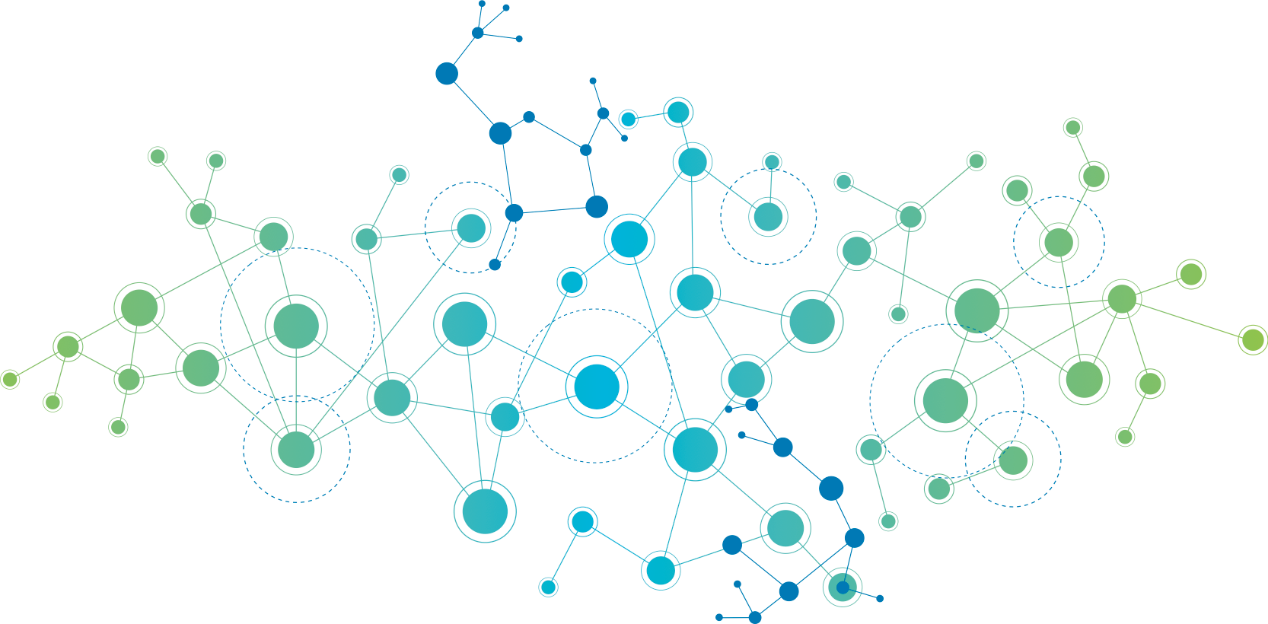
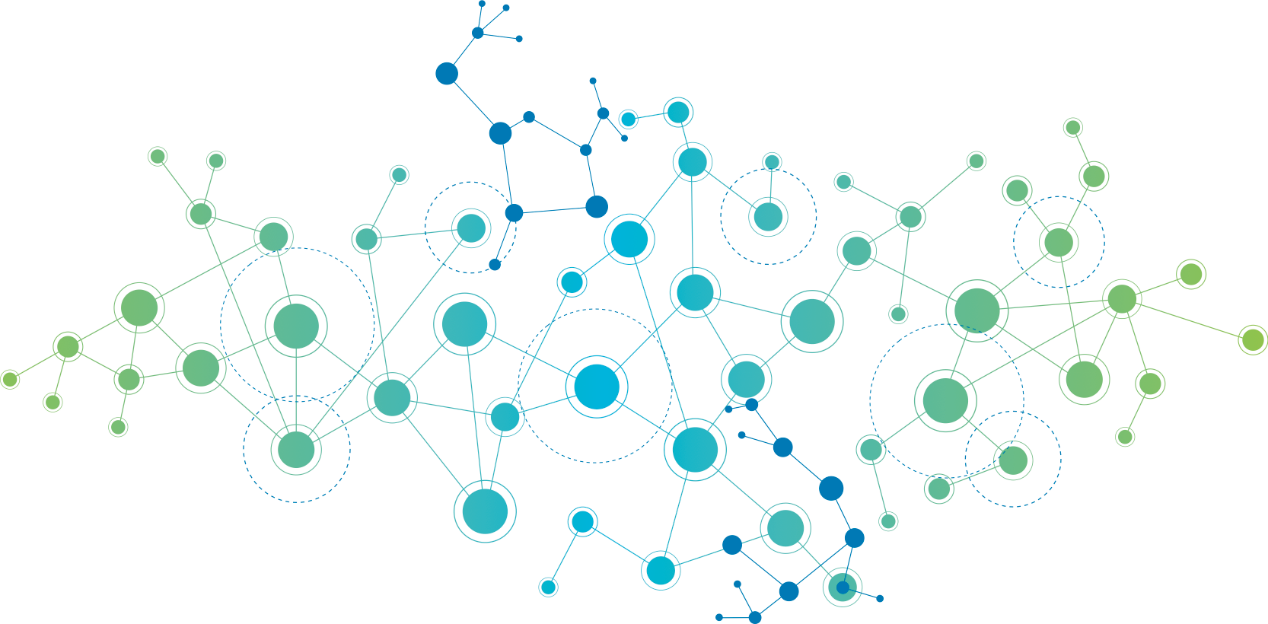
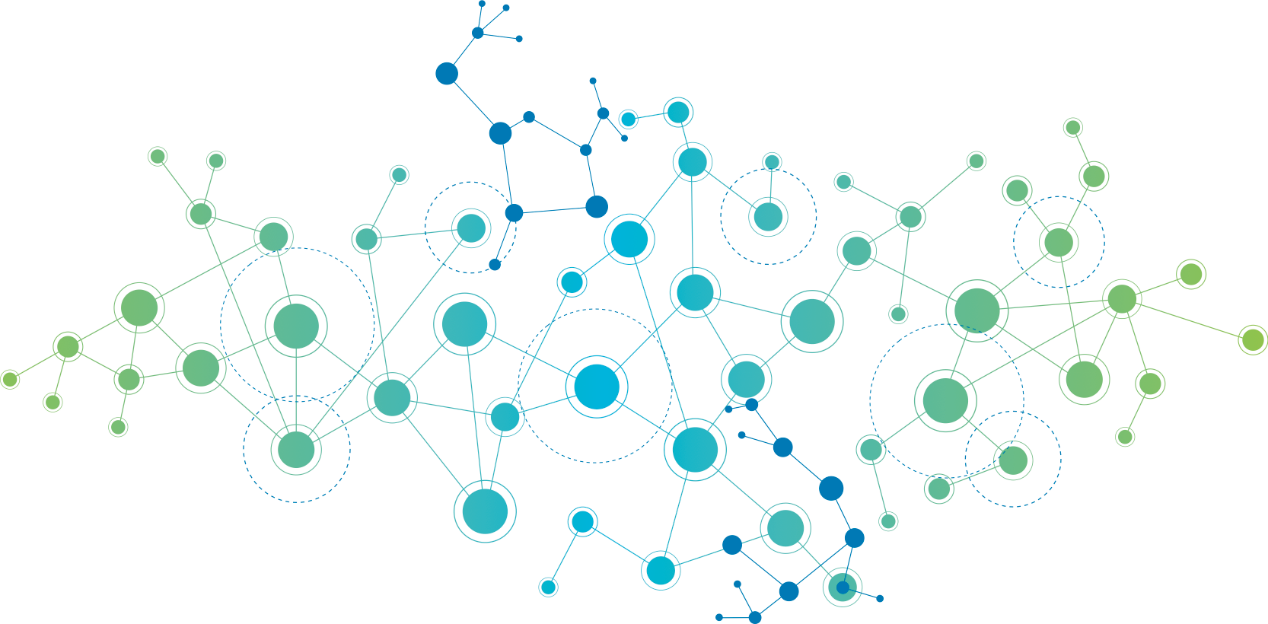
****

****

**Αλγόριθμοι Χρωματισμού Γραφημάτων**

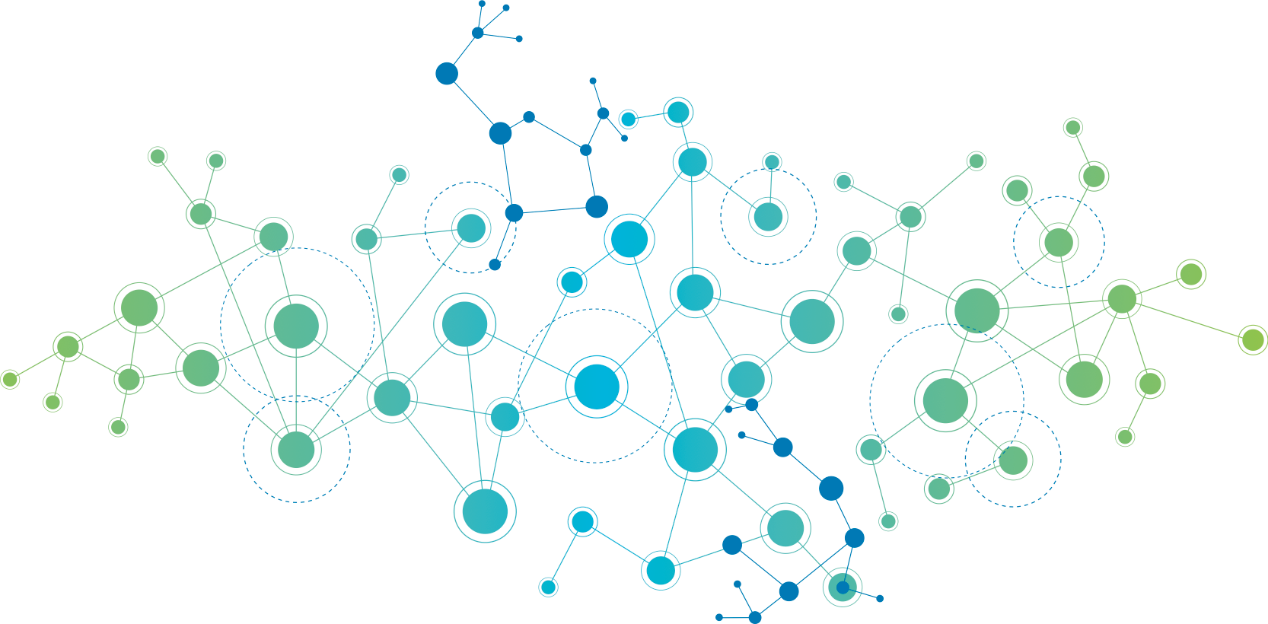
**Αλγόριθμοι και Πολυπλοκότητα**

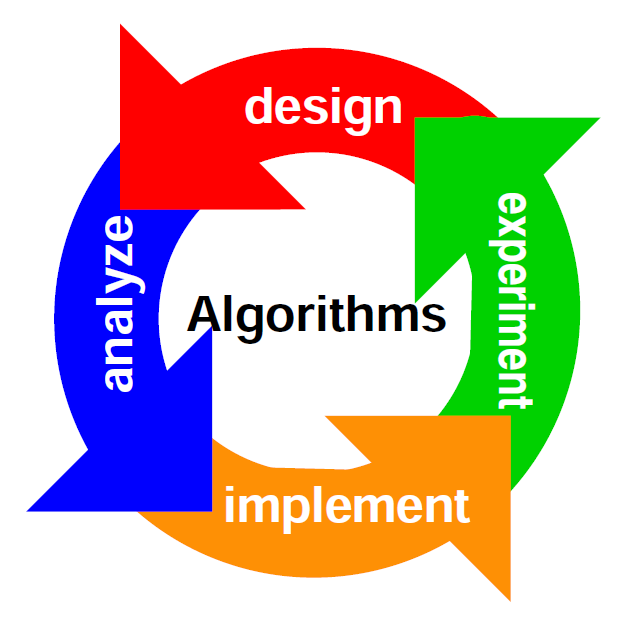
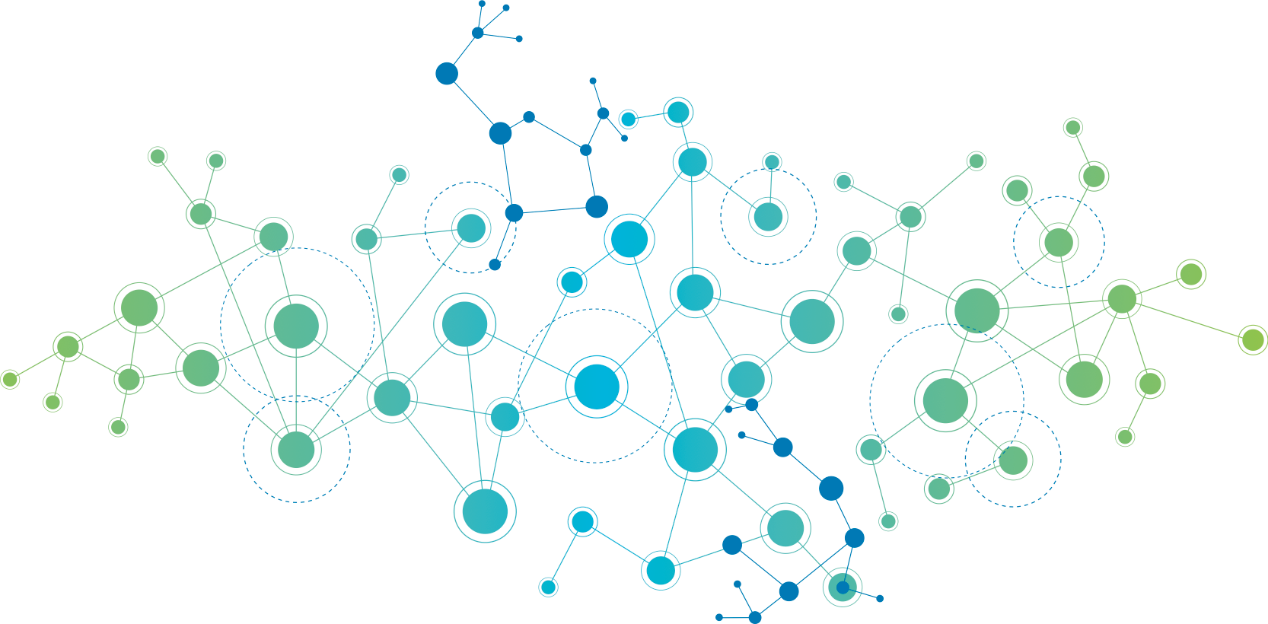
**Κωνσταντίνος Σακκάς**

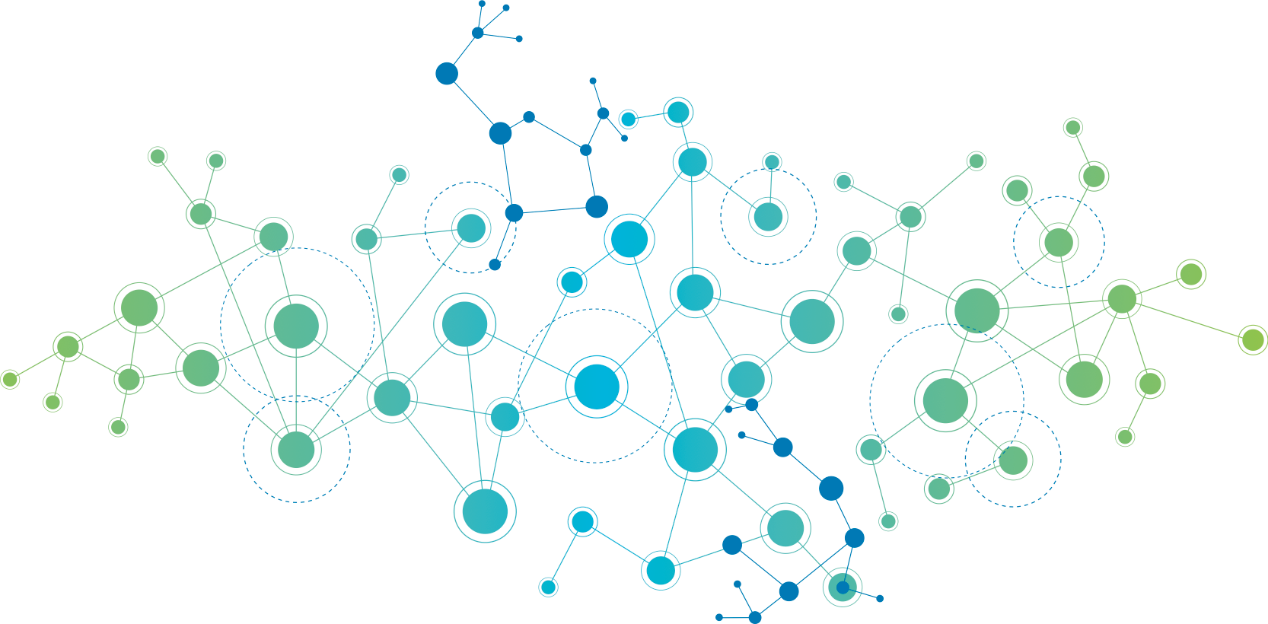
**ΑΜ: 15799 (παλιό), 1549 (νέο)**

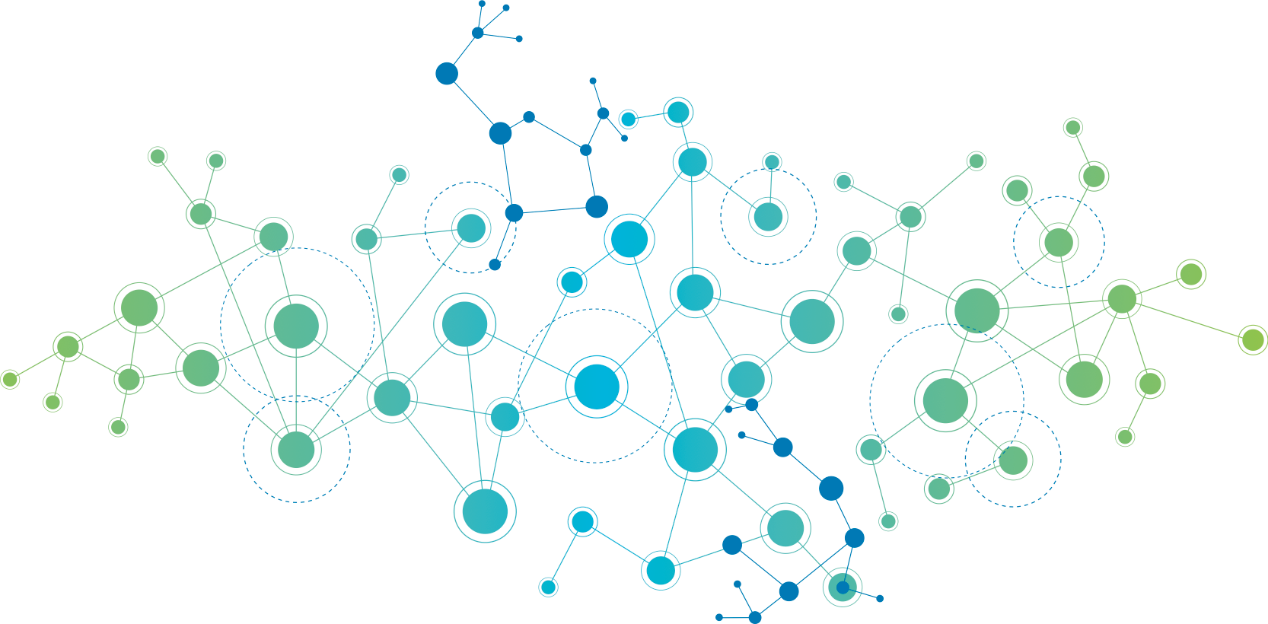
[**ksakkas@uoi.gr**](mailto:ksakkas@uoi.gr)

[**http://myweb.dit.uoi.gr/ksakkas/mysite/**](http://myweb.dit.uoi.gr/ksakkas/mysite/)

****

****

****

****

# **Περίληψη:**

Το πρόβλημα του χρωματισμού γραφήματος είναι ένα NP-hard πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης.

Αφορά την ανάθεση ενός χρώματος σε κάθε κορυφή ενός γραφήματος έτσι ώστε γειτονικές κορυφές να χρωματίζονται με διαφορετικό χρώμα, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται ο ελάχιστος αριθμός διαφορετικών χρωμάτων.

Στην παρούσα εργασία ζητείται η υλοποίηση τεσσάρων αλγορίθμων χρωματισμού γραφημάτων και η εφαρμογή τους σε γνωστά προβλήματα από τη βιβλιογραφία.

**Περιεχόμενα**

[**Περίληψη:** 2](#_Toc61802073)

[**1.** **ΕΙΣΑΓΩΓΗ (ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ NP-COMPLETE)** 4](#_Toc61802074)

[**1.1** **Η Κλάση Ρ** 4](#_Toc61802075)

[**1.2** **Η Κλάση ΝΡ** 4](#_Toc61802076)

[**1.3** **P vs. NP** 5](#_Toc61802077)

[**1.4** **NP-Complete (ΝP-Πλήρες)** 5](#_Toc61802078)

[**2.** **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ** 6](#_Toc61802079)

[**3.** **ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ** 7](#_Toc61802080)

[**3.1** **ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (Toronto datasets)** 7](#_Toc61802081)

[**3.2** **ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ** 8](#_Toc61802082)

[**4.** **ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ** 10](#_Toc61802083)

[**4.1** **FIRST FIT** 10](#_Toc61802084)

[**4.2** **DSATUR** 10](#_Toc61802085)

[**4.3** **RLF** 10](#_Toc61802086)

[**4.4** **Backtracking Dsatur** 10](#_Toc61802087)

[**4.5** **Μαζική επίλυση προβλημάτων** 11](#_Toc61802088)

[**5.** **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (LINK)** 12](#_Toc61802089)

[**5.1** **Στατιστικά Αρχείων .stu** 12](#_Toc61802090)

[**5.2** **FIRST FIT** 13](#_Toc61802091)

[**5.3** **DSATUR** 14](#_Toc61802092)

[**Αναφορές** 15](#_Toc61802093)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Αποτέλεσμα εικόνας για Attribution icon  **Copyright © 2021 Κωνσταντίνος Σακκάς. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος** | Αποτέλεσμα εικόνας για no derivative works symbol | Αποτέλεσμα εικόνας για gdpr icon |

# **ΕΙΣΑΓΩΓΗ (ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ NP-COMPLETE)**

## **Η Κλάση Ρ**

Η Κλάση Ρ(olynomial): Περιλαμβάνει τα προβλήματα που επιλύονται (αποφασίζονται) από κάποιο αλγόριθμο εντός πολυωνυμικού χρόνου.

Στην ουσία έχουμε συνδέσει την έννοια της αποδοτικότητας με την κλάση P. Η σύνδεση αυτή βασίζεται στην παρατήρηση ότι ένας πολυωνυμικός αλγόριθμος για ένα πρόβλημα βασίζεται σε κάποια βαθύτερη ιδιότητα του προβλήματος που επιτρέπει τη γρήγορη επίλυσή του αποφεύγοντας την λύση της εξαντλητικής αναζήτησης (brute force) που για τυπικά προβλήματα είναι εκθετικής πολυπλοκότητας. Για παράδειγμα, η εύρεση ενός ελάχιστου ζευγνύοντος δένδρου γίνεται σε πολυωνυμικό χρόνο, αφού μπορεί να εφαρμοσθεί η μέθοδος της απληστίας. (∆ούρος, 2012) (Ζισσιμόπουλος, -)

## **Η Κλάση ΝΡ**

Περιλαμβάνει τα προβλήματα που μπορούν να επαληθευτούν εντός πολυωνυμικού χρόνου.

Η κλάση πολυπλοκότητας NP αντιστοιχεί σε όλα τα προβλήματα για τα οποία υπάρχει πολυωνυμικός ανταιτιοκρατικός (non-deterministic) αλγόριθμος. Υπάρχει όμως ένας ισοδύναμος ορισμός που είναι εξαιρετικά πιο διαισθητικός και δείχνει ακριβώς τη σημασία αυτής της κλάσης πολυπλοκότητας. Ένα πρόβλημα P ανήκει στην κλάση N P αν έχει την ιδιότητα της πολυωνυμικής επαληθευσιμότητας. Για παράδειγμα, το πρόβλημα της ύπαρξης Hamiltonian κυκλώματος (HAMiltonian Circle - HAMC) ορίζεται ως εξής:

*Δοθέντος ενός μη-κατευθυνόμενου γραφήματος G = (V, E), να βρεθεί αν υπάρχει Hamiltonian κύκλωμα W στο G.* (∆ούρος, 2012)(Ζισσιμόπουλος, -)

## **P vs. NP**

Το πρόβλημα P vs. NP είναι ΤΟ ανοιχτό πρόβλημα στο χώρο της θεωρητικής Πληροφορικής.

99,99999…9% η σωστή απάντηση είναι ότι P≠NP

Κανένας όμως μέχρι σήμερα δεν έχει καταφέρει να το αποδείξει και να πείσει την επιστημονική κοινότητα ότι το απέδειξε σωστά.

0,000…0001% είναι η πιθανότητα η σωστή απάντηση να είναι P=NP. (∆ούρος, 2012)

## **NP-Complete (ΝP-Πλήρες)**

Ανήκει στην κλάση NP

– Όλα τα υπόλοιπα προβλήματα της κλάσης NP ανάγονται (πολυωνυμικά) σε αυτό.

«Ένα πρόβλημα Α ανάγεται σε ένα πρόβλημα Β»

– Το Α ανήκει στην κλάση NP

– To Β ανήκει στην κλάση NPComplete

– To A δεν είναι πιο δύσκολο από το Β

Για να δείξουμε, λοιπόν, ότι ένα πρόβλημα Π είναι NP-πλήρες θα πρέπει να δείξουμε ότι ανήκει στην κλάση NP κατασκευάζοντας έναν πολυωνυμικό επαληθευτή και έπειτα να δείξουμε ότι κάθε πρόβλημα στην κλάση NP ανάγεται στο Π. Το δεύτερο μέρος, όμως, είναι αρκετά πολύπλοκο και για αυτό το λόγο αν αποδείξουμε ότι ισχύει για ένα πρόβλημα, έπειτα κάνοντας αναγωγές από αυτό θα αποδεικνύουμε ότι και άλλα προβλήματα είναι NP-πλήρη. Το γνωστό θεώρημα των Cook-Levin δίνει το πρώτο τέτοιο πρόβλημα που είναι NP-πλήρες. (Ζισσιμόπουλος, -) (∆ούρος, 2012) (Βικιπαίδεια, 2020)

## **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ**

Το πρόβλημα χρωματισμού ακμών διερευνά αν είναι εφικτό να χρωματίσουμε τις ακμές ενός δοθέντος γραφήματος χρησιμοποιώντας μέχρι κ διαφορετικά χρώματα, όπου κ μια δεδομένη τιμή, ή με όσο το δυνατόν λιγότερα χρώματα. Ο ελάχιστος αριθμός χρωμάτων για τις ακμές ενός δοθέντος γραφήματος ονομάζεται χρωματικός δείκτης του γραφήματος.

Το πρόβλημα χρωματισμού γραφήματος τυπικά ορίζεται ως εξής. Δεδομένου ενός μη κατευθυνόμενου απλού γραφήματος G = (V, E) με ένα σύνολο κορυφών V και ένα σύνολο ακμών E, ζητείται η ανάθεση σε κάθε κορυφή v ∈ V ενός ακεραίου c(v) ∈ {1, 2, ..., k} έτσι ώστε το k να ελαχιστοποιείται και να ισχύει ότι c(v) ≠ c(u) ∀{v, u} ∈ E. Το πρόβλημα συναντάται σε μεγάλο αριθμό πρακτικών εφαρμογών όπως ο χρονοπρογραμ‐ ματισμός εκπαιδευτικών ιδρυμάτων (educational timetabling), ο χρονοπογραμματισμός αθλητι‐ κών γεγονότων (sports scheduling), η ανάθεση συχνοτήτων (frequency assignment), η ανάθεση καταχωρητών στους μεταγλωττιστές (compiler register allocation) και άλλα. Πολλοί αλγόριθμοι χρωματισμού γραφημάτων έχουν προταθεί τα τελευταία 50 έτη. Στην πα‐ ρούσα εργασία θα εξεταστούν τέσσερις αλγόριθμοι που ανήκουν στις λεγόμενες κατασκευαστι‐ κές τεχνικές (constructive techniques). Οι κατασκευαστικές τεχνικές δημιουργούν λύσεις βήμα προς βήμα, αναθέτοντας στη σειρά, σε κάθε κορυφή, ένα χρώμα, πιθανά εφαρμόζοντας οπι‐ σθοχώρηση κατά τη διαδικασία. Οι αλγόριθμοι που θα εξεταστούν είναι ο αλγόριθμος first fit, ο αλγόριθμος DSATUR, ο αλγόριθμος Recursive Largest First και ο αλγόριθμος backtracking DSATUR. Πληροφορίες για τους ανωτέρω αλγορίθμους μπορούν να βρεθούν στο άρθρο [LTMG12] καθώς και στις αναφορές του ίδιου άρθρου. (Γκόγκος , 2021) (Wikipedia, 2020)

# **ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ**

## **ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (Toronto datasets)**

Το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού εξετάσεων αφορά φοιτητές που έχουν πραγματοποιήσει εγγραφές σε εξετάσεις μαθημάτων. Για κάθε εξέταση διατίθεται μια λίστα από φοιτητές και κάθε φοιτητής μπορεί να είναι εγγεγραμμένος σε μια ή περισσότερες εξετάσεις. Κάθε εξέταση θα πρέπει να τοποθετηθεί σε μια περίοδο εξέτασης και η λύση του προβλήματος συνίσταται στην ανάθεση όλων των εξετάσεων στο μικρότερο δυνατό αριθμό περιόδων έτσι ώστε να μην υπάρχουν συγκρούσεις, δηλαδή να μην υπάρχουν φοιτητές που θα έπρεπε να συμμετάσχουν σε εξετάσεις σε περισσότερα του ενός μαθήματα στην ίδια περίοδο.

Ως δεδομένα του προβλήματος θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού εξετάσεων Toronto τα οποία είναι διαθέσιμα προς μεταφόρτωση στη διεύθυνση https://github.com/chgogos/datasets/blob/main/UETT/toronto.zip. Τα δεδομένα Toronto αποτελούνται από 13 προβλήματα και πληροφορίες για κάθε πρόβλημα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Τα αρχεία δεδομένων (κατάληξη .stu) διαθέτουν για κάθε σπουδαστή μια γραμμή που περιέχει τους αριθμούς των μαθημάτων στα οποία είναι εγγεγραμμένος χωρισμένους μεταξύ τους με κενά. Η πρώτη γραμμή του αρχείου αντιστοιχεί στον πρώτο σπουδαστή, η δεύτερη γραμμή στο δεύτερο σπουδαστή κ.ο.κ. Για παράδειγμα το αρχείο car‐f‐92.stu περιέχει 18419 σειρές δεδομένων και ξεκινά με τις ακόλουθες σειρές:

0170

0156

0281

0006

0154 0156

0383

0534 0535 0536

0275

0091 0160 0164

...

που σημαίνουν ότι ο φοιτητής 1 έχει εγγραφεί στο μάθημα 0170, ο φοιτητής 2 έχει εγγραφεί στο μάθημα 0156, ο φοιτητής 3 έχει εγγραφεί στο μάθημα 0281, ο φοιτητής 4 έχει εγγραφεί στο μάθημα 0006, ο φοιτητής 5 στα μαθήματα 0154 0156 κ.ο.κ (Γκόγκος , 2021)

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Πρόβλημα** | **Αρχείo Δεδομένων** | **Εξετάσεις** | **Φοιτητές** | **Εγγραφές** |
| **car‐f‐92** | **car‐f‐92.stu** | **543** | **18419** | **55522** |
| **car‐s‐91** | **car‐s‐91.stu** | **682** | **16925** | **56877** |
| **ear‐f‐83** | **ear‐f‐83.stu** | **190** | **1125** | **8109** |
| **hec‐s‐92** | **hec‐s‐92.stu** | **81** | **2823** | **10632** |
| **kfu‐s‐93** | **kfu‐s‐93.stu** | **461** | **5349** | **25113** |
| **lse‐f‐91** | **lse‐f‐91.stu** | **381** | **2726** | **10918** |
| **pur‐s‐93** | **pur‐s‐93.stu** | **2419** | **30029** | **120681** |
| **rye‐s‐93** | **rye‐s‐93.stu** | **486** | **11483** | **45051** |
| **sta‐f‐83** | **sta‐f‐83.stu** | **139** | **611** | **5751** |
| **tre‐s‐92** | **tre‐s‐92.stu** | **261** | **4360** | **14901** |
| **uta‐s‐92** | **uta‐s‐92.stu** | **622** | **21266** | **58979** |
| **ute‐s‐92** | **ute‐s‐92.stu** | **184** | **2749** | **11793** |
| **yor‐f‐83** | **yor‐f‐83.stu** | **181** | **941** | **6034** |

Θα εμφανίζονται τα ακόλουθα στατιστικά στοιχεία για καθένα από τα 13 προβλήματα του

**Toronto dataset:**

1. Αριθμός κορυφών.

2. Πυκνότητα. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας θα πρέπει να κατασκευαστεί ο πίνακας συγκρούσεων. Ο πίνακας συγκρούσεων είναι ένας δισδιάστατος πίνακας c στον οποίο κάθε στοιχείο cij = 1 αν η εξέταση i βρίσκεται σε σύγκρουση με την εξέταση j ενώ ισχύει ότι cij = 0 σε άλλη περίπτωση. Η πυκνότητα συγκρούσεων υπολογίζεται διαιρώντας τον αριθμό των στοιχείων του πίνακα συγκρούσεων που έχουν την τιμή 1 με το συνολικό πλήθος των στοιχείων του πίνακα.

3. Για τους βαθμούς (degrees) των κορυφών η ελάχιστη τιμή (min), η διάμεσος τιμή (median), η μέγιστη τιμή (max), η μέση τιμή (mean) καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (CV=coefficient of variation) που ορίζεται ως η τυπική απόκλιση προς τη μέση τιμή.

Τα αποτελέσματα θα πρέπει να είναι παρόμοια με τις τιμές του Table 1 από το [LTMG12] στη σελίδα 17. (Γκόγκος , 2021)

# **ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

## **FIRST FIT**

Θα ζητείται η επιλογή ενός από τα διαθέσιμα προβλήματα και θα επιλύεται με τη μέθοδο first fit. Ο αλγόριθμος first fit είναι ένας άπληστος (greedy) αλγόριθμος που λαμβάνει κάθε κορυφή και την αναθέτει στο μικρότερο αριθμό χρώματος που δεν προκαλεί σύγκρουση, δημιουργώντας νέα χρώματα όταν χρειάζεται. Οι κορυφές μπορούν αρχικά να ταξινομηθούν σε φθίνουσα σειρά βαθμού, όπως έχει προταθεί στο [WP67] και ο χρωματισμός των κορυφών να γίνει από την κορυφή με τον υψηλότερο βαθμό προς την κορυφή με το χαμηλότερο βαθμό.

## **DSATUR**

Θα ζητείται η επιλογή ενός από τα διαθέσιμα προβλήματα και θα επιλύεται με τον αλγόριθμο DSATUR. Ο αλγόριθμος DSATUR [Bré79] καθορίζει δυναμικά την επόμενη κορυφή που θαχρωματιστεί επιλέγοντας ανάμεσα στις κορυφές που δεν είναι χρωματισμένες εκείνη που κάθε φορά έχει το μεγαλύτερο αριθμό διαφορετικών χρωμάτων σε γειτονικές κορυφές.

## **RLF**

Θα ζητείται η επιλογή ενός από τα διαθέσιμα προβλήματα και θα επιλύεται με τον αλγόριθμο Recursive Largest First που περιγράφεται στο [LTMG12] καθώς και στο [Lei79].

## **Backtracking Dsatur**

Θα ζητείται η επιλογή ενός από τα διαθέσιμα προβλήματα και θα επιλύεται με τη μέθοδο backtracking DSATUR που περιγράφεται στο [LTMG12].

## **Μαζική επίλυση προβλημάτων**

Θα επιλύονται όλα τα προβλήματα Toronto (13) με όλους τους διαθέσιμους τρόπους επίλυ‐σης (4), δηλαδή θα παράγονται 13×4 = 52 σειρές αποτελεσμάτων που θα αναφέρουν το όνομα του προβλήματος, τη μέθοδο επίλυσης και τον αριθμό χρωμάτων που χρειάστηκαν. (Γκόγκος , 2021)

# **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (**[**LINK**](http://myweb.dit.uoi.gr/ksakkas/mysite/stats.html)**)**

## **Στατιστικά Αρχείων .stu**

[Εικόνα που περιέχει πίνακας

Περιγραφή που δημιουργήθηκε αυτόματα](http://myweb.dit.uoi.gr/ksakkas/mysite/stats.html)

## **FIRST FIT**

[Εικόνα που περιέχει πίνακας

Περιγραφή που δημιουργήθηκε αυτόματα](http://myweb.dit.uoi.gr/ksakkas/mysite/stats.html)

## **DSATUR**

[Εικόνα που περιέχει πίνακας

Περιγραφή που δημιουργήθηκε αυτόματα](http://myweb.dit.uoi.gr/ksakkas/mysite/stats.html)

# **Αναφορές**

∆ούρος, Β. (2012, Ιούνιος 11). *Κλάση NP, NP-Complete.* Ανάκτηση από http://www2.aueb.gr/: http://www2.aueb.gr/users/douros/algorithms/tutorials\_2012/14\_frontistirio\_complete.pdf

Wikipedia. (2020, Δεκέμβριος 19). *Graph coloring.* Ανάκτηση από en.wikipedia.org/: https://en.wikipedia.org/wiki/Graph\_coloring

Βικιπαίδεια. (2020, Οκτώμβριος 18). *Πρόβλημα P=NP.* Ανάκτηση από el.wikipedia.org/: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%81%CF%8C%CE%B2%CE%BB%CE%B7%CE%BC%CE%B1\_P%3DNP

Γκόγκος , Χ. (2021). *Αλγόριθμοι και Πολυπλοκότητα.* Ανάκτηση από github.com/chgogos/alco: https://github.com/chgogos/alco

Ζισσιμόπουλος, Β. (-). *Η κλάση NP.* Ανάκτηση από http://cgi.di.uoa.gr/: http://cgi.di.uoa.gr/~vassilis/ac/12L30-NPcompleteness.pdf