερη προτεραιότητα και επί ίσων προτεραιοτήτων αυτή με τη μικρότερη διεύθυνση MAC. Η προτεραιότητα της γέφυρας έχει προκαθορισμένη τιμή 32768 και μπορεί να αλλαχθεί από τον διαχειριστή μόνο σε πολλαπλάσια του 4096.

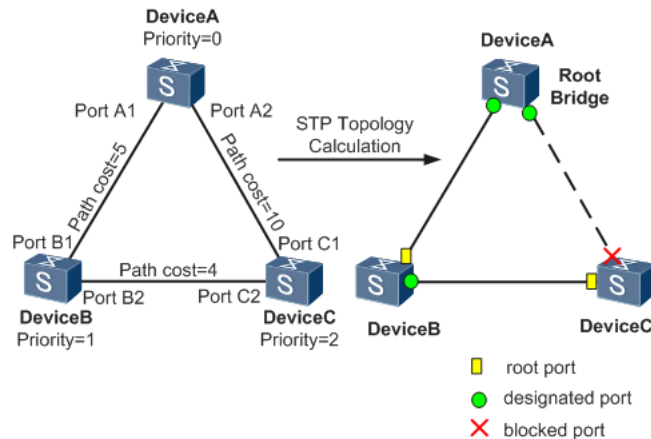
Υπολογισμός κόστους διαδρομών: Το επικαλύπτον δέντρο έχει την ιδιότητα ότι οι διαδρομές προς τη γέφυρα ρίζα έχουν το ελάχιστο κόστος. Κόστος της διαδρομής είναι το άθροισμα του κόστους κάθε τμήματος αυτής, όπου η ταχύτητα της ζεύξης καθορίζει το κόστος. Στο STP η προκαθορισμένη τιμή ήταν αρχικά 1 Gbps / bandwidth, όμως οι τιμές άλλαξαν ελαφρά ώστε να υπάρχει διαφοροποίηση για ταχύτερες του 1 Gbps ζεύξεις (10 Mbps = 100, 100 Mbps = 19, 1 Gbps = 4, 10 Gbps = 2). Στο RSTP η προκαθορισμένη τιμή είναι 20 Tbps / bandwidth (10 Mbps = 2000000, 100 Mbps = 200000, 1 Gbps = 20000, 10 Gbps = 2000, 100 Gbps = 200, 100 Tbps = 20). Η προκαθορισμένη τιμή για κάθε δικτυακό τμήμα μπορεί να τροποποιηθεί από τον διαχειριστή.



Ριζική θύρα (root port): Είναι θύρα της γέφυρας που οδηγεί προς τη ρίζα. Η γέφυρα ρίζα δεν έχει ριζικές θύρες (RP).

Επιλεγμένη θύρα (designated port): Είναι η θύρα που οδηγεί μακριά από τη ρίζα. Όλες οι ενεργές θύρες της ρίζας είναι επιλεγμένες θύρες (DP).

Μπλοκαρισμένη θύρα (blocked port): Οποιαδήποτε πόρτα γέφυρας που δεν είναι ριζική ή επιλεγμένη απενεργοποιείται και γίνεται μπλοκαρισμένη θύρα (BP).



### Καταστάσεις θυρών γέφυρας STP

**Blocking** – Μια θύρα που θα δημιουργούσε βρόχο εάν ήταν ενεργή. Δεν στέλνει ή λαμβάνει δεδομένα χρηστών, αλλά εξακολουθεί να λαμβάνει πλαίσια BPDU. Μπορεί να μεταβεί στην κατάσταση forwarding εάν υπάρξουν βλάβες σε άλλες ζεύξεις.

**Listening** – Η γέφυρα επεξεργάζεται πλαίσια BPDU, αλλά δεν προωθεί πλαίσια δεδομένων και δεν ενημερώνει πίνακες προώθησης. Περιμένει για πληροφορία που θα την οδηγήσει στην κατάσταση blocking.

**Learning** – Παρότι η θύρα δεν προωθεί πλαίσια δεδομένων, ενημερώνει τους πίνακες προώθησης.

**Forwarding** – Μια θύρα που δέχεται και προωθεί δεδομένα. Εξακολουθεί να εξετάζει τα πλαίσια BPDU μήπως και χρειαστεί να επιστρέψει στην κατάσταση blocking.

**Disabled** – Μια θύρα που δεν μετέχει στο STP (έχει αφαιρεθεί από τον διαχειριστή).

### Το πρωτόκολλο RSTP

Το RSTP (αρχικά IEEE 802.1w) είναι μια βελτιωμένη έκδοση του STP. Το STP σχεδιάστηκε μια εποχή όπου η επαναφορά της συνδεσιμότητας μετά από βλάβη μέσα σε ένα πρώτο λεπτό θεωρείτο επαρκής. Οι χρόνοι αυτοί δεν είναι πλέον ικανοποιητικοί και το RSTP σχεδιάστηκε ώστε να αντιδρά γρηγορότερα σε αλλαγές στην τοπολογία και επιτυγχάνει ταχύτερη σύγκλιση. Είναι συμβατό προς τα πίσω με το STP και έχει ενσωματωθεί στο νέο πρότυπο IEEE 802.1D-2004. Όντας μια εξέλιξη του STP, δεν είναι ριζικά διαφορετικό. Η βασική διαφοροποίηση είναι ότι μειώνει τις καταστάσεις των θυρών σε τρεις από αρχικά πέντε και διαχωρίζει πλήρως το ρόλο μιας θύρας στην ενεργή τοπολογία από την κατάσταση αυτής.

Το STP έχει τις προαναφερθείσες πέντε καταστάσεις θυρών (disabled, listening, learning, blocking, forwarding), όπου η κατάσταση (προωθεί, δεν προωθεί) και ο ρόλος στην τοπολογία ήταν ανάμεικτος. Σε αντίθεση στο RSTP, μια θύρα μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις ακόλουθες τρεις καταστάσεις:

**Discarding** – Η θύρα δεν αποστέλλει πλαίσια (δεδομένα) χρηστών,

**Learning** – Η θύρα δεν προωθεί πλαίσια ακόμα, αλλά μαθαίνει διευθύνσεις MAC (ενημερώνει τον πίνακα προώθησης),

**Forwarding** – Η θύρα είναι πλήρως λειτουργική (προωθεί πλαίσια χρηστών).

και ανάλογα με τη θέση της στην ενεργή τοπολογία η θύρα μπορεί να έχει ένα από τους ακόλουθους πέντε ρόλους:

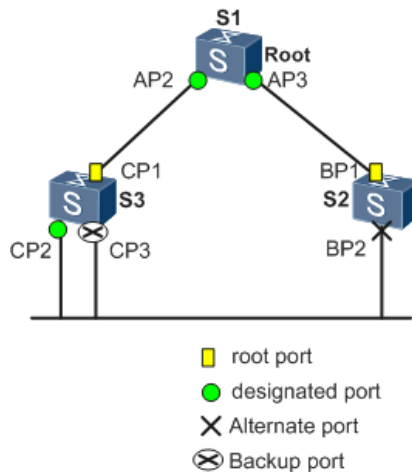
**Root** – Η καλύτερη θύρα μιας γέφυρας που δεν είναι ρίζα για προώθηση προς τη γέφυρα ρίζα,

**Designated** – Μια θύρα προώθησης προς τμήμα LAN,

**Alternate** – Μια εναλλακτική της ριζικής θύρας για τη διαδρομή προς τη γέφυρα ρίζα,

**Backup** – Μια επιπλέον θύρα που συνδέει στο ίδιο τμήμα LAN όπου μια άλλη θύρα της γέφυρας προωθεί,

**Disabled** – Μια θύρα που δεν μετέχει στο RSTP (έχει αφαιρεθεί από τον διαχειριστή).



### Το πλαίσιο BPDU (Bridge Protocol Data Unit)

Το πλαίσιο BPDU περιέχει τις αναγκαίες πληροφορίες για τη λειτουργία του STP. Σημαντικότερες εξ αυτών είναι Root ID, Bridge ID, Port ID, Root Path Cost, Hello Time και διάφορα Flags (Port Role: Alternate/Backup, Root, Designated, State: Learning, Forwarding). Ενθυλακώνεται σε πλαίσια IEEE 802.3 (όχι Ethernet II). Δείτε για περισσότερες λεπτομέρειες την εικόνα στην ιστοθέση <http://www.abdorefky.com/wp-content/uploads/2016/11/bpdu.png>. Τα πλαίσια BPDU εκπέμπονται περιοδικά κάθε 2 sec προς όλες τις γέφυρες που είναι συνδεδεμένες στο ίδιο τμήμα LAN και διαφημίζουν την καλύτερη διαδρομή προς τη ρίζα. Συγκεκριμένα, το πλαίσιο BPDU(R,c,B,p), όπου R είναι η τιμή ID της ρίζας, c είναι το κόστος της διαδρομής προς τη ρίζα (RPC – Root Path Cost), B είναι η ID της γέφυρας και p είναι η θύρα, έχει το εξής νόημα: «Είμαι η γέφυρα B και στέλνω από τη θύρα μου p, θεωρώντας ότι ρίζα είναι η γέφυρα R και το κόστος της διαδρομής μου προς τη ρίζα είναι c».

### Επιλογή της διαδρομής προς τη γέφυρα ρίζα

Κάθε γέφυρα S ακούει σε όλες τις θύρες της τα πλαίσια BPDU που στέλνουν οι άλλες γέφυρες. Για κάθε πλαίσιο BPDU(R,c,B,p) που λαμβάνει στη θύρα q, υπολογίζει και αποθηκεύει το διάνυσμα  $v[q]=(R, c+cost[q], B, p)$  προτεραιότητας ριζών (root priority vector), όπου  $cost[q]$  το κόστος για το τμήμα LAN της θύρας q. Εάν η ID της γέφυρας S είναι μικρότερη από οποιαδήποτε ID στο διάνυσμα v, τότε η γέφυρα S είναι ρίζα του δένδρου και παράγει BPDU(S,0,S,p), όπου p η θύρα στην οποία αποστέλλεται.

Σε κάθε γέφυρα υπάρχει μία ριζική θύρα, πλην της γέφυρας ρίζας όπου όλες οι θύρες είναι επιλεγμένες. Η ριζική θύρα (RP) προσδιορίζεται ως εξής. Εξετάζεται πρώτα η Bridge ID της γέφυρας ρίζας στο διάνυσμα v, όπου υπερισχύει η μικρότερη τιμή. Διαφορετικά, επί ίσων τιμών Bridge ID γέφυρας ρίζας, επιλέγεται η διαδρομή με την μικρότερη τιμή κόστους, δηλαδή, προτιμάται η ανάντη γέφυρα μέσω της οποίας ελαχιστοποιείται το κόστος προς τη γέφυρα ρίζα. Εάν αμφότερες οι τιμές Bridge ID γέφυρας ρίζας και κόστους είναι ίσες, τότε επιλέγεται η διαδρομή μέσω της γέφυρας με τη μικρότερη Bridge ID (επιλύει τη διαφορά ίδιου κόστους μεταξύ ανάντη γεφυρών). Τέλος εάν όλα τα προηγούμενα είναι ίσα, επιλέγεται η διαδρομή μέσω της θύρας με τη μικρότερη ID (επιλύει τη διαφορά όταν υπάρχουν πάνω από μία συνδέσεις με την ανάντη γέφυρα). Η γέφυρα στη συνέχεια

παράγει BPDUs(R,c(RP),S,p), όπου c(RP) το κόστος της διαδρομής προς τη ρίζα μέσω της ριζικής θύρας και p η θύρα όπου αποστέλλονται.

Η επιλεγμένη θύρα προσδιορίζεται ως εξής. Οι γέφυρες που είναι συνδεδεμένες στο ίδιο τμήμα LAN προσδιορίζουν από κοινού την *επιλεγμένη γέφυρα*, αυτή που έχει το ελάχιστο κόστος από το τμήμα αυτό προς τη ρίζα, συγκρίνοντας BPDUs, όχι διανύσματα προτεραιότητας ριζών. Η γέφυρα εκπέμπει BPDUs σε μια θύρα μόνο εάν το BPDUs της διαφημίζει μία καλύτερη διαδρομή από οποιαδήποτε BPDUs λαμβάνει σε αυτή τη θύρα. Σε αυτή την περίπτωση, η γέφυρα θεωρεί ότι είναι η επιλεγμένη για το τμήμα LAN στο οποίο συνδέεται η θύρα της και η θύρα αυτή είναι η επιλεγμένη θύρα (DP) για το εν λόγω τμήμα LAN. Μια γέφυρα που δεν είναι επιλεγμένη για ένα LAN δεν στέλνει BPDUs σε αυτό το LAN.

Το επικαλύπτον δένδρο σχηματίζεται ενώνοντας σε κάθε τμήμα LAN τις ριζικές θύρες που συνδέονται σε αυτό με την επιλεγμένη θύρα για αυτό το τμήμα LAN. Οι άλλες θύρες δεν είναι μέρος του. Κάθε γέφυρα προωθεί πλαίσια δεδομένων μόνο στις θύρες που μετέχουν στο επικαλύπτον δένδρο, δηλαδή, τις ριζικές και τις επιλεγμένες. Οι άλλες θύρες είναι αποκλεισμένες και έτσι δεν δημιουργούνται βρόχοι.

Όσον αφορά τα πλαίσια BPDUs, ο ρόλος των θυρών καθορίζει τα της μετάδοσης των. Η γέφυρα ρίζα στέλνει περιοδικά BPDUs σε όλες τις (επιλεγμένες) θύρες της. Αυτά λαμβάνονται από τη ριζική πόρτα των γεφυρών που είναι απευθείας συνδεδεμένες με τη γέφυρα ρίζα. Κάθε τέτοια γέφυρα υπολογίζει τα δικά της BPDUs και τα στέλνει στις επιλεγμένες θύρες της. Αυτά με τη σειρά τους λαμβάνονται από τις κατάντη γέφυρες, κ.ο.κ. Με σταθερή τοπολογία, οι γέφυρες στέλνουν BPDUs στις επιλεγμένες θύρες τους όταν λάβουν BPDUs στη ριζική τους θύρα. Σε κάθε γέφυρα, η θύρα όπου η γέφυρα λαμβάνει BPDUs που διαφημίζουν τις καλύτερες διαδρομές είναι η ριζική. Η ριζικές θύρες δεν στέλνουν BPDUs. Το ίδιο και οι αποκλεισμένες θύρες. Οι γέφυρες ακούνε για BPDUs στις επιλεγμένες και αποκλεισμένες θύρες, αλλά όσο η τοπολογία είναι σταθερή δεν πρέπει να λάβουν κανένα BPDUs.

Για μια πιο αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας των γεφυρών και του σχηματισμού του επικαλύπτοντος δένδρου δείτε [https://en.wikipedia.org/wiki/Spanning\\_Tree\\_Protocol](https://en.wikipedia.org/wiki/Spanning_Tree_Protocol).

### Εικονικά τοπικά δίκτυα (VLAN)

Η διασύνδεση τμημάτων LAN μέσω γεφυρών αποτελεί μερική λύση στο πρόβλημα της κλιμακοσιμότητας. Η κίνηση μεταξύ δύο κόμβων περιορίζεται στη διαδρομή μεταξύ των γεφυρών που τους συνδέει. Όμως καθώς το πλήθος των διασυνδεδεμένων σταθμών στο LAN αυξάνει, η κίνηση εκπομπής (όταν η θέση του προορισμού είναι άγνωστη) διασχίζει όλο το LAN. Ένας τρόπος να περιορισθεί η κίνηση εκπομπής είναι να διαχωριστεί το δίκτυο σε μικρότερα LAN και να διασυνδεθούν αυτά μέσω δρομολογητών. Το κάθε μικρότερο LAN γίνεται ένα υποδίκτυο IP. Οι δρομολογητές προωθούν τα πακέτα μεταξύ υποδικτύων/LAN με βάση τις διευθύνσεις IP, όχι τις διευθύνσεις MAC. Έτσι η κίνηση εκπομπής περιορίζεται χωρικά, όμως η συμμετοχή ενός κόμβου σε ένα υποδίκτυο συνδέεται με τη θέση του, πράγμα που πολλές φορές είναι ανεπιθύμητο.

Μια καλύτερη λύση είναι να δημιουργηθούν εικονικά LAN (Virtual LAN – VLAN). Το VLAN είναι μια απομονωμένη περιοχή εκπομπής σε όρους πρωτοκόλλου στρώματος ζεύξης δεδομένων. Τα εικονικά LAN διαχωρίζουν πλήρως την περιοχή εκπομπής από τη φυσική θέση των κόμβων. Ένας απλός τρόπος για τη δημιουργία VLAN είναι να διαχωρίσουμε τις θύρες ενός μεταγωγέα σε ομάδες, μία ανά VLAN, όπου η λειτουργία της εκμάθησης (και κατά συνέπεια οι εκπομπές) περιορίζεται στις θύρες της ομάδας. Ο ορισμός αυτός γίνεται χειροκίνητα από τον διαχειριστή του δικτύου σε κάθε μεταγωγέα. Έτσι ορίζουμε πολλαπλά εικονικά LAN πάνω από μία κοινή φυσική υποδομή και ένας μοναδικός μεταγωγέας εμφανίζεται ως πολλοί εικονικοί μεταγωγείς.

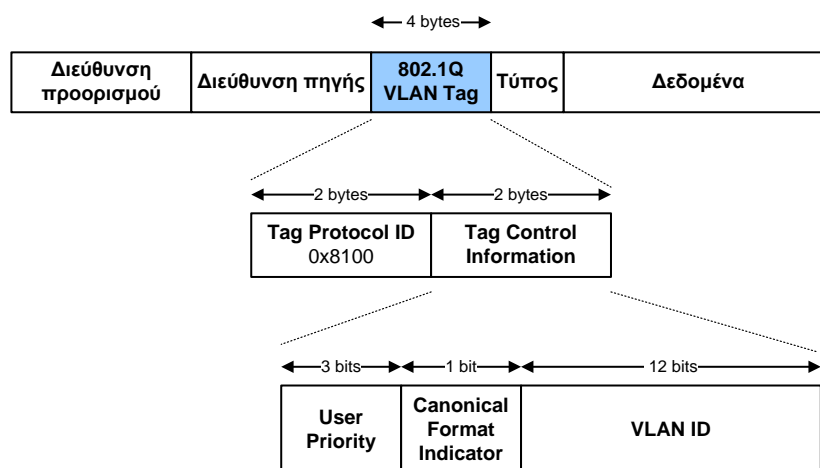
Ο μεταγωγέας διαχωρίζει πλήρως την κίνηση από διαφορετικά VLAN (απομόνωση κίνησης). Η κίνηση μεταξύ VLAN προωθείται μέσω δρομολόγησης, ως εάν οι φυσικοί μεταγωγείς ήταν

διαφορετικοί. Τα VLAN είναι κατασκευάσματα στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, ανάλογα με τα υποδίκτυα για το πρωτόκολλο IP. Συνήθως, υπάρχει μια ένα προς ένα αντιστοιχία μεταξύ VLAN και υποδικτύων IP παρότι είναι δυνατό να έχουμε πολλαπλά υποδίκτυα στο ίδιο VLAN. Στην πράξη οι κατασκευαστές πωλούν συσκευές που συνδυάζουν τη λειτουργία μεταγωγέα LAN και δρομολογητή IP.

Εάν το VLAN εκτείνεται σε πολλούς μεταγωγείς, η κίνηση μεταξύ των μεταγωγέων μπορεί να ανήκει σε διαφορετικά VLAN. Κατ' ανάγκη οι μεταγωγείς πρέπει να είναι σε θέση να πολυπλέκουν και αποπολυπλέκουν την κίνηση των διαφορετικών VLAN. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ετικετών VLAN (VLAN tags). Οι ετικέτες προστίθενται στα πλαίσια Ethernet και περιέχουν μια τιμή (τον αριθμό VLAN) που προσδιορίζει το VLAN. Μαρκάρουν τα πλαίσια ανάλογα με το VLAN όπου ανήκουν και επιπλέον επιτρέπουν τη συνύπαρξη VLAN στο ίδιο φυσικό μέσο. Μια απλή θεώρηση της λειτουργίας μεταγωγέων που υποστηρίζουν VLAN, είναι να φανταστείτε τις ετικέτες ως χρώματα. Το υλικό του μεταγωγέα χειρίζεται πλαίσια του ίδιου χρώματος ανεξάρτητα από τα πλαίσια άλλων χρωμάτων. Μπορεί κάλλιστα να εφαρμοστούν διαφορετικά επικαλύπτοντα δένδρα ανά VLAN, πρωτόκολλο MSTP (Multiple Spanning Tree Protocol) επέκταση του RSTP για VLANs. Οι ετικέτες μπορεί να γίνουν διαφανείς για τα ακραία συστήματα. Στη συνηθισμένη λειτουργία, ο αποστολέας παράγει ένα πλαίσιο, ο πρώτος μεταγωγέας προσθέτει την ετικέτα ανάλογα με το VLAN και ο τελευταίος μεταγωγέας την αφαιρεί.

### Η ετικέτα VLAN 802.1Q

Η ετικέτα VLAN έχει μήκος 4 byte και βρίσκεται στη θέση του πεδίου τύπος του πλαισίου Ethernet όπως φαίνεται στο σχήμα. Τα πρώτα δύο byte της ετικέτας έχουν την τιμή 0x8100 που δηλώνει ετικέτα 802.1Q. Τα δύο επόμενα byte περιέχουν τη VLAN Id, που λαμβάνει τιμές από 1 έως 4094. Η τιμή 0x000 δείχνει πλαίσιο που δεν ανήκει σε κανένα VLAN ενώ η τιμή 0xffff δεν έχει χρήση. Όταν χρησιμοποιούνται ετικέτες VLAN, ο τύπος του αρχικού πλαισίου Ethernet ακολουθεί αμέσως μετά την ετικέτα 802.1Q.



### Συνάθροιση ζεύξεων σε LAN

Τα VLANs επιτρέπουν στους διαχειριστές να ομαδοποιήσουν τους κόμβους του δικτύου ακόμη και εάν αυτοί είναι συνδεδεμένοι σε διαφορετικούς μεταγωγείς. Η διαχείριση γίνεται μέσω λογισμικού και αποφεύγονται φυσικές μετακινήσεις και ανακατατάξεις ζεύξεων. Όμως οι ζεύξεις μεταξύ μεταγωγέων θα πρέπει να μπορούν να διακινούν μαρκαρισμένη κίνηση VLAN. Τέτοιου είδους ζεύξεις αποκαλούνται κυκλώματα (trunks). Τα κυκλώματα μεταφέρουν πλαίσια διαφορετικών VLAN που ορίζονται πάνω από πολλαπλούς φυσικούς μεταγωγείς. Επειδή το εύρος ζώνης τώρα διαμοιράζεται μεταξύ πολλών VLAN πρέπει να έχουν τη μεγαλύτερη δυνατή χωρητικότητα. Για αυτό πολλές φορές χρησιμοποιούνται τεχνικές συνάθροισης ζεύξεων (link aggregation).

Ο όρος συνάθροιση ζεύξεων αναφέρεται σε τεχνικές όπου συνδυάζονται πολλαπλές παράλληλες δικτυακές ζεύξεις έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία μοναδική ζεύξη. Μια ομάδα συνάθροισης ζεύξεων (Link Aggregation Group – LAG) συνδυάζει ένα αριθμό φυσικών θυρών έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία διαδρομή μεγαλύτερης χωρητικότητας επί της οποίας μπορεί να εφαρμοσθούν τεχνικές καταμερισμού φορτίου και/ή να αυξηθεί η αξιοπιστία σε περίπτωση βλάβης μιας μεμονωμένης θύρας.

Η χωρητικότητα των ζεύξεων Ethernet δεν κλιμακώνεται γραμμικά. Η ιστορία έχει δείξει ότι έχουμε δεκαπλασιασμό της ταχύτητας σε κάθε γενιά: 10, 100 Mbit/s, 1, 10, 100 Gbit/s. Εάν κάπου απαιτείται μεγαλύτερη χωρητικότητα, χωρίς τη συνάθροιση, η μόνη λύση θα ήταν να περιμένει κανείς την επόμενη γενιά (που θα ήταν και κατά πολύ ακριβότερη). Η συνάθροιση ζεύξεων είναι μια πρακτική λύση που συνήθως υλοποιείται συνδυάζοντας δύο ή περισσότερες φυσικές ζεύξεις Ethernet ώστε να εμφανίζονται ως μια λογική σύνδεση (channel bonding).

## Γέφυρες, VLAN και LAG στο FreeBSD

Για τον χειρισμό γεφυρών, των εικονικών τοπικών δικτύων VLAN και των ζεύξεων συνάθροισης μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την εντολή `ifconfig`. Το FreeBSD υποστηρίζει το πρωτόκολλο RSTP. Είναι συμβατό προς τα πίσω με το STP και μεταπίπτει σε αυτό εάν ανιχνεύσει σύνδεση με παραδοσιακό εξοπλισμό STP. Όπως θα διαπιστώσετε από τις σελίδες του εγχειριδίου για την εντολή (`man ifconfig`), παράγραφος σχετική με τις γέφυρες, υπάρχει μια πληθώρα επιλογών για να δημιουργήσετε, καταστρέψετε και ρυθμίσετε τη λειτουργία μιας γέφυρας. Μερικές από τις πιο χρήσιμες είναι:

`ifconfig bridge create` για να δημιουργήσετε μια δικτυακή ψευδο-συσσκευή γέφυρα `bridgeX`, όπου ο αριθμός μονάδας `X` της συσκευής θα εμφανισθεί στο αποτέλεσμα της εντολής. Εάν θέλετε να ορίσετε συγκεκριμένη μονάδα δώστε τον αριθμό της, π.χ. `bridge1`.

`ifconfig bridge0 destroy` για να καταστρέψετε την ψευδο-συσσκευή `bridge0`.

`ifconfig bridge0 addm em0 addm em1 addm em2 up` για να προσθέσετε ως μέλη τις διεπαφές `em0`, `em1`, `em2` και ενεργοποιήσετε τη γέφυρα `bridge0`. Προσοχή, οι διεπαφές πρέπει να είναι και αυτές ενεργοποιημένες, `ifconfig em0 up`, κλπ.

`ifconfig bridge0 deletem em0` για να αφαιρέσετε τη διεπαφή μέλος `em0` από την `bridge0`.

`ifconfig bridge0 addr` για να δείτε τον πίνακα προώθησης, τις διευθύνσεις που έχει μάθει η γέφυρα `bridge0` και τις αντίστοιχες θύρες για αυτές.

`ifconfig bridge0 flush` για να αδειάσετε τον πίνακα προώθησης, διαγράφοντας τις διευθύνσεις που έχει μάθει δυναμικά η γέφυρα `bridge0`.

`ifconfig bridge0 stp em0 stp em1 stp em2` για να ενεργοποιήσετε το πρωτόκολλο STP στις διεπαφές `em0`, `em1`, `em2` της γέφυρας `bridge0`.

`ifconfig bridge0 -stp em0 -stp em1 -stp em2` για να απενεργοποιήσετε το πρωτόκολλο STP από τις διεπαφές `em0`, `em1`, `em2` της γέφυρας `bridge0`.

`ifconfig bridge0 priority value` για να θέσετε την τιμή της προτεραιότητας της γέφυρας `bridge0` σε πολλαπλάσια το 4096. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 32768, η ελάχιστη 0 και η μέγιστη 61440.

`ifconfig bridge0 ifpriority em0 value` για να θέσετε την προτεραιότητα της διεπαφής `em0` της γέφυρας `bridge0` σε πολλαπλάσια του 16. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 128, η ελάχιστη 0 και η μέγιστη 240.

`ifconfig bridge0 ifpathcost em0 value` για να θέσετε το κόστος της διαδρομής από τη διεπαφή `em0` γέφυρας `bridge0`.

Δείτε επίσης <https://docs.freebsd.org/en/books/handbook/advanced-networking/#network-bridging>, ειδικά, το παράδειγμα δημιουργίας και ενεργοποίησης μιας γέφυρας καθώς και ενεργοποίησης του STP. Με παρόμοιο τρόπο μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την εντολή `ifconfig` για να δημιουργήσετε διεπαφές συνάθροισης (link aggregation).

`ifconfig lagg create` για να δημιουργήσετε μια δικτυακή ψευδο-συσσκευή συνάθροισης `laggX`, όπου ο αριθμός μονάδας `X` της συσκευής θα εμφανισθεί στο αποτέλεσμα της εντολής.

`ifconfig lagg0 up laggport em0` για να προσθέσετε τη διεπαφή `em0` στη συσκευή συνάθροισης `lagg0`.

`ifconfig lagg0 -laggport em0` για να αφαιρέσετε τη διεπαφή `em0` από τη συσκευή συνάθροισης `lagg0`.

`ifconfig lagg0 laggproto proto` για να ορίσετε το πρωτόκολλο συνάθροισης. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι `failover`. Άλλες επιλογές είναι `lacp`, `loadbalance`, `roundrobin`, `broadcast` και `none`.

Δείτε περισσότερα για δημιουργία συναθροίσεων διεπαφών με την εντολή `ifconfig` στην ιστοσελίδα <https://docs.freebsd.org/en/books/handbook/advanced-networking/#network-aggregation>.

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την εντολή `ifconfig` με την παράμετρο `create` για να δημιουργήσετε διεπαφές που να ανήκουν σε διαφορετικά εικονικά τοπικά δίκτυα (VLAN). Έτσι με την εντολή

```
ifconfig em0.5 create vlan 5 vlandev em0 inet 192.168.20.20/24
```

δημιουργείτε μια ψευδο-διεπαφή VLAN βασισμένη στη διεπαφή `em0` που να ανήκει στο `vlan 5` και της αποδίδετε διεύθυνση IP. Η παράμετρος `vlan` ορίζει την τιμή του `vlan_tag` και η παράμετρος `vlandev` συσχετίζει τη φυσική διεπαφή `em0` με τη διεπαφή VLAN `em0.5`. Για ευκολία αντί της προηγούμενης μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την επόμενη σύνταξη της εντολής ώστε να δημιουργήσετε και ενεργοποιήσετε μια ψευδο-διεπαφή VLAN με `vlan_tag` το 5.

```
ifconfig em0.5 create up
```

Με τον τρόπο αυτό έχετε καλύτερη εποπτεία σε σχέση με το VLAN που ανήκει η κάθε συσκευή. Δείτε επίσης και [https://people.freebsd.org/~arved/vlan/vlan\\_en.html](https://people.freebsd.org/~arved/vlan/vlan_en.html).

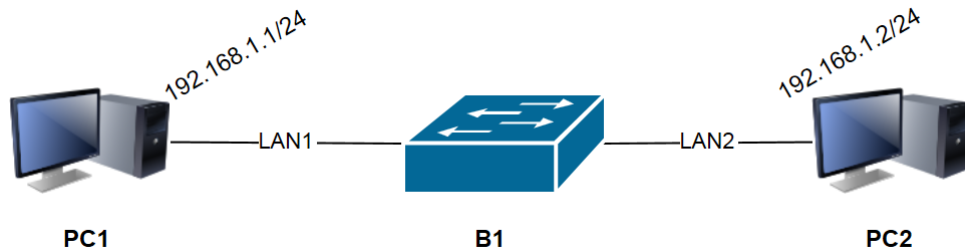
## Άσκηση 1: Γέφυρα - Διασύνδεση δύο LAN

Θα ξεκινήσετε κατασκευάζοντας στο Virtual Box την απλή τοπολογία του επόμενου σχήματος. Χρησιμοποιήστε για υπολογιστές PC1 και PC2 εικονικά μηχανήματα FreeBSD με μια κάρτα δικτύου σε εσωτερική δικτύωση (Internal) βασισμένα στο αρχείο `FreeBSD13.4.ova`<sup>1</sup> που δημιουργήσατε στην Εργαστηριακή Άσκηση 2. Για ευκολία και ελαχιστοποίηση χώρου αποθήκευσης στον δίσκο, μπορείτε να δημιουργήσετε το PC2, αλλά και τα PC3, PC4 που θα χρειαστούν στη συνέχεια, ως συνδεδεμένους κλώνους (linked clones) του PC1 φροντίζοντας να έχετε επιλέξει το `Generate new MAC addresses for all network adapters`. Για γέφυρα B1 δημιουργήστε παρόμοια ένα εικονικό μηχανήμα FreeBSD με τέσσερεις κάρτες δικτύου σε εσωτερική δικτύωση (Internal). Εάν υπάρχει, διαγράψτε το αρχείο `resolv.conf` σε **όλα** τα μηχανήματα. Με τις προεπιλεγμένες επιλογές για τις κάρτες δικτύου, `Promiscuous mode Deny`, το B1 δεν μπορεί να λειτουργήσει ως γέφυρα. Το VirtualBox εμφανίζει μόνο τα πλαίσια που απευθύνονται στη συγκεκριμένη διεπαφή, δηλαδή, τα πλαίσια με διεύθυνση MAC προορισμού αυτήν της συγκεκριμένης κάρτας δικτύου καθώς και τα πλαίσια εκπομπής ή πολλαπλής διανομής. Για να τροποποιήσετε την προεπιλεγμένη επιλογή, πηγαίνετε στις ρυθμίσεις σε όλες τις κάρτες δικτύου του B1, κάντε κλικ στο `Advanced` και στο πεδίο

---

<sup>1</sup> Επίσης μπορείτε να το βρείτε στα μηχανήματα του PC Lab στο δικτυακό δίσκο Υ, φάκελος VMs, είτε να το κατεβάσετε με ανώνυμο ftp από το `edu-dy.cn.ntua.gr` επιλέγοντας δυαδικό τρόπο μεταφοράς.

Promiscuous mode επιλέξτε το Allow VMs. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει ότι το VirtualBox θα παραδίδει στην αντίστοιχη διεπαφή του εικονικού μηχανήματος (VM) όλα τα πλαίσια που παράγουν τα άλλα VM στο ίδιο τοπικό δίκτυο. Για το πρώτο μέρος της άσκησης αυτής θα χρειαστείτε στο B1 δύο κάρτες δικτύου στα τοπικά δίκτυα LAN1 και LAN2, οπότε αποσυνδέστε τα καλώδια δικτύου στις άλλες φροντίζοντας να μην είναι επιλεγμένο το πεδίο Cable Connected<sup>2</sup>.

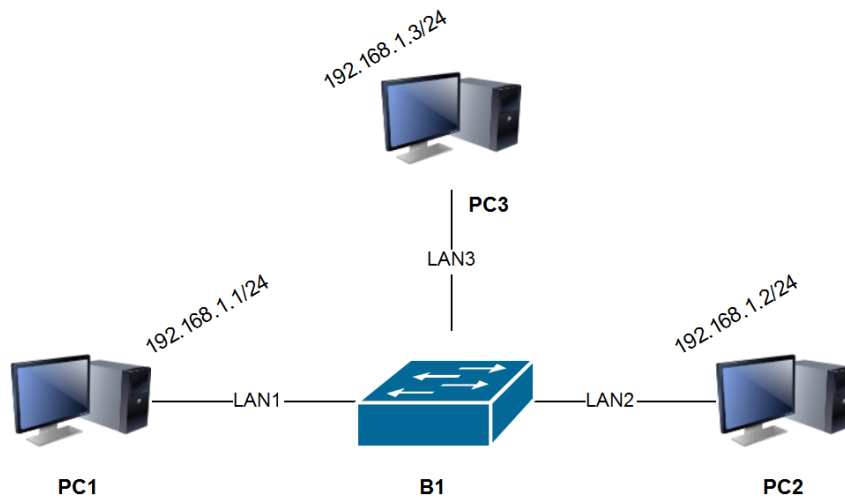


Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 1.1 Με ποιες εντολές φλοιού θα ορίσετε τις διευθύνσεις IPv4 των διεπαφών των PC1 και PC2;
- 1.2 Με ποιες εντολές φλοιού θα ενεργοποιήσετε τις διεπαφές του B1;
- 1.3 Δοκιμάστε από το PC1 να κάνετε ping στο PC2 και αντίστροφα από το PC2 προς το PC1. Τι παρατηρείτε;
- 1.4 Με χρήση του tcpdump στο B1 ελέγξτε εάν παράγονται πακέτα ICMP στο LAN1 και LAN2. Εξηγήστε τι συμβαίνει.
- 1.5 Δημιουργήστε και ενεργοποιήστε μια ψευδο-συσκευή γέφυρα bridge0 στο B1 που να περιλαμβάνει τις δύο διεπαφές του. Ποιες εντολές φλοιού χρησιμοποιήσατε;
- 1.6 Δοκιμάστε πάλι τις εντολές ping του ερωτήματος 1.3. Υπάρχει τώρα επικοινωνία;
- 1.7 Από τις τιμές του TTL που παρατηρείτε, πόσα βήματα απέχει το PC2 από το PC1;
- 1.8 Ελέγξτε τους πίνακες arp στα PC1 και PC2. Τι παρατηρείτε όσον αφορά τις διευθύνσεις MAC των διεπαφών των εικονικών μηχανημάτων;
- 1.9 Στο B1 ξεκινήστε δύο καταγραφές, μία στη διεπαφή για το LAN1 μία στο LAN2. Επιβεβαιώστε ότι πράγματι το B1 προωθεί τα πλαίσια Ethernet μεταξύ των LAN1 και LAN2 κάνοντας ping από το PC1 στο PC2. *[Υποδ. Χρησιμοποιήστε τις κατάλληλες επιλογές για να δείτε την επικεφαλίδα MAC και όσο το δυνατό πιο πολλές λεπτομέρειες]*.
- 1.10 Κάνει κάποια αλλαγή το B1 στις διευθύνσεις MAC των πλαισίων που προωθεί ή στις διευθύνσεις IPv4 των αντίστοιχων πακέτων;
- 1.11 Αλλάζει οποιοδήποτε άλλο πεδίο των πλαισίων και των αντίστοιχων πακέτων;
- 1.12 Κάντε traceroute από PC1 στο PC2. Υπάρχει ένδειξη της ύπαρξης του B1 στην έξοδό του; Γιατί;
- 1.13 Αρχίστε ένα ping από το PC1 στο PC2 και ξεκινήστε στο B1 μια καταγραφή στο LAN2.
- 1.14 Αλλάξτε τη διεύθυνση του PC2 σε 192.168.2.1/24. Προωθεί η γέφυρα τα πακέτα ICMP προς το PC2;
- 1.15 Είναι το ping επιτυχές; Γιατί;

<sup>2</sup> Μπορείτε ανά πάσα στιγμή να δείτε ποιες κάρτες δικτύου είναι συνδεδεμένες αφήνοντας τον δρομέα ακίνητο πάνω από το εικονίδιο δραστηριότητας δικτύου στο παράθυρο του εικονικού μηχανήματος. Με δεξί κλικ στο εν λόγω εικονίδιο έχετε την επιλογή να συνδέσετε ή αποσυνδέσετε αμέσως το καλώδιο δικτύου σε οποιαδήποτε κάρτα καθώς και να μεταβείτε στο μενού του VirtualBox με τις ιδιότητες καρτών δικτύου.

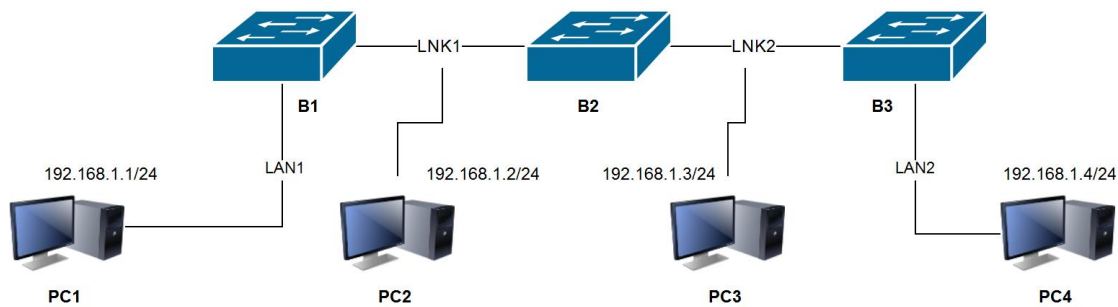
Αλλάξτε την IPv4 διεύθυνση του PC2 στην αρχική του και σταματήστε το ping. Προσθέστε στην τοπολογία ένα τρίτο υπολογιστή PC3, συνδέστε τον στο LAN3 και ρυθμίστε τον όπως στο σχήμα. Μην ξεχάσετε να επανασυνδέσετε στο B1 το καλώδιο δικτύου για το LAN3.



- 1.16 Μπορείτε να κάνετε ping από το PC3 στο PC1;
- 1.17 Προσθέστε τη διεπαφή em2 του B1 στη γέφυρα bridge0 του ερωτήματος 1.5. Η διεπαφή δεν είναι ενεργοποιημένη (όπως και οι προηγούμενες) οπότε θα πρέπει να την ενεργοποιήσετε.
- 1.18 Επαναλάβετε το ping από το PC3 στο PC1. Λαμβάνετε τώρα απάντηση από το PC1;
- 1.19 Με χρήση του tcpdump ελέγξτε εάν εμφανίζονται πακέτα ICMP στο LAN2 όταν κάνετε ping από το PC1 στο PC3 ή το αντίστροφο. Εξηγήστε τι συμβαίνει.
- 1.20 Εκκαθαρίστε τον πίνακα arp των PC1 και PC3. Επαναλάβετε την προηγούμενη καταγραφή στο LAN2 όταν κάνετε ping από το PC1 στο PC3. Ποια σχετικά με το ping πακέτα καταγράψατε και γιατί;
- 1.21 Με ποια εντολή μπορείτε να δείτε ποιες διεπαφές είναι μέλη της γέφυρας bridge0;
- 1.22 Με ποια εντολή μπορείτε να δείτε το περιεχόμενο του πίνακα προώθησης της γέφυρας bridge0;
- 1.23 Σε ποια μηχανήματα αντιστοιχούν οι διευθύνσεις MAC που παρατηρείτε για κάθε μία από τις διεπαφές του B1;
- 1.24 Επαναλάβετε το ping από το PC3 στο PC1 και ξαναδείτε το περιεχόμενο του πίνακα προώθησης της γέφυρας bridge0. Ποια είναι η μέγιστη διάρκεια ζωής των εγγραφών;
- 1.25 Διαγράψτε τις εγγραφές του πίνακα προώθησης.
- 1.26 Αφαιρέστε από τη γέφυρα bridge0 τη διεπαφή της στο LAN3.
- 1.27 Καταστρέψτε τη γέφυρα bridge0.
- 1.28 Αφαιρέστε τις διευθύνσεις IP από τις διεπαφές των PC1, PC2 και PC3.

## Άσκηση 2: Αυτο-εκπαίδευση γεφυρών

Κατασκευάστε στο VirtualBox την τοπολογία του επόμενου σχήματος. Χρησιμοποιήστε για υπολογιστές PC1, PC2, PC3 και PC4 τέσσερα εικονικά μηχανήματα FreeBSD με μια κάρτα δικτύου και για γέφυρες τρία εικονικά μηχανήματα B1, B2 και B3 με τέσσερις κάρτες δικτύου σε εσωτερική δικτύωση (Internal) ρυθμισμένες στα δίκτυα όπως στο σχήμα. Για ευκολία να δημιουργήσετε τα B2, B3 ως κλώνους του B1, αφού προηγουμένως το κλείσετε φροντίζοντας να έχετε επιλέξει το Generate new MAC addresses for all network adapters. Όπως και στην προηγούμενη άσκηση **αποσυνδέστε** τα καλώδια δικτύου των καρτών δικτύου των B1, B2 και B3 που δεν χρησιμοποιείτε.

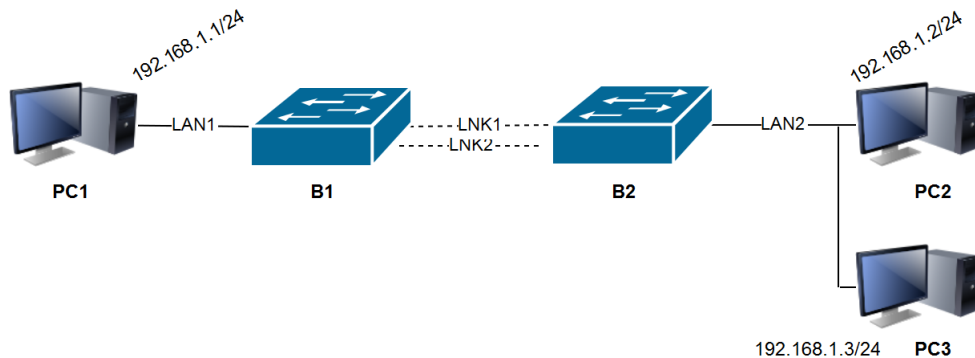


Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 2.1 Εάν δεν το έχετε ήδη κάνει, ορίστε διευθύνσεις IPv4 στις διεπαφές των PC1,2,3,4.
- 2.2 Δημιουργήστε μια ψευδο-συσσκευή γέφυρα bridge1 στο B1 που να περιλαμβάνει τις διεπαφές στα LAN1 και LNK1, ενεργοποιήστε αυτήν και τις διεπαφές.
- 2.3 Δημιουργήστε μια ψευδο-συσσκευή γέφυρα bridge2 στο B2 που να περιλαμβάνει τις διεπαφές στα LNK1 και LNK2, ενεργοποιήστε αυτήν και τις διεπαφές.
- 2.4 Δημιουργήστε μια ψευδο-συσσκευή γέφυρα bridge3 στο B3 που να περιλαμβάνει τις διεπαφές στα LNK2 και LAN2, ενεργοποιήστε αυτήν και τις διεπαφές.
- 2.5 Καταγράψτε τις διευθύνσεις MAC των PC και αδειάστε τους πίνακες ARP.
- 2.6 Διαγράψτε τις εγγραφές του πίνακα προώθησης των B1, B2 και B3.
- 2.7 Στα PC1, PC2, PC3 και PC4 ξεκινήστε μια καταγραφή με tcpdump.
- 2.8 Βεβαιωθείτε ότι οι πίνακες προώθησης των B1, B2 και B3 είναι κενοί και, αμέσως μετά, από νέο παράθυρο στο PC1 εκτελέστε την εντολή `ping -c 1 192.168.1.2`. Στη συνέχεια δείτε και καταγράψτε το περιεχόμενο των πινάκων προώθησης των B1, B2 και B3.
- 2.9 Με βάση τις καταγραφές στα PC και για κάθε ένα από τα τέσσερα πακέτα που παράχθηκαν (ARP request, ARP reply, ICMP echo request και ICMP echo reply) αιτιολογήστε τις εγγραφές των πινάκων προώθησης των B1, B2 και B3.
- 2.10 Στο PC2 εκτελέστε την εντολή `ping -c 1 192.168.1.1` και στη συνέχεια δείτε τους πίνακες προώθησης των B1, B2 και B3. Υπήρξαν αλλαγές στους πίνακες προώθησης και/ή τη διάρκεια των εγγραφών σε αυτούς; Αιτιολογήστε.
- 2.11 Στο PC2 εκτελέστε την εντολή `ping -c 1 192.168.1.4` και στη συνέχεια δείτε τους πίνακες προώθησης των B1, B2 και B3. Με βάση τις καταγραφές εξηγήστε γιατί ο πίνακας προώθησης του B1 περιέχει τη διεύθυνση MAC του PC4.
- 2.12 Από νέο παράθυρο στο PC3 εκτελέστε την εντολή `ping -c 1 192.168.1.2` και στη συνέχεια δείτε τους πίνακες προώθησης των B1, B2 και B3. Υπήρξαν αλλαγές στους πίνακες προώθησης; Αιτιολογήστε.
- 2.13 Από νέο παράθυρο στο PC4 κάντε `ping` στο PC2 και αφήστε το να τρέχει. Το ίδιο και από το PC1 προς το PC2.
- 2.14 Μετακινήστε το PC2 από το LNK1 στο LAN2 όπου βρίσκεται το PC4. Τι συμβαίνει με το `ping` από το PC4 προς το PC2;
- 2.15 Τι συμβαίνει με το `ping` από το PC1 προς το PC2; Αιτιολογήστε.
- 2.16 Στο PC2 εκτελέστε την εντολή `ping -c 1 192.168.1.3`. Τι παρατηρείτε με το `ping` από το PC1 στο PC2; Γιατί;
- 2.17 Εάν δεν είχατε κάνει το προηγούμενο `ping`, πόση ώρα θα έπρεπε να περιμένετε ώστε να λάβετε απάντηση από το PC2;

### Άσκηση 3: Καταιγίδα πλαισίων εκπομπής

Πολλές φορές στην πράξη η κίνηση μεταξύ δύο μεταγωγέων είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να καθίσταται αναγκαία η σύνδεσή τους με περισσότερες από μία ζεύξεις. Μια τέτοια σύνδεση, εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, θα οδηγήσει σε μια καταιγίδα πλαισίων εκπομπής (broadcast storm). Κατασκευάστε στο VirtualBox την τοπολογία του επόμενου σχήματος. Εάν χρησιμοποιήσετε τα εικονικά μηχανήματα της προηγούμενης άσκησης, στα B1 και B2 καταστρέψτε τις γέφυρες που είχατε δημιουργήσει. Όπως και πριν **αποσυνδέστε** τα καλώδια των καρτών δικτύου των B1 και B2 που δεν χρησιμοποιείτε.



Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 3.1 Δημιουργήστε και ενεργοποιήστε γέφυρα bridge1 στο B1 που να περιλαμβάνει τις διεπαφές του στα LAN1 και LNK1. Ενεργοποιήστε τις διεπαφές που συμμετέχουν στη γέφυρα.
- 3.2 Δημιουργήστε και ενεργοποιήστε γέφυρα bridge2 στο B2 που να περιλαμβάνει τις διεπαφές του στα LAN2 και LNK1. Ενεργοποιήστε τις διεπαφές που συμμετέχουν στη γέφυρα.
- 3.3 Καταγράψτε τις διευθύνσεις MAC των PC1,2,3 και αδειάστε τους πίνακες ARP.
- 3.4 Με χρήση του tcpdump στο PC1 ελέγξτε εάν εμφανίζεται κίνηση στο LAN1 όταν κάνετε ping από το PC2 στο PC3 ή το αντίστροφο. Εξηγήστε τι συμβαίνει.

**Προσοχή!** Εάν στη συνέχεια παρατηρήσετε πρόβλημα στη λειτουργία γεφυρών, ως πρώτο βήμα, απενεργοποιείτε (down) και μετά ενεργοποιείτε (up) τις διεπαφές τους. Εάν αυτό δεν λύσει το πρόβλημα, καταστρέψτε και ξαναδημιουργήστε τις γέφυρες.

- 3.5 Ξεκινήστε ένα ping από το PC3 στο PC1 και αφήστε το να τρέχει.
- 3.6 Προσθέστε στις γέφυρες bridge1 και bridge2 τις διεπαφές τους στο LNK2 και ενεργοποιήστε τις.
- 3.7 Σταματήστε το ping και ελέγξτε το περιεχόμενο των πινάκων προώθησης των γεφυρών bridge1 και bridge2.
- 3.8 Σε ποιες διεπαφές των B1 και B2, αντίστοιχα, εμφανίζονται οι MAC διευθύνσεις των PC1 και PC3;
- 3.9 Ξεκινήστε μια καταγραφή με tcpdump στο PC1 και μια αντίστοιχη στο PC2 εμφανίζοντας τις επικεφαλίδες Ethernet.
- 3.10 Εκκαθαρίστε τον πίνακα arp του PC3 και δώστε την εντολή ping -c 1 192.168.1.1. Είναι το ping επιτυχές;
- 3.11 Στις καταγραφές θα παρατηρήσετε ένα κατακλυσμό από πακέτα ARP. Για να σταματήσει, αποσυνδέστε το καλώδιο από τις κάρτες δικτύου των B1 και B2 σε μία από τις ζεύξεις LNK1 ή LNK2. Σε ποιες διεπαφές του B2 εμφανίζονται οι MAC διευθύνσεις των PC1 και PC3; Γιατί;

- 3.12 Στον κατακλυσμό από πακέτα ARP Request και ARP Reply της καταγραφής στο PC1, ποια ερώτηση ARP γίνεται και ποια απάντηση δίδεται;
- 3.13 Στην καταγραφή στο PC2 παρατηρείτε ένα κατακλυσμό από ARP Request. Ποια είναι η MAC διεύθυνση πηγής τους;
- 3.14 Γιατί τα πακέτα ARP Request επαναλαμβάνονται συνεχώς σε αμφότερες τις καταγραφές;
- 3.15 Γιατί τα ARP Reply στο LAN1 δεν προωθούνται στο LAN2;

#### **Άσκηση 4: Συνάθροιση ζεύξεων**

Στην προηγούμενη τοπολογία, παρότι εκ πρώτης όψεως δεν αναμένονταν, η ύπαρξη δύο παράλληλων διαδρομών μεταξύ των εικονικών μηχανημάτων δημιουργεί ένα βρόχο που οδηγεί σε καταιγίδα πλαισίων εκπομπής. Εάν ο σκοπός αυτής της διασύνδεσης ήταν η αύξηση της χωρητικότητας για να αντιμετωπιστεί αυξημένη κίνηση μεταξύ των B1 και B2, τότε θα πρέπει οι δύο ζεύξεις να ομαδοποιηθούν ώστε να εμφανίζονται στη γέφυρα ως μία. Η λειτουργία αυτή αποκαλείται συνάθροιση ζεύξεων (link aggregation) και έχει σκοπό τόσο τον διαμοιρασμό της κίνησης όσο και την υποστήριξη εναλλακτικής όδευσης, σε περίπτωση βλάβης κάποιας εκ των συνιστωσών της. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσετε την τοπολογία της προηγούμενης άσκησης για να δείτε πώς μπορεί να επιτευχθεί η συνάθροιση ζεύξεων.

Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 4.1 Καταστρέψτε τις ψευδο-συσσκευές γέφυρες στα B1, B2 και απενεργοποιήστε τις διεπαφές τους. Στη συνέχεια δημιουργήστε νέες γέφυρες χωρίς να προσθέσετε προς το παρόν διεπαφές.
- 4.2 Αφού ενεργοποιήσετε όλες τις κάρτες δικτύου στο B1, δημιουργήστε στη συνέχεια μια ψευδο-συσσκευή συνάθροισης lagg0.
- 4.3 Εντάξτε στην ψευδο-συσσκευή lagg0 τις διεπαφές της B1 στα LNK1 και LNK2 και ενεργοποιήστε την ψευδο-συσσκευή.
- 4.4 Επαναλάβετε τα δύο προηγούμενα βήματα στο B2.
- 4.5 Εντάξτε στη γέφυρα που δημιουργήσατε στο B1 τη διεπαφή του στο LAN1, την ψευδο-συσσκευή lagg0 και ενεργοποιήστε την γέφυρα.
- 4.6 Επαναλάβετε το προηγούμενο για το B2 με τη διεπαφή του στο LAN2 και την αντίστοιχη ψευδο-συσσκευή lagg0.
- 4.7 Ελέγξτε εάν εμφανίζεται κίνηση στο LAN1 όταν κάνετε ping από το PC2 στο PC3 ή το αντίστροφο. Εξηγήστε τι συμβαίνει.
- 4.8 Ξεκινήστε μια καταγραφή με tcpdump στο PC1.
- 4.9 Εκκαθαρίστε τον πίνακα arp του PC3 και δώστε την εντολή ping -c 1 192.168.1.1. Είναι το ping επιτυχές; Παρατηρήσατε πακέτα ARP στην καταγραφή;
- 4.10 Ξεκινήστε μια καταγραφή στη διεπαφή του B1 στο LNK1 και μια άλλη στη διεπαφή του B2 στο LNK2. Από το PC2 κάντε ping στο PC1 και αφήστε το να τρέχει. Σε ποια από τις δύο ζεύξεις, LNK1 ή LNK2, εμφανίζονται τα πακέτα ICMP; Γιατί; [Υπόδ. Ποιο είναι το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο συνάθροισης;]
- 4.11 Αποσυνδέστε τα καλώδια από τις κάρτες δικτύου των B1 και B2 στη ζεύξη όπου παρατηρήσατε πακέτα ICMP προηγουμένως. Τι παρατηρείτε όσον αφορά την έξοδο της εντολής ping και τη ζεύξη όπου μεταφέρονται τα πακέτα ICMP;
- 4.12 Επανασυνδέστε τις κάρτες δικτύων των B1 και B2. Άλλαξε κάτι σε σχέση με την απάντηση στην προηγούμενη ερώτηση;

## Άσκηση 5: Αποφυγή βρόχων

Μπορούμε να αποφύγουμε το πρόβλημα που παρατηρήσατε προηγουμένως ενεργοποιώντας τον αλγόριθμο επικαλύπτοντος δέντρου στις δύο γέφυρες. Ξεκινήσετε με την τοπολογία της προηγούμενης άσκησης. Το FreeBSD υλοποιεί το πρωτόκολλο RSTP, όμως για να λειτουργήσουν σωστά οι ψευδο-συσκευές γέφυρες θα πρέπει να κατασκευαστούν εξ αρχής.

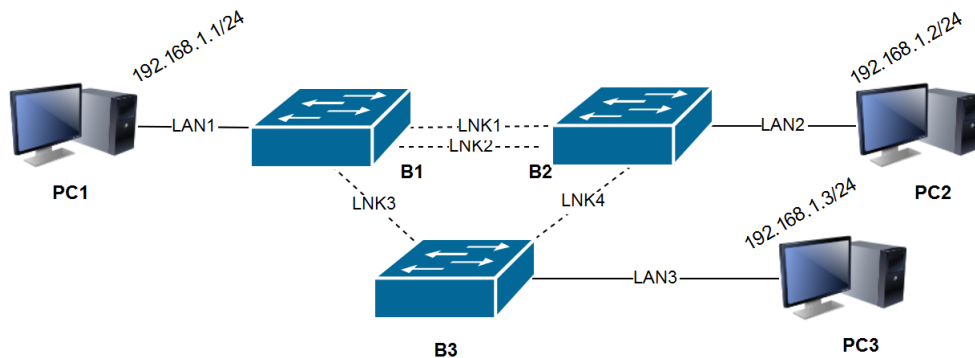
Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 5.1 Καταστρέψτε τις γέφυρες, τις ψευδο-συσκευές συνάθροισης και απενεργοποιήστε τις κάρτες δικτύου στα B1, B2.
- 5.2 Δημιουργήστε γέφυρα bridge1 στο B1 που να περιλαμβάνει τις διεπαφές του στα LAN1, LNK1 και LNK2, ενεργοποιήστε την καθώς και όλες τις διεπαφές.
- 5.3 Δημιουργήστε γέφυρα bridge2 στο B2 που να περιλαμβάνει τις διεπαφές του στα LAN2, LNK1 και LNK2, ενεργοποιήστε την καθώς και όλες τις διεπαφές.
- 5.4 Ενεργοποιήστε το STP σε όλες τις διεπαφές που μετέχουν στην bridge1.
- 5.5 Ενεργοποιήστε το STP σε όλες τις διεπαφές που μετέχουν στην bridge2.
- 5.6 Για κάθε μία γέφυρα προσδιορίστε την Bridge ID. Ποια η σχέση της με τις διευθύνσεις MAC των διεπαφών;
- 5.7 Ποια είναι η γέφυρα ρίζα του επικαλύπτοντος δέντρου;
- 5.8 Ποια είναι η κατάσταση και ποιος ο ρόλος κάθε μίας διεπαφής της γέφυρας ρίζας;
- 5.9 Εκ των δύο διεπαφών στα LNK1 και LNK2 της δεύτερης γέφυρας (αυτής που δεν είναι η ρίζα), ποια είναι η ριζική θύρα;
- 5.10 Ποια είναι η κατάσταση και ο ρόλος της άλλης εκ των δύο διεπαφών LNK1 και LNK2;
- 5.11 Ποια είναι η κατάσταση και ο ρόλος της διεπαφής στο LAN1 ή LAN2 της γέφυρας που δεν είναι η ρίζα;
- 5.12 Ξεκινήστε μια καταγραφή της κίνησης που παράγεται στη διεπαφή της γέφυρας ρίζας στο LAN1/2 φροντίζοντας να εμφανίζονται όσο το δυνατόν περισσότερες λεπτομέρειες καθώς και οι διευθύνσεις Ethernet των πλαισίων. Κάθε πότε εκπέμπονται BPDUs;
- 5.13 Τι είδους ενθυλάκωση Ethernet II ή IEEE 802.3 χρησιμοποιείται;
- 5.14 Ποιες είναι οι διευθύνσεις MAC πηγής και προορισμού των BPDUs;
- 5.15 Σε ποια διεπαφή της γέφυρας ρίζας ανήκει η MAC πηγής των BPDUs;
- 5.16 Τι είδους διεύθυνση (unicast, multicast, broadcast) είναι η MAC προορισμού των BPDUs;
- 5.17 Στα πλαίσια BPDUs που καταγράψατε προηγουμένως, ποια είναι η root ID, η bridge ID και το root path cost;
- 5.18 Ξεκινήστε μια αντίστοιχη της ερώτησης 5.12 καταγραφή της κίνησης που παράγεται στη διεπαφή της γέφυρας ρίζας στο LNK1 ή LNK2. Συγκρίνοντας με την προηγούμενη καταγραφή, ποιο μέρος της Bridge ID είναι η προτεραιότητα; [Υποδ.  $0x8000 = 32768$ .]
- 5.19 Τι είναι το δεύτερο μέρος της Bridge ID;
- 5.20 Το τρίτο μέρος της Bridge ID όπως την εμφανίζει το tcpdump είναι το Port ID. Εξηγήστε πώς προκύπτει η τιμή του. [Υποδ. Δείτε στην ιστοθέση <http://www.abdorefky.com/wp-content/uploads/2016/11/bpdu.png>.]
- 5.21 Παρατηρείτε παραγωγή κίνησης BPDUs στα LNK1 και LNK2 από την **άλλη** γέφυρα (αυτή που δεν είναι η ρίζα);
- 5.22 Σε ποια θύρα της **άλλης** γέφυρας παρατηρείτε παραγωγή κίνησης BPDUs;

- 5.23 Στα προηγούμενα BPDUs, ποια είναι η root ID, η bridge ID και το root path cost;
- 5.24 Ξεκινήστε ένα ring από το PC1 στο PC2 και αφήστε το να τρέχει; Είναι επιτυχές;
- 5.25 Στην γέφυρα που δεν είναι ρίζα αποσυνδέστε το καλώδιο της διεπαφής (LNK1 ή LNK2) που αντιστοιχεί στη ριζική θύρα και βρήκατε στην ερώτηση 5.9. Παρατηρώντας την έξοδο του ring, πόσος περίπου χρόνος περνάει μέχρι να αποκατασταθεί η επικοινωνία; Είναι αναμενόμενη αυτή η τιμή; [Υποδ. Δείτε λεπτομέρειες λειτουργίας για το πρωτόκολλο RSTP στην ιστοσελίδα [https://en.wikipedia.org/wiki/Spanning\\_Tree\\_Protocol](https://en.wikipedia.org/wiki/Spanning_Tree_Protocol).]
- 5.26 Επανασυνδέστε το καλώδιο που αποσυνδέσατε. Περιμένετε λίγο, υπάρχει τώρα διακοπή στην επικοινωνία;

## Άσκηση 6: Ένα πιο πολύπλοκο δίκτυο με εναλλακτικές διαδρομές

Στη συνέχεια κατασκευάστε μια πιο πολύπλοκη τοπολογία δικτύου όπως στο σχήμα, προσθέτοντας μία ακόμη γέφυρα B3 και μετακινώντας το PC3. Ορίστε όλες τις κάρτες δικτύου να ανήκουν στα τοπικά δίκτυα όπως φαίνεται στο σχήμα και φροντίστε τα καλώδια δικτύου να είναι συνδεδεμένα.



Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 6.1 Ενεργοποιήστε τη διεπαφή του B1 στο LNK3 και προσθέστε την στη bridge1. Ενεργοποιήστε και το STP για τη διεπαφή που προσθέσατε.
- 6.2 Αντίστοιχα στην bridge2 για τη διεπαφή του B2 στο LNK4.
- 6.3 Δημιουργήστε γέφυρα bridge3 στο B3, προσθέστε τις διεπαφές του στα LAN3, LNK3 και LNK4, ενεργοποιήστε την καθώς και όλες τις διεπαφές. Κατόπιν, ενεργοποιήστε το STP σε όλες τις διεπαφές.
- 6.4 Διαγράψτε τους πίνακες προώθησης σε όλες τις γέφυρες. Είναι το ring από το PC1 προς τα PC2 και PC3 επιτυχές; [Σημ. Εάν όχι, ελέγξτε ότι όλα τα καλώδια δικτύου είναι συνδεδεμένα και εν ανάγκη καταστρέψτε τις γέφυρες και δημιουργήστε τις πάλι εξ αρχής.]
- 6.5 Ορίστε μια κατάλληλη προτεραιότητα ώστε η γέφυρα bridge1 να γίνει η ρίζα του επικαλύπτοντος δέντρου (ακόμη και εάν είναι ήδη ρίζα δώστε τη σχετική εντολή).
- 6.6 Ποιο είναι το path cost για τις ζεύξεις LNK1, LNK2 και LNK4 στο B2; Πώς προκύπτει από την ταχύτητα της κάρτας δικτύου;
- 6.7 Ποιο είναι το root path cost στα πλαίσια BPDUs που λαμβάνει η bridge3 από τις άλλες δύο γέφυρες και πώς προκύπτει;
- 6.8 Ποια από τις θύρες της bridge3 στα LNK3 και LNK4 είναι η ριζική; Γιατί;
- 6.9 Ποια είναι η κατάσταση και ο ρόλος της θύρας στο LNK3 ή LNK4 που δεν είναι ριζική καθώς και της αντίστοιχής της στο B1 ή B2;

- 6.10 Ποιο είναι το root path cost στα πλαίσια BPDU που παράγει η bridge3 στο LAN3;
- 6.11 Ξεκινήστε ένα ping από το PC1 στο PC3 και αφήστε το να τρέχει.
- 6.12 Ορίστε το κόστος της διεπαφής της bridge3 στο LNK3 έτσι ώστε να γίνει ριζική θύρα η διεπαφή της στο LNK4. Ποια τιμή διαλέξατε για κόστος και γιατί;
- 6.13 Πόσος περίπου χρόνος πέρασε μέχρις ότου αποκατασταθεί η επικοινωνία;
- 6.14 Ποια είναι η κατάσταση και ο ρόλος των διεπαφών της bridge3 στο LNK3 και της bridge2 στο LNK4;
- 6.15 Υπήρξε κάποια διαφορά στις τιμές των παραμέτρων των BPDU που λαμβάνει η bridge3;
- 6.16 Υπήρξε κάποια διαφορά στις τιμές των παραμέτρων των BPDU που παράγει η bridge3;
- 6.17 Αποσυνδέστε το καλώδιο της διεπαφής της bridge3 στο LNK4. Πόσος περίπου χρόνος πέρασε μέχρις ότου αποκατασταθεί η επικοινωνία;
- 6.18 Επανασυνδέστε το καλώδιο που αποσυνδέσατε. Η επικοινωνία θα διακοπεί μετά από λίγο και θα επανέλθει. Πόσος περίπου χρόνος πέρασε από τη διακοπή μέχρις ότου αποκατασταθεί η επικοινωνία;
- 6.19 Συνδέστε την 4<sup>η</sup> διεπαφή του B3 στο LAN3, ενεργοποιήστε την, προσθέστε την στην bridge3 και ενεργοποιήστε για αυτήν το STP. Ποια είναι η κατάσταση και ο ρόλος των δύο θυρών της bridge3 στο LAN3;
- 6.20 Αποσυνδέστε την 4<sup>η</sup> διεπαφή του B3 και ορίστε το κόστος της διεπαφής της bridge3 στο LNK3 έτσι ώστε αυτή να γίνει ριζική θύρα. Ποια τιμή διαλέξατε για κόστος;

## Άσκηση 7: Εικονικά τοπικά δίκτυα (VLAN)

Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις καταγράφοντας παράλληλα, όπου απαιτείται, την ακριβή σύνταξη των εντολών που χρησιμοποιήσατε.

- 7.1 Στο PC1 δημιουργήστε με βάση την em0 δύο νέες διεπαφές, μία που να ανήκει στο VLAN 5 και μία στο VLAN 6. Δώστε σε αυτές τις IPv4 διευθύνσεις 192.168.5.1/24 και 192.168.6.1/24, αντίστοιχα.
- 7.2 Στο B1 με βάση τη διεπαφή του στο LAN1 δημιουργήστε και ενεργοποιήστε δύο νέες διεπαφές, μία για το VLAN 5 και μία για το VLAN 6.
- 7.3 Με βάση τη διεπαφή του B1 στο LNK1 δημιουργήστε και ενεργοποιήστε μια νέα διεπαφή για το VLAN 6 και αντίστοιχα στο LNK3 δημιουργήστε και ενεργοποιήστε μια νέα διεπαφή για το VLAN5.
- 7.4 Στο PC2 με βάση την em0 δημιουργήστε μια διεπαφή που να ανήκει στο VLAN 6 και δώστε σε αυτή την IP διεύθυνση 192.168.6.2/24.
- 7.5 Στο B2 αφού αποσυνδέσετε τη διεπαφή στο LNK2, με βάση τις διεπαφές του στα LAN2 και LNK1 δημιουργήστε και ενεργοποιήστε νέες διεπαφές για το VLAN 6.
- 7.6 Στο PC3 δημιουργήστε μια διεπαφή που να ανήκει στο VLAN 5 και δώστε σε αυτή την IP διεύθυνση 192.168.5.3/24.
- 7.7 Με βάση τις διεπαφές του B3 στα LAN3 και LNK3 δημιουργήστε και ενεργοποιήστε νέες διεπαφές για το VLAN 5.
- 7.8 Από το PC1 μπορείτε να κάνετε ping στις διευθύνσεις 192.168.6.2 και 192.168.5.3;
- 7.9 Για τη συνέχεια αφαιρέστε από το επικάλυπτον δένδρο τη διεπαφή της γέφυρας bridge1 στο LAN1.

- 7.10 Στο PC1 ξεκινήστε μια λεπτομερή καταγραφή στη διεπαφή em0 ώστε να εμφανίζονται οι επικεφαλίδες Ethernet καθώς και το περιεχόμενό των πλαισίων σε δεκαεξαδική μορφή.
- 7.11 Στο PC2 καθαρίστε τον πίνακα ARP και εκτελέστε την εντολή ping -c 1 192.168.1.1. Ποια είναι η τιμή του πεδίου Ethertype των πλαισίων για τα πακέτα ARP και ποια για τα πακέτα IPv4;
- 7.12 Στη συνέχεια στο PC2 εκτελέστε την εντολή ping -c 1 192.168.6.1. Σε τι διαφέρουν τα πλαίσια Ethernet που παράγονται τώρα από τα προηγούμενα;
- 7.13 Ποια είναι η τιμή του πεδίου Ethertype τώρα; Πώς ξεχωρίζουν τα πακέτα ARP από τα πακέτα IP;
- 7.14 Σε ποιο πεδίο της επικεφαλίδας Ethernet εμφανίζεται η πληροφορία για το VLAN;
- 7.15 Στο PC1 ξεκινήστε μια νέα λεπτομερή καταγραφή στη διεπαφή του στο VLAN 5 όπου να εμφανίζονται οι επικεφαλίδες Ethernet καθώς και το περιεχόμενο των πλαισίων σε δεκαεξαδική μορφή.
- 7.16 Στο PC3 καθαρίστε τον πίνακα ARP και εκτελέστε την εντολή ping -c 1 192.168.5.1. Ποια τιμή έχει τώρα το πεδίο Ethertype στα πλαίσια ARP και ποια στα πακέτα που μεταφέρουν τα μηνύματα ICMP; Υπάρχει πεδίο σχετικό με το VLAN;
- 7.17 Στη γέφυρα bridge1 προσθέστε στο επικαλύπτον δένδρο τη διεπαφή του B1 στο LAN1. Στο PC1 ξεκινήστε μια νέα καταγραφή όπως πριν, αλλά στη διεπαφή em0 αυτή τη φορά.
- 7.18 Είναι τα πλαίσια Ethernet που μεταφέρουν BPDU του ίδιου τύπου με αυτά που παρατηρήσετε προηγουμένως; Τι υπάρχει στη θέση του πεδίου Ethertype; [Υποδ. Δείτε λεπτομέρειες στο [https://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet\\_frame](https://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet_frame).]
- 7.19 Εάν δεν είχατε αφαιρέσει τη διεπαφή του B1 στο LAN1 από το επικαλύπτον δέντρο, ποιο φίλτρο θα χρησιμοποιούσατε στις προηγούμενες καταγραφές στο PC1 ώστε να μην συλλαμβάνετε πλαίσια BPDU;

Όνοματεπώνυμο:	Όνομα PC:
Ομάδα:	Ημερομηνία:

## Εργαστηριακή Άσκηση 3

### Τοπικά δίκτυα και μεταγωγείς LAN

Απαντήστε στα ερωτήματα στον χώρο που σας δίνεται παρακάτω και στην πίσω σελίδα εάν δεν επαρκεί. Το φυλλάδιο αυτό θα παραδοθεί στον επιβλέποντα.

1

- 1.1 .....
- 1.2 .....
- 1.3 .....
- 1.4 .....
- 1.5 .....
- 1.6 .....
- 1.7 .....
- 1.8 .....
- 1.9 .....
- 1.10.....
- 1.11.....
- 1.12.....
- 1.13.....
- 1.14.....
- 1.15.....

- 1.16.....
- 1.17.....
- .....
- 1.18.....
- 1.19.....
- .....
- 1.20.....
- .....
- 1.21.....
- 1.22.....
- 1.23.....
- 1.24.....
- 1.25.....
- 1.26.....
- 1.27.....
- 1.28.....
- 2**
- 2.1 .....
- .....
- 2.2 .....
- .....
- .....
- 2.3 .....
- .....
- .....
- 2.4 .....
- .....
- .....
- 2.5 .....
- .....
- .....
- 2.6 .....
- 2.7 .....
- 2.8 .....
- .....
- .....

- 2.9 .....
- .....
- .....
- .....
- .....
- .....
- 2.10.....
- .....
- .....
- 2.11.....
- .....
- .....
- 2.12.....
- .....
- .....
- .....
- 2.13.....
- .....
- 2.14.....
- .....
- 2.15.....
- .....
- .....
- 2.16.....
- .....
- 2.17.....
- .....
- 3**
- 3.1 .....
- .....
- .....
- .....
- 3.2 .....
- .....
- .....
- .....

- 3.3 .....  
.....  
.....
- 3.4 .....  
.....  
.....
- 3.5 .....
- 3.6 .....  
.....  
.....  
.....
- 3.7 .....  
.....
- 3.8 .....  
.....
- 3.9 .....
- 3.10.....  
.....
- 3.11.....  
.....
- 3.12.....
- 3.13.....  
.....  
.....
- 3.14.....  
.....  
.....
- 3.15.....  
.....
- 4**
- 4.1 .....  
.....  
.....
- 4.2 .....  
.....

- 4.3 .....
- 4.4 .....
- 4.5 .....
- 4.6 .....
- 4.7 .....
- 4.8 .....
- 4.9 .....
- 4.10.....
- 4.11.....
- 4.12.....
- 5**
- 5.1 .....
- 5.2 .....
- 5.3 .....

5.4	.....
5.5	.....
5.6	.....
	.....
5.7	.....
5.8	.....
	.....
	.....
5.9	.....
5.10	.....
5.11	.....
5.12	.....
5.13	.....
5.14	.....
	.....
5.15	.....
5.16	.....
5.17	.....
	.....
	.....
5.18	.....
5.19	.....
5.20	.....
	.....
5.21	.....
5.22	.....
5.23	.....
	.....
	.....
5.24	.....
	.....
5.25	.....
	.....
	.....
	.....
5.26	.....
	.....

**6**

- 6.1 .....  
.....  
.....
- 6.2 .....  
.....  
.....
- 6.3 .....  
.....  
.....  
.....
- 6.4 .....  
.....
- 6.5 .....
- 6.6 .....  
.....  
.....
- 6.7 .....  
.....
- 6.8 .....  
.....
- 6.9 .....  
.....
- 6.10.....
- 6.11.....
- 6.12.....  
.....
- 6.13.....
- 6.14.....  
.....
- 6.15.....
- 6.16.....
- 6.17.....  
.....
- 6.18.....
- 6.19.....  
.....

6.20.....	
.....	
<b>7</b>	
7.1 .....	
.....	
.....	
7.2 .....	
.....	
7.3 .....	
.....	
7.4 .....	
.....	
7.5 .....	
.....	
7.6 .....	
7.7 .....	
.....	
7.8 .....	
7.9 .....	
7.10.....	
7.11.....	
7.12.....	
.....	
7.13.....	
7.14.....	
.....	
7.15.....	
7.16.....	
7.17.....	
.....	
.....	
7.18.....	
7.19.....	
.....	
7.20.....	