Σύνθετα Δίκτυα

com+plex: with+ -fold (having parts)

Διδάσκων –
Δημήτριος Κατσαρός

Διάλεξη 15η

Ανοχή των σύνθετων δικτύων σε λάθη & επιθέσεις

Error & attack tolerance of complex networks

Δίκτυα με ανοχή σε σφάλματα

- Πολλά σύνθετα δίκτυα επιδεικνύουν εκπληκτικό βαθμό *ανοχής* σε *σφάλματα*
- Για παράδειγμα, σχετικά απλοί οργανισμοί αναπτύσσονται και αναπαράγονται παρά τις έντονες φαρμακευτικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις, μια ανοχή σε σφάλματα που αποδίδεται στην *ευρωστία του υποκείμενου μεταβολικού δικτύου*
- Σύνθετα επικοινωνιακά δίκτυα παρουσιάζουν επίσης εκπληκτικό βαθμό ευρωστίας: παρόλο που *σημαντικές συνιστώσες τους δυσλειτουργούν*, οι τοπικές αποτυχίες *σπάνια* οδηγούν σε απώλεια της συνολικής ικανότητας μεταφοράς πληροφορίας του δικτύου

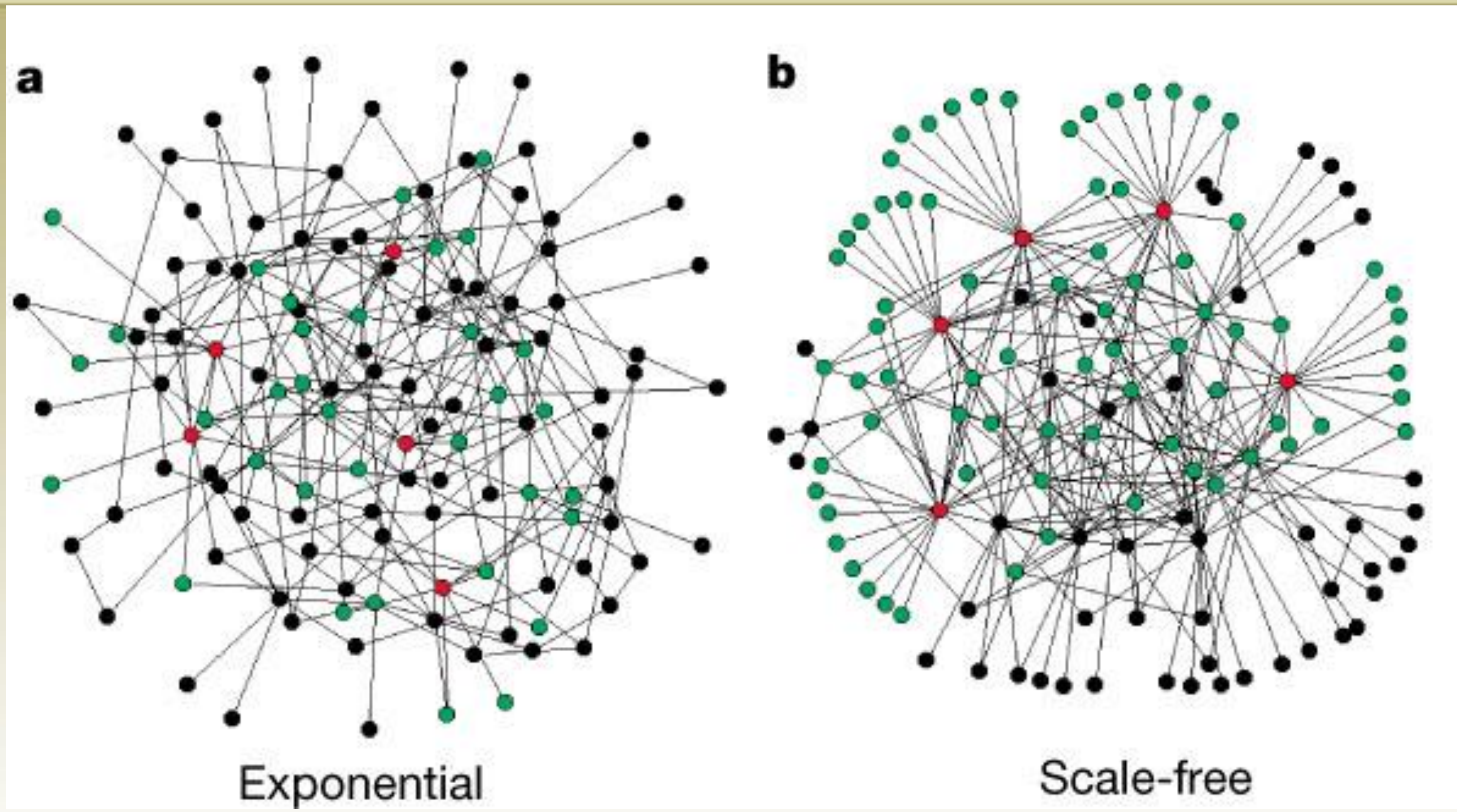
Όλα τα δίκτυα είναι ανεκτικά σε σφάλματα;

- Η σταθερότητα αυτών και άλλων σύνθετων συστημάτων συχνά αποδίδεται στην πλεονασματική “καλωδίωση” του λειτουργικού δικτύου που καθορίζεται από τις συνιστώσες του συστήματος
- Στη σειρά των διαλέξεων αυτών θα δείξουμε ότι η ανοχή σε σφάλματα δεν είναι κοινό γνώρισμα όλων των συστημάτων που έχουν χτιστεί με “πλεονασμό”: επιδεικνύεται μόνο από την ομάδα των ετερογενών “καλωδιωμένων” δικτύων, που λέγονται *δίκτυα άνευ κλίμακας* (scale-free networks), όπως είναι ο Παγκόσμιος Ιστός, το Διαδίκτυο, τα κοινωνικά δίκτυα και κύτταρα

Επιρρέπεια σε επιθέσεις

- Τέτοια δίκτυα επιδεικνύουν έναν μη αναμενόμενο βαθμό ευρωστίας, δηλ., εξαιρετική ικανότητα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων ακόμα και όταν έχουμε υψηλούς ρυθμούς αποτυχίας κόμβων
- Όμως, η ανοχή σε σφάλματα έχει ως συνέπεια τα δίκτυα αυτά να είναι πολύ *επιρρεπή σε επιθέσεις* (στην επιλογή και απομάκρυνση λίγων κόμβων που παίζουν ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της συνδεσιμότητας του δικτύου)
- Η ανοχή σε σφάλματα και επιθέσεις είναι γενικές ιδιότητες των επικοινωνιακών δικτύων

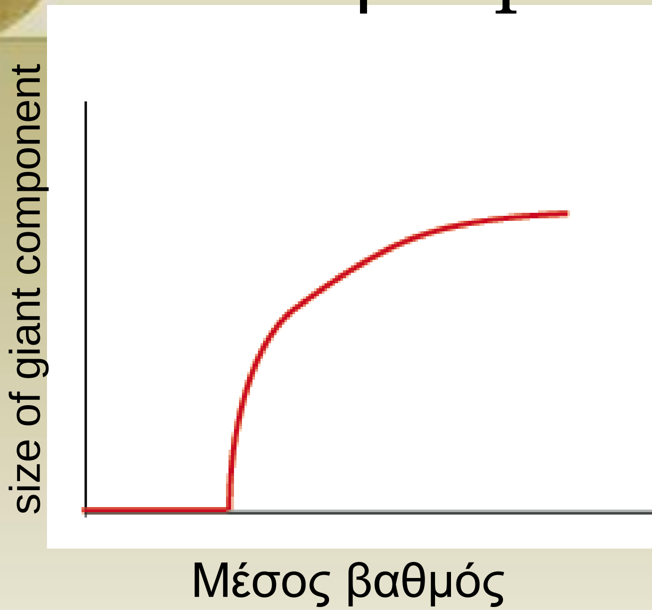
Εκθετικά & άνευ κλίμακας δίκτυα



Τα δυο δίκτυα περιέχουν 130 κόμβους και 215 συνδέσμους (<k>= 3.3).

Το exponential δίκτυο (το Erdos–Renyi μοντέλο παράγει δίκτυο με εκθετική ουρά) είναι ομογενές: οι περισσότεροι κόμβοι έχουν τον ίδιο περίπου αριθμό συνδέσεων. Το scale-free δίκτυο είναι ετερογενές: η πλειονότητα των κόμβων έχουν μόνο ένα ή δυο συνδέσμους, αλλά μερικοί κόμβοι έχουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων. **Με κόκκινο**: οι πέντε κόμβοι με τους περισσότερους συνδέσμους. **Με πράσινο**: οι γείτονες των "κόκκινων". Στο εκθετικό δίκτυο μόνο 27% των κόμβων είναι προσβάσιμοι από τους πέντε πιο διασυνδεδεμένους κόμβους. Στο scale-free δίκτυο, περισσότεροι από το 60% των κόμβων είναι προσβάσιμοι από τους πέντε πιο διασυνδεδεμένους κόμβους.

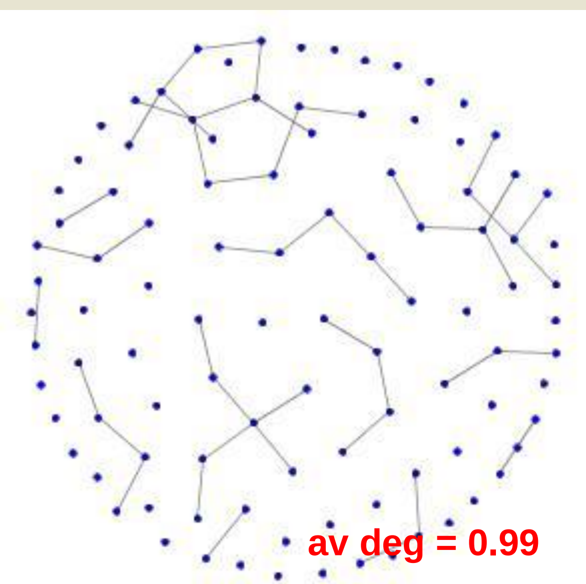
Κατώφλι percolation σε τυχαία δίκτυα

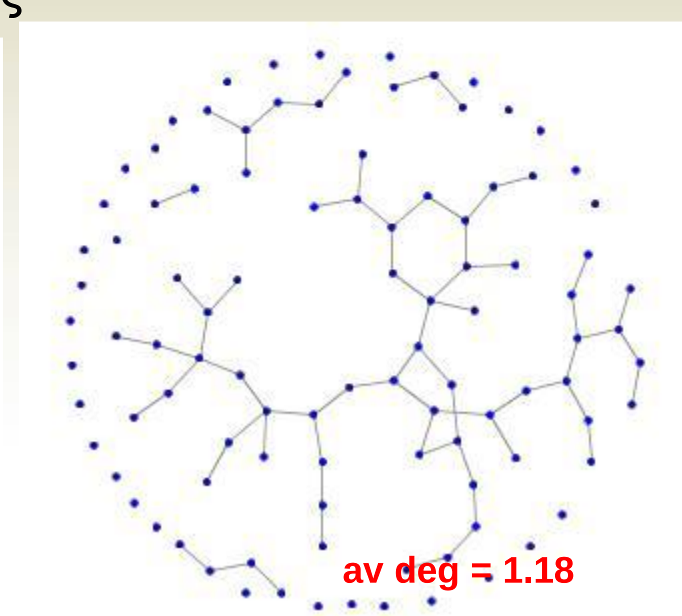


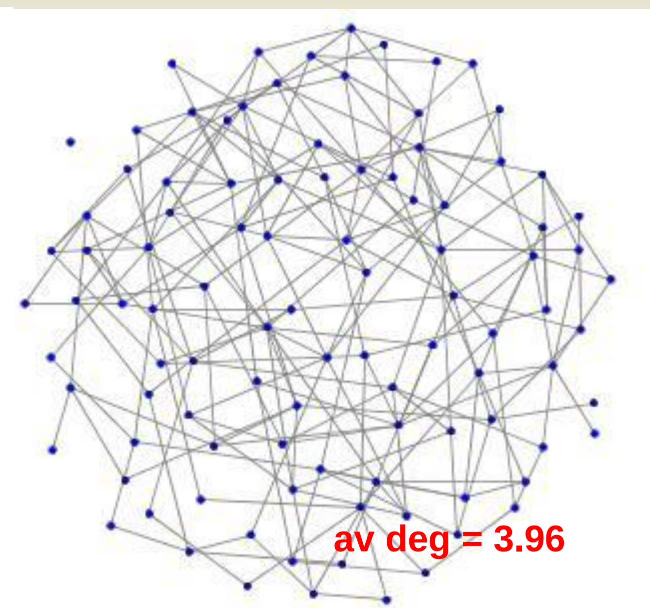
Percolation threshold: το σημείο στο οποίο εμφανίζεται η γιγαντιαία συνιστώσα

Καθώς ο μέσος βαθμός αυξάνει, μια γιγαντιαία συνιστώσα εμφανίζεται ξαφνικά

Η αφαίρεση συνδέσμων είναι η αντίστροφη διαδικασία Καθώς ο μέσος βαθμός πέφτει, το δίκτυο αποσυνδέεται



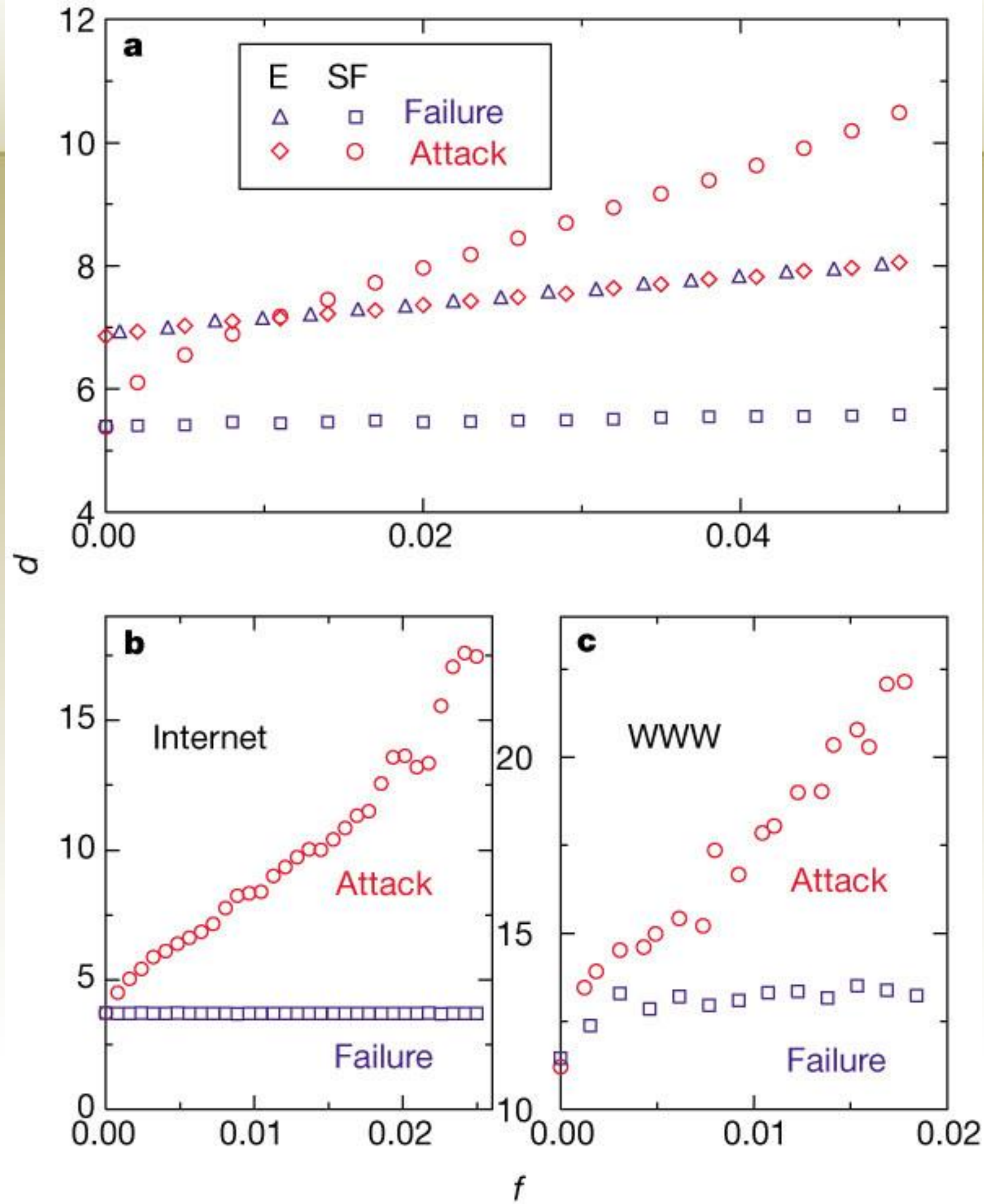




Μεταβολές στη διάμετρο

- Η αλληλοδιασύνδεση των κόμβων ενός δικτύου μπορεί να περιγραφεί με τη διάμετρό του d
- Δίκτυα με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων μπορεί να έχουν πολύ μικρή διάμετρο, για παράδειγμα
  - Το WWW με πάνω από 800 εκατομμύρια κόμβους έχει διάμετρο περίπου 19
  - Κοινωνικά δίκτυα με πάνω από έξι δισεκατομμύρια κόμβους πιστεύεται ότι έχουν διάμετρο περίπου 6
- Για να μελετήσουμε την ανοχή σε σφάλματα των δικτύων, μελετάμε τις αλλαγές στη διάμετρο όταν ένα μικρό ποσοστό f των κόμβων διαγράφεται
- Γενικώς, η διαγραφή κάποιου κόμβου αναμένεται ν' αυξήσει τις αποστάσεις μεταξύ των υπόλοιπων κόμβων, αφού η απουσία του θα σημάνει την απουσία κάποιων μονοπατιών που συνεισφέρουν στην αλληλοδιασύνδεση του συστήματος

[A] Με **μπλε**:Διάμετρος του exponential (τρίγωνα) και του scale-free (τετράγωνα), όταν ένα ποσοστό f των κόμβων διαγράφονται με τυχαίο τρόπο. (error tolerance). Με **κόκκινο**: αντίδραση του exponential (ρόμβοι) και του scale-free (κύκλοι) σε επιθέσεις, όταν διαγράφονται οι πιο διασυνδεδεμένοι κόμβοι. Η εξάρτηση της διαμέτρου από το f για διάφορα δίκτυα (N = 1,000; 5,000; 20,000), αγνοώντας μια λογαριθμική διόρθωση, είναι όμοια, άρα δεν εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου. Η διάμετρος του αρχικού (f=0) scale-free δικτύου είναι μικρότερη από του exponential, και άρα τα scale-free δίκτυα κάνουν αποδοτικότερη χρήση των συνδέσμων. **[B]** Οι αλλαγές στη διάμετρο του Internet υπό τυχαίες αποτυχίες (τετράγωνα) ή επιθέσεις (κύκλοι) σε έναν χάρτη του Internet με 6209 κόμβους και 12200 συνδέσμους (<k>=3.4) **[C]** Σφάλματα (τετράγωνα) και επιθέσεις (κύκλοι) σε ένα τμήμα του World-Wide Web με 325729 κόμβους και 1,498,353 συνδέσμους <k>= 4.59



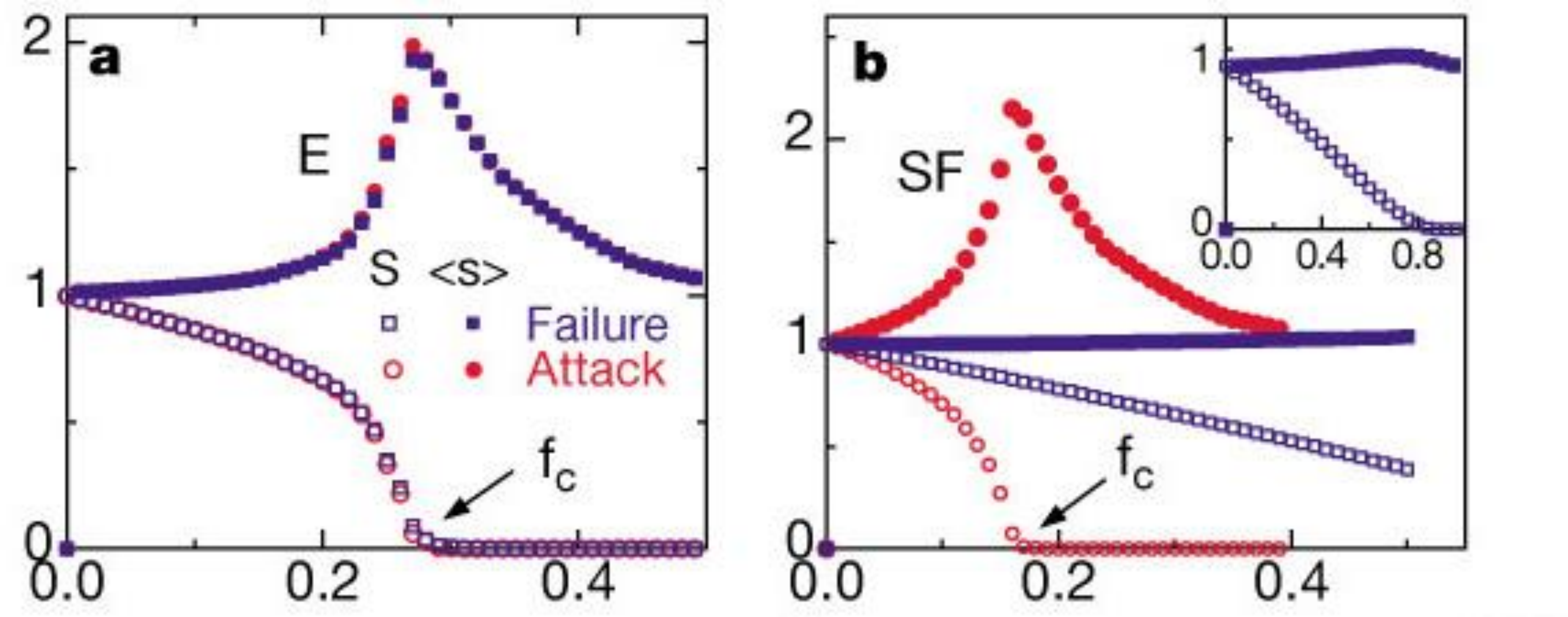
Συμπεράσματα

- Error tolerance: Συνδεσιμότητα μετά τη διαδοχική διαγραφή τυχαίων κόμβων
  - Στο exponential δίκτυο, η διάμετρος αυξάνει μονοτονικά με το f
  - Στο scale-free δίκτυο, η διάμετρος παραμένει αμετάβλητη σε αυξανόμενο αριθμό σφαλμάτων. Ακόμη και όταν 5% των κόμβων αποτυγχάνουν, η επικοινωνία μεταξύ των υπολοίπων παραμένει σχετικά ανέπαφη
- Attack tolerance: Συνδεσιμότητα μετά τη διαδοχική διαγραφή των πιο διασυνδεδεμένων κόμβων
  - Στο exponential δίκτυο, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά όταν οι κόμβοι διαγράφονται με τυχαίο τρόπο ή με διάταξη μειούμενης συνδεσιμότητας
  - Στο scale-free δίκτυο, όταν οι πιο διασυνδεδεμένοι κόμβοι διαγράφονται, η διάμετρος αυξάνει γρήγορα, διπλασιάζεται όταν διαγραφεί το 5% των κόμβων [επειδή η συνδεσιμότητα συντηρείται από λίγους υψηλά συνδεδεμένους κόμβους, των οποίων η διαγραφή αλλάζει δραστικά την τοπολογία του δικτύου και ελαττώνει την ικανότητα των υπολοίπων κόμβων να επικοινωνήσουν μεταξύ τους]

Διαδικασία τμηματοποίησης του δικτύου

- Όταν διαγράφονται κόμβοι από ένα δίκτυο, τότε ομάδες (clusters) των κόμβων των οποίων οι σύνδεσμοι στο σύστημα εξαφανίζονται μπορεί ν' αποκοπούν από το κύριο cluster
- Για να κατανοήσουμε τη διαδικασία τμηματοποίησης (fragmentation), μετρούμε το μέγεθος του μεγαλύτερου cluster, S, ως ποσοστό του μεγέθους του συνολικού συστήματος, όταν ένα ποσοστό f των κόμβων διαγράφονται είτε τυχαία είτε μετά από επίθεση
- Για το exponential, καθώς αυξάνουμε το f, το S δείχνει μια συμπεριφορά κατωφλίου τέτοια ώστε για $f > f^e_c \approx 0.28$, έχουμε $S \approx 0$
- Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται όταν εξετάζουμε το μέσο μέγεθος $<s>$ των μεμονωμένων clusters (δηλ., όλα τα clusters εκτός του μεγαλυτέρου), βρίσκοντας ότι το $<s>$ αυξάνει γρήγορα έως ότου $<s> \approx 2$ στο f^e_c, μετά το οποίο μειώνεται στο $<s> = 1$

Τμηματοποίηση του δικτύου



Σχετικό μέγεθος του μεγαλύτερου cluster S (ανοιχτά σύμβολα) και μέσο μέγεθος των μεμονωμένων clusters <s> (γεμισμένα σύμβολα) ως συνάρτηση του ποσοστού των διαγραφέντων κόμβων f των ίδιων δικτύων όπως και στην $8^{η}$ διαφάνεια. Το μέγεθος S ορίζεται ως το κλάσμα των κόμβων που περιέχονται στο μεγαλύτερο cluster (δηλ. S=1 για f=0). **[A]** Fragmentation του exponential δικτύου σε τυχαίες failures (τετράγωνα) και επιθέσεις (κύκλοι). **[B]** Fragmentation του scale-free δικτύου σε τυχαίες failures (μπλε τετράγωνα) και επιθέσεις (κόκκινοι κύκλοι). Το έσω γράφημα δείχνει τις καμπύλες της error tolerance για όλη το εύρος τιμών του f, αποδεικνύονται ότι το κύριο cluster διαχωρίζεται μόνο όταν αφαιρεθούν σχεδόν όλοι οι κόμβοι. Σημειώνουμε ότι η συμπεριφορά του scale-free δικτύου κάτω από errors παρουσιάζει το εξής φαινόμενο: σε εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων ($f_{max} \approx 0.75$) παρατηρούμε μια μικρή κορυφή στο <s> (<$s_{max} \approx 1.06$) ακόμη και στην περίπτωση των τυχαίων σφαλμάτων, αποδεικνύοντας την ύπαρξη ενός κρίσιμου σημείου. Για τα **[A]** και **[B]**, τα πειράματα επαναλήφθηκαν για δίκτυα με μεγέθη N = 1,000, 5,000 and 20,000, παρουσιάζονται όμοια συμπεριφορά.

Τμηματοποίηση του εκθετικού δικτύου

- Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν το ακόλουθο σενάριο κατάρρευσης
- Για μικρό f, μόνο μεμονωμένοι κόμβοι αποχωρίζονται, <s>≈1, αλλά καθώς το f αυξάνει, το μέγεθος των τμημάτων που αποκόπτονται από το κύριο cluster αυξάνεται, δείχνοτας μια ασυνήθιστη συμπεριφορά στο f^e_c
- Στο f^e_c το δίκτυο αποχωρίζεται πλήρως, το κύριο cluster σπάει σε μικρά κομμάτια, οδηγώντας το S≈0, και το μέγεθος των τμημάτων <s> κορυφώνεται
- Καθώς συνεχίζουμε να αφαιρούμε κόμβους ($f>f^e_c$), διασπάμε αυτά τα μεμονωμένα clusters, οδηγώντας σε περαιτέρω ελάττωση του <s>

Τμηματοποίηση του δικτύου άνευ κλίμακας

- Η συμπεριφορά του scale-free δικτύου είναι διαφορετική
- Για τυχαία σφάλματα, ΔΕΝ παρατηρείται κατώφλι τμηματοποίησης. Αντίθετα, το μέγεθος του μεγαλύτερου cluster μειώνεται αργά. Το γεγονός ότι <s>≈1 για τις περισσότερες τιμές του f, δείχνει ότι το δίκτυο μειώνεται κόμβο-κόμβο, δηλ., αυξανόμενος αριθμός σφαλμάτων οδηγεί σε απομόνωση μεμονωμένων κόμβων και όχι ολόκληρων clusters. Επομένως, σε αντίθεση με την καταστροφική τμηματοποίηση του exponential δικτύου στο σημείο f^e_c, το scale-free δίκτυο μένει ενωμένο ως ένα μεγάλο cluster για πολύ υψηλές τιμές του f, παρέχοντας επιπλέον ένδειξη για την τοπολογική σταθερότητα αυτών των δικτύων σε τυχαία σφάλματα
- Αυτή η συμπεριφορά είναι συνεπής με την ύπαρξη ενός εντελώς καθυστερημένου κρίσιμου σημείου όπου το δίκτυο διαχωρίζεται πλήρως μόνο όταν το κύριο cluster έχει διαλυθεί εντελώς
- Από την άλλη πλευρά, η απόκριση στις επιθέσεις του scale-free δικτύου είναι παρόμοια με την απόκριση στις επιθέσεις και σφάλματα του exponential δικτύου. Στο κρίσιμο κατώφλι $f^{sf}_c \approx 0.18$, μικρότερο από το κατώφλι $f^e_c \approx 0.28$ για το exponential δίκτυο, το συνολικό δίκτυο διαχωρίζεται σχηματίζονταις πολλά μεμονωμένα clusters

“Ταιριαστότητα” δικτύου

Network assortativity

Assortativity

- *Assortativity* ή assortative mixing είναι η προτίμηση των κόμβων ενός δικτύου να προσκολλώνται σε άλλους κόμβους με τους οποίους είναι όμοιοι κατά κάποιον τρόπο
- Παρόλο που το μέτρο ομοιότητας μπορείς να ποικίλλει, η assortativity συχνά εξετάζεται με όρους του βαθμού του κάθε κόμβου
- Συσχετίσεις μεταξύ κόμβων με παρόμοιο βαθμό συχνά εντοπίζονται στα mixing patterns πολλών πραγματικών δικτύων
  - Στα κοινωνικά δίκτυα, οι υψηλά διασυνδεδεμένοι κόμβοι τείνουν να συνδέονται με άλλους υψηλά διασυνδεδεμένους κόμβους. Αυτή η τάση αποκαλείται *assortative mixing* ή *assortativity*
  - Τα τεχνολογικά και βιολογικά δίκτυα τυπικά επιδεικνύουν *disassortative mixing* ή *dissortativity*, αφού οι υψηλού βαθμού κόμβοι τείνουν να συνδέονται με τους χαμηλού βαθμού κόμβους

Μέτρηση της assortativity

- Η assortativity συνήθως εκλαμβάνεται ως συσχέτιση μεταξύ των βαθμών δυο κόμβων
- Τα πιο κοινά μέτρα είναι:
  - neighbor connectivity
  - assortativity coefficient
- Η *neighbor connectivity* εξετάζει τις ιδιότητες του $\langle k_{nn} \rangle$ ή τον μέσο βαθμό των γειτόνων ενός κόμβου με βαθμό k
- Ο ορισμός του είναι: $\langle k_{nn} \rangle = \Sigma\_{k'}\; k' \, P(k' | k)$, όπου $P(k' | k)$ είναι η υπο συνθήκη πιθανότητα ότι μια ακμή του κόμβου με βαθμό k δείχνει σε έναν κόμβο με βαθμό k'
- Εάν η συνάρτηση αυτή είναι αύξουσα, το δίκτυο είναι assortative, αφού οι κόμβοι με μεγάλο βαθμό συνδέονται, συνήθως, σε κόμβους με μεγάλο βαθμό. Αλλιώς, εάν η συνάρτηση είναι φθίνουσα, το δίκτυο είναι dissortative

Συντελεστής assortativity

- Ο συντελεστής assortativity r είναι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson του βαθμού μεταξύ ζευγών συνδεδεμένων κόμβων

$$r \equiv \frac{\langle jk \rangle_e - \left[\langle (j+k)/2 \rangle_e\right]^2}{\langle (j^2+k^2)/2 \rangle_e - \left[\langle (j+k)/2 \rangle_e\right]^2}$$

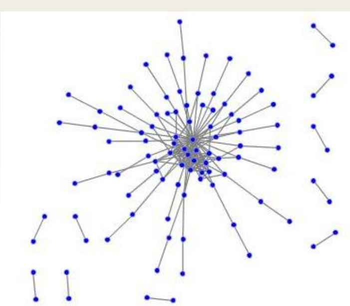
όπου οι μέσοι όροι $\langle \ldots. \rangle_e$ υπολογίζονται πάνω σε όλες τις ακμές e, και j, k είναι οι βαθμοί των κόμβων στα δυο άκρα της ακμής e

- Θετικές τιμές του r σημαίνουν συσχέτιση μεταξύ κόμβων με παρόμοιο βαθμό, ενώ αρνητικές τιμές σημαίνουν σχέσεις μεταξύ κόμβων διαφορετικού βαθμού
- Γενικά, οι τιμές του r κυμαίνονται μεταξύ −1 και 1. Όταν r=1, το δίκτυο αναφέρεται ότι έχει perfect assortative mixing patterns, ενώ όταν r = −1 το δίκτυο είναι completely disassortative

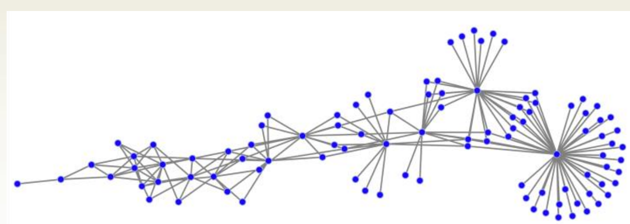
Δίκτυα με διαφορετική assortativity

- **Άσκηση 1.**

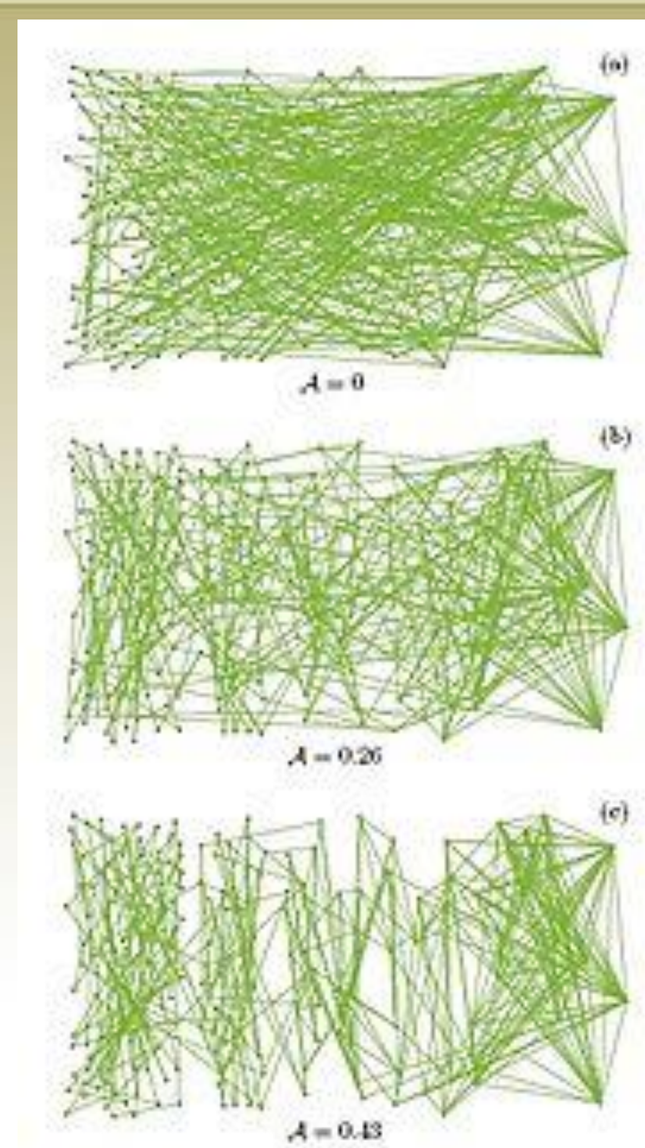
  Ποιο δίκτυο πιστεύετε ότι είναι πιο επιρρεπές σε επιθέσεις; Κάποιο με μεγάλη assortativity ή κάποιο με μικρή assortativity;



assortative



disassortative



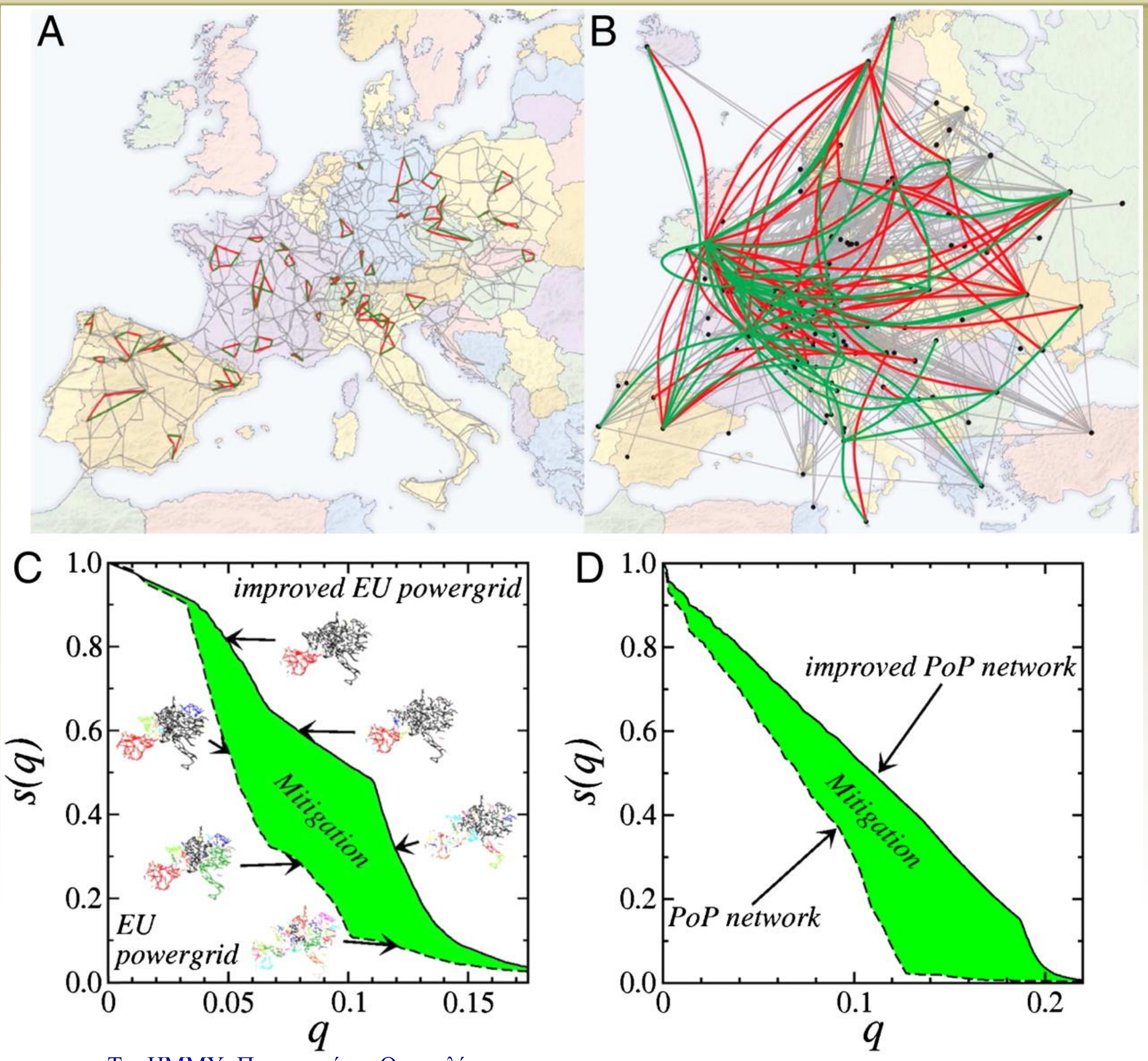
Αμβλύνοντας το αποτέλεσμα κακόβουλων επιθέσεων σε σύνθετα δίκτυα

Mitigating malicious attacks on complex networks

EU power grid και EU Internet σε επίπεδο PoP

[A] EU power grid με N=1254 generators και M=1811 power lines **[B]** το Internet με N=1098 service providers και M=6089 connections μεταξύ τους

Οι στικτές γραμμές στο **[C]** και **[D]** αναπαριστούν το μέγεθος της μεγαλύτερης συνδεδεμένης συνιστώσας μετά την διαγραφή ενός ποσοστού q των πιο διασυνδεδεμένων κόμβων. Αντί για τη στατική προσέγγιση, γίνεται χρήση μιας πιο δυναμικής, κατά την οποία οι πιο διασυνδεδεμένοι κόμβοι ξανα-υπολογίζονται μετά την απομάκρυνση κάθε κόμβου, πράγμα που συνιστά πιο επιβλαβή πρακτική. Ως συνέπεια, το “κλείσιμο” του 10% των power stations και η περικοπή του 12% των PoP θα επηρέαζαν το 90% της ακεραιότητας των αντίστοιχων δικτύων



Περί ευρωστίας του δικτύου

- Οι πράσινες περιοχές στα [C] και [D] είναι η βελτίωση της ανθεκτικότητας του δικτύου για κάθε ποσοστό q επιθέσεων
- Ανταλλαγή μόνο ενός μικρού αριθμού power lines ή καλωδίων cables
  - χωρίς ν’ αυξήσουμε το συνολικό μήκος των συνδέσεων, και
  - χωρίς ν’ αυξήσουμε τον αριθμό των συνδέσεων κάθε κόμβου
- Συνήθως η ευρωστία μετριέται με την τιμή q_c, το κρίσιμο ποσοστό των επιθέσεων μετά το οποίο το δίκτυο καταρρέει εντελώς
- Αυτό το μέτρο αγνοεί καταστάσεις στις οποίες το δίκτυο υποφέρει μεγάλη ζημιά χωρίς όμως να καταρρεύσει εντελώς

Μέτρο ευρωστίας

$$R = \frac{1}{N} \sum_{Q=1}^{N} s(Q),$$

όπου N είναι ο αριθμός κόμβων του δικτύου και s(Q) είναι το κλάσμα των κόμβων στη μεγαλύτερη διασυνδεδεμένη συνιστώσα μετά την αφαίρεση Q = qN κόμβων.

Ο παράγοντας κανονικοποίησης 1/N καθιστά την ευρωστία δικτύων με διαφορετικό μέγεθος συγκρίσιμη. Η εμβέλεια των πιθανών τιμών του R είναι μεταξύ 1/N και 0.5, όπου αυτά τα όρια αντιστοιχούν σε ένα star δίκτυο και σε ένα πλήρως συνδεδεμένο γράφημα, αντίστοιχα

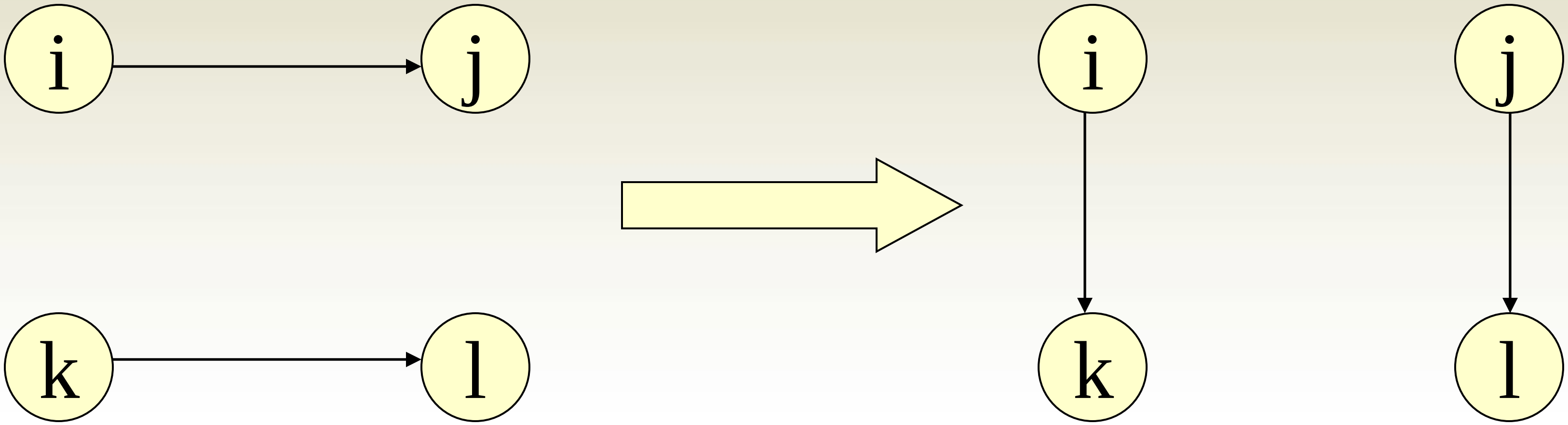
- Τη ουσία, το μέτρο αυτό μελετά το μέγεθος της μεγαλύτερης διασυνδεδεμένης συνιστώσας κατά τη διάρκεια όλων των κακόβουλων επιθέσεων

Πώς θα κάνω το δίκτυο πιο εύρωστο;

- Η ευρωστία μπορεί ν’ αυξηθεί:
  - Με προσθήκη συνδέσεων μέχρι το δίκτυο να γίνει πλήρες διασυνδεδεμένο
    - Για πρακτικούς λόγους και οικονομικούς (κόστος εγκατάστασης γραμμών, μεγαλύτερες απώλειες μετάδοσης) δεν είναι εφικτό
- Ψάχνουμε για μια λύση που δεν αυξάνει το κόστος των αλλαγών
  - Υποθέτουμε ότι αλλάζοντας το βαθμό κάποιου κόμβου είναι ακριβότερο από το ν’ ανταλλάξουμε συνδέσεις

Αλγοριθμικά, αυτή η ιδέα …

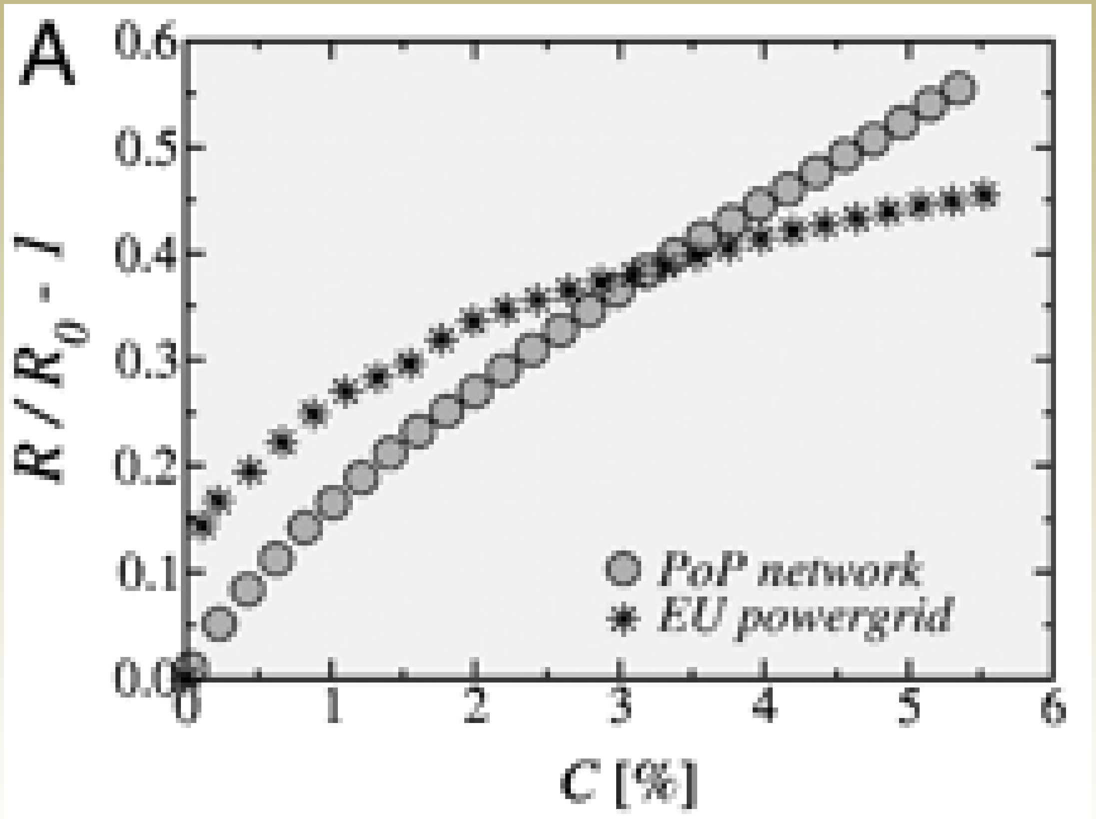
- Στο αρχικό δίκτυο, ανταλλάσουμε τις συνδέσεις δυο τυχαία επιλεγμένων συνδέσμων, έστω των e_{ij} και e_{kl}, οι οποίες συνδέουν τον κόμβο i με τον j, και τον κόμβο k με τον κόμβο l, αντίστοιχα, ώστε να γίνουν e_{ik} και e_{jl}, εάν και μόνο εάν η ευρωστία του δικτύου αυξάνεται, δηλ., $R_{new} > R_{old}$



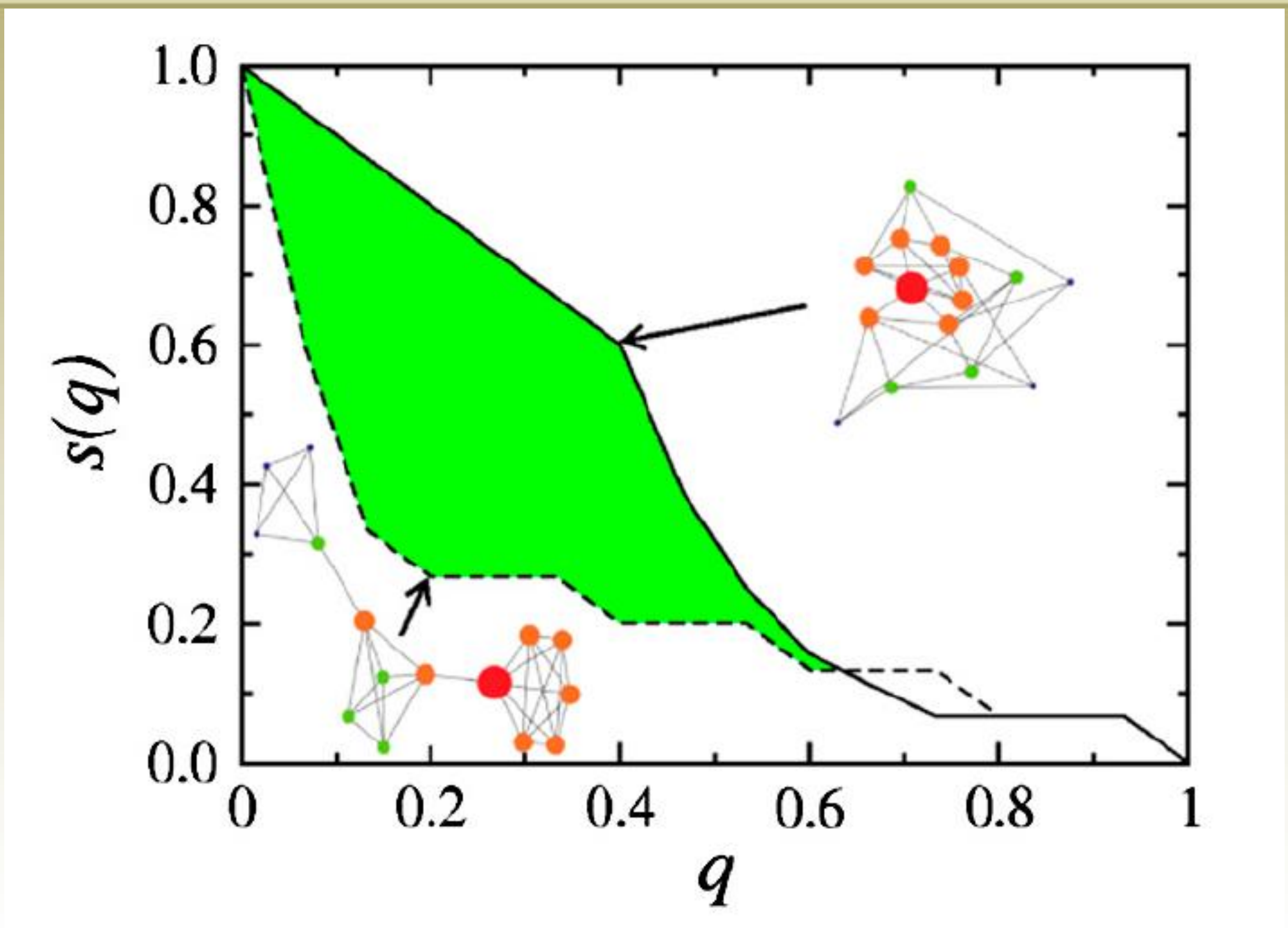
Λεπτομερώς ο αλγόριθμος

- Ο αλγόριθμος εκκινεί υπολογίζοντας την ευρωστία του αρχικού (PoP) (power supply system). Επομένως, υπολογίζεται η ευρωστία R των 2,000 (1,000) ανεξάρτητων επιθέσεων βασισμένων στον προσαρμοσμένο υπολογισμό των κόμβων με μεγαλύτερο βαθμό. Η τιμή της μέσης ευρωστίας ανατίθεται στη R_{old}
- Για να βελτιώσουμε την ευρωστία του δικτύου, δυο κόμβοι i και j, και δυο γείτονές τους k και l, επιλέγονται τυχαία
- Εάν η ανταλλαγή των γειτόνων – ο l γίνεται γείτονας του i και ο k γείτονας του j – δεν δημιουργεί self-connections ούτε double-connections, υπολογίζονται τα γεωγραφικά μήκη των συνδέσεων e_{il} και e_{jk}
- Μόνο εάν το άθροισμα των μηκών τους είναι μικρότερο από το άθροισμα των μηκών των e_{ik} και e_{jl}, υπολογίζεται η τιμής της ευρωστίας R_{new} του νέου δικτύου, ξανά κατά το μέσο όρο 2,000 (1,000) ανεξάρτητων επιθέσεων
- Η ανταλλαγή των γειτόνων γίνεται αποδεκτή, μόνο εάν αυξάνει σημαντικά την ευρωστία, δηλαδή $R_{new} > R_{old} + \delta_R$, όπου το κατώφλι δ_R τίθεται αυθαίρετα στην τιμή $\delta_R = 0.0006$ (0.001)
- Μετά από 10^6 (10^8) ανεξάρτητες ανταλλαγές, το κατώφλι μειώθηκε κατά έναν αυθαίρετο παράγοντα 0.8

Εφαρμογή στα δίκτυα power-grid & PoP

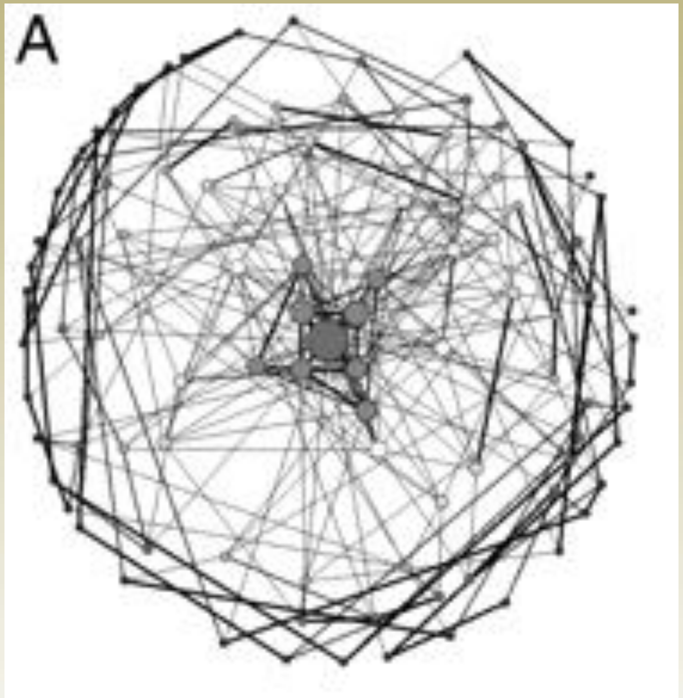


Εφαρμογή σε assortative δίκτυα



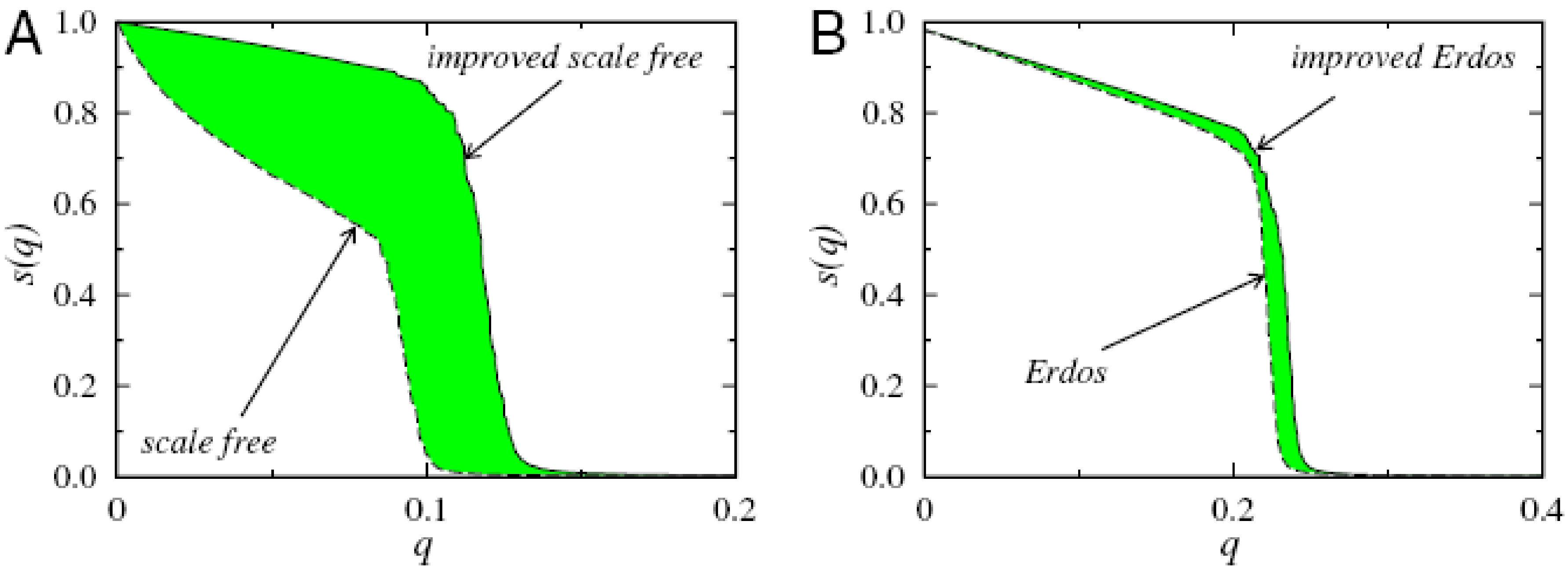
Το μέγεθος του μεγαλύτερου συνδεδεμένου cluster s(q) σε σχέση με το κλάσμα των κόμβων που αφαιρέθηκαν σε ένα highly assortative network (στικτή γραμμή), και το αντίστοιχο βελτιωμένο onion-like δίκτυο (συνεχής γραμμή). Στο σχήμα εικονίζονται επίσης οι διαφορετικές τοπολογίες των δυο δικτύων.

Ποια είναι τα onion-like δίκτυα;



Onion-like δίκτυα: αποτελούνται από έναν πυρήνα με υψηλά διασυνδεδεμένους κόμβους ιεραραχικά περιβαλλόμενοι από δαχτυλίδια κόμβων με φθίνοντα βαθμό. Στα onion-like δίκτυα σχεδόν κάθε ζεύγος κόμβων ίσου βαθμού k είναι συνδεδεμένο με ένα μονοπάτι που δεν περιλαμβάνει κόμβους υψηλότερου βαθμού

High betweenness attack



Το κλάσμα των κόμβων που ανήκουν στο largest connected cluster s(q) σε σχέση με το κλάσμα των κόμβων-θυμάτων της επίθεσης πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου όταν λαμβάνει χώρα μια high betweenness adaptive attack σε ένα (A) scale-free networks με N=4000 and γ=2.5, και σε ένα (B) Erdos–Renyi δίκτυο με N=4000 and M=8000. Η high betweenness adaptive attack είναι η πιο αποδοτική κακόβουλη επίθεση, αλλά απαιτεί γνώση της συνολικής τοπολογίας του δικτύου.