Módszerek és eszközök a kriptográfia oktatásakor

Márton Gyöngyvér

mgyongyi@ms.sapientia.ro
Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Románia

Absztrakt. Digitális világunkban naponta találkozunk olyan alkalmazásokkal melyek több-bé-kevésbé kapcsolódnak a kriptográfiához. Éppen ezért fontos megismernünk, hogy ezek hátterében milyen tudományos elméletek állnak. Jelen dolgozat témája olyan korszerű matematikai és informatikai eszközök és módszerek szemléltetése, melyek mind a felsőfokú oktatásban, mind a középiskolában is alkalmazhatóak a kriptográfiai ismeretek elsajátítása érdekében.

1. Bevezető

Mint minden tantárgy oktatásánál, a kriptográfiai ismeretek elsajátításához is hasznos valamely már létező szoftver, könyvtárcsomag alkalmazása. Ennek megválasztásában fontos szerepet játszanak a minőségi és anyagi tényezők. A Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetemen is fontosak voltak ezen szempontok, amikor a gyakorlati órákon alkalmas szoftvert választottuk ki.

Talán a legközismertebb, de nálunk mégis kevésbé elterjedt szoftver a CrypTool, ([6]), melyet a németországi Darmstadt Egyetemen kezdtek el fejleszteni a Deutsche Bank felkérésére. A kezdeti cél az volt, hogy a bank a kliensei számára az adatbiztonsághoz kapcsolódó fogalmakat közérthetővé tegye. Azóta ezt a szoftvert számos egyetemen, középiskolában alkalmazzák a kriptográfiai ismeretek elsajátítására és ezen egyetemi központok közül sokan részt is vállalnak a továbbfejlesztésben. A szoftverben lehetőség van rejtjelezésre, visszafejtésre, digitális aláírás generálására, protokollok lépésenkénti végigkövetésére, kriptoanalízis kivitelezésére. Természetesen grafikus felülettel és részletes help-pel rendelkezik, mely tartalmazza a kriptográfiához szükséges matematikai ismeretek leírását, illetve a szoftver kezeléséhez szükséges ismereteket.

A kriptográfiai alapfogalmak elsajátítása történhet tehát egy specifikus szoftver alkalmazásával, de emellett fontos az alapalgoritmusokat valamely programozási nyelvben megírni, tesztelni, futtatni. Ehhez egy olyan programozási nyelv kell, amelyben a nagy számok kezelése nem jelent problémát, hiszen számos kriptográfiai algoritmusban több száz bites számokat kell kezelni. Nagy számok kezelésére alkalmas, szintén ingyenes könyvtárcsomag a C programozási nyelvhez a MIRACL, lásd [5], amit a CrypTool-ban is alkalmaznak a nagy számok aritmetikájához. Ezt a könyvtárcsomagot Windows és Linux alatt is lehet használni. Azoknak pedig, akik Javában szeretnek programozni, ott van az egyszerűen kezelhető BigInteger beépített osztály.

Kriptográfiai algoritmusok programozásához alkalmazhatóak még funkcionális programozási nyelvek is, például a Clean, ([4]) vagy Haskell, ([8]). Mindkettő esetében a nagy számok aritmetikájához szükséges műveletek egy könnyen kezelhető könyvtárcsomagban érhetőek el. Ezen nyelvek szintaxisa viszonylag egyszerűen elsajátítható és a kriptográfiai primitívek programozása legtöbb esetben követi a matematikai jelölésrendszert.

A fent említett módszerek mellett egy igazán szemléltető módszert Koblitz alkalmaz, mikor a nagyközönségnek számítógép használata nélkül magyarázza a nyilvános kulcsú kriptográfia működési elvét, ([3]).

Ebben dolgozatban ezen eszközöket és módszereket mutatjuk be részletesebben.

2. A CrypTool

A kriptográfia azok körében is nagy érdeklődésnek örvend, akik nem rendelkeznek a szükséges matematikai ismeretekkel, hiszen a kriptográfia most is - és már a kezdetekben is - a titok tudománya volt. A titok megfejtése pedig köztudottan mindenki számára izgalmas játék. Ezt a fajta misztériumot ki lehet és ki is kell használni, mikor a kriptográfia oktatását elkezdjük. Egy rendszer feltörése, akkor is ha a rendszer napjainkban már nem használatos, a diák előtt sokkal nagyobb sikerélményt jelent, mint bármiféle matematikai ismeretek begyakoroltatása rutin feladatokon keresztül. És ha a megfelelő kíváncsiság, a motiváció kialakult, akkor a diák önszántából akarja elsajátítani a szükséges matematikai ismereteket. Éppen ezért évek óta olyan feladatokkal indítjuk a gyakorlati órákat, melyek klasszikus rendszerek feltörésére irányulnak. Erre írhatunk programot, de kiválóan alkalmas a CrypTool programcsomag is, mely segítségével már az első laborokon elsajátíthatóak a kriptoanalízis alapeszközei, mint például betűgyakoriság táblázat készítése egy, két, három, stb. betűcsoport esetében, melyek megjelenítése történhet grafikusan, vagy számadatokkal.

Legtöbbször első feladatként a Keyword Caesar, az affin és Vigenere rendszerek feltörését szoktuk feladatul kitűzni, mert ezek esetében a feltörés folyamata könnyebben vezet sikerhez, ([2]). Ma már mindhárom rendszernek csak pedagógiai jelentősége van, de a szöveg rejtjelezéséhez, a visszafejtéshez és a kriptoanalízishez már szükségesek elemi számelméleti ismeretek (mint például a kiterjesztett Euklideszi algoritmus, kétismeretlenes kongruenciarendszer megoldása, multiplikatív inverz meghatározása).

A kriptoanalízishez kapcsolódó másik példa, mely jól szemléltethető CrypTool-ban, az egész számok faktorizációjához kapcsolódik, ([1]). Az alábbi példa azt szemlélteti, hogy egy 200 jegyű összetett számot (ahol az összetett szám két prímszám szorzata) abban az esetben, mikor a két prím azonos nagyságrendű, azaz 100 bites szám, nem sikerül a programmal faktorizálni, de abban az esetben mikor a két prím eltérő nagyságrendű, azaz az egyik csak 20 bites, a másik pedig 180 bites szám, sikeres lesz a faktorizálás.

Legyenek a faktorizálandó számok:

Első eset:

$X_1 = 100808937177144577435502280754 1$ és

$X_2 = 89112871741762341958855813483 1,$

melyeknek meghatározzuk a szorzatát, a kapott eredmény:

$X = 898337388909026220826135448241753066983900118301796041560571.$

Második eset:

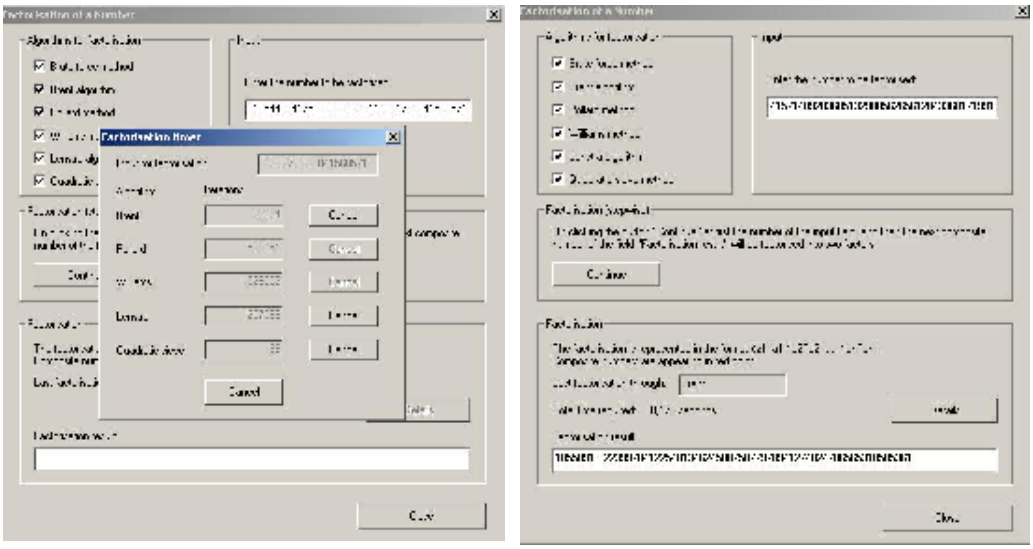
$X_1 = 223997041225401346245887587797094127402478656531050536 1$ és

X_2 = 1855891,

melyeknek meghatározzuk a szorzatát, a kapott eredmény:

X = 41571409283685132988562656120433681719911351634806791049316 51.

A CrypTool által megadott eredmények az alábbi két ablakban láthatóak, az első esetben látható, hogy a Pollard és Williams faktorizációs módszerek nem vezettek sikerre (nem aktívak a Cancel ablakok), a többiek esetében még a sokadik iteráció után sem kaptunk eredményt. A második ablakban a Brent faktorizációs módszer vezettet eredményre, 0.172 másodperc után.



A fenti példa arra is alkalmas, hogy az RSA nyilvános kulcsú kriptorendszer helytelen paraméter választására is felhívja a figyelmünket, azaz nem szabad olyan prímszámokat választani, amelyek nagyságrendje nagyon különbözik, mert ezek faktorizációjára léteznek hatékony algoritmusok.

Mindezen lehetőségek mellett a CrypTool programcsomag ennél jóval több szolgáltatást ad. Csak néhányat emelünk ki, csoportosítva őket témakörök szerint:

- Kriptográfiához kapcsolódó témakörök: klasszikus rendszerek, modern szimmetrikus rendszerek, aszimmetrikus rendszerek, hibrid rendszerek, digitális aláírás, kriptográfiai hash függvények, véletlen-szám generátorok működésének szemléltetése.
- Kriptoanalízishez kapcsolódó témakörök: a szimmetrikus rendszerek nyers-erő támadása, RSA elleni támadás, hibrid rendszerek elleni támadás, RSA-aláírás elleni támadás, kriptográfiai hash függvények elleni támadás kivitelezése.
- Pedagógiai eszközök, animációk: szimmetrikus és hibrid rendszerek, aláírás generálás, titokmegosztás, véletlen-számok 3D-s grafikus megjelenítése.

3. A MIRACL

Mint a bevezetőben szó volt róla, a MIRACL oktatásra ingyenes programcsomag, mely nagyszerűen alkalmazható valós kriptográfiai protokollok kiépítésére, mert többek között a nagy számok aritmetikáját is tartalmazza. 1988 óta fejlesztik és számos kereskedelmi cég használja. Elsősorban a standard C programozási nyelvhez készítették a megfelelő könyvtárakat, de legtöbbnek megvan a C++ alá írt verziója is. Miután a diák vagy a kriptográfiával ismerkedő személy kellőképpen megértette a szükséges alapfogalmakat, azok után felmerülhet annak az igénye is, hogy valós alkalmazást készítsen. Ehhez minden különösebb probléma nélkül felhasználhatja a MIRACL függvényeit.

Szemléltetésképpen itt is álljon egy példa, egy C program, mely a MIRACL függvényeit alkalmazva meghatározza a Diffie-Hellman-kulcscsere során generált kulcsokat, ([1]). Mielőtt megadnánk a C-ben megírt kódot, röviden elmondjuk, hogy mit is jelent ez a protokoll. A korábban alkalmazott rejtjelező algoritmusok legnagyobb problémája a rejtjelezéshez alkalmazott kulcs, kommunikáló felek közötti megosztása volt. Ez a kulcscsere, melyet a 70-es években publikáltak, pedig lehetővé tette, hogy két legális és titkosan, számítógépes hálózatban kommunikáló fél meg tudjon egyezni egy kulcsban, anélkül, hogy fizikailag is találkoznának. A kulcscsere biztonsága azon az elven alapszik, hogy a diszkrét logaritmus értékének meghatározására nem ismert hatékony algoritmus, ha a kulcs szerepét játszó számok nagyságrendje kellőképpen nagy. Feltételezve, hogy a kommunikációban részt vevő két legális fél Aliz és Bob, a Diffie-Hellman-kulcscsere egyszerűsített protokollja a következő lépéssorozatokból áll:

- Aliz választ egy nagy prímszámot, `p`-t, majd meghatározza `p`-nek egy primitív gyökét, legyen ez `q`. Ezután választ egy tetszőleges `a` pozitív egész számot, ahol `a<p-1`. Majd meghatározza az $A = q^a \bmod p$ értéket, ahol az `a` értékét titokban tartja, a `p, q, A` értékeket pedig elküldi Bobnak.
- Bob választ egy tetszőleges `b` pozitív egész számot, ahol `b<p-1`. Meghatározza a $B = q^b \bmod p$ értéket, a `b` értékét titokban tartja, `B`-t pedig elküldi Aliznak.
- A közös kulcsot Aliz a következőképpen határozza meg: $K = B^a \bmod p$.
- A közös kulcsot Bob a következőképpen határozza meg: $K = A^b \bmod p$.
- Hogy a kulcsnak mindkét fél ugyanazt az értéket kapja, azt a következő összefüggés biztosítja: $K = A^b = B^a = g^{a \cdot b} \bmod p$.

Az alábbi programkódban a `primtext` változóban egy 309 számjegyű prímszámot adtunk meg, mely megfelel a fent megadott protokoll `p`-jének. A primitív gyök értékének generálását az egyszerűség kedvéért az alábbi kódrészlet nem végzi el, ezt `3`-nak veszi. A `A` és `B` értékek meghatározását a `powltr`, a `K` értékek meghatározását pedig a `powmod` könyvtárfüggvények végzik. A `powltr`-re optimalizálás miatt van szükség, mert a gyors hatványozás ezen verziója hatékonyabb, ha kis szám hatványra emelését kell elvégezni.

```
#include <stdio.h>
#include "miracl.h"
#include <time.h>
char *primetext=
"155315526351482395991155996351231807220169644828378937433223838972232518351958838087073321845624756550146945246003790108045 94
```

```
038319477343949605191701989237010234137899011395956189589101971687329051281543472415758846061363820201702067275609106722333619439491076530983087606624648015661749216414009542777354731 9";

  int main()
  {
    unsigned long seed;
    big a, b, p, pa, pb, key;
    miracl *mip;
  #ifndef MR_NOFULLWIDTH
    mip = mirsys(500,0);
  #else
    mip = mirsys(500,MAXBASE);
  #endif
    a   = mirvar(0);
    b   = mirvar(0);
    p   = mirvar(0);
    pa  = mirvar(0);
    pb  = mirvar(0);
    key = mirvar(0);

    time((time_t *)&seed);
    irand(seed);
    printf("Diffie-Hellman kulcscsere .... \n");
    cinstr(p,primetext);

    printf("\nAliz eloszamitasai\n");
    bigbits(160,a);
    powltr(3,a,p,pa);
    cotnum(pa, stdout);
    printf("Bob eloszamitasai\n");
    bigbits(160,b);
    powltr(3,b,p,pb);
    cotnum(pb, stdout);

    printf("az Aliz altal meghatarozott kulcs=\n");
    powmod(pb,a,p,key);
    cotnum(key,stdout);

    printf("A Bob altal meghatarozott kulcs=\n");
    powmod(pa,b,p,key);
    cotnum(key,stdout);

    return 0;
  }
```

A tapasztalat azt mutatja, hogy ha a diákok rendelkeznek megfelelő programozói ismeretekkel, akkor ezen könyvtárfüggvények alkalmazása nem jelent gondot és könnyedén megtudják írni a prímtesztelő, prím faktorizációs, diszkrét logaritmus stb. meghatározását megvalósító algoritmusokat.

4. Funkcionális programozási nyelvek

Érdekes megfigyelés, hogy kriptográfiai algoritmusok kódja sokkal rövidebb valamely funkcionális programozási nyelvben, mint egy imperatív programozási nyelvben mint például C-ben vagy Java-ban. Ezen túlmenően egy funkcionális programozási nyelvben megírt függvény tesztelése is jóval egyszerűbben megoldható. Már a funkcionális programozási nyelv szintaxisa is arra készteti a programozót, hogy moduláris kódokat írjon, melyekben a hibák javítása egyszerűbb. Hasonlóan egyszerű a típushibák helyének meghatározása és kijavítása. A rekurzív algoritmusok implementálása pedig szinte magától értetődő a funkcionális környezetben. Mi a Clean programozási nyelvet tanítjuk, melyet a hollandiai nijmegeni egyetemen fejlesztenek és ingyenes hozzáférésű. Rendelkezik nagy számok aritmetikáját megoldó beépített modullal, ez a `BigInt`, melynek alkalmazása nem jelent különösebb problémát. A nyelv I/O műveletei pedig egyszerűek, így ezek sem gátolják a programozó munkáját. A szintaxis azt is lehetővé teszi, hogy a programozó a kriptográfiához szükséges matematika helyes alkalmazására koncentráljon, és ne az implementálás körülményeivel vesződjön.

Szemléltetésképpen bemutatjuk a moduláris gyors hatványozást, mely számos kriptorendszerben alapművelet. A moduláris hatványozás meghatározza az

$$x^p \pmod m \qquad (1)$$

értékét, egy gyors hatványozási technikával, ([1]), melynek először megadjuk a rövid leírását, majd Clean-beli kódját.

A moduláris hatványozást Clean-ben a `my_exp` és az `lexp` függvények alkalmazásával valósítjuk meg, ahol a `my_exp` az inicializálásokat és az `lexp` segédfüggvény meghívását végzi el. A tulajdonképpeni számításokat az `lexp` végzi. Ez a fajta megoldás, mely az inicializálásokat ilyen formában adja meg teljes mértékben jellemző a funkcionális programozási nyelvekre. Az `lexp` segédfüggvény bemeneti paraméterei az `y, x, p, m` értékek, ahol az `x, p, m` értékek az (1) képletnek megfelelőek, az `y`-ban pedig az eredményt számoljuk ki. A függvény minden egyes rekurzív hívása során a következőket végezzük el:

- ha a hatványkitevő értéke `0`, akkor megállunk, és visszatérítjük az `y` értékét, egyébként
  - ha páratlan a kitevő, akkor meghatározzuk az `y = y·x` szorzatot
  - ha páros a kitevő, akkor `y` értéke változatlan marad,
  - elvégezzük az `x = x·x` négyzetre emelést (a szorzás és a négyzetre emelés eredményeként kapott értékeket minden alkalommal `mod m` szerint vesszük)
  - elvégezzük a `p = p/2,` egész részt meghatározó osztás,
- a következő rekurzív hívás paraméterei az így kapott `y, x, p` értékek lesznek.

A továbbiakban azon konstans értékek definícióját is megadjuk, melyeket a fent leírt két függvény alkalmaz.

```
import BigInt
my_one :== toBigInt 1
my_two :== toBigInt 2
my_zero:== toBigInt 0
```

```
my_exp :: BigInt BigInt BigInt -> BigInt
my_exp x p m = lexp my_one x p m

lexp :: BigInt BigInt BigInt BigInt -> BigInt
lexp y x p m
  |p == my_zero = y
  #p1 = p / my_two
  #x1 = (x * x) rem m
  |isEven p = lexp y x1 p1 m
  #y1 = (y * x) rem m
    = lexp y1 x1 p1 m
```

Ezek alapján felmerült az a kérdés, hogy a korábbi szokással ellentétben, mely szerint a kriptográfia kizárólagos nyelve valamely imperatív nyelv volt, nem lenne-e egyszerűbb és hatékonyabb, hasonló biztonságú kriptográfiai alkalmazásokat valamely funkcionális programozási nyelvben megírni. Ennek eredményeként a 2007/2008 egyetemi tanévben egy államvizsgás diákunk azt a szakdolgozat témát kapta, hogy *Kriptográfiai algoritmusok funkcionális programozási környezetben*, melynek eredményeként sikeresen implementálta és tesztelte az RSA kriptorendszert a Clean programozási nyelvben.

Hasonló elgondolás alapján kezdte el fejleszteni a 2000-es évek elejétől a Cryptol programcsomagot az amerikai Galois cég, ([7]). Ez tulajdonképpen egy programozási nyelv kriptográfiai alkalmazások fejlesztésére, melyet a fejlesztők Haskell, ([8]) funkcionális programozási nyelvben írtak. Próbaverziója ingyenesen hozzáférhető.

5. Számítógép nélkül

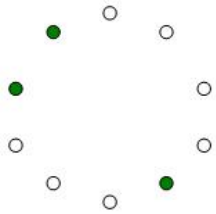
A bevezetőben említettük, hogy léteznek olyan elgondolások is, hogy a kriptográfiai alapelveket számítógépek használata nélkül próbáljuk elsajátítani. Ennek a szemléltetésére egy matematikai modellen keresztül bemutatjuk, hogy hogyan lehetséges nyilvános csatornán keresztül pénzérme feldobálós játékot játszani, úgy hogy ne lehessen csalni, és ugyanakkor hogyan lesz alkalmas a modell nyilvános kulcsú rejtjelezésre is. A feladat a perfekt gráfokhoz kapcsolódik, ezért a diákoknak való bemutatás során el lehet mondani egy-két gráfelméleti definíciót is.

Hasonlóan a harmadik fejezetben megadott szereposztáshoz, most is Aliz és Bob fogják a *pénzérme feldobálós játékot* játszani, ahol a következő lépéssorozatot végzik el:

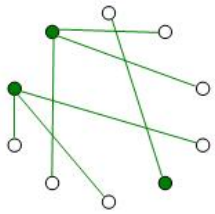
- Aliz választ egy `n` csomópontú gráfot, majd kiválaszt `k` csomópontot, ezek fogják alkotni a `K` halmazt. Tetszőlegesen összeköti a kiválasztott `K`-beli csomópont mindegyikét valamelyik másik nem `K`-beli csomóponttal. Az így kapott gráfot megjegyzi, ez lesz később a „bizonyíték”. Majd további csomópontokat köt össze véletlenszerűen, de ezek egyike sem lehet `K`-beli csomópont. Az így kapott gráfot elküldi Bobnak. Aliz pénzérméjének értéke a „feldobás” után a `K`-beli csomópontok párosságának értéke lesz.
- Ezek után Bob tippel, azaz jelzi, hogy Aliz páros vagy páratlan számra gondolt. Bob akkor nyer, ha az általa tippelt szám és a `K`-beli csomópontok párossága megegyezik. Másképpen Aliz nyer.
- Miután Aliz megkapta Bob válaszát, felfedi a `K`-beli csomópontokat, Bob pedig a kapott

gráf alapján könnyűszerrel ellenőrizni tudja, hogy Aliz nem csapta-e be.

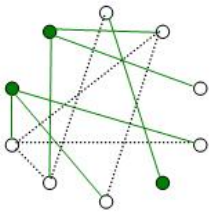
Az 1., 2. és 3. ábrák mutatják, hogy Aliz miképpen szerkeszti meg a „feldobásának" az értékét. Ez az érték a példa alapján 3 lesz. A 4. ábrát küldi el Bobnak, mely után Bob tippel. Bob tehát, akkor nyer, ha páratlan számot tippel.



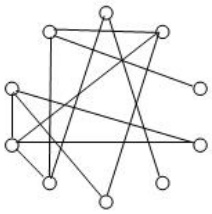
1. ábra



2. ábra



3. ábra

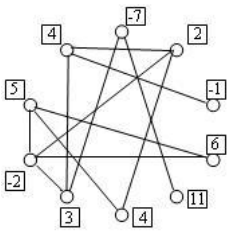


4. ábra

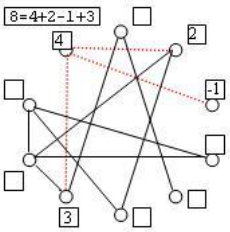
A protokoll biztonsága, azaz hogy a felek nem tudnak csalni, azon az elven alapszik, hogy a K-beli csomópontok perfekt gráfot alkotnak és egy gráfban a perfekt gráfok csomópontjának a száma megegyezik. Perfekt gráfot ily módon könnyű szerkeszteni, viszont a 4. ábra alapján következtetni, hogy mely csomópontok alkotnak perfekt gráfokat, azaz a perfekt gráfok meghatározása tetszőleges gráfok esetében NP-beli nehézségű feladat.

Nyilvános kulcsú rejtjelezés során a rejtjelező (nyilvános kulcs) nem ugyanaz a visszafejtő kulccsal (titkos kulcs), illetve a nyilvános kulcs ismerete alapján gyakorlatilag lehetetlen meghatározni a titkos kulcsot. Mint említettük a perfekt gráfok meghatározása, NP-beli feladat, ezért tökéletesen alkalmas nyilvános kulcsú rejtjelezésre. A titkosításban résztvevő felek legyenek megint Aliz és Bob, azzal a feltételezéssel, hogy Bob szeretne titkos üzenetet küldeni Aliznak. A lépéssorozat a következő lesz:

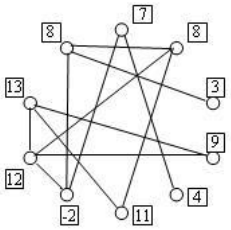
- Aliz választ egy n csomópontú gráfot, majd kiválaszt k csomópontot, ezek fogják alkotni a K halmazt, (1. ábra). Tetszőlegesen összeköti a kiválasztott K-beli csomópont mindegyikét valamelyik másik nem K-beli csomóponttal. Az így kapott gráfot megjegyzi, ez lesz a titkos kulcs, (2. ábra). Majd további csomópontokat köt össze véletlenszerűen, de ezek egyi ke sem lehet K-beli csomópont, (3. ábra). Az így kapott gráfot nyilvánossá teszi ez lesz a nyilvános kulcs, lásd 4. ábra.
- Bob a nyilvános kulcs alapján meghatározza a gráf csomópontjainak a számát. Feltételezve, hogy a titkosítandó érték 25, első lépésben a 25 értékét meghatározza annyi szám összegeként/különbségeként ahány csomópontú a gráf, (5. ábra). Az így kapott számok fogják a csomópontok értékét jelenteni. Második lépésben minden csomópontra meghatározza a csomópont értékének és a vele összekötött csomópontok értékének az összegét, (6., 7. ábrák). Az így kapott gráf lesz a 25 rejtjelezett értéke, ezt elküld Aliznak.
- A visszafejtéshez Aliz meghatározza a K−beli csomópontok összegét, mellyel visszakapja a titkosított értéket, (8. ábra).



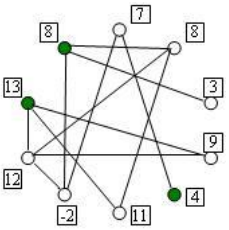
5. ábra



6. ábra



7. ábra



8. ábra

Természetesen bármilyen más grafikusan is szemléltethető NP-beli feladat alkalmas a kriptográfiai fogalmak megértésére. Befejezésként elmondhatjuk, hogy mindezen eszközök és módszerek sikeresen alkalmazhatóak úgy az egyetemi oktatásban és a középiskolában is. További terveink között szerepel, hogy a diákoktól kitöltött kérdőív formájában kérjük azon visszajelzéseket, melyek alapján az ő véleményeiket is figyelembe vehetjük a fenti eszközök és módszerek oktatásában.

Irodalom

1. Johannes Buchmann: *Introduction to cryptography*. Springer-Verlag, (2002)
2. Arto Salomaa: *Public-key cryptography*, Berlin Heidelberg New-York, Springer-Verlag, (1996)
3. Tim Bell, Harold Thimbleby, Mike Fellows, Ian Witten, Neil Koblitz: *Explaining cryptographic systems to the general public*. Computers and Education, Volume 40, Issue 3, (April 2003), 199-215
4. Pieter Koopman, Rinus Plasmeijer, Marko van Eeklen, Sjaak Smetsers :F*unctional programming in Clean*. http://clean.cs.ru.nl/contents/Clean_Book/clean_book.html
5. *MIRACL*: http://www.shamus.ie/
6. *CrypTool*: http://www.cryptool.org
7. *Cryptol*: http://www.cryptol.net
8. *Haskell*: http://www.haskell.org/