

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ - NETWORK MANAGEMENT

Αρχιτεκτονική & Δρομολόγηση στο Internet

Internet Architecture & Routing

Διευθυνσιοδότηση στο Internet

Εκπαιδευτικά & Ερευνητικά Δίκτυα

Ακαδημαϊκά & Εμπορικά Δίκτυα - Academic & Commercial Networks

Tier 1, Tier 2 Internet Service Providers (ISP), Internet eXchange Points (IXP)

Δρομολόγηση Επιπέδου Δικτύου - Network Level Routing (IP)

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης IP: Intra-AS & Border Gateway Protocols (BGP)

Β. Μάγκλαρης

maglaris@netmode.ntua.gr

www.netmode.ntua.gr

Νέα Κτίρια ΣΗΜΜΥ - Αίθουσα 013

6/10/2025

ΔΙΕΥΘΥΝΣΙΟΔΟΤΗΣΗ ΣΤΟ INTERNET (1)

- Το Internet αποτελεί ένα μεγάλο σύνολο από διασυνδεδεμένα ανεξάρτητα δίκτυα μέσω απλών μεταγωγέων πακέτου - ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΩΝ (**switches, routers**)
- Ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε πόρους σε οποιοδήποτε από αυτά τα δίκτυα
- Τα **IP datagrams** διασχίζουν πλήθος δικτύων για να φτάσουν στο δίκτυο προορισμό με διαφανή τρόπο για το χρήστη
- Δρομολόγηση:
 - Εντός Αυτόνομης Διαχειριστικής Οντότητας (π.χ. ISP): **Interior Gateway Protocols**, IGP π.χ. OSPF, IS-IS
 - Μεταξύ Διαχειριστικών Οντοτήτων: **Exterior Gateway Protocols**, EGP
→ **Border Gateway Protocol**, BGP

ΔΙΕΥΘΥΝΣΙΟΔΟΤΗΣΗ ΣΤΟ INTERNET (2)

- Το μόνο που πρέπει να γνωρίζει ο τελικός χρήστης είναι η διεύθυνση IP του προορισμού (λογική διεύθυνση) ή το όνομα αν υπάρχει αντιστοίχιση μέσω DNS (Domain Name System)
- **IPv4 Address:** 147.102.13.10 (**32 bits** – 2^{32} διευθύνσεις $\approx$ 4 billion)
- **IPv6 Address:** 2001:648:2000:d::a (**128 bits**)
- Η IP Address περιέχει πληροφορίες όπως:
 - 147.102.0.0/16, 2001:648:2000::/48 (δίκτυο)
 - 147.102.13.0/24, 2001:648:2000:d::/64 (υποδίκτυο)
 - 147.102.13.10/32, 2001:648:2000:d::a (μεμονωμένο interface δρομολογητή ή σταθμού εργασίας)

ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΓΝΩΣΤΑ IP & ΑΥΤΟΝΟΜΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ (επανάληψη)

Announced Networks, Autonomous Systems, Border Gateway Protocol - BGP

- **2/2025:** Το Internet σήμερα, <https://www.statista.com/statistics/617136/digital-population-worldwide/>
 - Πάνω από **5,56 billion** τελικοί χρήστες (συνδέσεις) σε συνολικό πληθυσμό ~**8,19 billion**, διείσδυση **67,9%**
 - Πάνω στα **1.200.000** ανακοινώσιμα δίκτυα – γνωστοί προορισμοί (announced public IPv4 & IPv6 networks via **BGP announcements**)
 - Ιεραρχικά ταξινομημένα σε Αυτόνομες Διαχειριστικές Περιοχές **AS's** (Autonomous Systems) με μοναδικό αριθμό **ASN** (Autonomous System Number, 16 bits → 32 bits)
- Καταχώρηση **IP** & **ASN** σε blocks των 1024 AS's με συντονισμό από **ICANN** (Internet Corporation for Assigned Names & Numbers) - **IANA** (Internet Assigned Number Authority) μέσω 5 περιφερειακών **RIR's** (Regional Internet Registries):
(1) **AFRINIC** (African Network Information Center), (2) **APNIC** (Asia Pacific Network Information Centre), (3) **ARIN** (American Registry for Internet Numbers), (4) **RIPE NCC** (Réseaux IP Européens Network Coordination Centre), (5) **LACNIC** (Latin America and Caribbean Network Information Centre)

26/9/2025: Σύνολο καταχωρημένων

AS's από **IANA** στα **RIRs**: **133.118**

<https://www.potaroo.net/tools/asn32/>

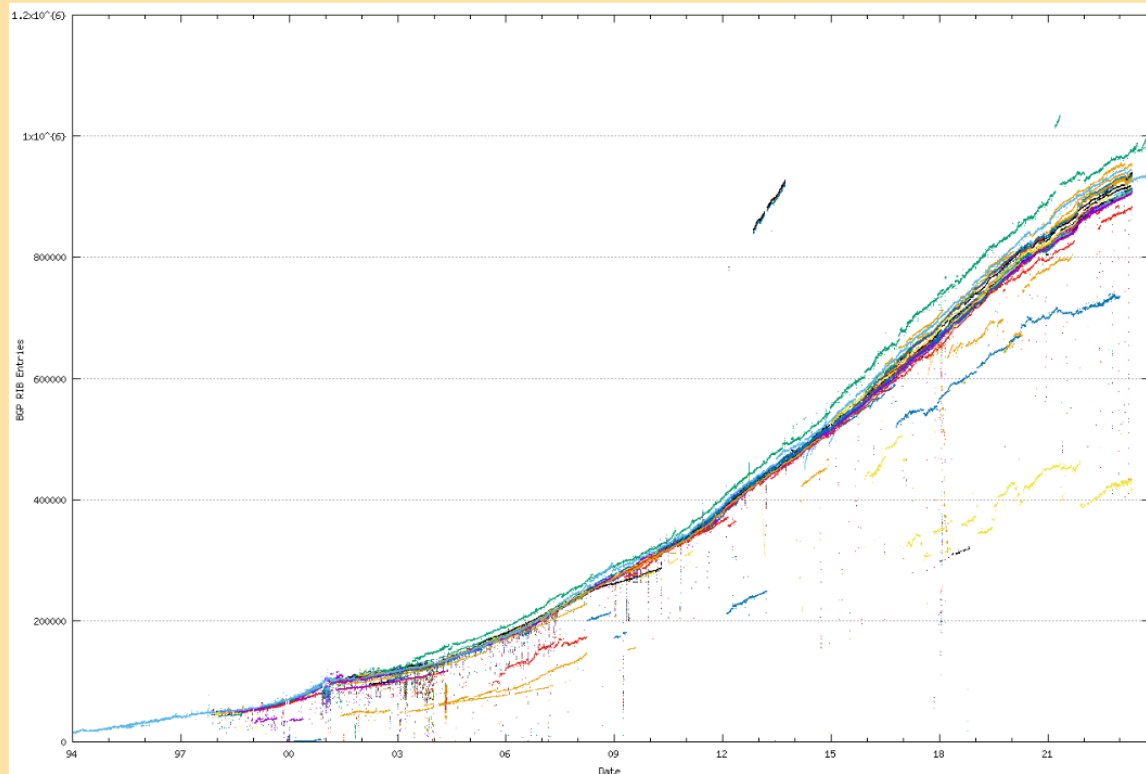
Status	AS Pool	16-bit	32-bit
IETF Reserved	0	0	0
IANA Unallocated Pool	4294834178	0	4294834178
Allocated	133118	0	133118
RIR Data			
AFRINIC	3326	0	3326
APNIC	33415	0	33415
ARIN	34640	0	34640
RIPE NCC	45610	0	45610
LACNIC	16127	0	16127

BGP TABLES: ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΝΩΣΤΩΝ (PUBLIC) ΔΙΚΤΥΩΝ - ΠΡΟΟΡΙΣΜΩΝ

<http://bgp.potaroo.net/>

(επανάληψη)

Growth of the BGP Table - 1994 to Present



BGP Table Data

Report last updated at Fri, 26 Sep 2025 12:08:18 GMT

IPv4 BGP Reports

AS131072 APNIC R&D 1030565

AS6447 Route-Views.Oregon-ix.net 1054218

IPv4 Route-Views

IPv6 BGP Reports

AS131072 APNIC R&D 236915

AS6447 Route-Views.Oregon-ix.net 227673

Πίνακες βασισμένοι σε καθημερινές μετρήσεις από διαφορετικά σημεία παρακολούθησης (monitoring probes)

ΠΛΗΘΟΣ ΑΡΙΘΜΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ASN/RIR: Autonomous System Numbers ανά Regional Internet Registry & Συνολικά από ICAAN - IANA

<http://bgp.potaroo.net/>

(επανάληψη)

Χρονική Εξέλιξη Κατανομής ASN ανά RIR
(Regional Internet Registry)

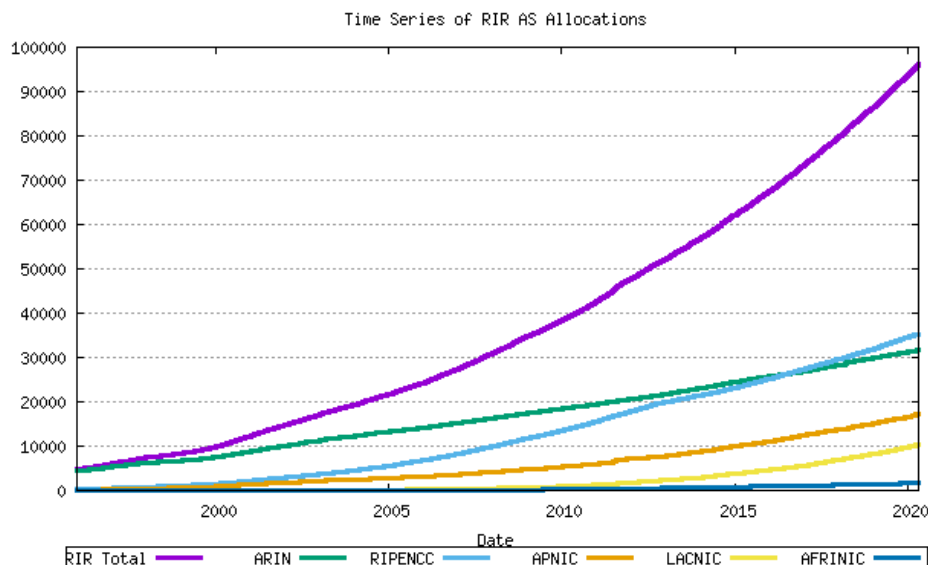


Figure 5 - Cumulative RIR AS assignments per RIR

Χρονική Εξέλιξη Συνολικού Αριθμού Διαφημιζόμενων AS's μέσω BGP & Συνολικού Αριθμού μη Διαφημιζόμενων AS's

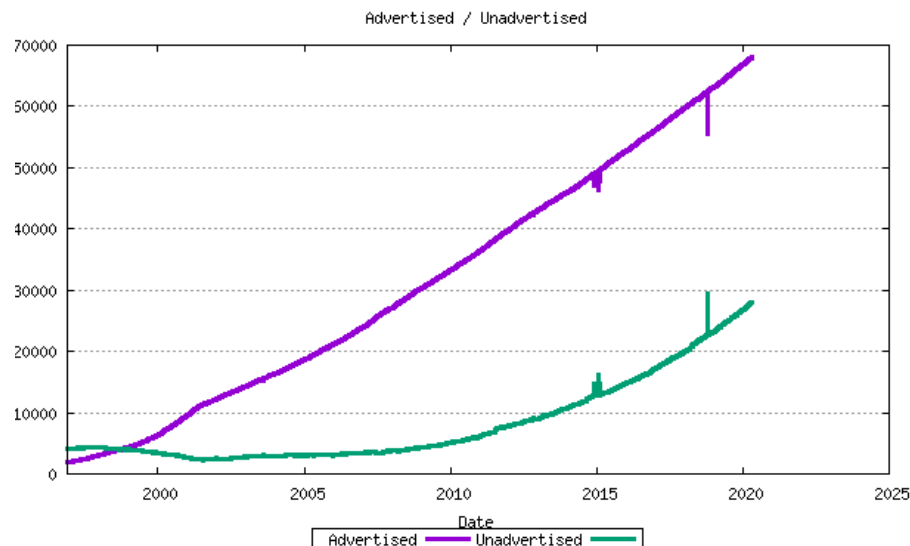
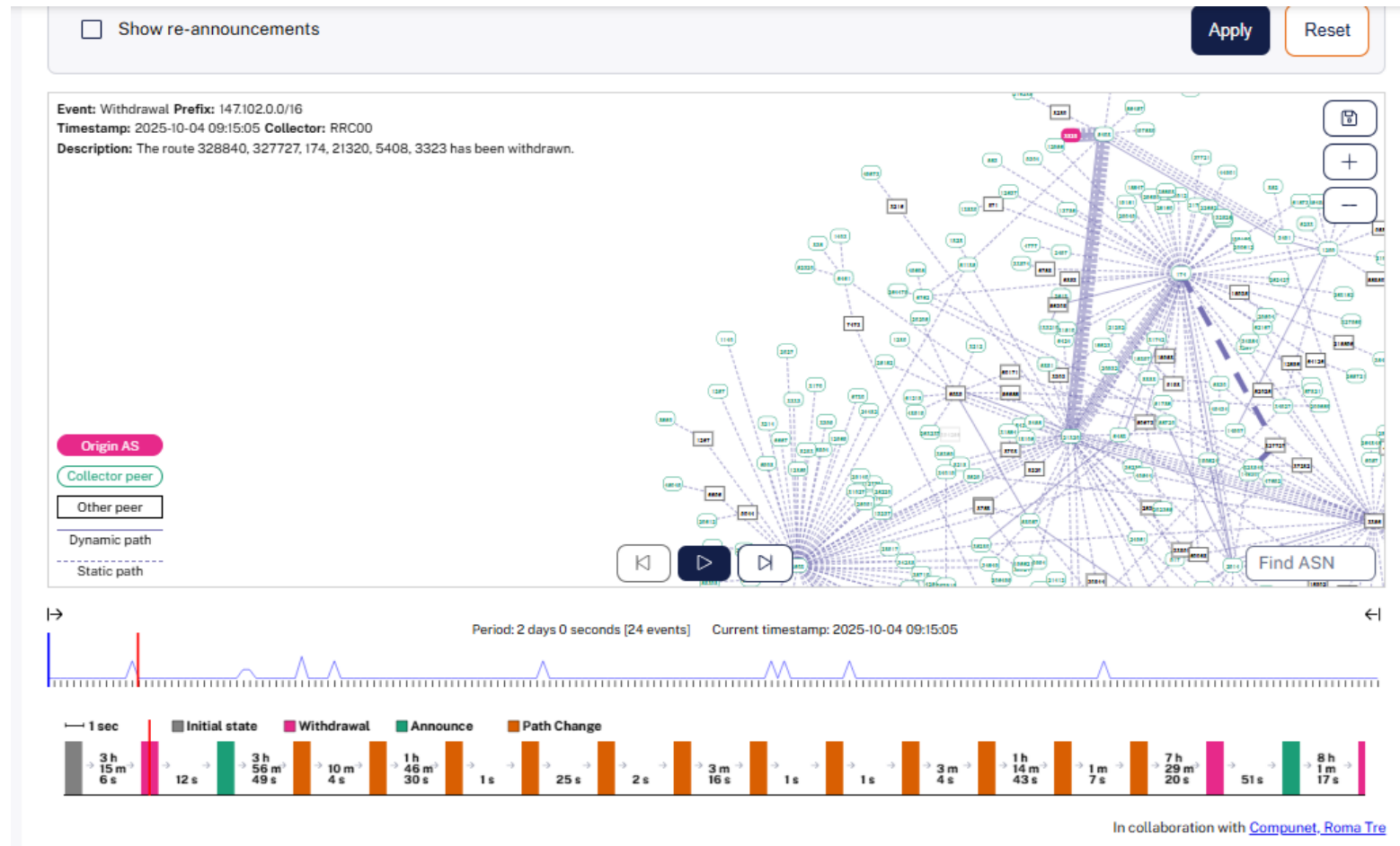


Figure 8 - Advertised / Unadvertised AS Count

ΠΑΡΟΧΗ INTERNET ΣΤΟ Ε.Μ.Π. (NTUA - ASN 3323)

<https://stat.ripe.net/special/bgplay> (6/10/2025)



ASN's

NTUA (3323)

GRNET (5408)

GÉANT (21320)

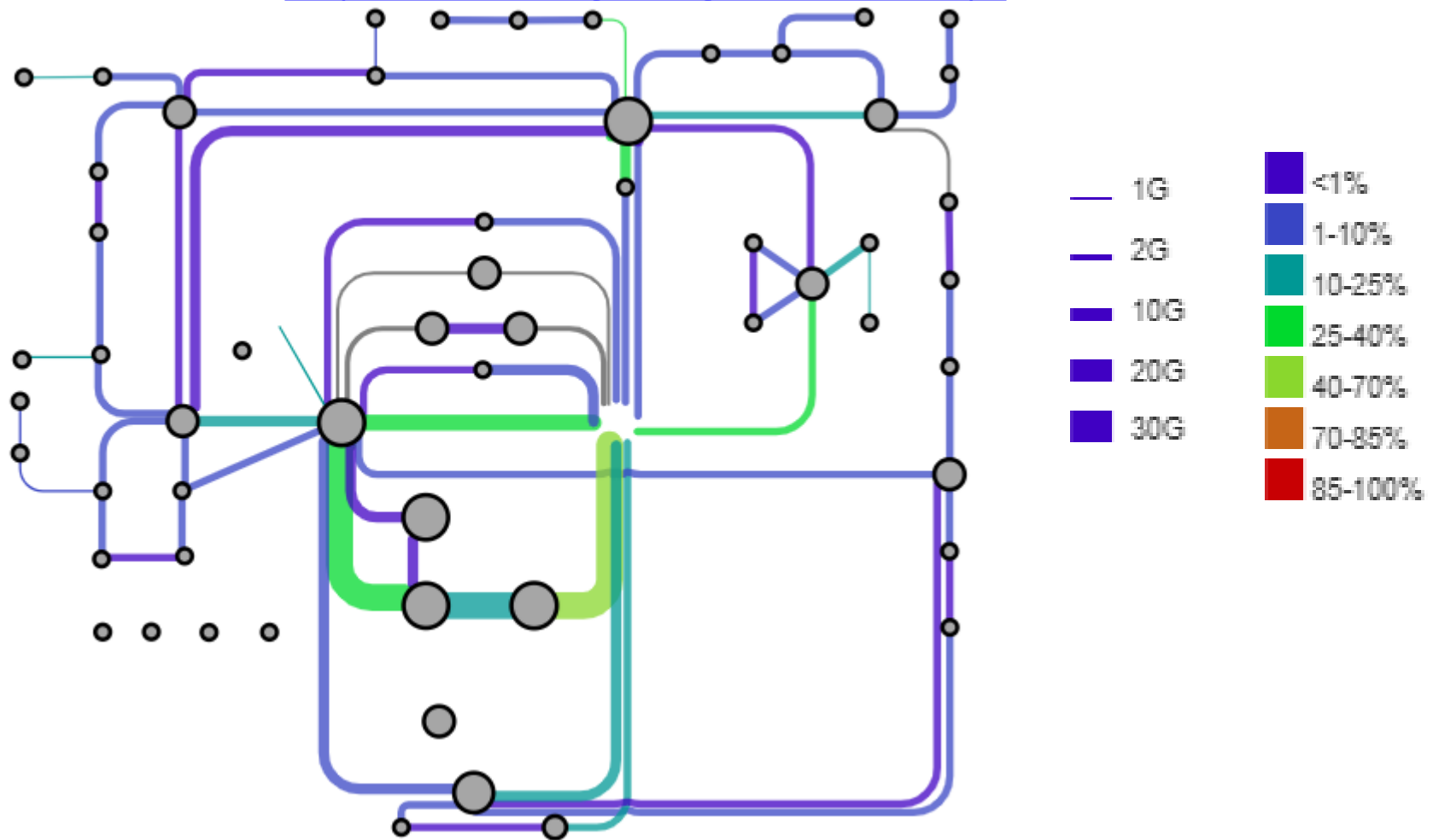
GÉANT Internet Feeds

- **LEVEL3 (3356)**
- **COGENT 174 (174)**
- **NORDUnet (2603)**

ΕΔΥΤΕ - GRNET: ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ/ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

IP Overlay (2/10/2025)

<https://netmon.grnet.gr/networkmap/>

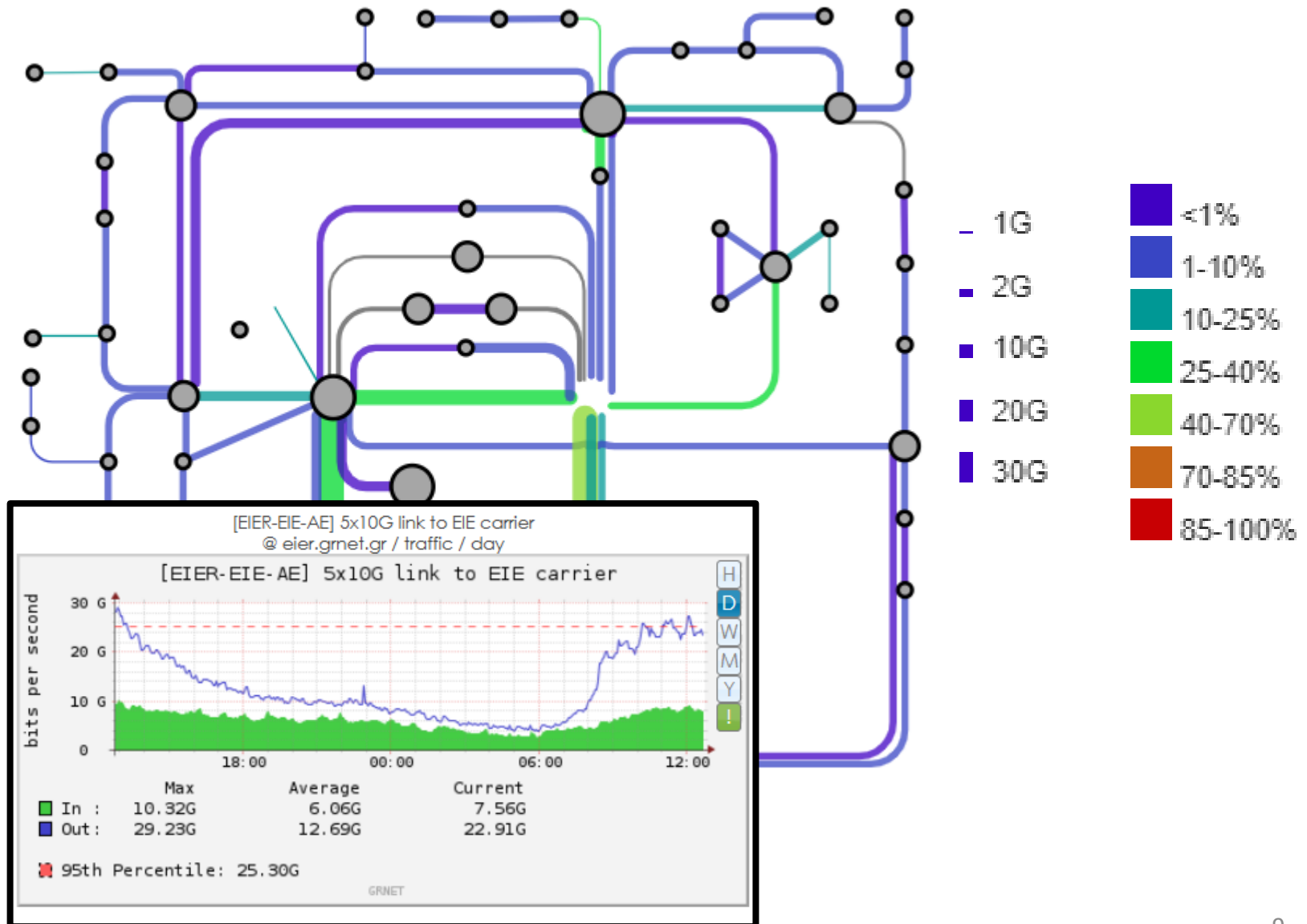


Σχήματα διαθέσιμα από το
Κέντρο Διαχείρισης Δικτύων - ΚΕΔ του GRNET
(GRNET Network Operations Center - NOC)

ΕΔΥΤΕ - GRNET: ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ/ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

IP Overlay (2/10/2025)

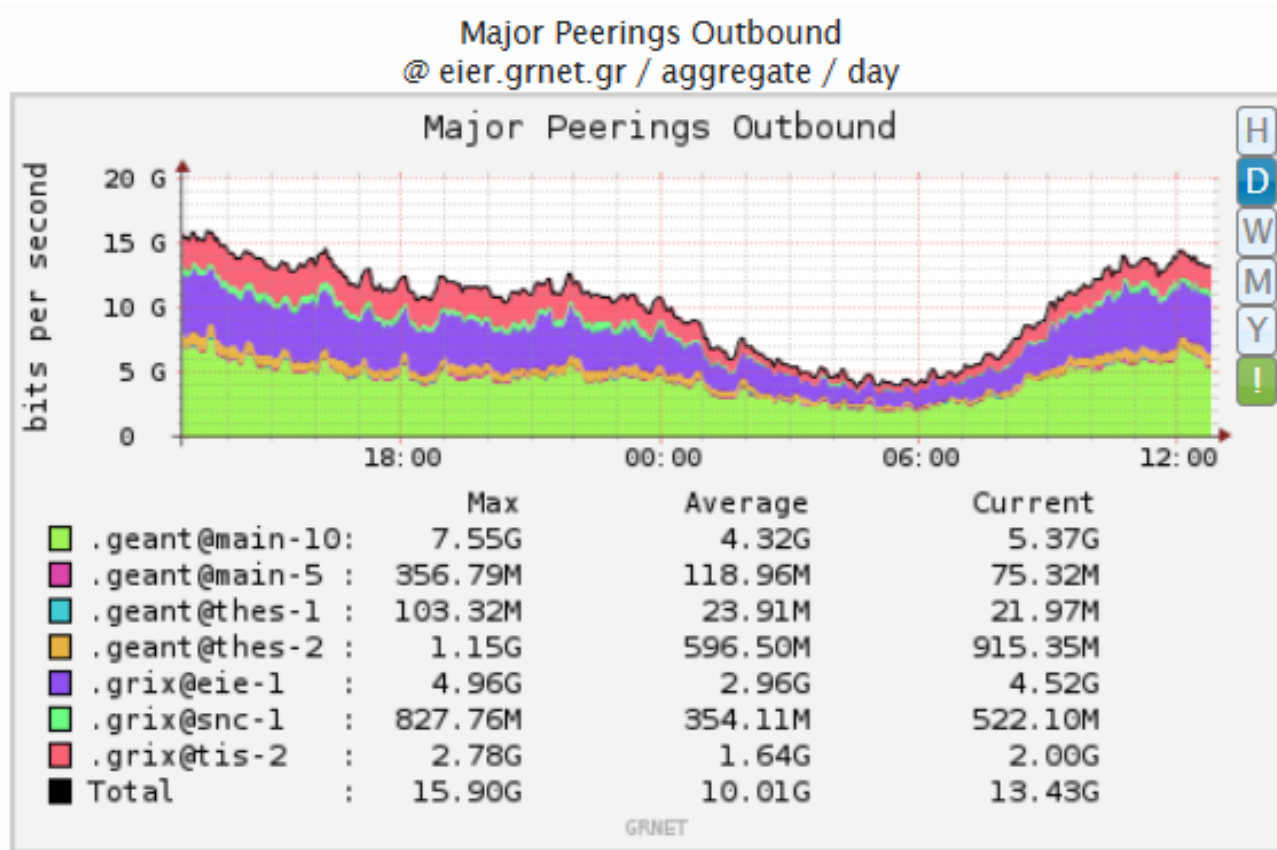
<https://netmon.grnet.gr/networkmap/>



Κίνηση Κεντρικού Κόμβου ΕΙΕ σε Πραγματικό Χρόνο (MRTG)

ΕΔΥΤΕ - GRNET: IP Peering Traffic MRTG (3/10/2025)

<https://mon.grnet.gr/rg/>

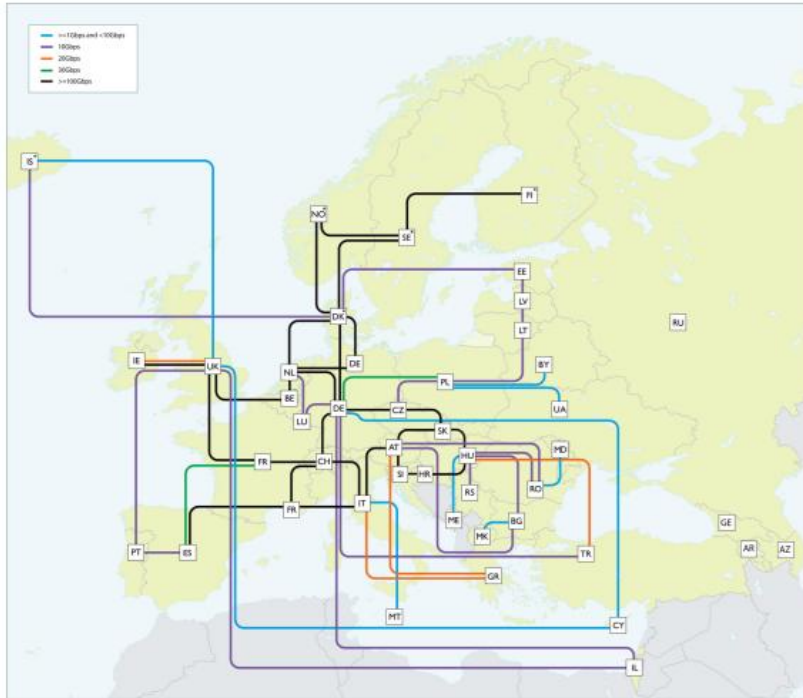


Γράφημα MRTG συνολικής εξερχόμενης κίνησης 3-10-2025

Κέντρο Διαχείρισης Δικτύων - ΚΕΔ του GRNET
(GRNET Network Operations Center - NOC)

The Pan-European Research and Education Network

GEANT interconnects Europe's National Research and Education Networks (NRENs). Together we connect over 50 million users at 10,000 institutions across Europe.



ΔΙΑΣΥΝΔΕΕΙ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ

10-100 Gbps:

40 Εθνικά Δίκτυα Έρευνας & Εκπαίδευσης (National Research & Education Networks – NRENs)

ΤΕΛΙΚΟΙ ΧΡΗΣΤΕΣ:

10.000 ++ Ιδρύματα

Ερευνητικές υποδομές παγκόσμιας εμβέλειας (CERN/HEP, ITER, ESFRI...)

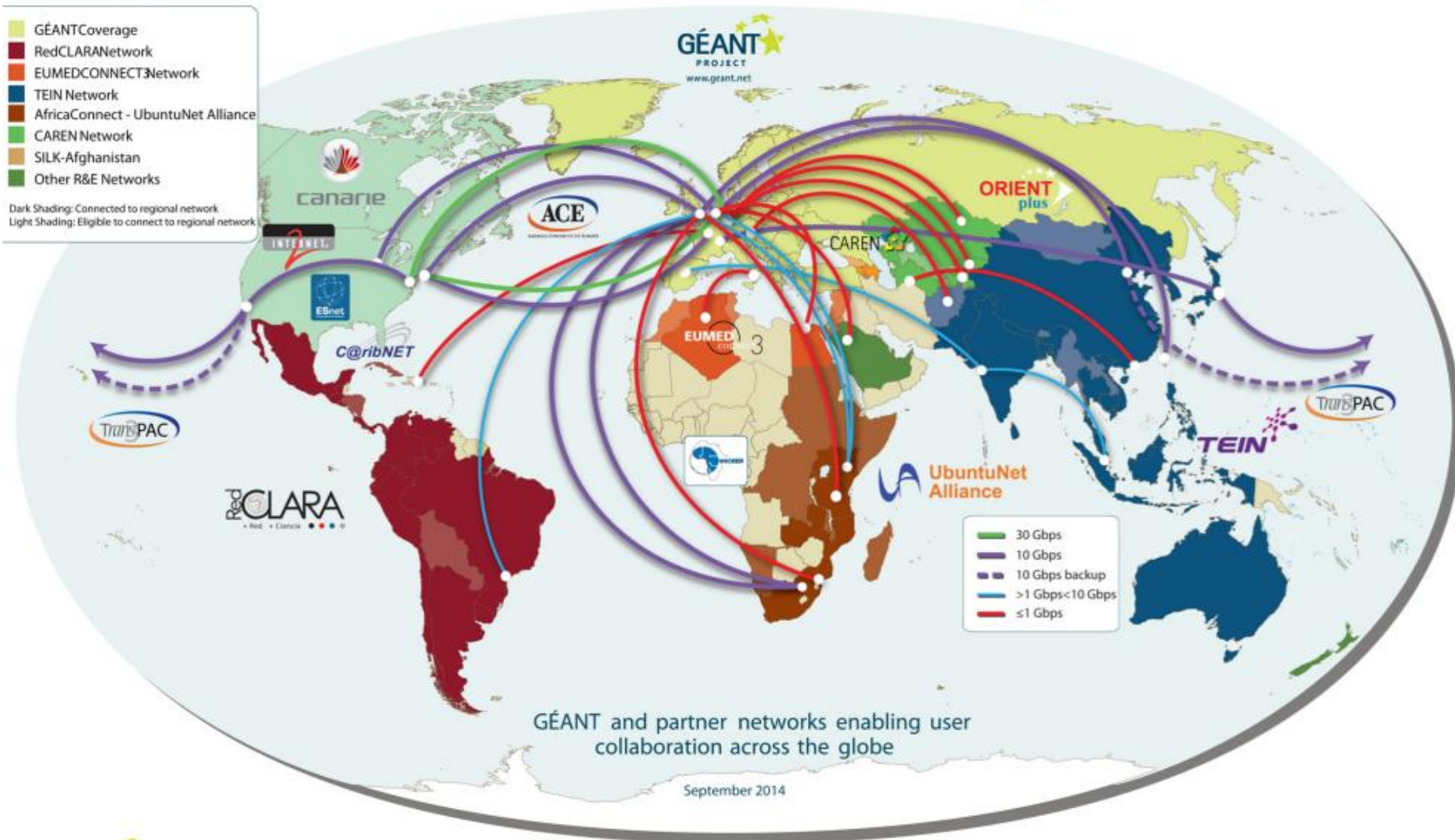
50 εκ. ++ φοιτητές, μαθητές, εκπαιδευτικό προσωπικό, ερευνητές



ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΣ ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΓÉΑΝΤ (8/2017)



At the Heart of Global Research and Education Networking



www.geant.net

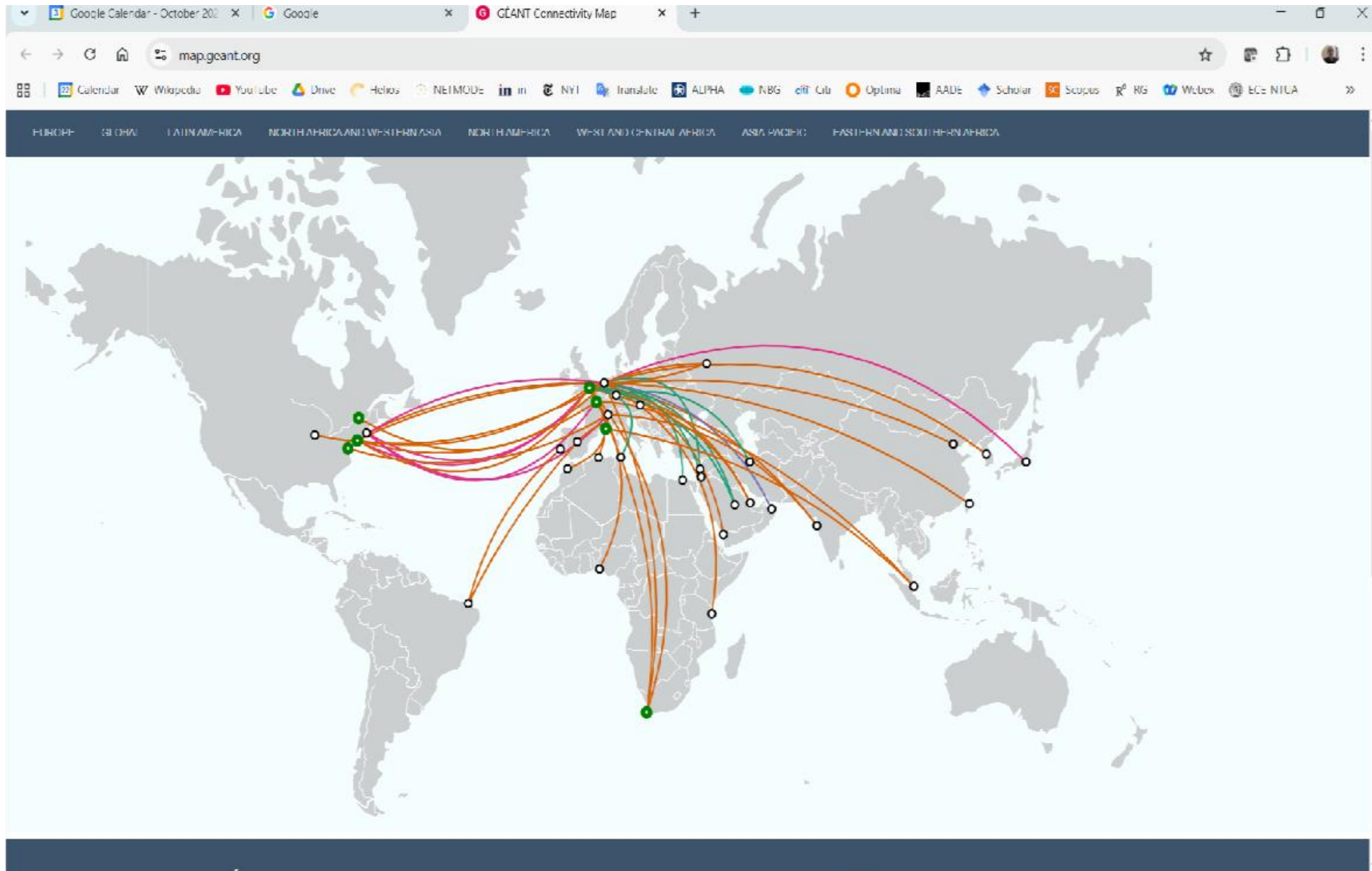
connect • communicate • collaborate

GÉANT is co-funded by the European Union within its 7th R&D Framework Programme.



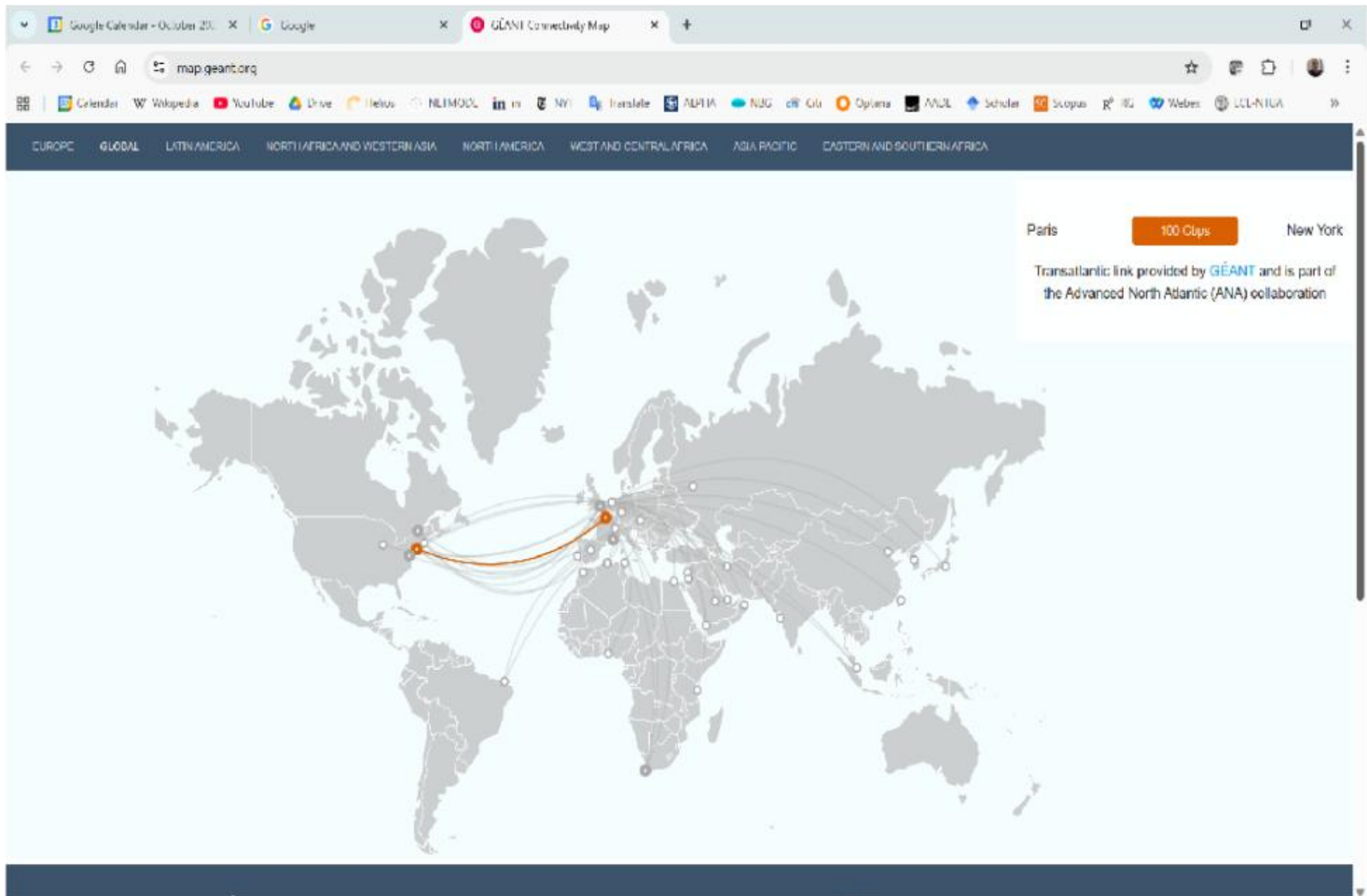
ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΓΕΑΝΤ (3/10/2025)

<https://map.geant.org/>



ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ GÉANT (3/10/2025)

<https://map.geant.org/>

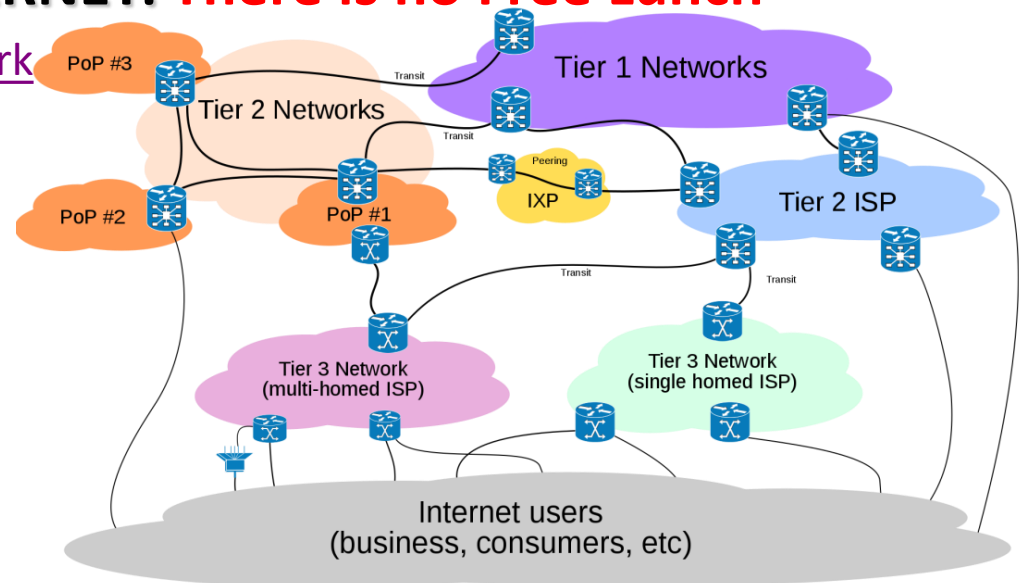


TO «ΕΜΠΟΡΙΚΟ» INTERNET: There is no Free Lunch

http://en.wikipedia.org/wiki/Tier_1_network

Οι 14 **Tier 1** ISP's με πρόσβαση και στα 1.200.000 δίκτυα - γνωστούς προορισμούς (IPv4 & IPv6 prefixes)

Name	Headquarters	AS number
AT&T ^[17]	United States	7018
Deutsche Telekom Global Carrier ^[19]	Germany	3320
GTT Communications	United States	3257
Liberty Global ^{[23][24]}	Netherlands ^[25]	6830
Lumen Technologies (formerly CenturyLink, formerly Level 3) ^{[27][28][29]}	United States	3356
NTT Communications (formerly Verio) ^[32]	Japan	2914
Orange ^[33]	France	5511
PG&W Global	Hong Kong	3491
Tata Communications (prev. VSNL prev. Teleglobe) ^[35]	India	6453
Telecom Italia Sparkle (Seabone) ^[37]	Italy	6762
Arellon (formerly Tella Carrier) ^[38]	Sweden	1299
Telxius (Subsidiary of Telefónica) ^[40]	Spain	12956
Verizon Enterprise Solutions (formerly UUNET) ^[46]	United States	701
Zayo Group (formerly AboveNet) ^[48]	United States	6461



Tier 2 ISP's με ελαφρά μειωμένη πρόσβαση

Name	Headquarters	AS Number
China Telecom	China	4134/4809
Singtel ^[62]	Singapore	7473
Cogent Communications (formerly PSINet) ^[63]	United States	174
Hurricane Electric ^[66]	United States	6939
RETN ^[69]	United Kingdom	9002
Vodafone Carrier Services (formerly Cable & Wireless) ^[60]	United Kingdom	1273
Verizon Enterprise Solutions (formerly XO Communications) ^{[62][63]}	United States	2828
Telstra ^[64]	Australia	4637
Comcast ^[65]	United States	7922

TO ATHENS INTERNET EXCHANGE (AIX)

Πρωτοβουλία του Ε.Μ.Π. & του GRNET, 1996

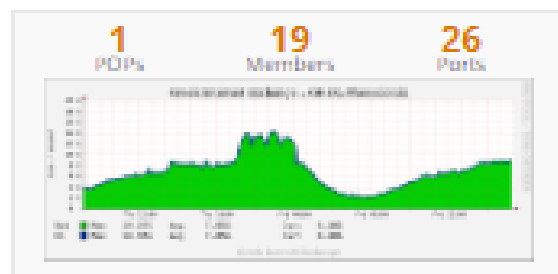
ΜΕΛΗ: **Tier 2** ISP's της Ελλάδας & ΕΔΕΤ για Εθνικό Peering

- GRNET (ΕΔΕΤ)
- Forthnet
- Hellas On Line
- Altec Telecoms
- NetOne
- Vivodi
- Verizon Hellas
- ON Telecoms
- OTENET
- AT&T Global Network Services Hellas
- ORANGE BUSINESS SERVICES
- Vodafone NET
- WIND
- Tellas
- Lannet

Το BGP δεν ανακοίνωνε Εθνικούς Προορισμούς συνδρομητών εκτός Ελλάδος μέσω AIX, μόνο από Tier 1 – Tier 2 feeds των παρόχων τους (πιθανή συνεργασία μόνο σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης)

<https://www.gr-ix.gr/members/>

1 σημείο στέγασης (Point-of-Presence, PoP)



Greek Internet Exchange :: Greek Internet Exchange

Y-axis: Gbit / second (0 to 900)

X-axis: Week 26, Week 27, Week 28, Week 29, Week 40

Legend:

- Out Peak 851.84G
- In Peak 851.13G
- Out Avg 455.45G
- In Avg 455.42G
- Cur: 423.71G
- Cur: 423.73G

Greek Internet Exchange

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

- **Διαχειριστικός Έλεγχος**

- Συγκεντρωτικός: Δημόσια Δίκτυα Μεταγωγής Πακέτου **X.25/X.75**
- Κατανεμημένος: **Internet**
 - Interior Gateway Protocols - **IGP**
 - Exterior (Border) Gateway Protocols - **EGP/BGP**

- **Δρομολόγηση με ή χωρίς Εναλλακτικούς Δρόμους**

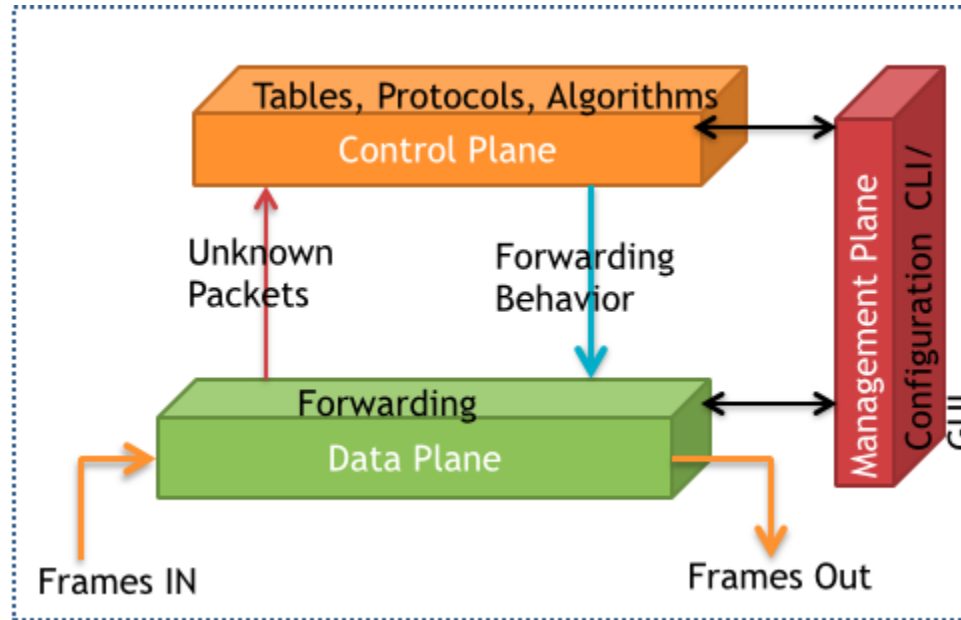
- Single choice:
 - Δρομολόγηση Επιπέδου 3 στο **Internet**: **Host Routing**, **IGP** (OSPF, IS-IS), **BGP**
 - Δρομολόγηση Επιπέδου 2: **Bridged Ethernet LANs**
- Alternate routing:
 - Δρομολόγηση Επιπέδου 3 στο Internet: **IGP ECMP** (Equal-Cost Multi-Path)
 - Δρομολόγηση Επιπέδου 2 ½: **MPLS/TE** (Multi-Protocol Label Switching / Traffic Engineering)
 - Τηλεφωνικά Δίκτυα **PSTN** (Public Switched Telephone Networks)

- **Διαχειριστική Δυναμική**

- Στατική δρομολόγηση:
 - **Host Routing** στο Internet - Default Gateway
 - Υπολογισμός εναλλακτικών δρόμων με σταθερά βάρη γραμμών (**X.25/X.75**)
- Δυναμική δρομολόγηση:
 - Μεταβαλλόμενα βάρη γραμμών (**ARPANet**)
 - Μεταβολές ανάλογα με διαθεσιμότητα γραμμών (**Internet IGP, BGP**)

ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ

(επανάληψη)



<https://thenewstack.io/defining-software-defined-networking-part-1/>

Data Plane: Μετάδοση - Προώθηση Δεδομένων σε Πλαίσια/Frames ή Πακέτα

Control Plane: Έλεγχος - Σηματοδότηση Ροής Πακέτων Δεδομένων

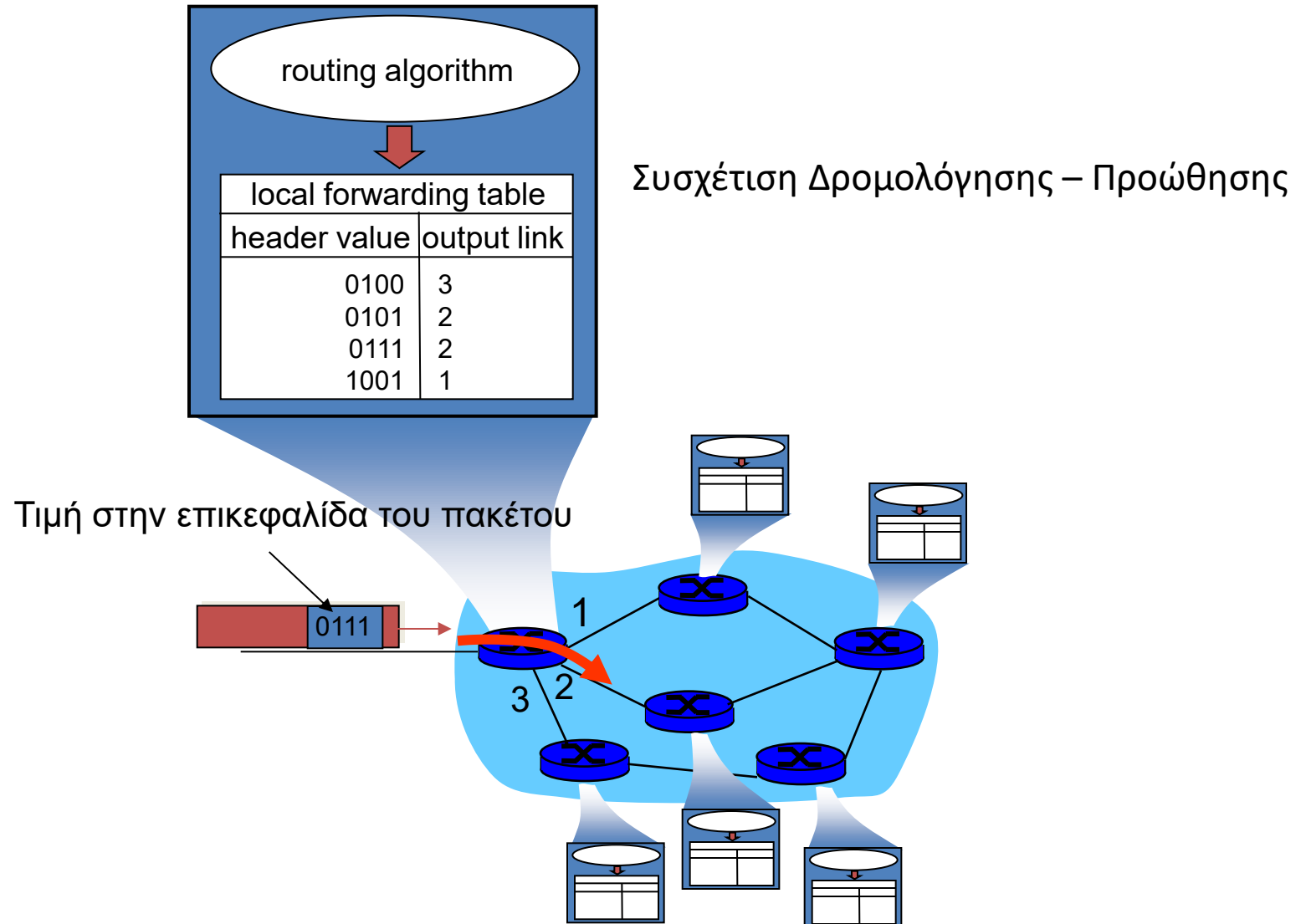
Management Plane: Διαχειριστικές Λειτουργίες Δικτύου

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟ INTERNET

- **Πρωώθηση (forwarding):** Μετακίνηση πακέτων από την είσοδο δρομολογητή σε κατάλληλη έξοδο (**λειτουργία data plane**)
- **Δρομολόγηση (routing):** καθορισμός διαδρομής πακέτων από πηγή προς προορισμό, *routing algorithms* (**λειτουργία control plane**)

Σημείωση: Στις επόμενες διαφάνειες χρησιμοποιήθηκε υλικό υποστήριξης του βιβλίου των Kurose & Ross “**Computer Networking: A Top-Down Approach,**” Pearson Publisher, 6th Edition.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟ INTERNET



ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Layer 3 Intra-AS Routing

- **Intra-AS Routing, Interior Gateway Protocols (IGP):** Μια έξοδος προς επόμενο Interface για κάθε υποδίκτυο (subnet) τελικό προορισμό εντός ενός AS
 - **RIP** (Routing Internet Protocol): Πρωτόκολλο παλαιάς γενιάς, βασισμένο σε αλγόριθμους **distance vector** (**Bellman Ford**)
 - **OSPF** (Open Shortest Path First): Το πιο διαδομένο σήμερα, βασισμένο σε αλγόριθμους **link state** (**Dijkstra**). Για λόγους κλιμάκωσης, μπορεί να υλοποιηθεί ιεραρχικά γύρω από την περιοχή κορμού (**backbone area 0** ή 0.0.0.0) και με συνδεόμενες περιφερειακές περιοχές (**stub areas**). Για δρομολόγηση πακέτων IPv4, ισχύει η OSPF Version 2: RFC 2328, 1998
 - **IS-IS**
 - Δυνατότητα πολλαπλών εναλλακτικών δρόμων ίσου κόστους (ECMP): Direct routing μεταξύ γειτονικών δρομολογητών με παράλληλες συνδέσεις και επιλογή εξόδου με proprietary αλγορίθμους (π.χ. Per-Packet Round-Robin, Per-Flow Load Balancing, Per Source -Destination Traffic Engineering...) Για αυτοματισμό του OSPF απαιτείται τροποποίηση του αλγορίθμου **Dijkstra για k-Shortest paths**

Layer 3 Inter-AS Routing

- **Border Gateway Protocol (BGP)**: Εναλλακτικές διαδρομές με βάρη προς όλα τα γνωστά δίκτυα (περίπου **1.200.000** σήμερα) μεταξύ ακραίων δρομολογητών (**border gateways**) Autonomous Systems – **AS's** (περίπου **134.000** σήμερα)
 - Οι πίνακες **BGP** φυλάσσονται στην ηλεκτρονική μνήμη των **border gateways** και ανανεώνονται δυναμικά όποτε υπάρχουν αλλαγές στο Internet με ευθύνη των γειτονικών δρομολογητών (**border gateways**) που ανακοινώνουν τα δίκτυα των αυτονόμων κοινοτήτων (**AS's**) που γνωρίζουν (**advertising**) με πακέτα ελέγχου
 - Η διαδρομή καταγράφεται στον **BGP Table** των ακραίων δρομολογητών (border gateways) ενός **AS** ανά prefix (υποδίκτυο προορισμού) και την σειρά των **AS's** της προτεινόμενης διαδρομής (μαζί με το βάρος της)
 - Ο υπολογισμός των «βέλτιστων» **Inter-AS** δρόμων γίνεται καταμελημένα, βασισμένος σε αλγόριθμους **distance vector (Bellman Ford)** με κόστη τα βάρη των συνδέσεων μεταξύ **border gateways**. Οι δρόμοι **Inter-AS** μπορεί να αλλάξουν στη πορεία ενός πακέτου προς τον τελικό του προορισμό
 - BGP (RFC 4271): **Control plane packets (signals)**, σε **TCP port 149**
 - **1^η προδιαγραφή του BGP: 1989**, 12th IETF Meeting, Austin, Texas

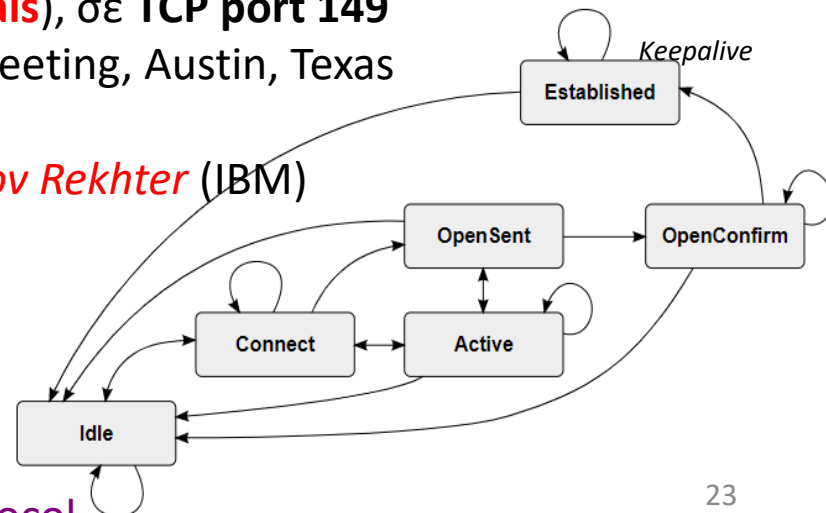
Two Napkin Protocol:

Leonard Bosack & Kirk Lougheed (Cisco), Yakov Rekhter (IBM)

Finite State Machine

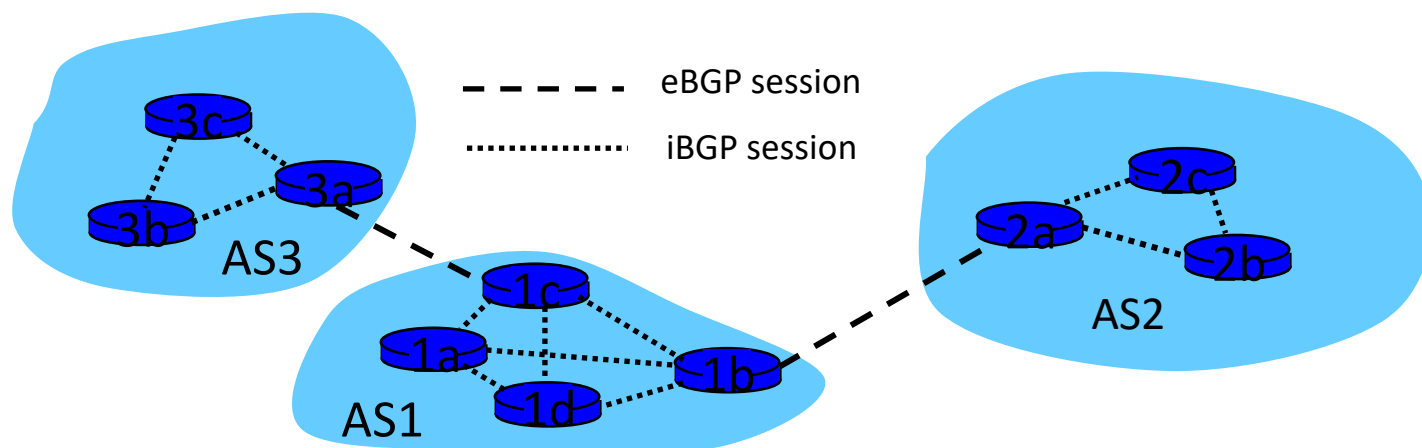
States: *Idle*, *Connect*, *Active*, *OpenSent*, *OpenConfirm*, *Established*

BGP packet types: *Open*, *Update*, *Notification* (error signal), *Keepalive* (default 60 sec)



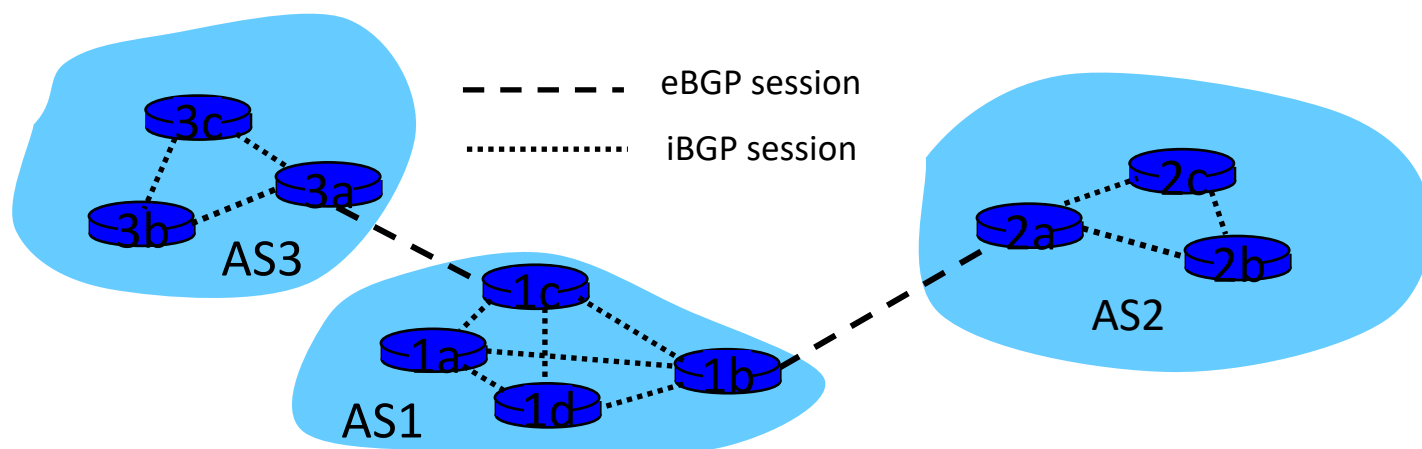
ΒΑΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ BGP

- Τα ζεύγη από συνοριακούς δρομολογητές (BGP peers) ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης (routing info) πάνω από ημι-σταθερές συνδέσεις TCP: **BGP sessions**
 - Οι BGP sessions δεν χρειάζεται να αντιστοιχίζονται σε φυσικές συνδέσεις links
- Όταν το AS2 ανακοινώνει ένα πρόθεμα (**prefix** υποδικτύου προορισμού) προς AS1:
 - Το AS2 **υπόσχεται** ότι θα προωθεί πακέτα με διεύθυνση προορισμού που να ανήκει στο δεδομένο prefix
 - Το AS2 μπορεί να συναθροίσει (**aggregate**) prefixes υποδικτύων στις ανακοινώσεις του



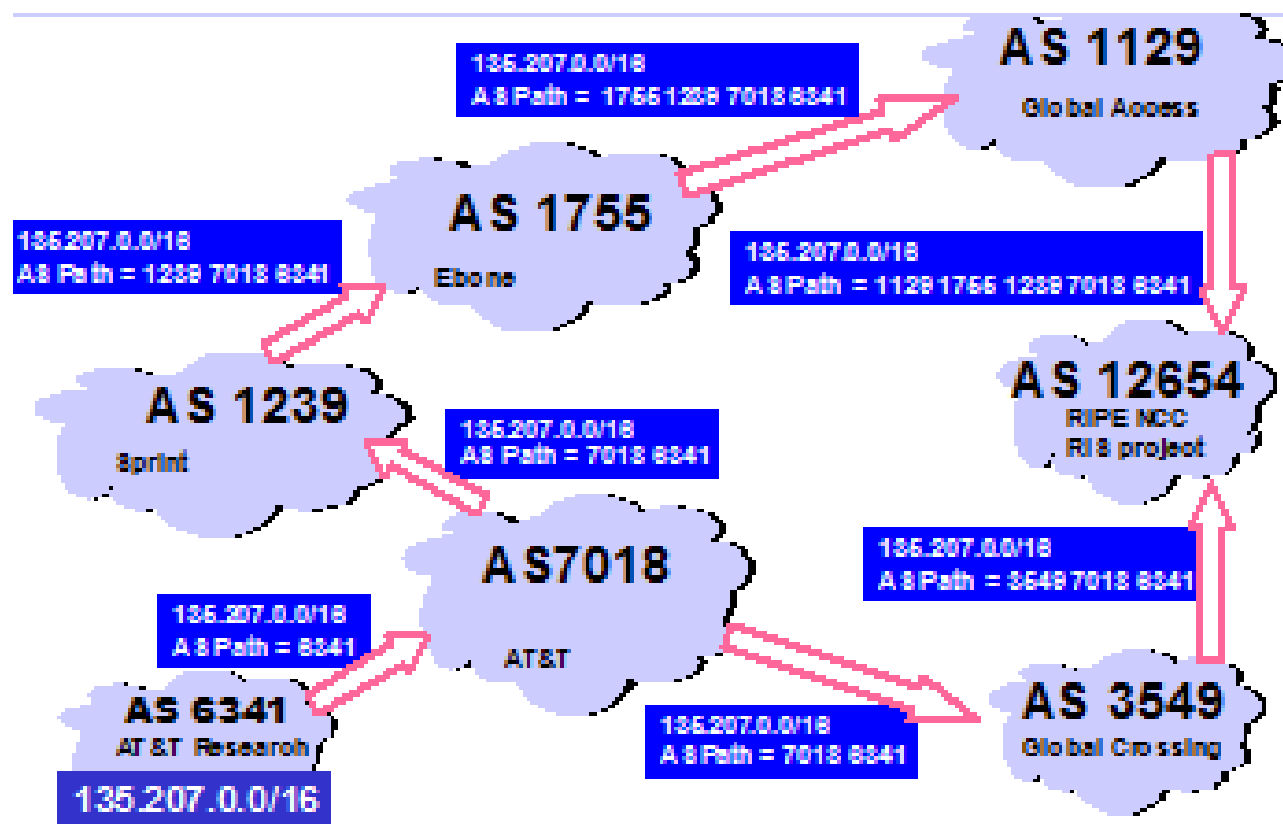
ΔΙΑΝΟΜΗ BGP REACHABILITY INFO

- Με χρήση σύνδεσης TCP, το πρωτόκολλο **eBGP** (*external BGP*) μεταξύ των border gateways 3a και 1c στέλνει **prefix reachability info** της AS3 στην AS1
 - 1c μπορεί να χρησιμοποιήσει **iBGP** (*internal BGP*) για διανομή νέων **prefix reachability info** σε όλους τους δρομολογητές κορμού της AS1
 - 1b μπορεί να ξανα-ανακοινώσει νέο **prefix reachability info** στο AS2 πάνω από σύνδεση eBGP μεταξύ 1b-to-2a
- Ένας δρομολογητής όταν μαθαίνει νέο **network prefix**, δημιουργεί routing entry στο πίνακα προώθησης (**forwarding table**)
- Οι δρομολογητές που μετέχουν στο iBGP μέσα σε μια AS πρέπει να είναι απ' ευθείας διασυνδεδεμένοι (**fully connected iBGP routers**)



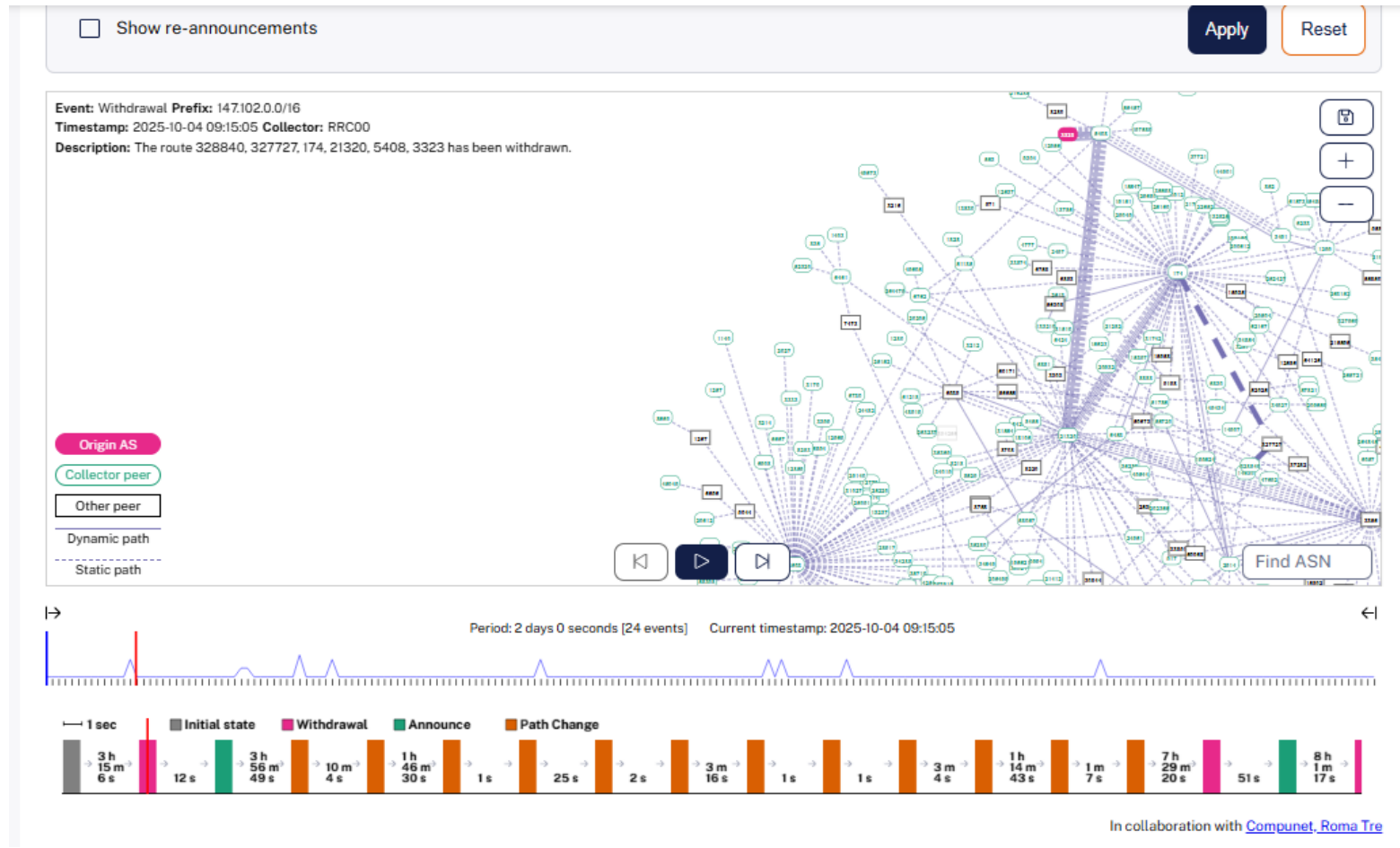
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ 135.207.0.0/16 ΜΕΣΩ BGP

(από παρουσίαση του *Timothy G. Griffin, AT&T Research, Paris 2002*)



ΠΑΡΟΧΗ INTERNET ΣΤΟ Ε.Μ.Π. (NTUA - ASN 3323)

<https://stat.ripe.net/special/bgplay> (6/10/2025)



ASN's

NTUA (3323)

GRNET (5408)

GÉANT (21320)

GÉANT Internet Feeds

- **LEVEL3 (3356)**
- **COGENT 174 (174)**
- **NORDUnet (2603)**

In collaboration with [CompuNet, Roma Tre](#)