Βασικές Έννοιες Θεωρίας Γραφημάτων

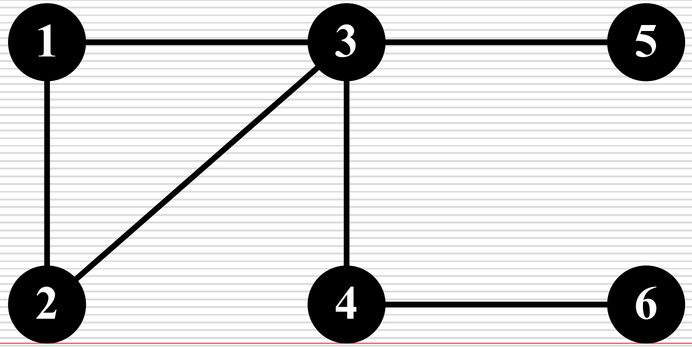
Δημήτρης Φωτάκης

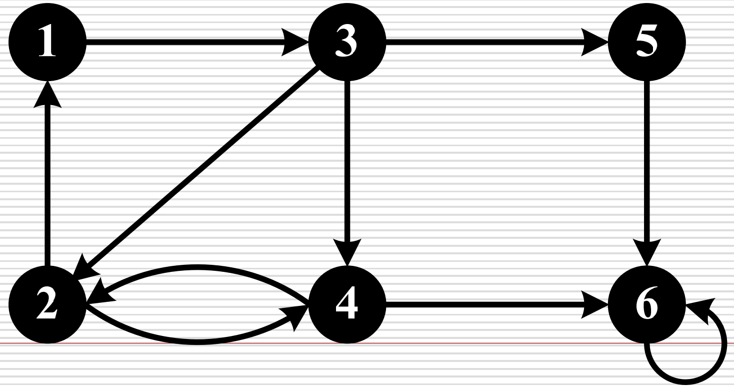
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Γραφήματα

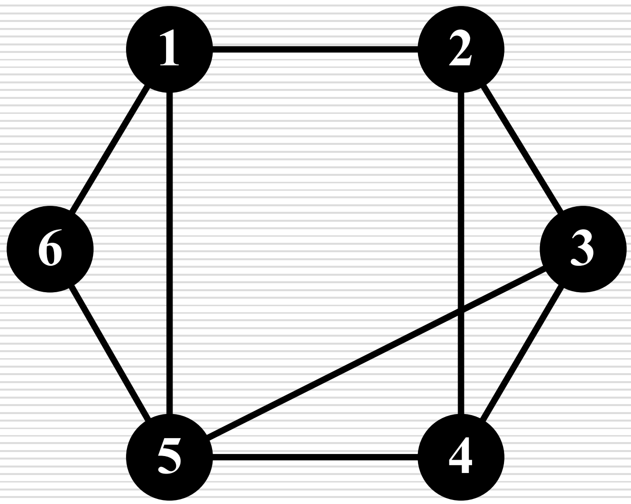
- Μοντελοποίηση πολλών σημαντικών προβλημάτων (π.χ. δίκτυα – συνεκτικότητα, διαδρομές, δρομολόγηση – ανάθεση πόρων, layouts, …).
- Γράφημα G(V, E): V κορυφές
  E ακμές (ζεύγη σχετιζόμενων κορυφών)
  - Τάξη |V| = n και μέγεθος |E| = m.
  - Κατευθυνόμενα και μη-κατευθυνόμενα, απλά μη-κατευθ.
  - Βάρη (μήκη) στις ακμές $G(V,E,w)$, $w : E \mapsto \mathbb{R}$

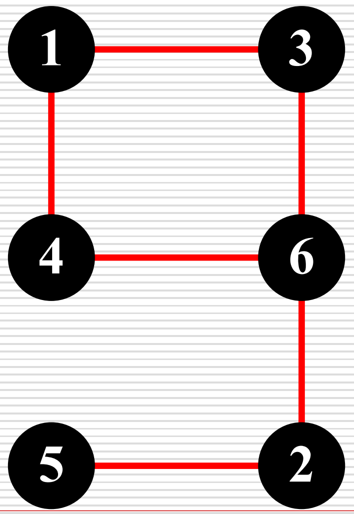




Πλήρες και Συμπληρωματικό Γράφημα

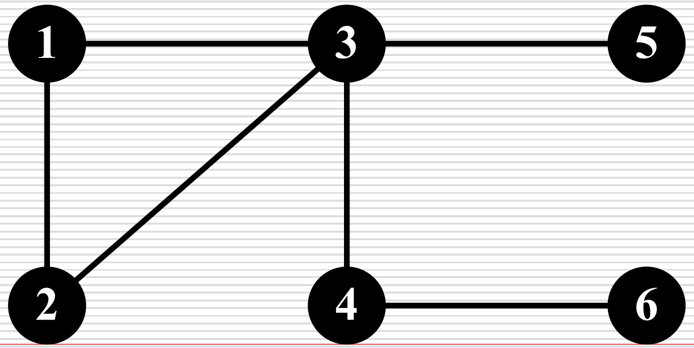
- Πλήρες γράφημα n κορυφών: K_n
  - Όλα τα ζεύγη κορυφών συνδέονται με ακμή: $n(n-1)/2$ ακμές.
- Συμπληρωματικό γράφημα $\overline{G}$ γραφήματος G.
  - Ίδιο σύνολο κορυφών. Ακμές: όσες δεν υπάρχουν στο G.
  - Συμπληρωματικό $\overline{G}$: αρχικό γράφημα G.

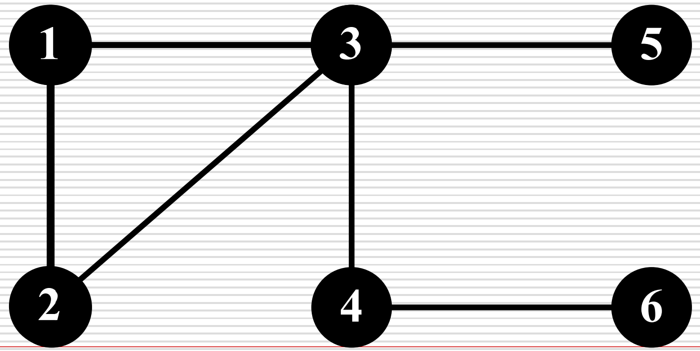




Υπο-Γραφήματα

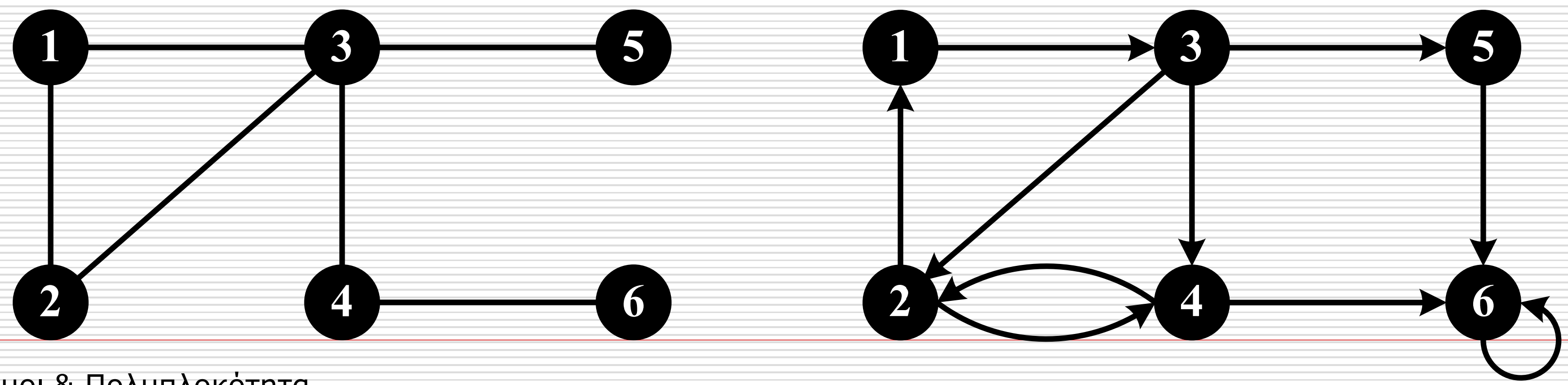
- Υπογράφημα G′(V′, E′) του G(V, E) όταν V′ $\subseteq$ V και E′ $\subseteq$ E.
  - Επικαλύπτον ή συνδετικό (spanning) όταν V′ = V,
    δηλ. έχει **όλες τις κορυφές** του αρχικού γραφήματος,
    επιλέγουμε τις **ακμές** που τις συνδέουν.
  - Επαγόμενο (induced) όταν $E' = \{(u, v) \in E : u, v \in V'\}$
    δηλ. έχει **όλες τις ακμές** του αρχικού μεταξύ των
    επιλεγμένων **κορυφών**.





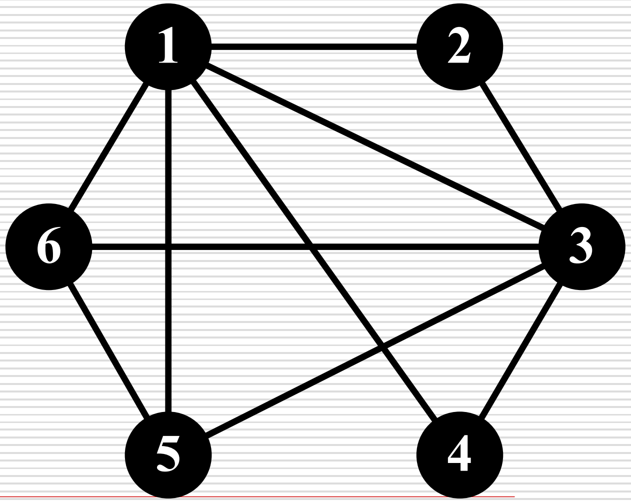
Βαθμός Κορυφής

- Βαθμός κορυφής deg(v): #ακμών εφαπτόμενων στη v.
  - Κατευθυνόμενα: προς-τα-έσω και προς-τα-έξω βαθμός.
  - Μη-κατευθυνόμενο G(V, E): $\sum_{v \in V} \deg(v) = 2\,|E|$
  - Άρτιο πλήθος κορυφών περιττού βαθμού.



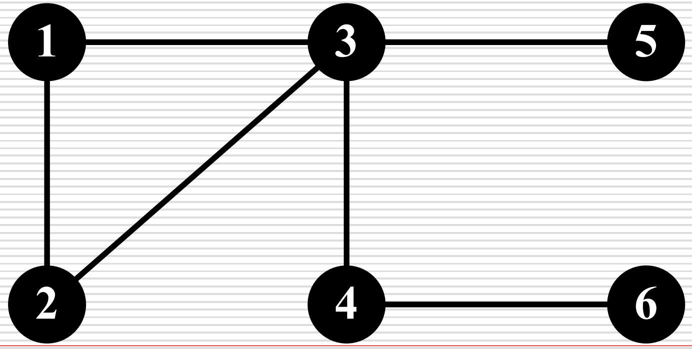
Διαδρομές, Μονοπάτια, και Κύκλοι

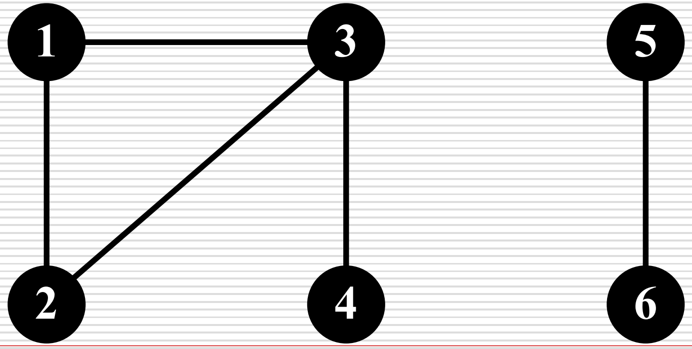
- Διαδρομή – Μονοκονδυλιά – Μονοπάτι – Κύκλος
  - Διαδρομή: ακολουθία «διαδοχικών» ακμών.
    - «Διαδοχικές» ακμές: κατάληξη πρώτης = αρχή της δεύτερης.
    - Π.χ. {2, 1}, {1, 3}, {3, 4}, {4, 1}, {1, 5}, {5, 3}, {3, 6}.
  - Μονοκονδυλιά: διαδρομή χωρίς επανάληψη ακμών.
  - (Απλό) μονοπάτι: διαδρομή χωρίς επανάληψη κορυφών (και ακμών).
  - Υπάρχει διαδρομή u – v ανν υπάρχει μονοπάτι u – v.
  - Απόσταση d(u, v) (χωρίς και με βάρη): μήκος συντομότερου u – v μονοπατιού.
  - Κλειστή διαδρομή όταν άκρα της ταυτίζονται.
  - Κλειστή μονοκονδυλιά ή κύκλωμα.
  - (Απλός) κύκλος: μονοπάτι που άκρα του ταυτίζονται («κλειστό» μονοπάτι).



Συνεκτικότητα

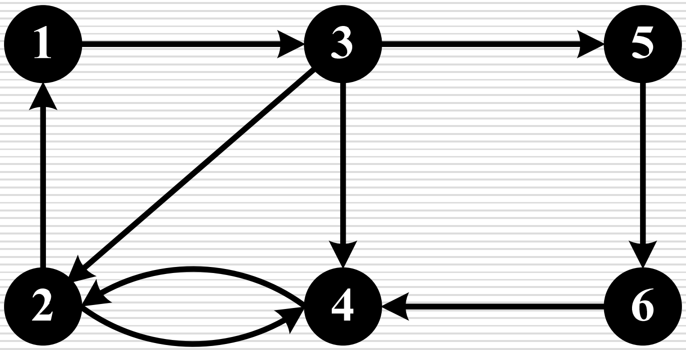
- (Μη-κατευθυνόμενο) γράφημα G(V, E) **συνεκτικό** αν για κάθε ζευγάρι κορυφών u, v ∈ V, υπάρχει u – v μονοπάτι.
  - Μη-συνεκτικό γράφημα αποτελείται από συνεκτικές συνιστώσες: μεγιστικά (maximal) συνεκτικά υπογραφήματα.
  - Γέφυρα (ακμή τομής): ακμή που αν αφαιρεθεί αυξάνει το πλήθος των συνεκτικών συνιστωσών.
    - Ακμή γέφυρα ανν δεν ανήκει σε κύκλο.
  - Σημείο άρθρωσης (κορυφή τομής): κορυφή που αν αφαιρεθεί αυξάνει το πλήθος των συνεκτικών συνιστωσών.

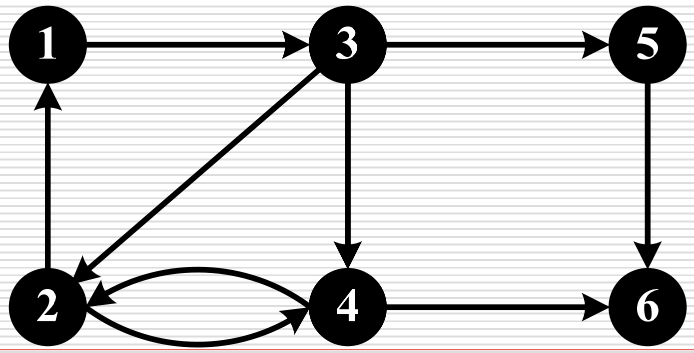




Συνεκτικότητα

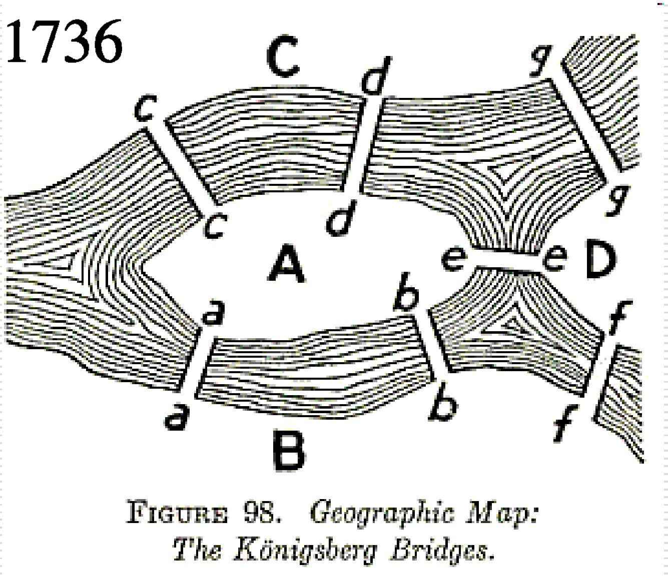
- (Κατευθυνόμενο) γράφημα G(V, E) **ισχυρά συνεκτικό** αν $\forall u, v \in V$, υπάρχουν u – v και v – u μονοπάτια.
  - Για κάθε ζευγάρι κορυφών ισχυρά συνεκτικού γραφήματος, υπάρχει κύκλος που τις περιλαμβάνει.
  - Αν ένα κατευθυνόμενο γράφημα δεν είναι ισχυρά συνεκτικό, διαμερίζεται σε ισχυρά συνεκτικές συνιστώσες:
    - Μεγιστικά ισχυρά συνεκτικά υπογραφήματα.

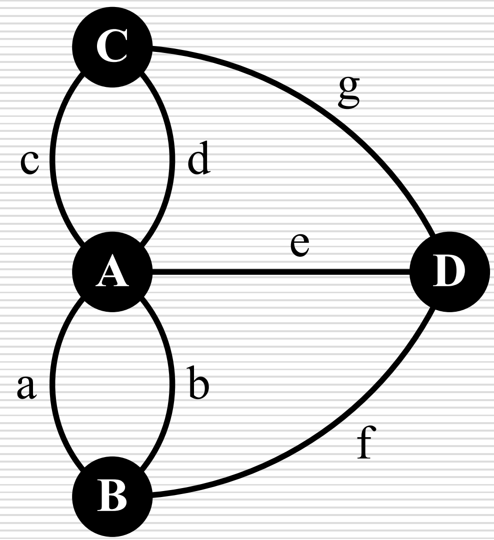


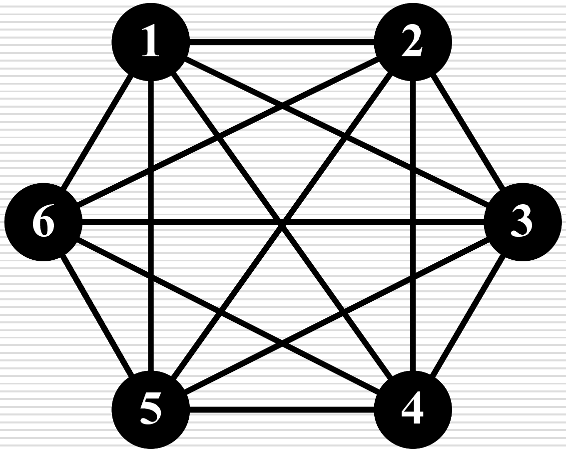


Κύκλος Euler

- Κλειστή μονοκονδυλιά που διέρχεται:
  - από κάθε ακμή 1 φορά, και
  - από κάθε κορυφή τουλάχιστον 1 φορά.
- Συνεκτικό (μη-κατευθ.) γράφημα έχει κύκλο Euler ανν όλες οι κορυφές έχουν άρτιο βαθμό.



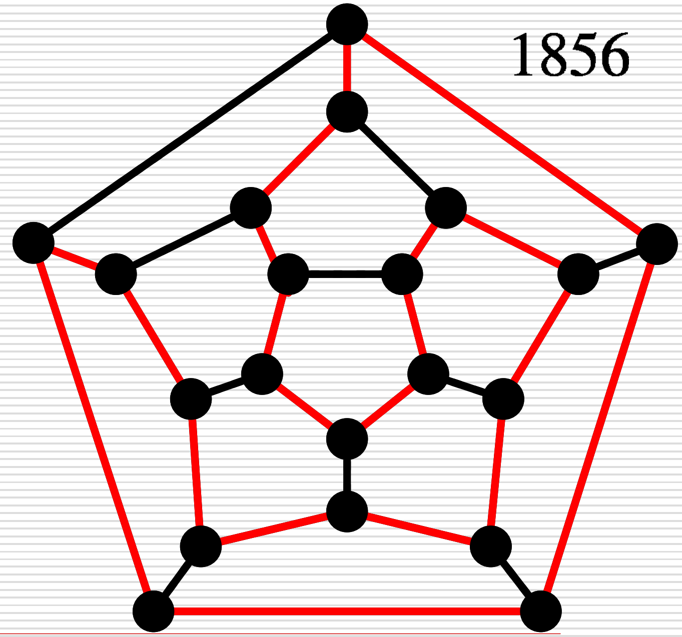




Κύκλος Hamilton

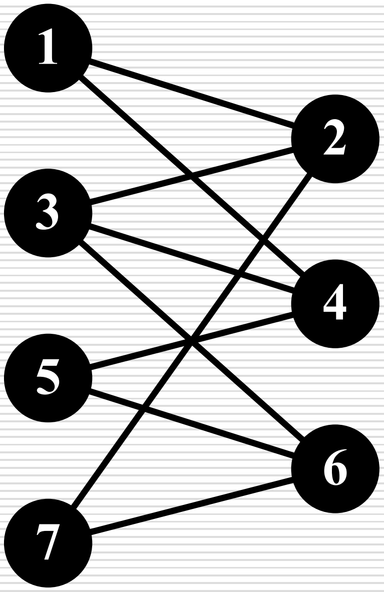
- (Απλός) κύκλος που διέρχεται από όλες τις κορυφές.
  - Διέρχεται από κάθε κορυφή 1 φορά.
  - Μπορεί να μην διέρχεται από κάποιες ακμές.
- Δεν είναι γνωστή ικανή και αναγκαία συνθήκη!
- Ικανές συνθήκες ώστε G(V, E) έχει κύκλο Hamilton:
  - $\forall v \in V$, $\deg(v) \geq |V|/2$ (Θ. Dirac).
  - $\forall u, v \in V$, $\deg(u) + \deg(v) \geq |V|$ (Θ. Ore).
- Αναγκαίες συνθήκες για ύπαρξη κύκλου Hamilton σε γραφήμα G:
  - G δεν έχει γέφυρα ή σημείο άρθρωσης.

1856



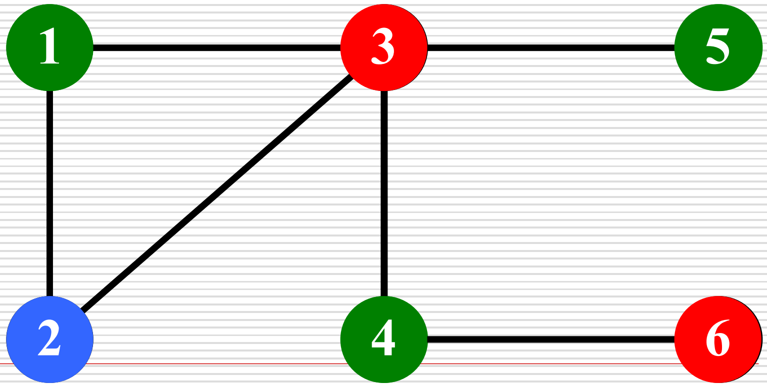
Διμερές Γράφημα

- Ανεξάρτητο σύνολο: σύνολο κορυφών που δεν συνδέονται με ακμή.
- Υπάρχει διαμέριση κορυφών σε δύο ανεξάρτητα σύνολα.
  - $G(X, Y, E)$: X και Y ανεξάρτητα σύνολα, ακμές μόνο μεταξύ κορυφών X και Y.
  - G διμερές ανν $\chi(G) \leq 2$.
  - G διμερές ανν δεν έχει κύκλους περιττού μήκους.
  - Κύκλος n κορυφών C_n: διμερές ανν n άρτιος.
- Πλήρες διμερές γράφημα $K_{n,m}$:
  - Δύο ανεξάρτητα σύνολα με n και m κορυφές.
  - Όλες οι $n \cdot m$ ακμές μεταξύ τους.
  - Π.χ. $K_{3,3}$ έχει 9 ακμές.



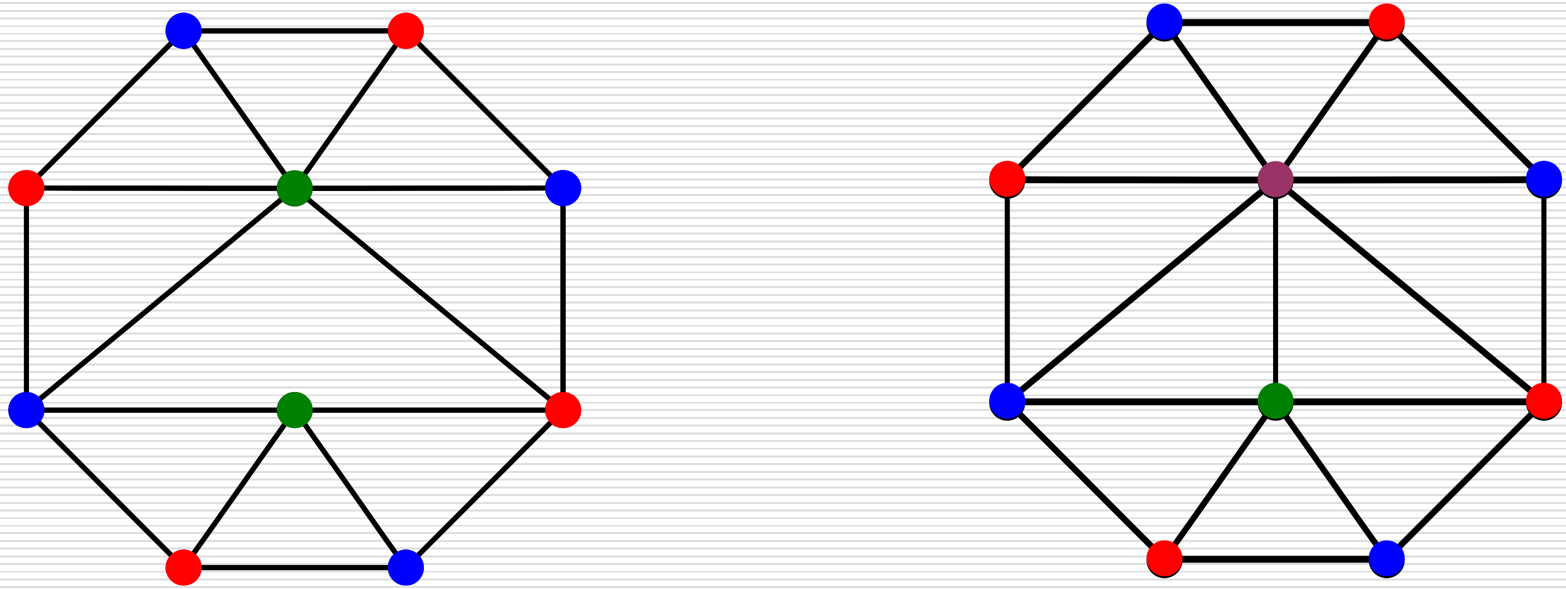
Χρωματικός Αριθμός

- **Ανεξάρτητο σύνολο:** σύνολο κορυφών που δεν συνδέονται με ακμή.
- **k-μερές γράφημα:** κορυφές του διαμερίζονται σε k ανεξάρτητα σύνολα.
  - Ενδιαφέρει ελάχιστο k για το οποίο γράφημα G είναι k-μερές.
  - Αυτό ταυτίζεται με χρωματικό αριθμό $\chi(G)$ γραφήματος G.
- **Χρωματικός αριθμός**: ελάχιστο πλήθος χρωμάτων για χρωματισμό κορυφών ώστε όλες οι ακμές να έχουν άκρα διαφορετικού χρώματος.
  - Κορυφές ίδιου χρώματος: ανεξάρτητο σύνολο.
  - Αν G περιέχει K_m, $\chi(G) \geq m$
  - $\chi(G) \leq \Delta+1$



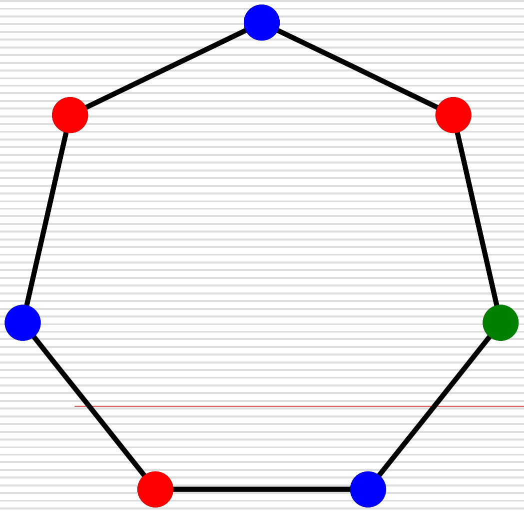
Χρωματικός Αριθμός

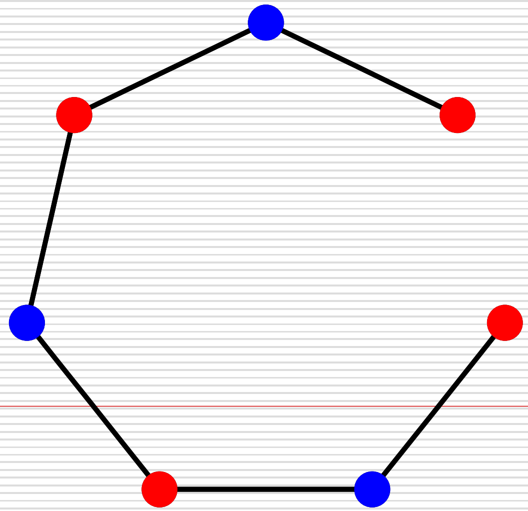
- **Χρωματικός αριθμός**: ελάχιστο πλήθος χρωμάτων για χρωματισμό κορυφών ώστε όλες οι ακμές να έχουν άκρα διαφορετικού χρώματος.
  - Κορυφές ίδιου χρώματος: ανεξάρτητο σύνολο.

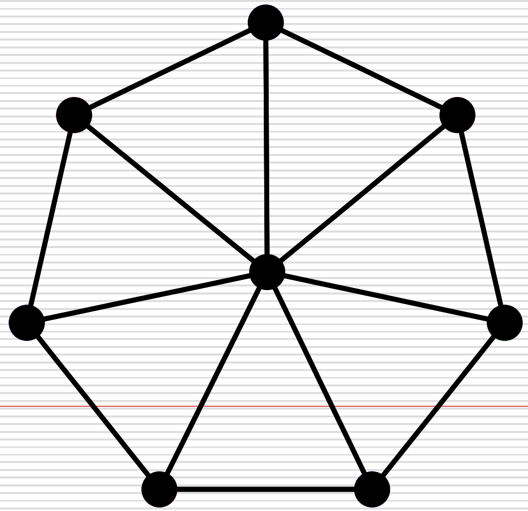


Χρωματικός Αριθμός

- Χρωματικά **k-κρίσιμο** γράφημα G: $\chi(G) = k$ και για κάθε ακμή e, $\chi(G-e) = k-1$.
  - K_n n-κρίσιμο: $\chi(K_n) = n$ και για κάθε e, $\chi(K_n - e) = n-1$.
  - Απλός κύκλος C_n, n άρτιος: $\chi(C_n) = 2$ και όχι 2-κρίσιμο.
  - Απλός κύκλος C_n, n περιττός: $\chi(C_n) = 3$ και 3-κρίσιμο.
  - Τροχός W_n, n άρτιος: $\chi(W_n) = 3$ και όχι 3-κρίσιμο.
  - Τροχός W_n, n περιττός: $\chi(W_n) = 4$ και 4-κρίσιμο.

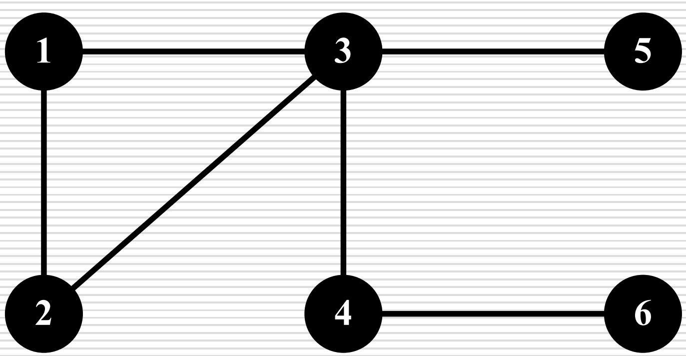






Αναπαράσταση Γραφημάτων

- … με **πίνακα γειτνίασης**: $A[i,j] = \begin{cases} 1 & (v_i, v_j) \in E \\ 0 & (v_i, v_j) \notin E \end{cases}$
  - Αν έχουμε βάρη, $A[i,j] = w(v_i, v_j)$
  - (Απλό) μη κατευθυνόμενο: συμμετρικός, διαγώνιος 0.
  - Άθροισμα στοιχείων γραμμής (στήλης): βαθμός κορυφής.
  - Χώρος $\Theta(n^2)$.
  - Άμεσος έλεγχος για ύπαρξη ακμής.



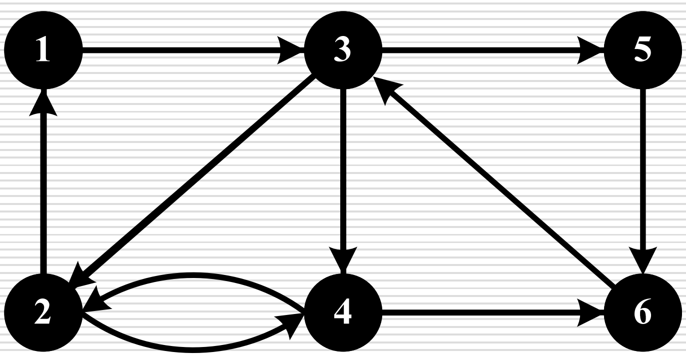
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0
3	1	1	0	1	1	0
4	0	0	1	0	0	1
5	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0

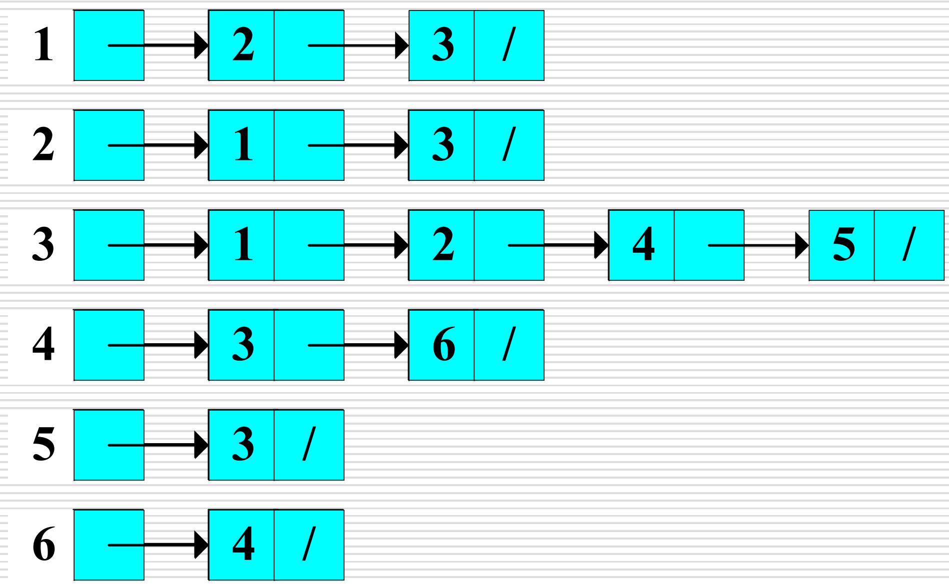
Πίνακας Γειτνίασης

- $A^k[u_i, u_j]$ = #διαδρομών u_i – u_j μήκους k.
  - Διαγώνιος τετραγώνου: $A^2[u_i, u_i]$ = βαθμός(u_i).
  - $A^3[u_i, u_i] = 2 \times$ #τριγώνων που συμμετέχει u_i.
- Ορίζουμε: $Y = \sum_{k=1}^{n-1} A^k$
- $Y[u_i, u_j]$ = #διαδρομών u_i – u_j μήκους $\leq n - 1$.
  - Μονοπάτια έχουν μήκος $\leq n - 1$, και διαδρομή ανν μονοπάτι.
  - Γράφημα συνεκτικό ανν όλα τα στοιχεία του Y θετικά (> 0).

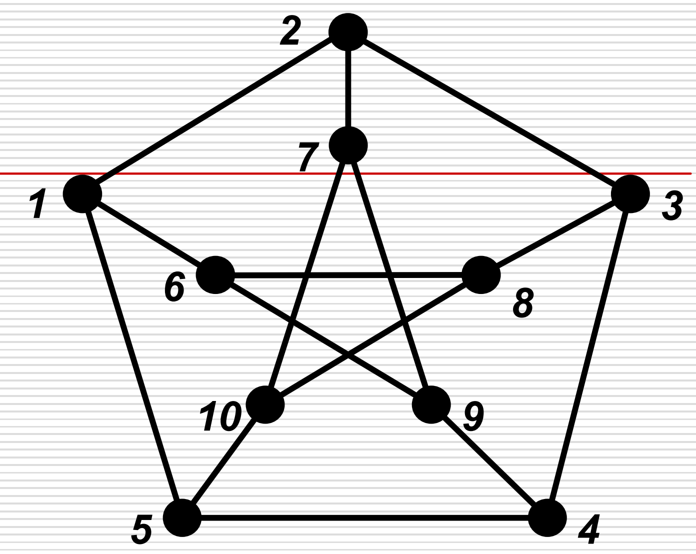
Αναπαράσταση Γραφημάτων

- … με **λίστα γειτνίασης**: γειτονικές κορυφές σε λίστα.
  - Αν έχουμε βάρη, τα αποθηκεύουμε στους κόμβους.
  - Χώρος Θ(m).
  - Έλεγχος για ύπαρξη ακμής σε χρόνο O(deg(u)).





Πίνακας Πρόσπτωσης



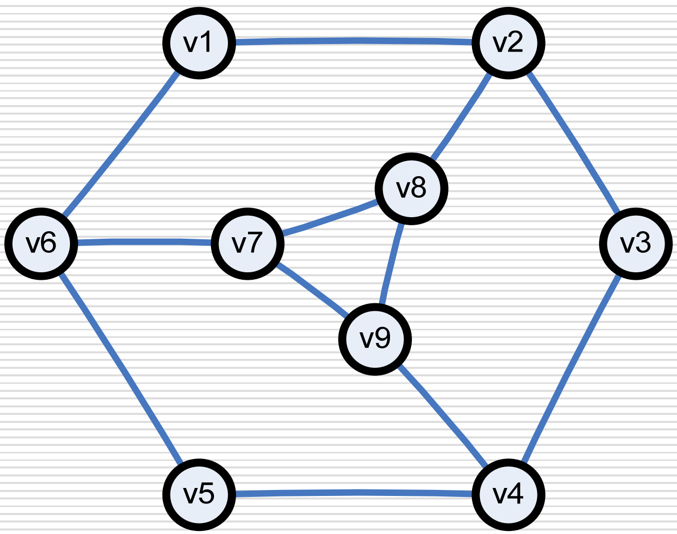
$$A[i,j] = \begin{cases} 1 & \text{αν } v_i \in e_j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

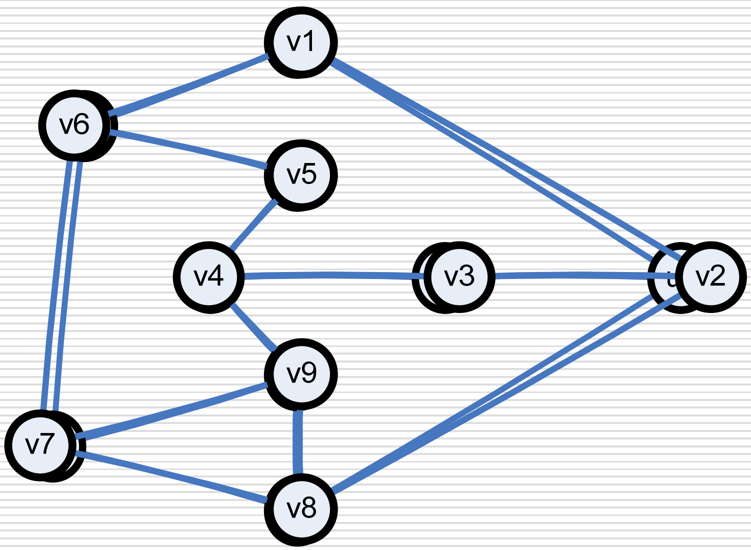
	1,2	1,5	1,6	2,3	2,7	3,4	3,8	4,5	4,9	5, 10	6,8	6,9	7,9	7, 10	8, 10
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1

Ισομορφικά Γραφήματα

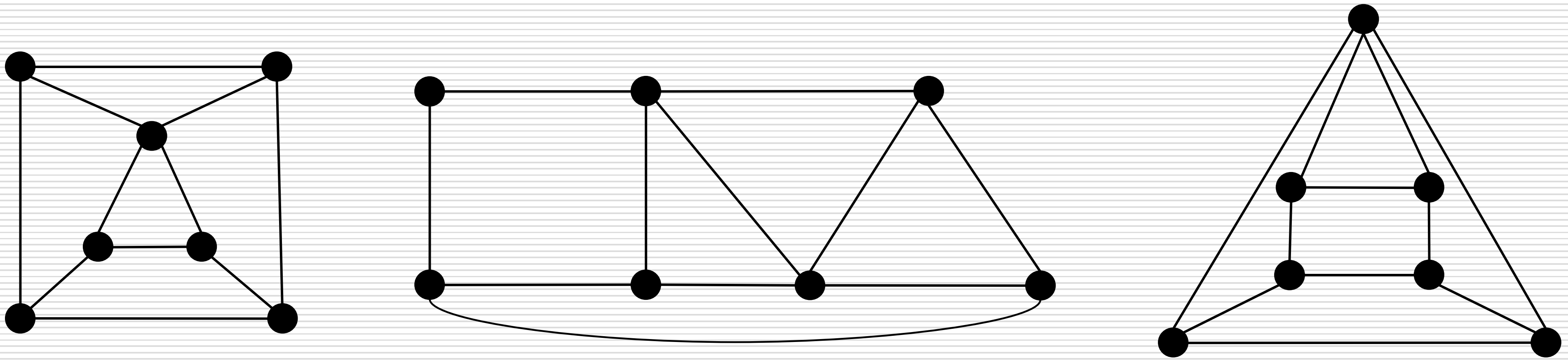
- Γραφήματα $G(V_G, E_G)$ και $H(V_H, E_H)$ είναι **ισομορφικά** ανν υπάρχει 1-1 και επί συνάρτηση $f: V_G \rightarrow V_H$ (ισομορφισμός) ώστε για κάθε $u, v \in V_G$, $\{u, v\} \in E_G$ ανν $\{f(u), f(v)\} \in E_H$
  - Υπάρχει αντιστοιχία κορυφών που διατηρεί τη γειτονικότητα.
  - Ισομορφισμός αποτελεί σχέση ισοδυναμίας.
- Αναλλοίωτη ιδιότητα: ισομορφικά γραφήματα «συμφωνούν».
  - Όλες οι σημαντικές ιδιότητες: #κορυφών, #ακμών, βαθμοί, συνεκτικότητα, κύκλος Euler και Hamilton, χρωματικός αριθμός, ...
- Πως αποδεικνύω ότι δύο γραφήματα ισομορφικά:
  - Βρίσκω ισομορφισμό και ελέγχω ότι διατηρεί γειτονικότητα.
  - Αποδεικνύω (με ισομορφισμό) ότι τα συμπληρωματικά τους είναι ισομορφικά.

Ισομορφικά Γραφήματα





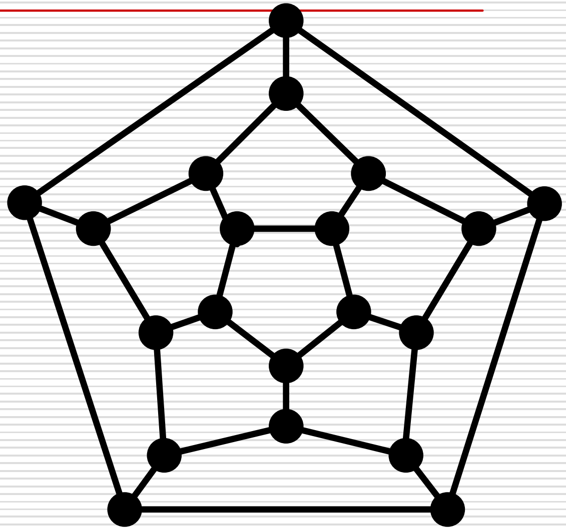
Ισομορφικά Γραφήματα



Ισομορφικά Γραφήματα

- Πως αποδεικνύω ότι δύο γραφήματα δεν είναι ισομορφικά:
  - Βρίσκω μια αναλλοίωτη ιδιότητα στην οποία «διαφωνούν».
- Αυτοσυμπληρωματικό γράφημα: ισομορφικό με το συμπληρωματικό του.
  - Αυτοσυμπληρωματικό γράφημα έχει $n(n-1)/4$ ακμές.
  - Αυτοσυμπληρωματικά γραφήματα υπάρχουν μόνο αν n ή $n-1$ είναι πολλαπλάσιο του 4.

Επίπεδα Γραφήματα



- Επίπεδο ένα γράφημα που **μπορεί** να ζωγραφιστεί στο επίπεδο χωρίς να τέμνονται οι ακμές του.
- Θεώρημα 4 χρωμάτων:
  - Επίπεδο γράφημα έχει χρωματικό αριθμό ≤ 4.
- Επίπεδη αποτύπωση ορίζει **όψεις** (faces).
  - Περιοχή επιπέδου που ορίζεται από (απλό) κύκλο και δεν μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερες όψεις.
  - **Εσωτερικές** και **εξωτερική** όψη.
  - f = #όψεων επίπεδου γραφήματος.
- Τύπος του Euler για συνεκτικά επίπεδα γραφ.: $n + f = m + 2$
  - #όψεων είναι αναλλοίωτη ιδιότητα, δεν εξαρτάται από αποτύπωση!

Επίπεδα Γραφήματα

- Μέγιστος αριθμός ακμών απλού επίπεδου γραφήματος.
  - Απλό: κάθε όψη ορίζεται από τουλάχιστον 3 ακμές.
  - Κάθε ακμή «ανήκει» σε μία ή δύο όψεις:
    - Αν ανήκει σε κύκλο: σύνορο δύο όψεων.
    - Διαφορετικά, «ανήκει» σε μία όψη.
  - (Κάθε ακυκλικό γράφημα είναι επίπεδο με μία όψη, την εξωτερική).

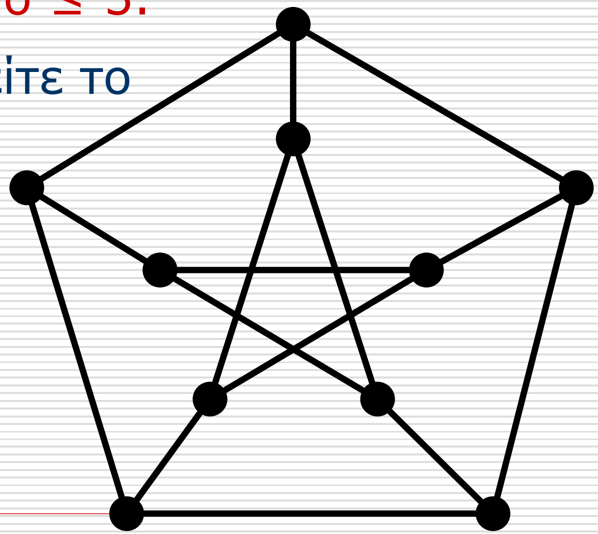
$$3f \leq \sum_{f \in \text{όψεις}} \#\boldsymbol{\text{ακμών}}(f) \leq 2m \Rightarrow f \leq 2m/3$$

$$m + 2 = n + f \leq n + 2m/3 \Rightarrow m/3 \leq n - 2 \Rightarrow m \leq 3n - 6$$

  - Υπάρχει συνεκτικό απλό επίπεδο γράφημα με m = 3n – 6.
    - Όλες του οι όψεις είναι τρίγωνα.
- Απλό **διμερές** επίπεδο γράφημα: m ≤ 2n – 4.

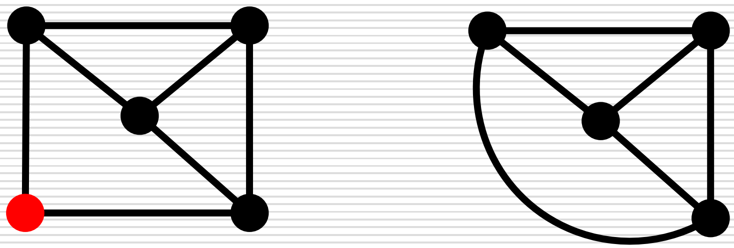
Επίπεδα Γραφήματα

- Άρα αν απλό γράφημα έχει $m > 3n-6$ ($m > 2n-4$ αν διμερές), **δεν** είναι επίπεδο.
  - Τα K_5 και $K_{3,3}$ **δεν** είναι επίπεδα.
  - Το συμπληρωματικό του γραφ. Petersen δεν είναι επίπεδο.
  - Απλό επίπεδο γράφημα περιέχει κορυφή βαθμού 5.
    - Π.χ. χρησιμοποιείται για να δείξουμε επαγωγικά ότι κάθε επίπεδο γράφημα έχει χρωματικό αριθμό ≤ 5.
  - Κάθε γράφημα G με $n \geq 11$ κορυφές, είτε το G είτε το συμπληρωματικό του δεν είναι επίπεδο.



Ομοιομορφικά Γραφήματα

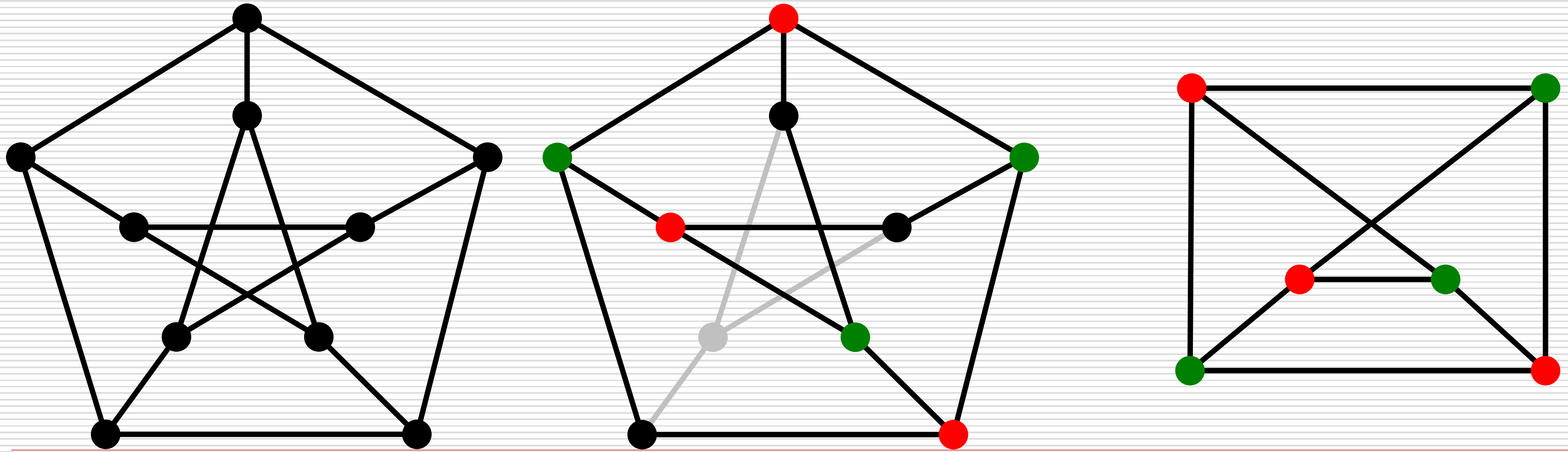
- **Απλοποίηση σειράς**: απαλοιφή κορυφών βαθμού 2 (δεν επηρεάζουν επιπεδότητα).



- Γραφήματα G και H ομοιομορφικά ανν μπορούν να καταλήξουν ισομορφικά με διαδοχική εφαρμογή απλοποιήσεων σειράς.
  - Ομοιομορφικά μπορούν να «διαφωνούν» σε αναλλοίωτες ιδιότητες, αλλά «συμφωνούν» σε **επιπεδότητα**.
  - Ομοιομορφικά «συμφωνούν» σε κύκλο Euler και κύκλο Hamilton;

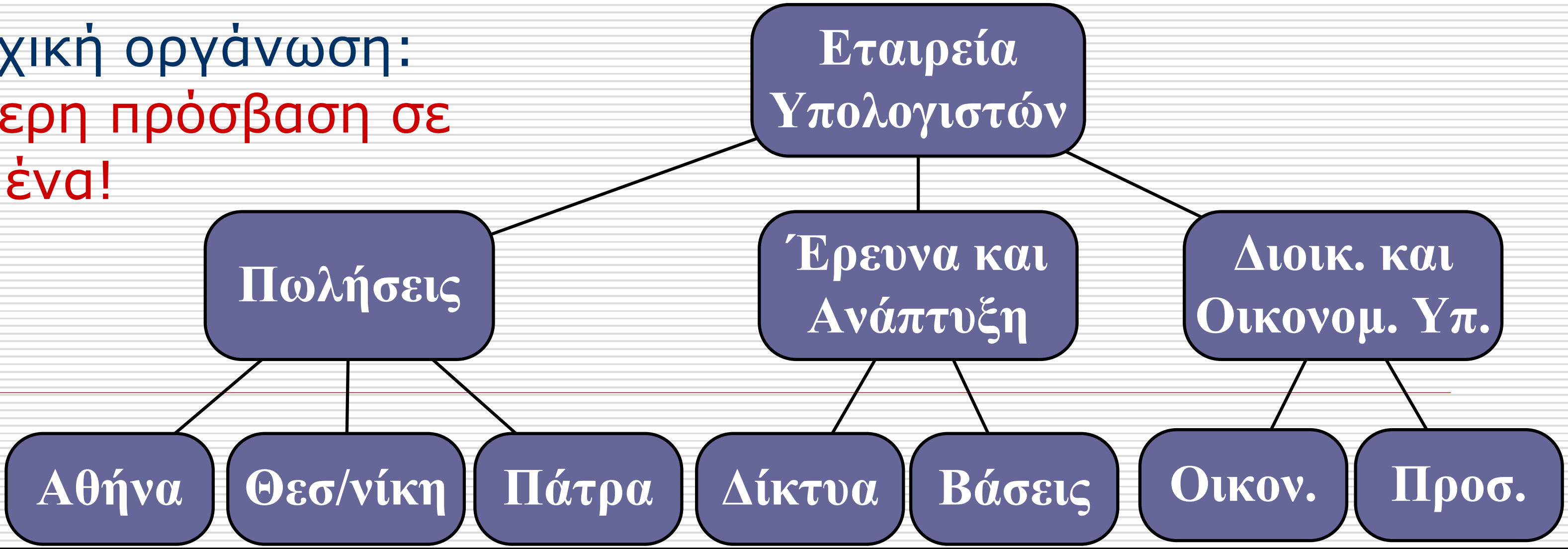
Θεώρημα Kuratowski

- **Θ. Kuratowski**: Γράφημα επίπεδο ανν δεν περιέχει υπογράφημα ομοιομορφικό με K_5 ή $K_{3,3}$.
  - Ένα γράφημα δεν είναι επίπεδο ανν μπορούμε με απλοποιήσεις (διαγραφές κορυφών και ακμών, απλοποιήσεις σειράς) να καταλήξουμε σε K_5 ή $K_{3,3}$.



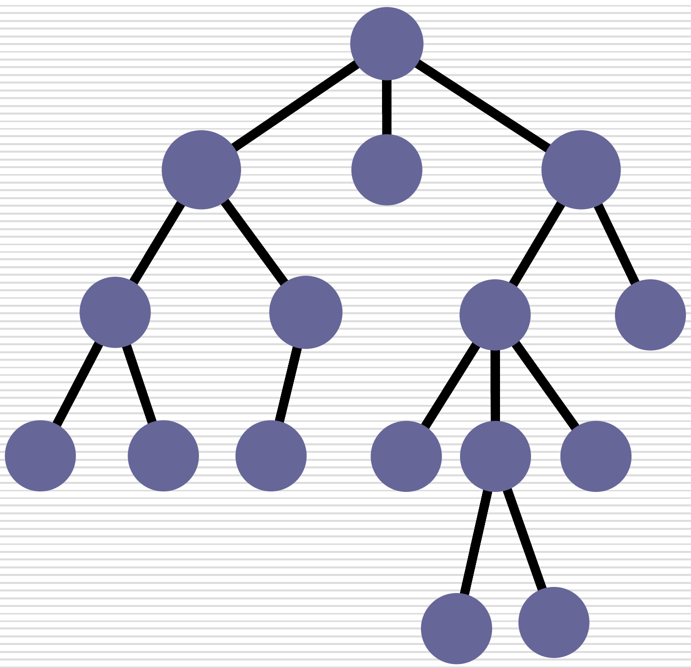
Δέντρα

- **Δέντρο:** μοντέλο ιεραρχικής δομής.
  - Αναπαράσταση (ιεραρχικών) σχέσεων: προγόνου-απογόνου, προϊσταμένου-υφισταμένου, όλου-μέρους, …
- Εφαρμογές:
  - Γενεαλογικά δέντρα.
  - Οργανόγραμμα επιχείρησης, ιεραρχία διοίκησης.
  - User interfaces, web sites, module hierarchy, δέντρα απόφασης, …
  - Ιεραρχική οργάνωση: ταχύτερη πρόσβαση σε δεδομένα!



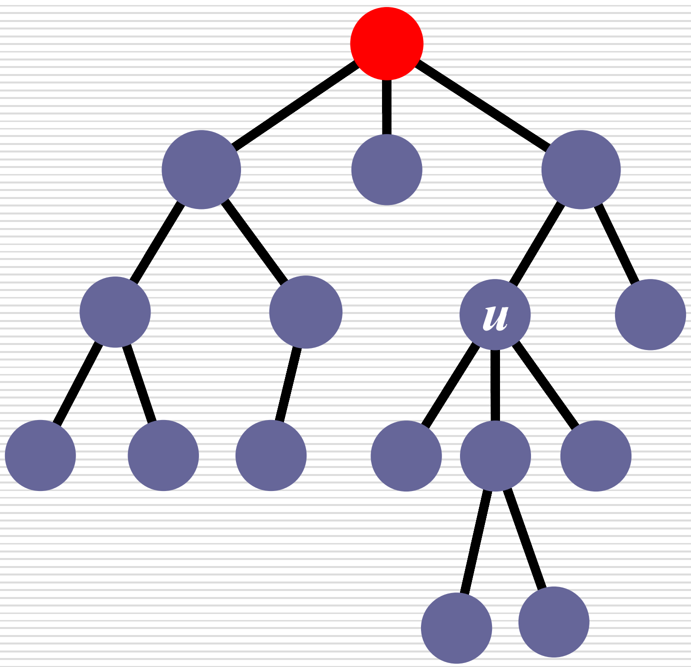
Δέντρα: Βασικές Ιδιότητες

- Γράφημα **ακυκλικό** και **συνεκτικό.**
- Τα παρακάτω είναι **ισοδύναμα** για κάθε απλό μη κατευθυνόμενο γράφημα G(V, E):
  - G είναι δέντρο.
  - Κάθε ζευγάρι κορυφών του G συνδέεται με μοναδικό μονοπάτι.
  - G ελαχιστικά συνεκτικό.
  - G συνεκτικό και |E| = |V|-1.
  - G ακυκλικό και |E| = |V|-1.
  - G μεγιστικά ακυκλικό.



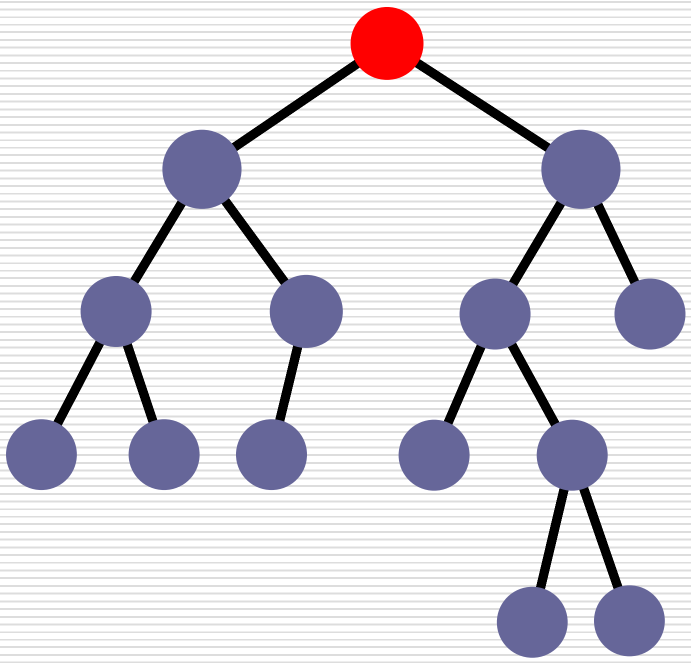
Δέντρα: Ορολογία

- Γράφημα **ακυκλικό** και **συνεκτικό.**
- Δέντρο με **n κορυφές** έχει **m = n – 1 ακμές.**
- **Ρίζα**: κόμβος χωρίς πρόγονο.
  - Δέντρο με **ρίζα** : **ιεραρχία**
- **Φύλλο**: κόμβος χωρίς απογόνους.
- **Πρόγονοι u**: κόμβοι στο (μοναδικό) μονοπάτι *u* προς ρίζα.
- **Απόγονοι u**: κόμβοι που έχουν ως πρόγονο το *u*.
- **Υποδέντρο u**: Δέντρο αποτελούμενο από *u* και απόγονούς του.



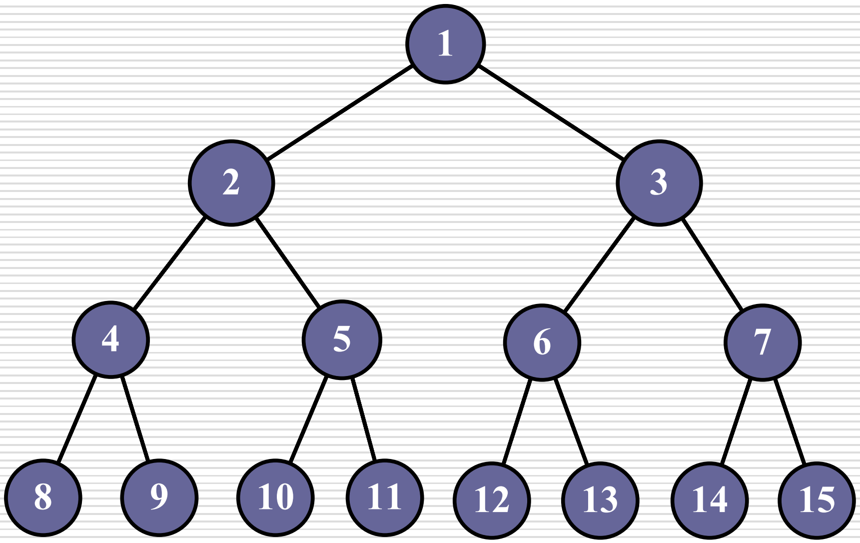
Δέντρα: Ορολογία

- **Επίπεδο u**: μήκος μονοπατιού από *u* προς ρίζα.
- **Ύψος**: μέγιστο επίπεδο κόμβου (φύλλου).
  - Μέγιστη απόσταση από ρίζα.
- **Βαθμός u**: αριθμός παιδιών u.
- **Δυαδικό δέντρο** : κάθε κορυφή **≤ 2 παιδιά**
  - Αριστερό και δεξιό.
- Κάθε **υποδέντρο** είναι δυαδικό δέντρο.



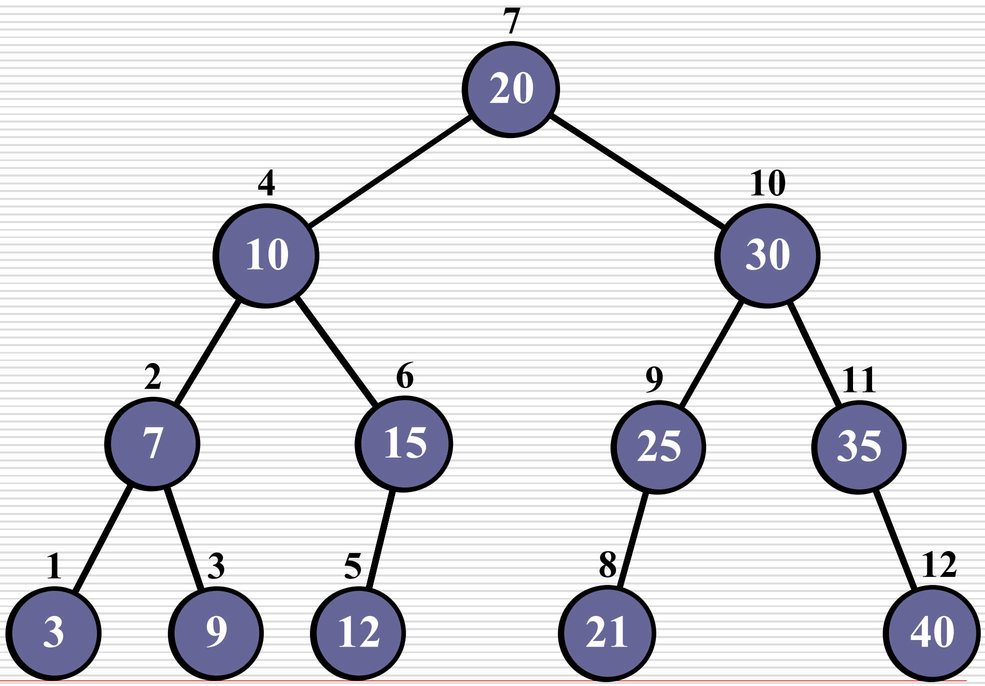
Δυαδικά Δέντρα

- **Ύψος *h*** :
  $h+1 \leq$ #κορυφών $\leq 2^{h+1} - 1$
  - $h+1$ επίπεδα, ≥ 1 κορ. / επίπ.
  - $\leq 2^{i}$ κορυφές στο επίπεδο i .
    $1 + 2 + \ldots + 2^{h} = 2^{h+1} - 1$
- **#κορυφών n** :
  $\log_2(n+1) - 1 \leq h \leq n - 1$
- **Πλήρες** (complete) : $n = 2^{h+1} - 1$



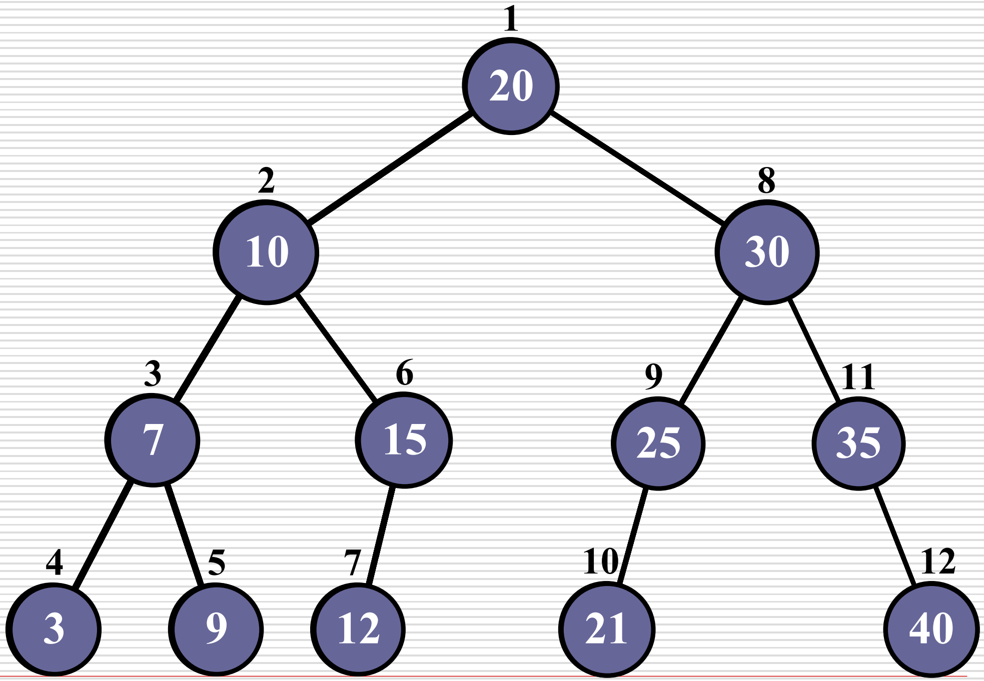
Inorder

- Ενδο-διατεταγμένη (inorder) διέλευση:
  - Αριστερό – Ρίζα – Δεξί.
  - Κόμβος εξετάζεται μετά από κόμβους αριστερού υποδέντρου και πριν από κόμβους δεξιού υποδέντρου.



Preorder

- **Προ**-διατεταγμένη (preorder) διέλευση:
  - Ρίζα – Αριστερό – Δεξί.
  - Κόμβος εξετάζεται πριν από κόμβους αριστερού και δεξιού υποδέντρου.



Postorder

- Μετα-διατεταγμένη (preorder) διέλευση:
  - Αριστερό – Δεξί – Ρίζα
  - Κόμβος εξετάζεται μετά από κόμβους αριστερού και δεξιού υποδέντρου.