Alkalmazott Matematikai Lapok **29** (2012), 1-52.

MULTIGRÁFOK FOKSOROZATAI

IVÁNYI ANTAL ÉS LUCZ LORÁND

Havel 1955-ben [28], Erdős és Gallai 1960-ban [20], Hakimi 1962-ben [27], Tripathi, Venugopalan és West 2010-ben [87], Özkan [62] 2011-ben javasoltak módszert annak eldöntésére, hogy nemnegatív egészek sorozata lehet-e egy egyszerű gráf foksorozata. Ezeknek az algoritmusoknak a legrosszabb futási ideje legalább négyzetes. Takahashi 2007-ben [84], Hell és Kirkpatrick [29] 2009-ben lineáris algoritmust javasoltak. 1974-ben Chungphaisan [18] kiterjesztette a csúcspárok között legfeljebb $b \geq 1$ élet tartalmazó multigráfokra mind a Havel–Hakimi-, mind pedig az Erdős–Gallai-tételt. Ezeknek az algoritmusoknak is legalább négyzetes a legrosszabb futási ideje. Cikkünkben bemutatjuk a Chungphaisan–Erdős–Gallai-algoritmus lineáris változatát. A Chungphaisan–Havel–Hakimi-algoritmust pedig úgy javítjuk és gyorsítjuk, hogy $b = 1,\ 2$ esetén is lineáris futási idejű legyen.

1. Bevezetés

A gyakorlatban különböző területeken szükség van objektumok rangsorolására. Ennek egyik elterjedt módszere, hogy az objektumokat páronként összehasonlítjuk, és az összehasonlítás eredményeképpen pontokat adunk az objektumoknak, végül pedig az objektumokat a kapott pontszámok alapján rangsoroljuk. Például Landau biológiai [47], Hakimi kémiai [27], Kim et al. [40], valamint Newman és Barabási [61] hálózati, Bozóki, Fülöp, Kéri, Poesz és Rónyai gazdasági [11, 12, 39], Liljeros et al. emberi kapcsolatokra vonatkozó [48], Iványi et al. pedig sportbeli [31, 32, 35, 37, 65, 67, 69] alkalmazásokra hivatkoztak.

Legyenek a, b és n egészek, $n \geq 1$ és $b \geq a \geq 0$. Az (a, b, n)-*gráfok* olyan hurokmentes – irányított vagy irányítatlan – gráfok, melyek csúcshalmaza $V = \{v_1, \ldots, v_n\}$ és a különböző v_i és v_j csúcsok legalább a és legfeljebb b éllel vannak összekötve. Eszerint az *egyszerű irányítatlan gráfok* $(0, 1, n)$-gráfok, míg a *tournamentek* $(1, 1, n)$-gráfok.

Irányított gráfok esetén, ha v_i és v_j összehasonlításakor v_i kap egy pontot, akkor annak a gráfban v_i-ből v_j-be menő irányított él felel meg. Irányítatlan gráfok esetén viszont csúcspárok kapják a pontot, és annak a két csúcsot összekötő irányítatlan él felel meg.

Ebben a cikkben elsősorban azt vizsgáljuk, hogy nemnegatív egész számok $s = (s_1, \ldots, s_n)$ nemnövekvő sorozata és adott a alsó korlát, valamint b felső korlát esetén létezik-e olyan irányítatlan (a,b,n)-gráf, amelynek foksorozata s. Ennek megfelelően – ha mást nem mondunk – a gráf kifejezés irányítatlan gráfot jelent.

Emellett foglalkozunk a foksorozatok számával, amelyet $G(a,b,n)$-nel jelölünk.

A hasonló feladatokkal kapcsolatban megjegyezzük, hogy mind az irányítatlan, mind pedig az irányított gráfokkal kapcsolatban az utóbbi néhány évben is számos publikáció jelent meg (például [5, 7, 8, 13, 19, 21, 26, 29, 34, 50, 55, 58, 62, 65, 70, 85, 87, 88, 89], illetve [6, 9, 10, 12, 15, 22, 24, 31, 32, 37, 38, 40, 43, 46, 53, 51, 52, 57, 64, 67, 68]).

Legyenek l, m és u egész számok, továbbá $1 \leq m$ és $l \leq u$. Egész számok $s = (s_1, \ldots, s_m)$ sorozatát (l,u,m)-*korlátosnak* (röviden: korlátosnak) nevezzük, ha $l \leq s_i \leq u$ minden $1 \leq i \leq m$ indexre. Az $s = (s_1, \ldots, s_m)$ (l,u,m)-korlátos sorozatot (l,u,m)-*szabályosnak* mondjuk, ha $u \geq s_1 \geq \cdots \geq s_m \geq l$.

A vizsgálatok során kitüntetett szerepet játszanak az $(a(n-1), b(n-1), n)$-szabályos sorozatok. Ezeket a sorozatokat (a,b,n)-*grafikusnak* (vagy röviden grafikusnak) nevezzük, ha létezik olyan (a,b,n)-gráf, melynek foksorozata s.

Jelentős számú cikk (például [14, 23, 44, 56]) foglalkozik páros számok *grafikus felbontásaival*: előállítják a $2k$ páros szám pozitív egész összeadandókra való monoton csökkenő felbontásait, és az így kapott $q = (q_1, \ldots, q_m)$ sorozatok közül – amelyekre $q_1 + \cdots + q_m = 2k$ és $q_m \geq q_{m-1} \geq \cdots \geq q_1$ – szűrik ki a $(0, 2k-1, 2k)$-grafikus sorozatokat, vagy pedig rekurzióval eleve csak a grafikus sorozatokat állítják elő.

A továbbiakban főleg szabályos sorozatokkal foglalkozunk. A definíciókban az alsó és felső korlátok azért szerepelnek, hogy ellenőrző algoritmusainkat megkíméljük a nyilvánvalóan nem grafikus sorozatok ellenőrzésétől, ezért ezek a megszorítások nem jelentik az általánosság korlátozását.

A cikkben csak *teljes* gráfokkal foglalkozunk. Ezekre az jellemző, hogy ha $a \leq c \leq b$, akkor bármely két csúcs között c él is meg van engedve, és az irányított esetben azok tetszőlegesen irányíthatók (azaz eltérünk a teljes gráfok szokásos definíciójától). A *hiányos* gráfoknál bizonyos lehetőségek tiltva vannak. Például a labdarúgásnak [24, 33, 35, 45] olyan irányított $(2,3,n)$-gráfok felelnek meg, amelyekben a csúcsokat 2 vagy 3 él köti össze, azonban 2 él esetén azok mindig ellentétesen, míg 3 él esetén azok mindig azonosan vannak irányítva.

Míg teljes gráfok esetén a sorozatok tesztelése az operációkutatás folyamos módszereivel kényelmesen megoldható (bár gyakran vannak gyorsabb algoritmusok is), hiányos gráfok esetén ezek a módszerek nem alkalmazhatók.

Cikkünk fő célkitűzése, hogy minél kisebb várható futási idejű algoritmusokat találjunk annak eldöntésére, hogy adott s szabályos sorozat grafikus-e. Eközben a minden sorozatot helyesen minősítő *pontos*, és a csak a szabályos sorozatok egy részét minősítő *közelítő* algoritmusokkal is foglalkozunk.

Érdemes megemlíteni, hogy a fokszámsorozatok számának meghatározásával kapcsolatos nehézségek miatt annak is jelentős irodalma (lásd például [8, 19, 57]) van, hogy véletlen mintavétellel becsüljük ezeket a számokat.

Melléktermékként bővítettük a *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences* adatbázist [36, 51, 52].

Módszerünk az összes grafikus sorozat gazdaságos előállítására is alkalmas (lásd Ruskey [71], valamint Barnes és Savage cikkeit [3, 4]).

A cikk felépítése a következő. A bevezető első rész után a $(0, 1, n)$ témakör klasszikus pontos algoritmusait foglaljuk össze. A harmadik részben új pontos algoritmusokat, a negyedikben általános leszámlálási eredményeket, az ötödikben pedig új tesztelő algoritmusokat ismertetünk. A hatodik részben a közelítő algoritmusok hatékonyságát és futási idejét, míg a hetedikben a pontos algoritmusok futási idejét elemezzük. A nyolcadik rész témája a $(0, b, n)$-gráfok potenciális foksorozatainak tesztelése, míg a kilencedikben az (a, b, n)-gráfoké a főszerep. A tizedik részben a $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok párhuzamos leszámlálása a téma.

2. Klasszikus pontos algoritmusok $(0, 1, n)$-gráfokhoz

Ebben a részben két, a $(0, 1, n)$-gráfok potenciális foksorozatainak tesztelésére alkalmas klasszikus algoritmust ismertetünk.

2.1. Havel–Hakimi-algoritmus (HH)

A feladat megoldására az első módszert Vaclav Havel cseh matematikus javasolta 1955-ben [28, 49]. 1962-ben Louis Hakimi [27] Haveltől függetlenül publikálta ugyanezt az eredményt, ezért ma a tételt rendszerint *Havel–Hakimi-tételnek*, a módszert pedig *Havel–Hakimi-algoritmusnak* nevezik.

2.1. Tétel. (Hakimi [27], Havel [28]) *Ha $n \geq 3$, az $(s_1, \ldots, s_n)$ $(0, 1, n)$-szabályos sorozat akkor és csak akkor $(0, 1, n)$-grafikus, ha az*

$$(s_2 - 1, s_3 - 1, \ldots, s_{s_1} - 1, s_{s_1+1} - 1, s_{s_1+2}, \ldots, s_n)$$

sorozat $(0, 1, n - 1)$-grafikus.

Bizonyítás. Lásd [27, 28]. □

A továbbiakban sorozatok ismétlődő elemeinek tömör jelölésére használjuk az $s = (c^d)$ típusú jelölést, ami azt jelzi, hogy a sorozat d darab c-t tartalmaz.

Ha ezen tétel alapján írunk egy rekurzív algoritmust, akkor annak futási ideje legjobb esetben – például az egy darab $n-1$ után $n-1$ nullát tartalmazó bemenetre – $\Theta(1)$, legrosszabb esetben pedig – például az n darab $(n-1)$-et tartalmazó *homogén* bemenetre – $\Theta(n^2)$. Ez ugyanis grafikus sorozat, ezért minden elemét ellenőrizni kell. Másrészt az elemek összege négyzetes, és az algoritmus az elemeket egyesével csökkenti nullára. Érdemes megjegyezni, hogy a tétel bizonyítása konstruktív, és a bizonyításon alapuló algoritmus négyzetes idő alatt nem csak ellenőriz, hanem egy megfelelő gráfot is előállít (feltéve persze, hogy létezik megfelelő egyszerű gráf).

A következő, Havel–Hakimi-típusú algoritmus csak a bemenet tesztelését végzi el, helyreállítását nem.

A cikk programjaiban a [16] tankönyvben leírt pszeudokód konvenciókat követjük.

Itt és a továbbiakban n a sorozat hosszát (a gráf csúcsainak számát) jelöli, $s = (s_1, \ldots, s_n)$ a vizsgálandó szabályos sorozat, L pedig a vizsgált sorozat grafikusságát jellemzi: $L = 0$ azt jelenti, hogy a vizsgált sorozat nem grafikus; $L = 1$ esetén a sorozat grafikus, míg $L = 2$ azt jelzi, hogy az adott algoritmus *nem tud* dönteni.

2.1. Algoritmus. Havel-Hakimi(n, s)

```
1. for i = 1 to n − 1                          // 1–6. sor: s elemeinek tesztelése
2.     if s_{s_i+i} == 0                        // 2–4. sor: s nem grafikus
3.         L = 0
4.         return 0
5.     for j = i + 1 to i + s_i
6.         s_j = s_j − 1
7.     (s_{i+1}, ..., s_n) rendezése nemnövekvő sorrendbe
8. L = 1                                        // 8–9. sor: s grafikus
9. return L
```

Az algoritmust később irányított gráfokra [22, 31, 32, 41] is kiterjesztették.

2.2. Erdős–Gallai-algoritmus (EG)

Időrendben a következő eredmény Erdős Pál és Gallai Tibor alábbi szükséges és elégséges feltétele [20] volt.

Nemnegatív egészek adott $s = (s_1, \ldots, s_n)$ sorozata esetén a sorozat első i elemét a sorozat s_i eleméhez tartozó *fejnek,* míg a többi elemét az s_i elemhez tartozó *faroknak* nevezzük. A fejelemek összegét H_i, míg a farokelemek összegét T_i jelöli ($i = 1, \ldots, n$). A $\sum_{k=i+1}^{n} \min(i, s_k)$ összeget pedig C_i-vel jelöljük és a farok *becsült kapacitásának* nevezzük. Ha egy s sorozatra H_n páros, akkor a sorozatot n*-párosnak,* egyébként n*-páratlannak* nevezzük.

2.2. Tétel. (Erdős, Gallai, [20]) *Ha* $n \geq 1$, *a* $(0, 1, n)$*-szabályos* $(s_1, \ldots, s_n)$ *sorozat akkor és csak akkor* $(0, 1, n)$*-grafikus, ha*

$$H_n \quad \textit{páros} \tag{1}$$

és

$$H_i \leq i(i-1) + C_i \quad (i = 1, \ldots, n-1). \tag{2}$$

Bizonyítás. Lásd [17, 20, 73, 87]. □

A tétel alapgondolata az, hogy az első i csúcs fokait egyrészt ezen csúcsok közötti élekkel – ezekből legfeljebb $i(i-1)/2$ van – másrészt a nagyobb indexű csúcsok fokaival lehet lekötni. A nagyobb indexű csúcsokra pedig az jellemző, hogy egyrészt legfeljebb i csúcs egy-egy fokát tudják lekötni, másrészt legfeljebb annyi fokot, mint a saját fokszámuk. A tétel szépségét az adja, hogy ezeknek a természetes szükséges feltételeknek az elégségességét is tartalmazza.

A 2.2. tételen alapul a következő Erdős–Gallai-algoritmus.

A szokásos változók mellett C az aktuális C_i-t jelöli.

2.2. Algoritmus. Erdős-Gallai(n, s)

```
1.  L = 0                          // 1. sor: L kezdeti értékének beállítása
2.  H_1 = s_1                      // 2–4. sor: H elemeinek kiszámítása
3.  for i = 2 to n
4.      H_i = H_{i-1} + s_i
5.  if H_n páratlan                // 5–6. sor: paritás ellenőrzése
6.      return 0
7.  for i = 1 to n - 1             // 7–12. sor: s tesztelése
8.      C = 0                      // 7. sor: C kezdeti értékének beállítása
9.      for k = i + 1 to n         // 8–9. sor: C frissítése
10.         C = C + min(i, s_k)
11.     if H_i - i(i - 1) > C      // 11. sor: szükséges feltétel ellenőrzése
12.         return L               // 12. sor: s nemgrafikus
13. L = 1                          // 13–14. sor: s grafikus
14. return L
```

Az Erdős-Gallai (röviden: EG) algoritmus memóriaigénye $\Theta(n)$. Bár ez a program csak ellenőriz, futási ideje a legjobb $\Theta(n)$ és a legrosszabb $\Theta(n^2)$ között változik. A közelmúltban Tripathi et al. [87] publikáltak a tételre konstruktív bizonyítást, amely grafikus bemenet esetén $\Theta(n^3)$ idő alatt egy megoldást is előállít.

A szabályos sorozatoknak aszimptotikusan a fele páros sorozat. Az 1. táblázathoz a $(0, 1, n)$-szabályos sorozatok számát a majd a 4. szakaszban szereplő (24) képlet alapján [1, 80], míg a $(0, 1, n)$-páros sorozatok számát az ugyancsak a 4. szakaszban következő 4.2. lemma alapján számítottuk [80]. A táblázat harmadik oszlopa a két számosság hányadosának gyors konvergenciáját szemlélteti $n = 1, \ldots, 38$ csúcs esetén.

3. Új pontos algoritmusok $(0, 1, n)$-gráfokhoz

Ebben a részben a klasszikus algoritmusok néhány gyorsított változatát mutatjuk be.

3.1. Nullamentes algoritmusok

Mivel a sorozatok végén lévő nullák izolált csúcsokat jelentenek, így azok nem befolyásolják, hogy az adott sorozat grafikus-e. Ezt a megfigyelést hasznosítja a következő állítás, amelyben p az s sorozat pozitív elemeinek a számát jelöli.

1. táblázat. A szabályos ($R(n)$) és a páros ($E(n)$) sorozatok száma, valamint ezen számok hányadosa ($E(n)/R(n)$).

n	$R(n)$	$E(n)$	$E(n)/R(n)$
1	1	1	1,0000000000000
2	3	2	0,6666666666667
3	10	6	0,6000000000000
4	35	19	0,5428571428571
5	126	66	0,5238095238095
6	462	236	0,5108225108225
7	1716	868	0,5058275058275
8	6435	3235	0,5027195027195
9	24310	12190	0,5014397367339
10	92378	46252	0,5006819805581
11	352716	176484	0,5003572279114
12	1352078	676270	0,5001708481315
13	5200300	2600612	0,5000888410284
14	20058300	10030008	0,5000427753100
15	77558760	38781096	0,5000221251603
16	300540195	150273315	0,5000107057227
17	1166803110	583407990	0,5000055150693
18	4537567650	2268795980	0,5000026787479
19	17672631900	8836340260	0,5000013755733
20	68923264410	34461678394	0,5000006701511
21	269128937220	134564560988	0,5000003432481
22	1052049481860	526024917288	0,5000001676328
23	4116715363800	2058358034616	0,5000000856790
24	16123801841550	8061901596814	0,5000000419280
25	63205303218876	31602652961516	0,5000000213918
26	247959266474052	123979635837176	0,5000000104862
27	973469712824056	486734861612328	0,5000000053420
28	3824345300380220	1912172660219260	0,5000000026224
29	15033633249770520	7516816644943560	0,5000000013342
30	59132290782430712	29566145429994736	0,5000000006558
31	232714176627630544	116357088391374032	0,5000000003333
32	916312070471295267	458156035385917731	0,5000000001640
33	3609714217008132870	1804857108804606630	0,5000000000833
34	14226520737620288370	7113260369393545740	0,5000000000410
35	56093138908331422716	28046569455332514468	0,5000000000208
36	221256270138418389602	110628135071477978626	0,5000000000103
37	873065282167813104916	436532641088444120108	0,5000000000052
38	3446310324346630677300	1723155162182151654600	0,5000000000026

3.1. KÖVETKEZMÉNY. *Ha $n \geq 1$, az $(s_1, \ldots, s_n)$ $(0,1,n)$-szabályos sorozat akkor és csak akkor $(0,1,n)$-grafikus, ha $s_1 = 0$, vagy az $(s_1, \ldots, s_p)$ sorozat $(0,1,p)$-grafikus.*

Bizonyítás. Ha a sorozatnak van pozitív eleme, akkor az állítás a Havel-Hakimi, illetve az Erdős-Gallai következménye, de közvetlenül is adódik: a nullák ugyanis nem segítenek a pozitív fokszámok párosításánál, ugyanakkor nem okoznak önálló igényt sem. □

Az ezen a tulajdonságon alapuló megvalósítást nullamentes Erdős-Gallai (EGn), illetve nullamentes Havel-Hakimi (HHn) algoritmusnak nevezzük.

3.2. Rövidített Erdős–Gallai-algoritmus (EGr)

H_i maximális értéke szabályos sorozat esetén $n(n-1)$, ezért a 2.2. tételben szereplő (2) egyenlőtlenség $i = n$ esetén biztosan teljesül, így felesleges ellenőrizni.

Ennél is hasznosabb a következő lemma. Tripathi és Vijay 2003-as cikkében [86] szerepel az az észrevétel, hogy az Erdős–Gallai-tételben a (2) egyenlőtlenséget elég csak addig ellenőrizni, amíg $H_i > i(i-1)$ teljesül.

3.1. LEMMA. (Tripathi és Vijay [86]) *Ha $n \geq 1$, a $(0,1,n)$-szabályos $s = (s_1, \ldots, s_n)$ sorozat akkor és csak akkor $(0,1,n)$-grafikus, ha*

$$H_n \quad \textit{páros}$$

és

$$H_i - \min(H_i, i(i-1)) \leq \sum_{k=i+1}^{n} \min(i, s_k) \quad (i = 1, 2, \ldots, h),$$

ahol

$$h = \max_{1 \leq k \leq n} (k \mid k(k-1) < H_k).$$

Bizonyítás. Ha $i(i-1) \geq H_i$, akkor (2) bal oldala nempozitív, ezért az egyenlőtlenség biztosan teljesül, így felesleges ellenőrizni. □

Például a száz darab ötöst tartalmazó sorozat esetén (2) jobb oldalát az Erdős–Gallai-algoritmus szerint kilencvenkilencszer, míg a rövidített Erdős–Gallai-algoritmus szerint csak hatszor kell kiszámítani. A javításnak a várható futási időre gyakorolt hatását a 7. részben vizsgáljuk.

A 3.1. lemmán alapuló algoritmust rövidített Erdős–Gallai-algoritmusnak (EGr) nevezzük.

3.3. Ugró Erdős–Gallai-algoritmus (EGu)

Az ismétlődő elemeket összevonva egy szabályos $(s_1, \ldots, s_n)$ sorozat $(s_{i_1}^{e_1}, \ldots, s_{i_q}^{e_q})$ alakban is felírható, ahol $s_{i_1} > \cdots > s_{i_q}$, $e_1, \ldots, e_q \geq 1$, és $e_1 + \cdots + e_q = n$. Legyen $g_j = e_1 + \cdots + e_j$ $(j = 1, \ldots, q)$.

Az s_i elemet az s sorozat *ugró* elemének nevezzük, ha $i = n$, vagy $1 \leq i \leq n-1$, és $s_i > s_{i+1}$. Ekkor az ugró elemek az $s_{g_1}, \ldots, s_{g_q}$ elemek. Az ugró (vagy ellenőrző) elemeket $c_1 = s_{g_1}, \ldots, c_q = s_{g_q}$ módon jelöljük.

Tripathi és Vijai 2003-ban a [86] cikkben az Erdős–Gallai-tétel következő, lényeges gyorsítást lehetővé tevő változatát is bizonyították.

3.1. TÉTEL. (Tripathi, Vijay [86]) *A $(0,1,n)$-szabályos $s = (s_1, \ldots, s_n)$ sorozat akkor és csak akkor $(0,1,n)$-grafikus, ha*

$$H_n \quad \text{páros}$$

és

$$H_{g_i} - g_i(g_i - 1) \leq \sum_{k=g_i+1}^{n} \min(g_i, s_k) \quad (i = 1, \ldots, q).$$

Bizonyítás. Lásd [86]. □

A következő program (EGu) az Erdős–Gallai-algoritmusnak a 3.1. lemma, valamint a 3.3. tétel alapján gyorsított változatát mutatja be.

A szokásos változók mellett itt $H = (H_1, \ldots, H_n)$, ahol H_i s első i elemének az összege; p s pozitív elemeinek a száma, és s_{p+1} segédváltozó annak eldöntéséhez, hogy s_p ugró elem-e.

3.1. Algoritmus. Erdős–Gallai-ugró(n, s, L)

```
1.  p = n                                   // 1–3. sor: nullamentesítés
2.  while s_p = 0
3.      p = p − 1
4.  H_1 = s_1                               // 4–8. sor: paritás ellenőrzése
5.  for i = 2 to p
6.      H_i = H_{i−1} + s_i
7.  if H_p páratlan
8.      return 0
9.  s_{p+1} = 0                             // 9–19. sor: fej igényének ellenőrzése
10. i = 1
11. while i ≤ p ∧ i(i − 1) < H_i
12.     while s_i == s_{i+1}
13.         i = i + 1
14.     E = 0
15.     for j = i + 1 to p
16.         E = E + min(j, s_j)
17.     if H_i > i(i − 1) + E
18.         return 0
19.     i = i + 1
20. return 1                                // 20. sor: s grafikus
```

Ennek az algoritmusnak a futási ideje a legjobb $\Theta(1)$ és a legrosszabb $\Theta(n^2)$ között változik.

Megjegyezzük, hogy az ellenőrzést elég a $(q-1)$-edik ugrópontig folytatni.

A 2. táblázat azt mutatja, hogy $n = 3, \ldots, 15$ csúcs esetén EGu hány menet alatt tudja kizárni a nem $(0, 1, n)$-grafikus sorozatokat a $(0, 1, n)$-szabályos sorozatok tesztelése során. $f_i(n) = f_i$ azoknak az n hosszúságú, nem $(0, 1, n)$-grafikus sorozatoknak a száma, amelyek pontosan i tesztelési menetet igényeltek. A táblázat minden sorára jellemző, hogy a maximális menetszám körülbelül $\frac{n}{2}$.

2. táblázat. A $(0, 1, n)$-szabályos nem $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok eloszlása $n = 3, \ldots, 15$ csúcsra aszerint, hogy az EGu algoritmus hány menet alatt tudja őket kizárni.

n/i	$R(n) - G(n)$	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
3	6	6						
4	24	24						
5	95	91	4					
6	360	338	22					
7	1 374	1 262	102	10				
8	5 222	4 729	409	84				
9	19 949	17 841	1 587	487	34			
10	76 362	67 645	6 025	2 294	398			
11	293 368	257 779	22 802	9 820	2 825	142		
12	1 129 961	986 274	86 292	39 745	15 554	2 096		
13	4 363 985	3 787 213	327 644	156 295	74 542	17 632	659	
14	16 891 448	14 586 597	1 248 368	605 592	327 404	111 872	11 615	
15	65 516 140	56 330 831	4 774 119	2 331 442	1 363 561	599 615	113 316	3 256

A 3. táblázat tartalmazza a $(0, 1, n)$-szabályos, -grafikus és -nemgrafikus sorozatok számát, valamint az EGu algoritmus számára a nemgrafikus, grafikus és összes sorozat kiszűréséhez szükséges menetek átlagos számát $n = 3, \ldots, 15$ csúcs esetén. A táblázatban szereplő X', Y' és Z' hatékonysági jellemzők definícióját a (15), (16) and (17) képletek tartalmazzák. Figyelemre méltó, hogy n növekedtével az X' és Z' értékek csökkennek, míg az Y' értékek nőnek.

3.4. Lineáris Erdős–Gallai-algoritmus (EGl)

A következő Erdős–Gallai-Lineáris algoritmus kihasználja, hogy az s bemeneti sorozat monoton. Ennek köszönhetően a C_i kapacitásokat minden i-re konstans időben meg tudja határozni, azaz nincs szüksége arra, hogy a megfelelő farok elemeit egyenként megvizsgálja. A gyors számolás kulcsa a *súlypontokat* tartalmazó $w(s)$ sorozat.

Adott s sorozat esetén legyen $w(s) = (w_0, \ldots, w_{n-1})$, ahol $i > s_1$ esetén $w_i = 0$, egyébként pedig w_i az s sorozat legnagyobb indexű olyan elemének indexe, amelyik legalább akkora, mint i.

3. táblázat. A $(0, 1, n)$-szabályos és -grafikus sorozatok száma, valamint az Erdős–Gallai-ugró algoritmus által az $n = 3, \ldots, 15$ hosszú sorozatok vizsgálata során végzett tesztek átlagos száma.

n	$R(n)$	$G(n)$	X'	Y'	Z'
3	10	4	0,3333333333	0,5833333333	0,4333333333
4	35	11	0,2500000000	0,5909090909	0,3571428571
5	126	31	0,2084210526	0,6064516129	0,3063492063
6	462	102	0,1768518519	0,6192810458	0,2745310245
7	1 716	342	0,1555416927	0,6219715957	0,2485014985
8	6 435	1 213	0,1388117579	0,6267518549	0,2307886558
9	24 310	4 361	0,1259433778	0,6312007949	0,2165821107
10	92 378	16 016	0,1154618789	0,6336476024	0,2053021282
11	352 716	59 348	0,1068633005	0,6357110908	0,1958472384
12	1 352 078	222 117	0,0996191461	0,6373495350	0,1879565503
13	5 200 300	836 315	0,0934514246	0,6386612700	0,1811323607
14	20 058 300	3 166 852	0,0881205642	0,6397881871	0,1752191576
15	77 558 760	120 426 20	0,0834688999	0,6407780422	0,1700028030

Az s sorozat s_i elemének ellenőrzésekor két eset van: ha $i > w_i$, akkor a C_i kapacitás egyszerűen számítható: $H_n - H_i$, mivel a farok minden s_j elemének hozzájárulása csak s_j.

Ha viszont $i \leq w_i$, akkor a C_i-t definiáló szummát két részre bontjuk: az első részhez a farok azon s_j kezdő elemeinek hozzájárulása tartozik, amelyekre teljesül $s_j \geq i$, a második részhez pedig a többi elem. Legyen

$$q(s) = q = \max_{1 \leq i \leq n} \{i \mid i(i-1) \leq H_i\}.$$

3.2. Tétel. (Iványi, Lucz, Móri, Sótér [35]) *Ha* $n \geq 1$, *az* $s = (s_1, \ldots, s_n)$ $(0, 1, n)$*-szabályos sorozat akkor és csak akkor* $(0, 1, n)$*-grafikus, ha*

$$H_n \quad \textit{páros}, \tag{3}$$

továbbá

$$H_i \leq i(k-1) + H_n - H_k \quad (i = 1, \ldots, q), \tag{4}$$

ahol

$$k(s) = k = \begin{cases} w_i, & \text{ha } i \leq w_i, \\ i, & \text{ha } i > w_i. \end{cases} \tag{5}$$

Bizonyítás. Megmutatjuk, hogy a tételben szereplő feltétel ekvivalens a 2.2. tétel feltételeivel.

A (3) feltétel pontosan megegyezik az (1) feltétellel.

Ha $i \le w_i$, akkor

$$H_i \le i(i-1) + (w_i - i + 1)i + H_n - H_{w_i} \tag{6}$$

és ha $i > w_i$, akkor

$$H_i \le i(i-1) + H_n - H_i. \tag{7}$$

Ha (6) jobb oldalán kiemeljük i-t, akkor a

$$H_i \le iw_i + H_n - H_{w_i}$$

egyenlőtlenséget kapjuk. Ha a (4) egyenlőtlenségbe (5) alapján behelyettesítjük k-t, akkor az $i \le w_i$ esetben a (6), az $i > w_i$ esetben pedig a (7) egyenlőtlenséget kapjuk. □

A következő program a 3.2. tétel alapján adott n-re tetszőleges n-szabályos sorozatról eldönti, hogy grafikus-e. A program futási ideje minden sorozatra $O(n)$. Érdemes megjegyezni, hogy akár a bemenő sorozat rendezettségétől is eltekinthetünk, mivel a sorozat elemei egész számok és mindegyik a $[0, n-1]$ intervallumba esik, így szükség esetén $O(n)$ idő alatt rendezni tudjuk a sorozatot.

A szokásos változók mellett H_i az éppen tesztelt s első i elemének az összege, w a kurrens s_i-hez tartozó súlypont; y pedig az ellenőrzés egyszerűsítéséhez használt változó (az aktuális s_i *vágópontja* (w és i maximuma)).

3.2. Algoritmus. Erdős–Gallai-lineáris(n, s, L)

```
1.  H_1 = s_1                              // 1. sor: H_1 beállítása
2.  for i = 2 to n                         // 2–3. sor: H további elemeinek számítása
3.      H_i = H_{i-1} + s_i
4.  if H_n páratlan                        // 4–6. sor: paritás ellenőrzése
5.      L = 0
6.      return
7.  w = n                                  // 7. sor: súlypont beállítása
8.  for i = 1 to n - 1                     // 8–16. sor: s elemeinek tesztelése
9.      while w > 1 ∧ s_w < i              // 8–10. sor: aktuális súlypont számítása
10.         w = w - 1
11.     y = max(i, w)                      // 11. sor: aktuális vágópont számítása
12.     if H_i > i(y - 1) + H_n - H_y
13.         L = 0                          // 13–14. sor: nemgrafikus s elutasítása
14.         return L
15. L = 1                                  // 15–16. sor: s grafikus
16. return L
```

3.2. KÖVETKEZMÉNY. *A* $(0, 1, n)$*-szabályos* $s = (s_1, \ldots, s_n)$ *sorozatról az* EGl *algoritmus* $\Theta(n)$ *idő alatt dönti el, hogy* $(0, 1, n)$*-grafikus-e.*

Bizonyítás. A 1–3. sorok $\Theta(n)$ időt igényelnek. Mivel a w súlypontot legfeljebb n-szer frissítjük, ezért a 4–16. sorok időigénye $O(n)$, így az algoritmus futási ideje $\Theta(n)$. □

3.5. Gyors Erdős–Gallai-algoritmus (EGgy)

Tripathi és Vijai a [86] cikkben az Erdős–Gallai-tétel következő, lényeges gyorsítást lehetővé tevő változatát is bizonyították.

Az ismétlődő elemeket gyakoriságuk segítségével tömörítve a $(0,1,n)$-szabályos $(s_1,\ldots,s_n)$ sorozat felírható az $(s_{i_1}^{e_1},\ldots,s_{i_q}^{e_q})$ alakban, ahol $s_{i_1}<\cdots<s_{i_q}$; $e_1,\ldots,e_q\geq 1$ és $e_1+\cdots+e_q=n$. Legyen $g_j=e_1+\cdots+e_j$ $(j=1,\ \ldots,\ q)$.

Az s_i elemet az s *ugró pontjának* nevezzük, ha $i=n$, vagy $1\leq i\leq n-1$ és $s_i>s_{i+1}$. Ekkor az ugró pontok az $s_{g_1},\ldots,s_{g_q}$ elemek.

3.3. Tétel. (Tripathi, Vijay [86]) *Az $s=(s_1,\ldots,s_n)$ szabályos sorozat akkor és csak akkor grafikus, ha*

$$H_n \quad \textit{páros}$$

és

$$H_{g_i}-g_i(g_i-1)\leq\sum_{k=c_i+1}^{n}\min(g_i,s_k)\quad (i=1,\ldots,q).$$

Bizonyítás. Lásd [86]. □

Megjegyezzük, hogy az ellenőrzést elég a $(q-1)$-edik ugró pontig folytatni.

A következő tétel – EGe és EGu előnyeit egyesítve – a tesztelési idő további csökkentését teszi lehetővé.

3.4. Tétel. *A $(0,1,n)$-szabályos $s=(s_1,\ldots,s_n)$ sorozat akkor és csak akkor $(0,1,n)$-grafikus, ha igaz az, hogy*

$$H_n \quad \textit{páros}$$

és

$$H_{g_i}\leq\begin{cases}H_n-H_{g_i}+g_i(g_i-1), & \textit{ha}\ \ w_i\leq g_i\\ H_n-H_{w_i}+g_i(w_i-1), & \textit{ha}\ \ w_i>g_i\quad (i=1,\ldots,q-1).\end{cases}\tag{8}$$

Bizonyítás. A csak az ugró pontokban való tesztelés elégségességét Tripathi és Vijay [86] már bebizonyították. A tételben megadott feltétel ezeket az ellenőrzéseket végzi el, kihasználva a sorozat elemeinek monoton csökkenését, azaz a

$$\sum_{k=g_i+1}^{n}\min(g_i,s_k)$$

összeget nem számolja újra minden esetben, pontosabban nem ebben a formában végzi el a számítást, hanem explicit módon.

A kifejezés értéke a (9) formában adható meg, mégpedig azért, mert a sorozat monotonitása garantálja, hogy a $k\leq w_i$ esetén a $\min(i,s_k)$ kifejezés értéke i, míg $k>w_i$ esetén s_k. Ebből következik, hogy

$$\sum_{k=g_i+1}^{n-1}\min(g_i,s_k)=\begin{cases}H_n-H_{g_i}, & \text{ha}\ \ w_i\leq g_i\\ H_n-H_{w_i}+g_i(w_i-g_i), & \text{ha}\ \ w_i>g_i.\end{cases}\tag{9}$$

4. táblázat. Az ugró és a gyors Erdős–Gallai-algoritmusok egy sorozatra jutó átlagos műveletigénye.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
EGu	4	12	16	21	26	32	37	43	49	56	63	70	77	85
$\frac{\text{EGu}}{n}$	$2,0$	$4,0$	$4,0$	$4,2$	$4,3$	$4,6$	$4,6$	$4,8$	$4,9$	$5,1$	$5,3$	$5,4$	$5,5$	$5,7$
EGgy	12	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
$\frac{\text{EGgy}}{n}$	$6,0$	$5,0$	$4,3$	$3,8$	$3,5$	$3,3$	$3,1$	$3,0$	$2,9$	$2,8$	$2,8$	$2,7$	$2,6$	$2,6$

Az eddigiek alapján az eredeti feltételt átírhatjuk a következő alakba:

$$H_{g_i} - g_i(g_i - 1) \leq \begin{cases} H_n - H_{g_i}, & \text{ha } w_i \leq g_i \\ H_n - H_{w_i} + g_i(w_i - g_i), & \text{ha } w_i > g_i. \end{cases} \tag{10}$$

A (10) egyenlőtlenséget átrendezve megkapjuk a (8) egyenlőtlenséget. □

A most megadott tétel alapján megvalósított EGgy algoritmus és az eddigi legjobb (ugró Erdős–Gallai) algoritmus sorozatonkénti átlagos műveletszámait, valamint a sorozat egyetlen elemére jutó átlagos műveletszámot tartalmazza a 4. táblázat. Itt az átlag azt jelenti, hogy a vizsgált sorozatokhoz tartozó műveletszámok összegét elosztottuk a sorozatok számával.

A táblázatból leolvasható, hogy az átlagos műveletszám a lineáris algoritmus esetében kevesebb, mint fele annyi, mint az ugró algoritmus esetében és az n érték növelésével minden lépésben ugyanannyival növekszik. Az utóbbi azért fontos, mert így az n növelésével lépésről lépésre nagyobb az új algoritmussal elért gyorsulás a korábbiakhoz képest. Az utóbbi kijelentés azonban nem meglepő, ha figyelembe vesszük, hogy a korábbi ismert algoritmusok négyzetesek, míg az új algoritmus lineáris futási idejű. Jól látható, hogy a régi módszer esetén a sorozatok egy eleméhez tartozó átlagos műveletszám az n érték növekedésével együtt nőtt, az új módszernél azonban ez a szám lépésről lépésre csökken.

A 3.4. tétel feltételeit ellenőrzi a következő algoritmus.

3.3. Algoritmus. Erdős–Gallai-gyors(n, s, L)

1. $H_1 = s_1$ // 1. sor: H_1 beállítása
2. **for** $i = 2$ **to** n // 2–4. sor: H további értékeinek számítása
3. $\quad H_i = H_{i-1} + s_i$
4. **if** H_n páratlan // 4–7. sor: paritás ellenőrzése
5. $\quad L = 0$ // 5–6. sor: nemgrafikus sorozat elutasítása
6. $\quad$ **return**
7. $w = n$ // 7. sor: súlypont kezdeti értéke
8. **for** $i = 1$ **to** $n - 1$ // 8–26. sor: sorozat tesztelése
9. $\quad$ **if** $s_i == s_{i+1}$ // 9–11 sor: ugrópont tulajdonság ellenőrzése

```
10.         continue                          // 10. sor: nem ugrópont átlépése
11.     while (w > 1) ∧ (s_w ≤ i)             // 11–12. sor: súlypont frissítése
12.         w = w − 1
13.     if w < i                              // 13–16. sor: súlypont ugrópont előtt
14.         if H_i > H_n − H_i + i(i − 1) 14–18. sor: tétel feltételének ellenőrzése
15.             L = 0                         // 15–16. sor: nemgrafikus sorozat elutasítása
16.             return
17.     else if H_i > H_n − H_w + i(w − 1)    // 17–19. sor: súlypont ugrópont után
18.             L = 0                         // 18–19. sor: nemgrafikus sorozat elutasítása
19.             return
20. L = 1                                     // 20–21. sor: grafikus sorozat elfogadása
21. return L
```

3.5. Tétel. *Az Erdős–Gallai-gyors algoritmus műveletigénye lineáris.*

Bizonyítás. Az 1. sor időigénye $O(1)$, a 2–3. soré $\Theta(n)$, a 4–7. soré $O(1)$, a 8–20. soré $O(n)$, a 21–22. soré pedig $O(1)$. így az algoritmus teljes műveletigénye $\Theta(n)$. □

3.6. Eltoló Havel–Hakimi-algoritmus (HHe)

Havel és Hakimi eredeti tételének természetes algoritmikus megfelelőjét HHr-nek (rendező Havel–Hakimi) nevezzük, mert a tétel természetes alkalmazása minden menetben igényli a redukált bemenet rendezését.

A tétel alapján olyan megvalósítás is lehetséges, hogy a fokszámok redukálását a sorozat monotonitását megőrizve végezzük. Ekkor az eltoló Havel–Hakimi-algoritmust (HHe) kapjuk.

3.7. Paritásos Havel–Hakimi-algoritmus (HHp)

Érdekes gondolat az Erdős–Gallai- és a Havel–Hakimi-feltételek együttes alkalmazása úgy, hogy először s paritását vizsgáljuk, és csak a páros bemenetekre alkalmazzuk a rendszerint négyzetes futási idejű rekurzív ellenőrzést. Ezzel ugyan elveszítjük a nullamentes Havel–Hakimi azon jó tulajdonságát, hogy legjobb esetben konstans idő alatt lefut, viszont cserébe megkapjuk azt, hogy a várható futási idő jelentősen csökken.

3.8. Lineáris Havel–Hakimi-tesztelő algoritmus (HHl)

Az EGl algoritmusban kulcsszerepe volt az s_i elemhez tartozó w_i súlypontnak [35], amely $i > s_1$ esetén 0, egyébként a legnagyobb olyan k index, amelyre igaz, hogy $s_k \geq bi$ (természetesen ez az egyenlőtlenség a $(0, 1, n)$ -gráfokra – azaz a $b = 1$ esetben – az $s_k \geq i$ egyenlőtlenségre egyszerűsödik). Most azonban a súlypont mellett az r_i maradék is fontos: ez azt adja meg, hány felhasználatlan fok maradt az előző, s_{i-1} elem feldolgozása során.

A súlypont arra is alkalmas, hogy a Havel–Hakimi-algoritmus lineáris változatában fontos szereplő legyen. Az algoritmus alapja a következő tétel.

3.6. TÉTEL. *Ha* $n \geq 1$, *az* $(s_1, \ldots, s_n)$ $(0, 1, n)$*-szabályos sorozat akkor és csak akkor* $(0, 1, n)$*-grafikus, ha*

$$s_1 < w_1, \tag{11}$$

és

$$s_i \leq w_i + r_{i-1} \quad (i = 2, \ldots, n-1), \tag{12}$$

ahol

$$w_i = \max(k \geq 0 \mid s_k \geq i) \quad (i = 1, \ldots, n), \tag{13}$$

és

$$r_i = w_i + r_{i-1} - s_i \quad (i = 1, \ldots, n). \tag{14}$$

Bizonyítás. (13) szerint w_i megadja, hogy az s sorozatban hány olyan s_k elem van, amely legalább i. Ezért a Havel–Hakimi-algoritmus első menetének végrehajtásához szükséges és elégséges (11), a további rekurzív menetekhez pedig (12), azaz az, hogy az s_i fokszám feldolgozásához elég legyen az előző menet felhasználatlan maradéka (r_i), plusz az adott menetben felhasználhatóvá váló fokok (w_i). □

A Havel–Hakimi-lineáris pszeudokódjában $r = (r_1, \ldots, r_n)$, ahol r_i az s_i-hez tartozó maradék; $w = (w_1, \ldots, w_n)$, ahol w_i az i indexhez tartozó súlypont, és $H = (H_1, \ldots, H_n)$, ahol H_i az s sorozat első i elemének összege.

3.4. Algoritmus. Havel–Hakimi-lineáris(n, s, L)

```
1.  if s_1 == 0                        // 1–3. sor: nullákból álló sorozat elfogadása
2.      L = 1
3.      return L
4.  if s_{s_1+1} == 0                  // 4–6. sor: s_1 tesztelése konstans idő alatt
5.      L = 0
6.      return L
7.  w_1 = n                            // 7-12. sor: az első súlypont és tartalék számítása
8.  j = n
9.  while s_j ≤ 1 ∧ j > 0
10.     w_1 = w_1 − 1
11.     j = j − 1
12. r_1 = w_1 − 1 + s_1
13. for i = 2 to n − 1                 // 13–21. sor: s tesztelése
14.     j = w_{i−1}                    // 14–17. sor: új súlypont kiszámítása
15.     while s_j ≤ i ∧ j > 0
16.         w_i = w_i − 1
17.         j = j − 1
18.     if w_i ≥ i                     // 18–22. sor: s grafikus?
19.         if s_i > w_i + r_{i−1}
20.             L = 0                  // 20–21. sor: s nem grafikus
```

```
21.             return L
22.         r_i = w_i − 1 + r_{i−1} − s_i          // 22. sor: r_i frissítése
23.     if w_i < i
24.         if s_i > w_i + r_{i−1}
25.             L = 0                           // 25–26. sor: s nem grafikus
26.             return L
27.         r_i = w_i + r_{i−1} − s_i              // 27. sor: r_i frissítése
28. L = 1                                          28–29. sor: s grafikus
29. return L
```

3.7. Tétel. *A Havel–Hakimi-lineáris algoritmus futási ideje legjobb esetben* $\Theta(1)$, *legrosszabb esetben* $\Theta(n)$.

Bizonyítás. Az 1–6. sorok időigénye $O(1)$, és például a (0^n) bemenetre a program a 3. sorban megáll, ezért a legjobb futási idő $O(1)$. A 7–11. sorok időigénye $\Theta(n)$. Mivel a súlypontok számítása legfeljebb n csökkentést igényel, a 12–29. sorok időigénye $O(n)$, ezért a legrosszabb eset $\Theta(n)$. □

3.9. Példák

3.1. Példa. Legyen az első példában $n = 4$ és $s = \big(3^3, 1\big)$. Az 1–12. sorok szerint $r_1 = 0$. Ha $i = 2$, akkor $w_i = 3$, és a 19. sor feltétele nem teljesül, ezért s *nem* $(0, 1, 4)$-*grafikus.*

3.2. Példa. A következő példában $n = 7$ és $s = \big(5, 3^2, 2, 1^3\big)$. Az 1–12. sorokban azt kapjuk, hogy $w_1 = 7$ és $r_1 = 1$. Ha $i = 2$, akkor $w_i = 4$, a 19. sor feltétele nem teljesül, és a 22. sor szerint $r_2 = 1$. Ha $i = 3$, akkor $w_i = 3$, és nem teljesül a 24. sor feltétele. Ha $i = 4$, akkor $w_i = 1$, és most sem teljesül a 24. sor feltétele. Ha $i = 5$, akkor teljesül a 09. sor $s_j \le 1$ feltétele, és ezért s $(0, 1, 7)$-*grafikus.*

3.3. Példa. Legyen $n = 7$ és $s = \big(5, 4, 1^5\big)$. Erre a sorozatra $r_1 = 1$, és ha $i = 2$, akkor $w_i = 2$, ezért a 24. sor feltétele teljesül, így s *nem* $(0, 1, 7)$-*grafikus.*

3.4. Példa. Utolsó példánkban legyen $n = 7$ és $s = \big(5^2, 4, 3^4\big)$. Az első 12 sor szerint $r_1 = 1$. Ha $i = 2$, akkor $w_i = 7$ és $r_2 = 1$. Ha $i = 3$, akkor $w_3 = 7$ és $r_3 = 2$. Ha $i = 4$, akkor teljesül a 15. sor $s_i \le 1$ feltétele, ezért s $(0, 1, 7)$-*grafikus.*

A következő táblázatokban bemutatjuk, hogyan oszlanak meg a kizárt grafikus és nemgrafikus sorozatok az egyes menetek között. Azt is jellemezzük, hogy átlagosan hány meneten át kell egy grafikus, illetve nemgrafikus sorozatot a kizárásáig tesztelni, és azt is, hogy a menetek hányadrészét fordítjuk átlagosan egy sorozat tesztelésére.

Az 5. táblázat a HHl által az i-edik $(i = 1, \ldots, 11)$ menetben kiszűrt nem $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok számát mutatja $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

5. táblázat. HHl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében a $(0, 1, n)$-szabályos sorozatok közül kiszűrt nem $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0										
2	1	0									
3	6	0	0								
4	22	2	0	0							
5	85	8	2	0	0						
6	311	35	12	2	0	0					
7	1169	128	58	17	2	0	0				
8	4369	488	239	100	24	2	0	0			
9	16524	1805	942	471	173	32	2	0	0		
10	62650	6800	3601	2021	956	289	43	2	0	0	
11	239008	25571	13677	8147	4561	1877	470	55	2	0	0

6. táblázat. HHl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében a $(0, 1, n)$-szabályos sorozatok közül kiszűrt grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1										
2	2	0									
3	1	3	0								
4	1	8	2	0							
5	1	16	12	2	0						
6	1	29	48	22	2	0					
7	1	47	130	127	35	2	0				
8	1	72	306	488	290	54	2	0			
9	1	104	618	1492	1475	591	78	2	0		
10	1	145	1158	3863	5757	3868	1112	110	2	0	
11	1	195	1998	8890	18440	18662	9053	1958	149	2	0

A 6. táblázat HHl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében kiszűrt $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok számát tartalmazza $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

Legyen $n_i(a, b, n, \mathrm{A}) = n_i$, illetve $m_i(a, b, n, \mathrm{A}) = m_i$ az A algoritmus által az (a, b, n)-szabályos vagy (a, b, n)-páros sorozatok vizsgálata során az i-edik ($i = 1, \ldots, n$) menetben kizárt nemgrafikus, illetve grafikus sorozatok száma, továbbá legyen

$$N = \sum_{i=1}^{n-1} n_i \quad \textit{és} \quad M = \sum_{i=1}^{n-1} m_i,$$

$$X(a, b, n, \mathrm{A}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} i n_i}{N},$$

$$Y(a, b, n, \mathrm{A}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} i m_i}{M},$$

$$Z(a, b, n, \mathrm{A}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} i(m_i + n_i)}{N + M},$$

$$X'(a, b, n, \mathrm{A}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} i n_i}{N(n-1)}, \tag{15}$$

$$Y'(a, b, n, \mathrm{A}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} i m_i}{M(n-1)}, \tag{16}$$

$$Z'(a, b, n, \mathrm{A}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} i(m_i + n_i)}{(N + M)(n-1)}. \tag{17}$$

A 7. táblázat a HHl algoritmus hatékonyságát jellemzi $a = 0$, $b = 1$ és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

7. táblázat. HHl hatékonysági jellemzői $a = 0$, $b = 1$ és $n = 2, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/jellemző	X	Y	Z	X'	Y'	Z'
2	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$
3	$1,000000000$	$1,750000000$	$1,300000000$	$0,500000000$	$0,875000000$	$0,650000000$
4	$1,083333333$	$2,454545455$	$1,514285714$	$0,361111111$	$0,818181818$	$0,504761905$
5	$1,126315789$	$3,032258065$	$1,595238095$	$0,281578947$	$0,758064516$	$0,398809524$
6	$1,180555556$	$3,588235294$	$1,712121212$	$0,236111111$	$0,717647059$	$0,342424242$
7	$1,220524017$	$4,111111111$	$1,796620047$	$0,203420670$	$0,685185185$	$0,299436674$
8	$1,262734584$	$4,629843364$	$1,897435897$	$0,180390655$	$0,661406195$	$0,271062271$
9	$1,299062610$	$5,140793396$	$1,988235294$	$0,162382826$	$0,642599175$	$0,248529412$
10	$1,335323852$	$5,650162338$	$2,083407305$	$0,148369317$	$0,627795815$	$0,231489701$
11	$1,368874588$	$6,157056683$	$2,174534186$	$0,136887459$	$0,615705668$	$0,217453419$

Az 7. táblázat 11. sorában található $X'(0, 1, 11) = 0,136887459$ és $Y'(0, 1, 11) = 0,615705668$. Eszerint 11 csúcs esetén a nemgrafikus sorozatok kiszűréséhez átlagosan a menetek 14%-ára, míg a grafikus sorozatok kiszűréséhez

átlagosan 62%-ára van szükség, ahonnan az következik, hogy az összes szűréshez átlagosan a menetek 22%-át kell végrehajtani.

Érdemes megjegyezni, hogy Tripathi és Vijay ugrópontokról szóló tétele a HHl algoritmus gyorsítására is felhasználható.

4. Általános leszámlálási eredmények

Eddig például Avis és Fukuda [2], Barnes és Savage [3, 4], Burns [14], Erdős és Moser [59], Frank, Savage and Sellers [25], Kleitman és Winston [42], Rødseth, Sellers, Tverberg [70], Ruskey et al. [71], Simion [75], Stanley [83], Winston és Kleitman [90] publikáltak foksorozatok leszámlálására vonatkozó eredményeket. Az általunk vizsgált sorozatok számával kapcsolatos eredmények találhatók Sloane és Ploffe [76], valamint Stanley [82] könyvében és a *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences* című honlapon [78, 79, 80] is.

Ha l, m és u egész számok, továbbá $l \leq u$ és $m \geq 1$, akkor az $s = (s_1, \dots, s_n)$ (l, u, m)-korlátos sorozatok $B(l, u, m)$ száma

$$B(l, u, m) = (u - l + 1)^m. \tag{18}$$

A (18) képlet közvetlen adódik abból, hogy az s sorozatnak mind az m eleme $u - l + 1$ lehetséges értéket vehet fel.

Az is közvetlenül belátható, hogy ha l, m és u egész számok, továbbá $l \leq u$ és $m \geq 1$, akkor az (l, u, m)-szabályos sorozatok $R(l, u, m)$ száma

$$R(l, u, m) = \binom{m + u - l}{m}. \tag{19}$$

Legyen ugyanis az $s = (s_1, \dots, s_m)$ (l, u, m)-szabályos sorozat esetén $s' = (s'_1, \dots, s'_m)$, ahol $s'_i = s_i + m - i$. A lehetséges s és s' sorozatok halmazai között kölcsönösen egyértelmű kapcsolat áll fenn. A különböző s' sorozatok száma pedig annyi, ahányféleképpen a különböző l, $l + 1$, $\dots$, $u + m - 1$ számok – azaz $u + m - l$ szám – közül m számot ki tudunk választani.

Ha $l = 0$, $u = n - 1$ és $m = n$, akkor az

$$R(0, n - 0, n) = R(n) = \binom{2n - 1}{n} \tag{20}$$

alakot kapjuk.

A szimulációs vizsgálatok elemzésénél (is) hasznos a szabályos és a páros sorozatok számát megadó függvények tulajdonságainak ismerete.

4.1. Lemma. *Ha $n \geq 1$, akkor*

$$\frac{R(n+2)}{R(n+1)} > \frac{R(n+1)}{R(n)}, \tag{21}$$

$$\lim_{n\to\infty} \frac{R(n+1)}{R(n)} = 4, \tag{22}$$

továbbá

$$\frac{4^n}{\sqrt{4\pi n}}\left(1-\frac{1}{2n}\right) < R(n) < \frac{4^n}{\sqrt{4\pi n}}\left(1-\frac{1}{8n+8}\right). \tag{23}$$

Bizonyítás. A (20) egyenlőség alapján

$$\frac{R(n+2)}{R(n+1)} = \frac{(2n+3)!(n+1)n!}{(n+2)!(n+1)!(2n+1)!} = \frac{4n+6}{n+2} = 4 - \frac{2}{n+2},$$

ahonnan (21) és (22) is közvetlenül adódik.

(23) belátásához felhasználjuk a Stirling-formula következő alakját [16]: ha $n \ge 1$, akkor

$$n! = \left(\frac{n}{e}\right)^n \sqrt{2\pi n} e^{\tau_n},$$

ahol

$$\frac{1}{12n+1} < \tau_n < \frac{1}{12n}.$$

□

1987-ben Ascher [1] a következő képletet vezette le a $(0,1,n)$-páros sorozatok $E(n)$ számára.

4.2. Lemma. (Ascher [1], Sloane and Plouffe [76]) *Ha $n \ge 1$, akkor a $(0,1,n)$-páros sorozatok $E(n)$ száma*

$$E(n) = \frac{1}{2}\left(\binom{2n-1}{n} + \binom{n-1}{\lfloor n \rfloor}\right). \tag{24}$$

Bizonyítás. Lásd [1, 76]. □

A (20) képlet és a 4.2. lemma egybevetése mutatja, hogy a páros és páratlan sorozatok számának nagyságrendje megegyezik, azonban több a páros sorozat, mint a páratlan. A 4.2. lemma alapján pontosan meg tudjuk adni $E(n)$ aszimptotikus nagyságrendjét.

4.3. Lemma. (Iványi, Lucz, Móri, Sótér [35]) *Ha $n \ge 1$, akkor*

$$\frac{E(n+2)}{E(n+1)} > \frac{E(n+1)}{E(n)},$$

$$\lim_{n\to\infty} \frac{E(n+1)}{E(n)} = 4,$$

továbbá

$$\frac{4^n}{\sqrt{\pi n}}(1-\delta(n)) < E(n) < \frac{4^n}{\sqrt{\pi n}}(1-\Delta(n)),$$

ahol $\delta(n)$ és $\Delta(n)$ monoton csökkenve nullához tartó sorozatok.

Bizonyítás. A bizonyítás hasonló a 4.1. lemma bizonyításához. □

Amint azt a következő állítás és az 1. táblázat is mutatja, az $E(n)/R(n)$ hányadosok sorozata monoton csökkenve $\frac{1}{2}$-hez tart.

4.1. Következmény. (Iványi, Lucz, Móri, Sótér [35]) *Ha* $n \geq 1$, *akkor*

$$\frac{E(n+1)}{R(n+1)} < \frac{E(n)}{R(n)}$$

és

$$\lim_{n\to\infty} \frac{E(n)}{R(n)} = \frac{1}{2}.$$

Bizonyítás. Lásd [35]. □

Bár az alapfeladatban nemnegatív elemekből álló sorozatok szerepelnek, algoritmusaink – a futási idő csökkentése érdekében – csak a sorozatok pozitív kezdőszeletét vizsgálják. Ennek várható hatását jellemzi a következő két állítás, amelyek a nullát tartalmazó sorozatok számát és a sorozatokban lévő nullák átlagos számát adják meg.

4.4. Lemma. *Ha* $n \geq 1$, *akkor a* $(0,1,n)$*-szabályos sorozatok közül*

$$R_z(n) = \binom{2n-2}{n-1} = \frac{n}{2n-1}R(n).$$

tartalmaz legalább egy nullát.

Bizonyítás. A nullát tartalmazó $(0,1,n)$-szabályos sorozatok halmaza kölcsönösen egyértelműen leképezhető a $(0,n-1,n)$-szabályos sorozatok halmazára. Az utóbbi halmaz elemszáma pedig (20) szerint

$$\binom{2n-2}{n-1} = \frac{(2n-2)!n}{n(n-1)!(2n-1)} = \frac{n}{2n-1}\binom{2n-1}{n} = \frac{n}{2n-1}R(n).$$

□

Egész számokból álló sorozat különböző elemeinek a számát az adott sorozat *szivárványszámának* nevezzük. Legyen $q_n(s)$ valószínűségi változó, amely egy véletlen $(0,1,n)$-korlátos sorozat szivárványszámát jellemzi. $q_n(b)$ szivárványszámának várható értékét és szórását a következő állítás tartalmazza.

4.5. Lemma. (Iványi, Lucz, Móri, Sótér [35]) *Legyen* σ *egy véletlen* $(0,n-1,n)$*-korlátos sorozat és* $q_n(\sigma)$ *a szivárványszáma. Ekkor* σ $E[q_n(\sigma)]$ *várható értéke és*

$Var[q_n(\sigma)]$ szórása a következő:

$$
\begin{aligned}
E[q_n(\sigma)] &= n\left[1-\left(1-\frac{1}{n}\right)^n\right] = n\left(1-\frac{1}{e}\right)+O(1),\\
Var[q_n(\sigma)] &= n\left(1-\frac{1}{n}\right)^n\left[1-\left(1-\frac{1}{n}\right)^n\right]\\
&\quad + n(n-1)\left[\left(1-\frac{2}{n}\right)^n-\left(1-\frac{1}{n}\right)^{2n}\right]\\
&= \frac{n}{e}\left(1-\frac{2}{e}\right)+O(1).
\end{aligned}
$$

Bizonyítás. Lásd [35]. □

A következő állítás a k szivárványszámú $(0, n-1, n)$-szabályos sorozatok számát adja meg.

4.6. Lemma. (Iványi, Lucz, Móri, Sótér [35]) *Ha $1 \le k \le n$ és $m \ge 1$, akkor a k szivárványszámú $(0, n-1, m)$-szabályos sorozatok $S(k, m, n)$ száma*

$$S(k,m,n) = \binom{n}{k}\binom{m-1}{k}, \ k = 1, \ldots, n.$$

Bizonyítás. Lásd [35]. □

Eszerint a véletlen σ $(0, n-1, m)$-szabályos sorozatok $r_n(\sigma)$ szivárványszáma hipergeometriai eloszlású az $n+m-1$, n és m paraméterekkel. Legyen $\rho_n(\sigma)$ egy véletlen $(0, 1, n)$-szabályos sorozat és $E[r_n(\sigma)]$, illetve $V[r_n(\sigma)]$ σ várható értéke, illetve szórása. Ekkor $\rho_n(\sigma)$ szivárványszámának várható értékét és szórását a következő állítás tartalmazza.

4.2. Következmény. (Iványi, Lucz, Móri, Sótér [35]) *Legyen ρ egy véletlen $(0, 1, n)$-szabályos sorozat. Ekkor ρ $E[r_n(\rho)]$ várható értéke és $V[r_n(\rho)]$ szórása a következő:*

$$
\begin{aligned}
E[r_n(\rho)] &= \frac{n^2}{2n-1} = \frac{n}{2} + \frac{n}{4n-2} = \frac{n}{2} + O(1),\\
V[r_n(b)] &= \frac{n^2(n-1)}{2(2n-1)^2} = \frac{n}{8} + \frac{n}{128n^2-128n+32} = \frac{n}{8} + O(1).
\end{aligned}
$$

Bizonyítás. Lásd [35]. □

A pontos algoritmusokról szóló 3.1. részben beláttuk, hogy elég a $(0, 1, n)$-páros sorozatok nullamentes prefixét megvizsgálni ahhoz, hogy eldöntsük, grafikus-e a vizsgált sorozat. Mivel a 4.4. lemma szerint a páros sorozatoknak aszimptotikusan csak nullmértékű hányada tartalmaz nullát (és ez a hányad a gyakorlat számára legérdekesebb n-ekre sem nagy), konkrét sorozatok vizsgálatánál nem jelentős az időmegtakarítás. Amikor viszont az összes páros sorozatot elemezzük (az átlagos futási idő vagy $G(n)$ meghatározása érdekében), nagyon hasznos a következő lemma.

Legyen $G_z(n)$ a nullamentes grafikus n-páros sorozatok száma.

4.7. Lemma. (Iványi, Lucz, Móri, Sótér [35]) *Ha $n \geq 2$, akkor a $(0,1,n)$-grafikus sorozatok száma*

$$G(n) = G_z(n) + G(n-1).$$

Bizonyítás. A $(0,1,n)$-grafikus sorozatokban vagy $s_n = 0$, vagy $s_n > 0$. Az előbbiekben vagy $s_1 = n-1$, vagy $s_1 < n_1$. Ha $s_1 = n-1$ és $s_n = 0$, akkor az s sorozat biztosan nem grafikus, mert nincs benne elég pozitív elem. Az $s_1 < n-1$ és $s_n = 0$ tulajdonságú sorozatok $n-1$ hosszú fejei pontosan a $(0,1,n-1)$-grafikus sorozatok. □

A grafikus sorozatok $G(n)$ számának jellemzésével kapcsolatos kutatások ígéretes iránya a páros számok pozitív összeadandókra való felbontása, és annak vizsgálata, hogy az ilyen felbontások közül melyek $(0,1,n)$-grafikusak [3, 4, 14]. Ezek segítségével sikerült a grafikus sorozatok számára vonatkozó alábbi aszimptotikus korlátokat bizonyítani.

4.8. Lemma. (Burns [14]) *Léteznek olyan pozitív c és C állandók, hogy a $(0,1,n)$-grafikus sorozatok $G(n)$ száma a következő korlátok közé esik:*

$$\frac{4^n}{cn} < G(n) < \frac{4^n}{(\log n)^C \sqrt{n}} \,.$$

Bizonyítás. Lásd [14]. □

Nézzük meg, mit várhatunk a HHl algoritmus első hat sorától. Az algoritmus lehetséges bemenetei a $(0, n-1, n)$-szabályos sorozatok. Ezek $R(n)$ száma a (20) képlet szerint

$$R(n) = \binom{2n-1}{n}.$$

HHl első három sora kiszűri például azokat a sorozatokat, amelyek $(n-1)$-gyel kezdődnek, és nullával végződnek. Ezek száma (19) szerint

$$B(0, n-1, n-2) = \binom{2n-3}{n-2}.$$

Ezek közül a HHl által kiszűrt sorozatok $R_1(n)$ hányada

$$R_1(n) = \frac{\binom{2n-3}{n-2}}{\binom{2n-1}{n}} = \frac{2(2n-1)}{n} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8n-4}\,.$$

HHl pontosan azokat a sorozatokat szűri ki, amelyek $(n-i)$-vel ($i = 1, \ldots, n-2$) kezdődnek, és legalább i nullát tartalmaznak. Rögzített i-re az ilyen sorozatok aszimptotikus részaránya $1/4^i$, úgy HHl aszimptotikusan a szabályos sorozatokból a

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{4^i} = \frac{1}{3}$$

összegnek megfelelő hányadot, azaz egy harmad részét szűri ki.

Mivel a grafikus sorozatok aszimptotikus sűrűsége nulla, ezért minden A pontos algoritmusra létezik egy $s_{1,A} + s_{2,A} + \cdots = 1$ sor (valószínűség-eloszlás), amelyben s_i az i-edik menetben kiszűrt hányad. Például $s_{1,A} = 1/3$ minden olyan pontos algoritmusra, amelyik első menetben a PT algoritmust (vagy annak valamilyen lassú változatát) használja – ilyen a HH és az EG is.

5. Tesztelő algoritmusok

Sorozatok megvalósíthatóságának vizsgálata során természetes észrevétel, hogy az s sorozat i-hez tartozó fejének H_i fokszám igényét részben belső (az adott fejen belüli), részben pedig külső (a fejnek megfelelő farokhoz tartozó) fokszámokkal elégítjük ki.

Először egy „pozitív”, majd egy „paritásos”, egy „binomiális” és végül egy „fejfelező” tesztelő/szűrő algoritmust mutatunk be.

5.1. Pozitív teszt

A farokban lévő nulla elemek nem növelik a farok párosítási lehetőségeit. Ez az észrevétel lehetővé teszi, hogy az i-edik elemhez tartozó farok foklekötési lehetőségeire (potenciáljára) T_i-nél pontosabb becslést adjunk. Ez a teszt a Havel–Hakimi-algoritmus első menetének megfelelő ellenőrzést végzi el. Legyen p az s sorozat pozitív elemeinek a száma.

5.1. KÖVETKEZMÉNY. *Ha $n \geq 1$ és $s = (s_1, \ldots, s_n)$ $(0, 1, n)$-grafikus sorozat, akkor*

$$s_1 \leq p - 1, \quad \textit{vagy} \quad s_1 = 0. \tag{25}$$

Bizonyítás. A (25) egyenlőtlenség azt a követelményt fejezi ki, amelyet a Havel–Hakimi-algoritmus az első iterációs menetben, illetve az Erdős–Gallai-algoritmus a (2) egyenlőtlenség $i = 1$ esetben való ellenőrzésével megvalósít. □

A 5.1. következményen alapuló tesztet a következő algoritmus végzi, amelyben p: a bemenetben lévő pozitív elemek száma.

5.1. Algoritmus. Pozitív teszt(n, s, L)

1. $L = 0$
2. $p = n$

while $s_p == 0$
    $p = p - 1$
if $s_1 > p - 1$
    return L
$L = 2$
return L

Ennek az algoritmusnak a futási ideje a legjobb $\Theta(1)$ és a legrosszabb $\Theta(n)$ között változik.

Ennek az algoritmusnak a javított változata az alábbi Gyors teszt (Gyt) [54].

5.2. Algoritmus. Gyors teszt(n, s, L)

if $s_{s_1+1} == 0$
    $L = 0$
    return L
$L = 2$
return L

A Gyors teszt ugyanazt az eredményt adja, mint Pozitív teszt, a futási ideje azonban mindig $\Theta(1)$.

5.2. paritás teszt

Első tesztünk az Erdős–Gallai-tétel első szükséges feltételén alapul. Nagyon hatékony teszt, mivel mind a korlátos, mind a szabályos sorozatoknak körülbelül fele páratlan sorozat, és a teszt ezekről lineáris idő alatt megállapítja, hogy biztosan nem grafikus sorozatok.

5.1. LEMMA. *Ha $n \geq 1$ és s $(0, 1, n)$-grafikus sorozat, akkor*

$$H_n \quad \text{páros.}$$

Bizonyítás. Egy egyszerű gráf minden éle kettővel növeli a fokszámok összegét. □

Ezt az állítást a 2.2. tétel következményeként is megkaphatjuk. A 5.1. lemmában javasolt tesztet a következő algoritmus végzi.

5.3. Algoritmus. Paritás teszt(n, s, L)

$L = 0$
$H_1 = 0$
for $i = 2$ **to** n
    $H_i = H_{i-1} + s_i$
if H_n páratlan
    return L
$L = 2$
return L

Ennek az algoritmusnak a lépésszáma minden esetben $\Theta(n)$.

5.3. Binomiális teszt (Bt)

Harmadik tesztünk az Erdős–Gallai-tétel másik szükséges feltételének ötletét terjeszti ki. Lényege, hogy a fej igényének a fejen belül ki nem elégíthető részét a faroknak, a farok igényének belül ki nem elégíthető részét a fejnek kell kielégítenie, végül a teljes sorozat igényét a fej és a farok együttműködésével, valamint a fej és a farok belső éleivel kell kielégíteni. Az algoritmus nevét arról kapta, hogy a fej és a farok belső éleinek a számát egy-egy binomiális együttható segítségével becsüljük. Legyen p az s sorozat pozitív elemeinek a száma.

5.2. LEMMA. *Ha* $n \geq 1$ *és* s $(0, 1, n)$*-grafikus sorozat, akkor*

$$2H_i \leq i(i-1) + T_i \quad (i = 1, \ldots, p). \tag{26}$$

Bizonyítás. A (26) egyenlőtlenség azt fejezi ki, hogy a fej H_i igényét a legfeljebb $i(i-1)$ belső lehetőség és a farok legfeljebb T_i kapacitása segítségével kell kielégíteni, ahol $T_I = H_n - H_i$. □

A 5.2. lemmában javasolt tesztet végzi el a következő program.

5.4. Algoritmus. Binomiális teszt(n, s, L)

```
p = n
while s_p == 0
    p = p - 1
if p == 1
    L = 0
    return L
H_1 = s_1
for i = 2 to p
    H_i = H_{i-1} + s_i
for i = 1 to p
    if 2H_i > i(i - 1) + H_p
        L = 0
        return L
L = 1
return L
```

Az algoritmus azért kezdi s végénél p meghatározását, mert a 4.7. lemma szerint kevés nulla várható a sorozatokban.

Ennek az algoritmusnak a futási ideje a legjobb $\Theta(1)$ és a legrosszabb $\Theta(n)$ között változik.

Az eddigi szimulációs vizsgálatok szerint nagyon hatékony szűrő algoritmus. Aszimptotikus hatékonysága kulcsfontosságú az optimális tesztelő algoritmus futási ideje szempontjából.

Megjegyezzük, hogy Binomiális teszt $i = 1$ esetén elvégzi Pozitív teszt munkáját, ezért a Pozitív teszt algoritmusra nincs szükségünk. A várható futási idő szempontjából viszont a konstans idő alatt hatékony Gyors teszt hasznos lehet.

Felmerült, hogy a Binomiális teszt algoritmust is csak az ellenőrző pontokon alkalmazzuk, a szimulációs kísérletek azonban azt mutatták, hogy ezzel csökkenne az algoritmus hatékonysága.

n helyett p viszont gyengítené az algoritmust, mert például a rossz $(2, 2, 0)$ sorozatot *nem* szűrné ki. Ha azonban csak a páros nullamentes sorozatokat vizsgáljuk, a $(2, 2, 0)$ és hasonló sorozatokat egyetlen algoritmusunk sem kell tesztelnie (mert ezeket már a bemenő sorozatok előállítása során kiszűrjük).

5.4. Fej felezése (Ft)

Az s sorozat fokpárosító lehetőségeinek az eddigieknél pontosabb becslését kaphatjuk, ha a fejet két részre osztjuk. Legyen $\lfloor i/2 \rfloor = h_i$. Ekkor az $(s_1, \ldots, s_{h_i})$ sorozatot az i indexhez tartozó fej *elejének*, az $(s_{h_i+1}, \ldots, s_i)$ sorozatot pedig az i indexhez tartozó fej *végének* nevezzük.

5.3. Lemma. *Ha $n \geq 1$ és s $(0, 1, n)$-grafikus sorozat, akkor*

$$\begin{aligned} H_i \leq {} & \min(H_{h_i}, T_n - T_i, h_i(n-i)) \\ & + \min(H_i - H_{h_i}, T_n - T_i, (i-h_i)(n-i)) \\ & + \min(h_i(i-h_i), H_i) + 2\min\left(\binom{h_i}{2}, H_{h_i}\right) \\ & + 2\min\left(\binom{i-h_i}{2}, H_i - H_{h_i}\right) \quad (i = 1, \ldots, n), \end{aligned} \tag{27}$$

továbbá

$$\min(H_{h_i}, T_n - T_i, h_i(n-i)) + \min(H_i - H_{h_i}, T_n - T_i, (i-h_i)(n-i)) \leq T_i. \tag{28}$$

Bizonyítás. Legyen G az s sorozatot megvalósító G gráf. Ekkor az i indexhez tartozó fej H_i fokszámösszegét lekötő élek halmazát öt részhalmazra osztjuk: a fej eleje és a farok, a fej vége és a farok közötti, a fej két része közötti, valamint a fej részein belüli élekre. Az egyes részhalmazokba tartozó élek száma legyen rendre $X_{i,1}, \ldots, X_{i,5}$.

$X_{i,1}$ legfeljebb a fej elemeinek H_{h_i} összege, legfeljebb a farok elemeinek $T_n - T_i$ összege, és legfeljebb a fej elejéből és a farokból képezhető párok $h_{h_i}(n-i)$ szorzata lehet, azaz

$$X_{i,1} \leq \min(H_{h_i}, T_n - T_i, h_i(n-i)). \tag{29}$$

Hasonló gondolatmenettel kapjuk, hogy

$$X_{i,2} \leq \min(H_i - H_{h_i}, T_n - T_i, (i-h_i)(n-i)). \tag{30}$$

$X_{i,3}$ legfeljebb $h_i(i - h_i)$, és legfeljebb H_i, ezért

$$X_{i,3} \leq \min(h_i(i-h_i), H_i). \tag{31}$$

$X_{i,4}$ legfeljebb $\binom{h_i}{2}$, és legfeljebb H_{h_i}, így

$$X_{i,4} \le \min\left(\binom{h_i}{2}, H_{h_i}\right), \tag{32}$$

míg $X_{i,5}$ legfeljebb $\binom{i-h_i}{2}$, és legfeljebb $H_i - H_{h_i}$, ahonnan

$$X_{i,5} \le \min\left(\binom{i-h_i}{2}, H_i - H_{h_i}\right). \tag{33}$$

Az is követelmény, hogy a farok részei együtt nem léphetik túl a farok kapacitását, azaz teljesüljön

$$X_{i,1} + X_{i,2} \le T_i. \tag{34}$$

A (29), (30), (31), (32) és (33) egyenlőtlenségeket összegezve azt kapjuk, hogy

$$H_i \le X_{i,1} + X_{i,2} + X_{i,3} + 2X_{i,4} + 2X_{i,5}. \tag{35}$$

Az $X_{i,4}$ és $X_{i,5}$ előtti kettes konstansok azt veszik figyelembe, hogy a fej részein belüli hasznos élek kettővel járulnak hozzá a fej H_i igényének kielégítéséhez.

Ha a (29), (30), (31), (32) és (33) egyenlőtlenségeket a (35) egyenlőtlenségbe helyettesítjük, akkor (27) adódik, míg (34) ekvivalens a (28) egyenlőtlenséggel. □

A 5.3. lemmában javasolt tesztet a következő algoritmus végzi, melynek egyedi paraméterei egyrészt $T = (T_1, \ldots, T_n)$, ahol T_i az s sorozat utolsó $n - i$ elemének összege, másrészt $X = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$: X_j a fej vége $X_{i,j}$ paraméterének aktuális értéke.

5.5. Algoritmus. Fejfelező teszt(n, s, H, T, p, L)

for $i = 2$ **to** $n - 1$
    $h = \lfloor i/2 \rfloor$
    $X_1 = \min(H_h, T_n - T_i, h(n-i))$
    $X_2 = \min(H_i - H_h, T_n - T_i, (i-h)(n-i))$
    $X_3 = \min(h(i-h), H_i)$
    $X_4 = \min\left(\binom{h_i}{2}, H_{h_i}\right)$
    $X_5 = \min\left(\binom{i-h_i}{2}, H_i - H_{h_i}\right)$
    if $H_i > X_1 + X_2 + X_3 + 2X_4 + 2X_5$ vagy $X_1 + X_2 > T_i$
        $L = 0$
        return L
$L = 1$
return L

Az algoritmus futási ideje legjobb esetben $\Theta(1)$, legrosszabb esetben $\Theta(n)$.

Hasonló módon a farok felezése is további sorozatok kiszűrését tenné lehetővé, de a szimulációs kísérletek szerint ez nem csökkentené a várható futási időt.

6. Közelítő algoritmusok hatékonysága és futási ideje

A tesztek elemzésénél a szabályos és páros sorozatokat vettük alapul. A páros sorozatok halmaza a legkisebb olyan halmaz, melynek elemszámát explicit képlettel meg tudjuk adni. Az $n-1 \geq b_i \geq 1$ feltételeknek eleget tevő *n-korlátos sorozatok* halmazának elemszámát is könnyű megadni, de ezen halmazok elemszáma túl gyorsan nő n növekedtével. A szabályos sorozatok elemzéséhez szerencsére nem kell *minden* korlátos sorozatot előállítani: elegendő a szabályos sorozatokat előállítani, és a rájuk vonatkozó hatékonysági jellemzőket a nekik megfelelő gyakoriságokkal súlyozni. Például egy azonos elemekből álló *homogén* szabályos sorozatnak egyetlen korlátos sorozat felel meg, míg a különböző elemekből álló $(n, n-1, \ldots, 1, 0)$ „szivárvány" sorozatnak $n!$ különböző korlátos sorozat felel meg.

Az alapvető pontos algoritmusokat kétféle módon próbáljuk gyorsítani (azaz várható futási idejüket csökkenteni). Az egyik út, hogy csökkentjük az általuk elvégzendő ellenőrzések számát. A másik út pedig az, hogy gyors (lineáris) előtesztekkel igyekszünk a rossz sorozatok jelentős részét kiszűrni, hogy csak a lehetséges bemenetek kis hányadánál legyen szükség a viszonylag lassú, de pontos alapalgoritmusokra.

Az első típusú javításra példa az Erdős–Gallai-algoritmus ugrása. A második típusra pedig példa a Havel–Hakimi-algoritmus kiegészítése előzetes paritásvizsgálattal, valamint az Erdős–Gallai-algoritmus kiegészítése nullamentesítéssel.

A futási idők csökkentése érdekében *minden* algoritmus csak a páros, nullamentes sorozatokat vizsgálta.

Adott A algoritmusnak az n hosszúságú szabályos sorozatokra vonatkozó hatékonyságát az A algoritmus által kizárt n hosszúságú sorozatok és az ugyanolyan hosszúságú szabályos sorozatok számának hányadosával jellemezzük. Ezt a hányadost $E_{\mathrm{A}}(n)$-nel jelöljük, és az A algoritmus n hosszúságú sorozatokra vonatkozó *hatékonyságának* nevezzük.

A következő közelítő algoritmusokat vizsgáljuk:

1) Nullamentesítő teszt (Nt);

2) Binomiális teszt (Bt);

3) Fejfelező teszt (Ft).

A 8. táblázat a nullamentes binomiális és a nullamentes faroktesztelt sorozatok számát, továbbá a (0,1,n)-grafikus sorozatok számát és a grafikus sorozatok száma szomszédos n helyeken felvett értékei hányadosát tartalmazza $n = 1, \ldots, 29$ csúcs esetén.

A 9. táblázat azt jellemzi, hogy a vizsgált közelítő algoritmusok a szabályos sorozatoknak milyen hányadát szűrik ki. A táblázat a nullamentes páros sorozatok száma $(E_z(n))$ mellett tartalmazza a nullamentes binomiális $(B_z(n))$, a nullamentes faroktesztelt $(F_z(n))$ és a grafikus sorozatok $(G(n))$ számának, valamint a szabályos sorozatok számának hányadosát.

8. táblázat. A nullamentes binomiális ($B_z(n)$), nullamentes faroktesztelt ($F_z(n)$) $(0, 1, -n)$-szabályos sorozatok száma, valamint a $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok száma (G_n) és a grafikus sorozatok halmazának szomszédos n helyeken felvett számosságai hányadosa $(G(n+1))/G(n)$ $n = 1, \ldots, 29$ csúcs esetén.

n	$B_z(n)$	$F_z(n)$	$G(n)$	$G(n+1)/G(n)$
1	**1**	**0**	**1**	2,000000
2	**2**	**2**	**2**	2,000000
3	**4**	**4**	**4**	2,750000
4	**11**	**11**	**11**	2,818182
5	**31**	**31**	**31**	3,290323
6	103	**102**	**102**	3,352941
7	349	344	**342**	3,546784
8	1256	1230	1213	3,595218
9	4577	4468	4361	3,672552
10	17040	16582	16016	3,705544
11	63944	62070	59348	3,742620
12	242218	234596	222117	3,765200
13	922369	891852	836315	3,786674
14	3530534	3409109	3166852	3,802710
15	13563764	13082900	12042620	3,817067
16	52283429	50380684	45967479	3,828918
17	202075949	194550002	176005709	3,839418
18	782879161	753107537	675759564	3,848517
19	3039168331	2921395019	2600672458	3,856630
20	11819351967	11353359464	10029832754	3,863844
21			38753710486	3,870343
22			149990133774	3,876212
23			581393603996	3,881553
24			2256710139346	3,886431
25			8770547818956	3,890907
26			34125389919850	3,895031
27			132919443189544	3,897978
28			518232001761434	3,898843
29			2022337118015338	

A 10. táblázat a Binomiális teszt és a Fejfelező teszt algoritmusok futási idejét adja meg másodpercben és műveletszámban $n = 1, \dots, 20$ csúcsra.

Ha $n = 2$, akkor (20) szerint $R(n) = \binom{3}{2} = 3$ $(0, 1, n)$-szabályos sorozat van: $(1, 1)$, $(1, 0)$ és $(0, 0)$. Az n hosszúságú páros sorozatok számát $E(n)$-nel jelöljük. Ezzel a jelöléssel $E(2) = 2$. A Binomiális teszt által elfogadott, n hosszúságú sorozatok számát $B(n)$-nel jelölve $B(2) = 2$. Az n hosszúságú grafikus sorozatok számát jelöljük $G(n)$-nel. Ekkor $G(2) = 2$, és a Binomiális teszt hibája (hatékonysága) $R_{Bt}(2) = 2/2 = 1$.

Ha $n = 3$, akkor a szabályos sorozatok száma $R(n) = 10$. Ezek közül a (2,2,2), (2,2,0), (2,1,1), (2,0,0), (1,1,0) és (0,0,0) páros, azaz $E(3) = 6$. Ezek közül a Binomiális teszt kizárja a (2,2,0) és (2,0,0) sorozatokat, így $B(3) = 4$. A megmaradt 4 sorozat grafikus, így $F(3) = G(3) = 4$.

Ha $n = 4$, akkor a szabályos sorozatok száma $R(4) = 35$. Ezek közül 19 a páros, és a következő 11 grafikus: (3,3,3,3), (3,3,2,2), (3,2,2,1), (3,1,1,1,), (2,2,2,2), (2,2,2,0), (2,2,1,1), (2,1,1,0), (1,1,1,1), (1,1,0,0) és (0,0,0,0). A 19 páros sorozat közül a Binomiális teszt is kizárja azt a nyolc sorozatot, amelyeket az Erdős–Gallai kizárna, így $B(4) = F(4) = G(4) = 11$.

Az $R(5) = 126$ szabályos sorozat közül $E(5) = 66$ a páros, ezek között pedig $B(5) = 31$ a binomiális. Ezek a sorozatok mind grafikusak, azaz $F(5) = G(5) = 31$.

Az $R(6) = 462$ szabályos sorozat közül $E(6) = 236$ a páros, amelyek között $B(6) = 103$ binomiális sorozat van. A Binomiális teszt a 102 grafikus sorozat mellett az (5,5,3,3,3,1) rossz sorozatot is elfogadja. Ezek szerint a legfeljebb 5 hosszúságú sorozatokra nézve a Binomiális teszt hibátlanul kiszűri a nem grafikus sorozatokat, a 6 hosszú sorozatokra azonban már csak közelítő algoritmus. A Fejfelező teszt ezzel a sorozattal is megbirkózik, ezért $F(6) = G(6) = 102$.

Az $R(7) = 1716$ szabályos sorozat között $E(6) = 868$ a páros, melyek közül $B(7) = 376$ a binomiális. A binomiális sorozatok között még 34 rossz van, melyek közül a Pozitív teszt a 27 grafikus sorozat mellett a következő 7 rosszat is elfogadja: $(6, 6, 6, 4, 4, 4, 2)$, $(6, 6, 5, 4, 4, 4, 1)$, $(6, 6, 4, 4, 4, 3, 1)$, $(6, 6, 4, 3, 3, 3, 1)$, $(6, 6, 3, 3, 3, 2, 1)$, $(6, 5, 3, 3, 3, 1, 1)$, $(5, 5, 3, 3, 3, 1, 0)$. A következő Fejfelező teszt ezek közül a $(6, 6, 4, 3, 3, 3, 1)$ kivételével mindet kiszűri, így $F(7) = 343$. A cikkben nem ismertetett Farokfelező teszt $i = 4$ mellett legfeljebb $8 + 2$ fokot tud lekötni a fej eleje és a farok részei között, legfeljebb további $4 + 0$ fokot a fej vége és a farok részei között, legfeljebb további 8 fokot a fej két része között, és két fokot a fej elején belül. Ez azonban összesen csak $10 + 4 + 8 + 2 = 24$ fok, ami kevesebb a sorozat $H_7 = 26$ összes fokszámánál. Tehát a Farokfelező teszt a 7 hosszú bemenetek közül $T(7) = 342$ sorozatot fogad el, így $G(7) = 342$.

A 8. táblázatban minden sorban a pontos értékeket félkövéren írtuk. Eszerint $n \leq 4$ esetén $B(n) = G(n)$, azaz a Binomiális teszt ugyanannyi sorozatot fogad el, mint a pontos algoritmusok. $n > 4$ esetén egyre nő a Binomiális teszt hibája: $n = 5$ esetén még csak egyetlen páros sorozatról nem ismeri fel, hogy nemgrafikus, $n = 6$ esetén már hatszor hibázik.

A Pozitív teszt $n = 5$-ig hibátlan, a Fejfelező teszt $n = 6$-ig, a Farokfelező teszt pedig $n = 7$-ig.

9. táblázat. A nullamentes párossorozatok száma, továbbá a nullamentes binomiális/szabályos, nullamentes fejtesztelt/szabályos és grafikus/szabályos számarányok.

n	$E_z(n)$	$E_z(n)/R(n)$	$B_z(n)/R(n)$	$F_z(n)/R(n)$	$G(n)/R(n)$
1	0	0,000000	1,000000	1,000000	1,000000
2	1	0,333333	0,666667	0,666667	0,666667
3	2	0,300000	0,400000	0,400000	0,400000
4	9	0,257143	0,314286	0,314286	0,314286
5	28	0,230159	0,246032	0,246031	0,246032
6	110	0,238095	0,222943	0,220779	0,220779
7	396	0,231352	0,203380	0,200466	0,199301
8	1519	0,236053	0,195183	0,191142	0,188500
9	5720	0,235335	0,188276	0,183793	0,179391
10	21942	0,237524	0,184460	0,179502	0,173375
11	83980	0,238098	0,181290	0,175977	0,168260
12	323554	0,239301	0,179145	0,173508	0,164278
13	1248072	0,240000	0,177368	0,171500	0,160821
14	4829708	0,240784	0,176014	0,169960	0,157882
15	18721080	0,241379	0,174884	0,168684	0,155271
16	72714555	0,241946	0,173965	0,167634	0,152950
17	282861360	0,242424	0,173188	0,166738	0,150844
18	1101992870	0,242860	0,172533	0,165972	0,148926
19	4298748300	0,243243	0,171970	0,165306	0,147158
20	16789046494	0,243590	0,171486	0,164725	0,145521
21					0,143997
22					0,142569
23					0,141228
24					0,139961
25					0,138762
26					0,137625
27					0,136542
28					0,135509
29					0,134521

10. táblázat. A Binomiális teszt (Bt) és a Fejfelező teszt (Ht) futási ideje másodpercben és a műveletek számával megadva $n = 1, \ldots, 20$ csúcs esetén.

n	Bt, s	Bt, művelet	Ft, s	Ft, művelet
1	0	14	0	15
2	0	41	0	43
3	0	180	0	200
4	0	716	0	815
5	0	2 918	0	3 321
6	0	11 918	0	13 675
7	0	48 952	0	56 299
8	0	201 734	0	233 182
9	0	831 374	0	964 121
10	0	3 426 742	0	3 988 542
11	0	14 107 824	0	16 469 036
12	0	58 028 152	0	67 929 342
13	0	238 379 872	0	279 722 127
14	0	978 194 400	1	1 150 355 240
15	2	4 009 507 932	3	4 724 364 716
16	6	16 417 793 698	13	19 379 236 737
17	26	67 160 771 570	51	79 402 358 497
18	106	274 490 902 862	196	324 997 910 595
19	423	1 120 923 466 932	798	1 328 948 863 507
20	1 627	4 573 895 421 484	3 201	5 429 385 115 097

Az 1. táblázatban $R(n)$ értéke $n = 23$-ig az OEIS A001700 sorozata [78], $E(n)$ értéke $n = 23$-ig az OEIS A005654 sorozata [80], a 8. táblázatban $G(n)$ értéke pedig $n = 23$-ig az OEIS A0004251-es sorozata [79]. A többi értéket mi határoztuk meg: $R(24), \ldots, R(38)$, $E(24), \ldots, E(38)$, valamint $B(n)$ és $F(n)$ értékek nem szerepelnek az OEIS-ben.

Ebben a cikkben elsősorban a soros algoritmusokkal kapott eredményekről számolunk be.

A témakörben vannak párhuzamos eredmények is [60, 63, 74, 81]. Saját párhuzamos eredményeinket a 10. részben ismertetjük.

7. Pontos algoritmusok futási ideje

A következő pontos algoritmusokat vizsgáljuk:
1) HHr: Rendező Havel–Hakimi-algoritmus.
2) HHe: Eltoló Havel–Hakimi-algoritmus.

3) EG: Erdős–Gallai-algoritmus.
4) EGu: Erdős–Gallai-algoritmus ugrásokkal.
5) EGl: Erdős–Gallai-algoritmus ugrásokkal lineárisan.

A pontos algoritmusok sorozatonkénti átlagos futási idejét n függvényében mikromásodpercben a 11. táblázat tartalmazza $n = 1, \dots, 15$ csúcsra. A sorozatok előállításához szükséges műveleteket beszámítottuk.

11. táblázat. Az elvégzett műveletek száma n függvényében a HHr, HHe, EG, EGu, és EGl algoritmusok esetén.

n	HHr	HHe	EG	EGu	EGl
1	10	15	87	-	-
2	40	61	119	12	37
3	231	236	267	116	148
4	1 170	1 052	946	551	585
5	5 969	4 477	4 000	2 677	2 339
6	31 121	20 153	18 206	12 068	9 539
7	157 345	88 548	82 154	54 184	38 984
8	784 341	393 361	372 363	238 813	160 126
9	3 628 914	1 726 484	1 666 167	1 666 167	656 575
10	17 345 700	7 564 112	7 418 447	4 552 276	2 692 240
11	80 815 538	32 895 244	32 737 155	19 680 986	11 018 710
12	385 546 527	142 460 352	143 621 072	84 608 529	45 049 862
13	1 740 003 588	613 739 913	626 050 861	362 141 061	183 917 288
14	8 066 861 973	2 633 446 908	2 715 026 827	1 543 745 902	750 029 671
15	36 630 285 216	11 254 655 388	11 717 017 238	6 557 902 712	3 055 289 271

A 11. táblázat második és harmadik oszlopának összehasonlítása azt mutatja, hogy HHe lényegesen gyorsabb, mint HHr, különösen ha n nő. A negyedik és ötödik oszlop összehasonlítása azt mutatja, hogy a futási idő lényegesen csökken, ha csak az ugró pontokban kell az elemeket tesztelni. Végül az utolsó három oszlop együtt a lineáris algoritmusnak a négyzetesekkel szembeni előnyét jelzi.

A 12. táblázat az Erdős–Gallai-lineáris futási idejét tartalmazza másodpercben és az elvégzett műveletek számával megadva, továbbá az egy páros sorozatra jutó amortizált műveletszámot.

A 12. táblázat legérdekesebb adatai az utolsó oszlopban vannak. Azt mutatják, hogy a műveletek számát osztva a vizsgált sorozatok hosszával és számával monoton csökkenő sorozatot kapunk (lásd [71]).

A 13. táblázat a $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok első elem szerinti eloszlását mutatja $n = 1, \dots, 12$ csúcs esetén. Ezek az adatok hasznosak az Erdős–Gallai-leszámláló algoritmus tervezéséhez (a feladat szeletekre osztásához).

A 13. táblázatban azt látjuk, hogy a gyakoriságok $n = 6$-tól nőnek $(n - 2)$-ig, és az utolsó pozitív érték kisebb, mint az utolsó előtti.

12. táblázat. Az Erdős–Gallai-lineáris algoritmus teljes és amortizált futási ideje másodpercben és a műveletek számában

n	$E(n)$	$T(n)$, s	$Op(n)$	$T(n)/E(n)/n$, s	$Op(n)/E(n)/n$
2	2	0	37	0	9.25000000000
3	6	0	148	0	8.22222222222
4	19	0	585	0	7.69736842105
5	66	0	2 339	0	7.08787878788
6	236	0	9 539	0	6.73658192090
7	868	0	38 984	0	6.41606319947
8	3 235	0	160 126	0	6.18724884080
9	12 190	0	656 575	0	5.98464132714
10	46 252	0	2 692 240	0	5.82080774885
11	176 484	0	11 018 710	0	5.67587378511
12	676 270	0	45 049 862	0	5.55126675243
13	2 600 612	0	183 917 288	0	5.44005937537
14	10 030 008	1	750 029 671	0.00000000712149	5.34132654018
15	38 781 096	5	3 055 289 271	0.00000000859525	5.25219687963
16	150 273 315	23	12 434 367 770	0.00000000956590	5.17156346504
17	583 407 990	79	50 561 399 261	0.00000000796537	5.09797604337
18	2 268 795 980	297	205 439 740 365	0.00000000727258	5.03056202928

13. táblázat. A $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok eloszlása s_1 szerint, $n = 1, \ldots, 12$ csúcs esetén

n/s_1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1											
2	1	1										
3	1	1	2									
4	1	1	4	4								
5	1	2	7	10	11							
6	1	3	10	22	35	31						
7	1	3	14	34	78	110	102					
8	1	4	18	54	138	267	389	342				
9	1	4	23	74	223	503	968	1352	1213			
10	1	5	28	104	333	866	1927	3496	4895	4361		
11	1	5	34	134	479	1356	3471	7221	12892	17793	16016	
12	1	6	40	176	661	2049	5591	13270	27449	47757	65769	59348

8. $(0, b, n)$-gráfok

Ebben a részben a klasszikus tételek $(0, b, n)$-gráfokra való kiterjesztésével foglalkozunk.

8.1. Erdős–Gallai-tétel és Chungphaisan tétele

1974-ben Chungphaisan [18] mind az Erdős–Gallai-tételt, mind pedig a Havel–Hakimi-tételt kiterjesztette $(0, b, n)$-gráfokra. Az EG-tétel kiterjesztése a következő.

8.1. Tétel. (Chungphaisan [18]) *Legyen $n \geq 1$. A $(0, b(n-1), n)$-szabályos $s = (s_1, \ldots, s_n)$ sorozat akkor és csak akkor $(0, b, n)$-grafikus, ha*

$$\sum_{i=1}^{n} s_i \quad \textit{páros}$$

és

$$\sum_{i=1}^{j} s_i - bj(j-1) \leq \sum_{k=j+1}^{n} \min(bi, s_k) \quad (j = 1, \ldots, n-1).$$

Bizonyítás. Lásd [18]. □

A tételen alapuló algoritmus legrosszabb esetben négyzetes időt igényel. A következő állítás lehetővé teszi, hogy a $(0, b, n)$-szabályos sorozatokat legrosszabb esetben $\Theta(n)$ idő alatt teszteljük.

8.2. Tétel. (Iványi, [34]) *Ha $n \geq 1$, a $(0, b, n)$-szabályos $s = (s_1, \ldots, s_n)$ sorozat akkor és csak akkor $(0, b, n)$-grafikus, ha*

$$H_n \quad \textit{páros}$$

és

$$H_i > bi(y_i - 1) + H_n - H_y \quad (i = 1, \ldots, n-1),$$

ahol

$$y_i = \max(i, w_i) \quad (i = 1, \ldots, n-1).$$

Bizonyítás. Lásd [34]. □

A következő Chungphaisan–Erdős–Gallai-lineáris algoritmus (ChEGl) – amely az EGl-algoritmus természetes általánosítása – $O(n)$ idő alatt eldönti, hogy egy $(0, b, n)$-szabályos sorozat $(0, b, n)$-grafikus-e.

8.1. Algoritmus. Chungphaisan–Erdős–Gallai-lineáris(n, s, b, L)

Bemenet. n: csúcsok száma $(n \geq 1)$;
$s = (s_1, \ldots, s_n)$: $(0, b, n)$-szabályos sorozat;

b: a gráf két csúcsa között megengedett élek maximális száma.

Kimenet. L: s grafikusságát jelző logikai változó.

Munkaváltozók. i: ciklus változó;
$w = (w_1, \ldots, w_n)$: w_i az i indexhez tartozó súlypont.

1. $H_1 = s_1$ // 1 sor: H_1 kezdeti értékének beállítása
2. **for** $i = 2$ **to** $n - 1$ // 2–3. sor: H további elemeinek számítása
3. $\quad H_i = H_{i-1} + s_i$
4. **if** H_n páratlan // 4–6. sor: paritás ellenőrzése
5. $\quad L = 0$ // 5–6. sor: páratlan sorozat elutasítása
6. $\quad$ **return**
7. $w = n$ // 7. sor: első súlypont értékének beállítása
8. **for** $i = 1$ **to** $n - 1$ // 8–16. sor: s tesztelése
9. $\quad$ **while** $s_w < ib$ és $w > 0$
10. $\qquad w = w - 1$
11. $\quad y = \max(i, w)$
12. $\quad$ **if** $H_i > bi(y - 1) + H_n - H_y$
13. $\qquad L = 0$
14. $\qquad$ **return** L // 14. sor: s nem grafikus
15. $L = 1$ // 15–16. sor: s grafikus
16. **return** L

8.3. Tétel. (Iványi, [34]) ChEGl *futási ideje minden esetben* $\Theta(n)$.

Bizonyítás. A 1–6. sorok végrehajtása $\Theta(n)$ időt igényel. Mivel w szigorúan monoton csökken a program végrehajtása során, ezért a 7–14. sorok $O(n)$ időt igényelnek, így az algoritmus futási ideje minden esetben $\Theta(n)$. □

Legyen $b = 3$ és $s = (13, 10, 5, 5, 4, 1)$. $H_6 = 38$ páros. Ha $i = 1$, akkor $w_i = y = 5$ és a 11. sor feltétele $(13 \leq 3 \cdot 1 \cdot (5 - 1))$ nem teljesül. Ha $i = 2$, akkor viszont $w_i = y = 2$ és a feltétel teljesül $(23 > 3 \cdot 2 \cdot (2 - 1)) + 5 + 5 + 4 + 1)$, ezért s *nem* $(0, 3, 6)$*-grafikus.*

Maradjon b 3, de s-et változtassuk meg: legyen $s' = (13, 10, 5, 5, 4, 3)$. Az előző példához képest a futás során az első változás az, hogy amikor $i = 2$, akkor $23 \leq 3 \cdot 2 \cdot (2 - 1) + 5 + 5 + 4 + 3$, és így a 11. sorban lévő feltétel nem teljesül, és ugyanez az eredmény $i = 3$, 4 és 5 esetén is, ezért s' $(0, 3, 6)$*-grafikus.*

A 14. táblázat az (a, b, n)-szabályos és (a, b, n)-grafikus sorozatok számát tartalmazza $n = 1, \ldots, 11$ csúcs, valamint $a = 0$ és $b = 1$, $a = 0$ és $b = 2$, $a = 2$ és $b = 5$ esetén. A szabályos sorozatok számát a (20) képlettel, az (a, b, n)-grafikus sorozatok számát pedig a Chungphaisan–Erdős–Gallai–lineáris algoritmussal határoztuk meg. Az utolsó oszlop elemeinek meghatározásánál hasznosítottuk a 9.1. következményt.

A következő táblázatokban bemutatjuk, hogyan oszlanak meg a kizárt grafikus és nemgrafikus sorozatok az egyes menetek között. Azt is jellemezzük, hogy átlagosan hány meneten át kell egy grafikus, illetve nemgrafikus sorozatot a kizárásáig

14. táblázat. Az (a, b, n)-szabályos és (a, b, n)-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs, valamint $a = 0$ és $b = 1$, $a = 0$ és $b = 2$, $a = 2$ és $b = 5$ esetén.

n	$R(0,1,n)$	$G(0,1,n)$	$R(0,2,n)$	$G(0,2,n)$	$R(2,3,n)$	$G(2,5,n)$
1	1	1	1	1	1	1
2	3	2	6	3	10	4
3	10	4	35	10	84	23
4	35	11	210	52	715	189
5	126	31	1287	283	6188	1582
6	462	102	8008	1706	54264	13583
7	1716	342	50388	10436	480700	122345
8	6435	1213	319770	65370	4292145	1092573
9	24310	4361	2042975	413111	38567100	9816598
10	92378	16016	13123110	2633537	348330136	88680716
11	352716	59348	84672315	16882153	3159461968	804480107

15. táblázat. ChEGL i-edik $(i = 1, \ldots, 11)$ menetében kiszűrt nem $(0, 2, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0									
2	3	0								
3	22	3	0							
4	132	26	2	0						
5	824	164	31	4	0					
6	5 084	1 026	276	75	3	0				
7	31 902	6 288	2 018	829	111	5 0				
8	201 366	39 090	13 282	7 231	1 837	203	4	0		
9	1 281 918	244 833	84 340	53 594	20 681	4 259	298	6	0	
10	8 207 232	1 548 774	529 578	365 461	183 262	59 726	8 709	470	5	0
11	52 819 163	9 866 545	3 331 910	2 385 963	1 404 590	632 058	155 070	17 213	660	7

tesztelni, és azt is, hogy a menetek hányadrészét fordítjuk átlagosan egy sorozat tesztelésére.

A 15. táblázat a ChEGl i-edik $(i = 1, \ldots, 11)$ menetében kiszűrt nemgrafikus sorozatok számát tartalmazza $a = 0$, $b = 2$ és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

A 16. táblázat a ChEGl i-edik $(i = 1, \ldots, 11)$ menetében kiszűrt $(0, 2, n)$-grafikus sorozatok számát tartalmazza $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

16. táblázat. ChEGl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében kiszűrt $(0, 2, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	2	0								
3	1	9	0							
4	1	7	42	0						
5	1	10	29	224	0					
6	1	14	49	183	1 297	0				
7	1	18	70	345	1 143	7 658	0			
8	1	23	97	559	2 326	7 262	46 489	0		
9	1	28	125	846	4 038	15 927	46 074	286 007	0	
10	1	34	159	1 191	6 520	29 629	107 724	295 609	1 779 026	0
11	1	40	193	1 624	9 668	50 663	213 399	728 610	1 900 061	11 154 877

A 17. táblázat a ChEGl algoritmus hatékonyságát jellemzi $a = 0$, $b = 2$ és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

17. táblázat. ChEGl hatékonysági jellemzői $a = 0$, $b = 2$ és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/jellemző	X	Y	Z	X'	Y'	Z'
2	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$
3	$1,120000000$	$1,900000000$	$1,342857143$	$0,560000000$	$0,950000000$	$0,671428571$
4	$1,187500000$	$2,820000000$	$1,576190476$	$0,395833333$	$0,940000000$	$0,525396825$
5	$1,232649071$	$3,803030303$	$1,759906760$	$0,308162268$	$0,950757576$	$0,439976690$
6	$1,280785891$	$4,788212435$	$1,957042957$	$0,256157178$	$0,957642487$	$0,391408591$
7	$1,322698224$	$5,770438549$	$2,137870128$	$0,220449704$	$0,961739758$	$0,356311688$
8	$1,363989613$	$6,751572493$	$2,320248929$	$0,194855659$	$0,964510356$	$0,331464133$
9	$1,402468979$	$7,733105601$	$2,496464714$	$0,175308622$	$0,966638200$	$0,312058089$
10	$1,439464334$	$8,714770487$	$2,670148311$	$0,159940482$	$0,968307832$	$0,296683146$
11	$1,474743645$	$9,697001722$	$2,839981439$	$0,147474365$	$0,969700172$	$0,283998144$

8.2. Havel–Hakimi-tétel és Chungphaisan tétele

Chungphaisan [18] a következő módon terjesztette ki a Havel-Hakimi tételt.

8.4. Tétel. (Chungphaisan [18]) *Legyen $n \geq 2$ és $b \geq 1$. Az $s = (s_1, \ldots, s_n)$ $(0, b, n)$-szabályos sorozat akkor és csak akkor $(0, b, n)$-grafikus, ha a j-edik b-redukált $w_j^* = (w_1^*, \ldots, w_{n-1}^*)$ sorozat $(0, b, n)$-grafikus minden $1 \geq j \geq n$ indexre.*

Bizonyítás. Lásd [18]. □

A tételen alapuló algoritmus nagyon lassú. A tétel következő javítása azonban lehetővé teszi, hogy a tesztelést legrosszabb esetben is el tudjuk végezni $O(n)$ idő alatt.

8.5. TÉTEL. (Iványi, [34]) *Legyen* $n \geq 1$ *és* $b \geq 1$. *Nemnegatív egészek egy* $s = (s_1, \dots, s_n)$ $(0, b(n-1), n)$*-szabályos sorozata akkor és csak akkor* $(0, b, n)$*-grafikus, ha*

$$\sum_{i=1}^{n} s_i \quad \textit{páros}$$

és

$$\sum_{i=1}^{j} s_i \leq bj(j-1) \leq \sum_{k=j+1}^{n} \min(jb, s_k) \quad (j = 1, \dots, n-1).$$

Bizonyítás. Lásd [34]. □

A következő Chungphaisan–Havel–Hakimi-lineáris algoritmus (ChHHl) – amely a HH algoritmus természetes általánosítása – $O(n)$ idő alatt eldönti, hogy egy $(0, b, n)$-szabályos gráf $(0, b, n)$-grafikus-e.

8.2. Algoritmus. Chungphaisan-Havel-Hakimi-lineáris(n, s, b, L)

Bemenet. n: csúcsok száma $(n \geq 1)$;
$s = (s_1, \dots, s_n)$: $(0, b, n)$-grafikus sorozat;
b: a gráf két csúcsa között megengedett élek maximális száma $(1 \leq b \leq 2)$.

Kimenet. L: s grafikusságát jelző logikai változó.

Munkaváltozók. i: ciklus változó;
$w = (w_1, \dots, w_n)$: w_i az i indexhez tartozó súlypont;
$r = (r_1, \dots, r_n)$: r_i az i indexhez tartozó maradék.

```
1.  L = 0                        // 1. sor: a gyakoribb érték beállítása
2.  if s_1 == 0                  // 2–4. sor: a nullákból álló sorozat grafikus
3.      L = 1
4.      return L
5.  if s_⌈s_1/b+1⌉ == 0          // 5–7. sor: s_1 ellenőrzése konstans idő alatt
6.      return L
7.  H_1 = s_1                    // 7. sor: H_1 kezdeti értékének beállítása
8.  for i = 2 to n − 1           // 8–9. sor: H további elemeinek számítása
9.      H_i = H_{i−1} + s_i
10. if H_n páratlan              // 10–11. sor: paritás tesztelése
11.     return L
12. w_1 = n                      // 12. sor: első súlypont kezdeti értékének beállítása
13. while s_{w_1} < b ∧ w_1 > 0
14.     w_1 = w_1 − 1
```

15. **if** $s_1 > b(w_1 - 1) + H_n - H_{w_1}$
16. **return** L
17. $r_1 = b(w_1 - 1) + H_n - H_{w_1} - s_1$ // 17. sor: első maradék számítása
18. **for** $i = 2$ **to** $n - 1$ // 18–34. sor: s tesztelése
19. **if** $H_{i-1} \geq H_n/2 \vee s_i \leq 1 \vee s_{i+1} = 0$ // 19–21. sor: s elfogadása
20. $L = 1$
21. **return** L
22. $w_i = w_{i-1}$ // 22–24. sor: w_i frissítése
23. **while** $s_i < bi \wedge w_i > 0$
24. $w_i = w_i - 1$
25. **if** $w_i \geq i$ // 25–27. sor: esetszétválasztás
26. **if** $s_i > b(w_i - 1) + r_{i-1} + H_{w_{i-1}} - H_{w_i} -$
$- b(w_{i-1} - w_i)(i - 1)$ // 26. sor: s_i tesztelése
27. **return** L
28. $r_i = b(w_i - 1) + r_{i-1} + H_{w_{i-1}} - H_{w_i} -$
$- b(w_{i-1} - w_i)(i - 1) - s_i$ // 28. sor: maradék frissítése
29. **else if** $s_i > bw_i + r_{i-1} + H_{w_{i-1}} - H_{w_i}$
30. $- b(w_{i-1} - w_i)(i - 1)$
31. **return** L
32. $r_i = bw_i + r_{i-1} + H_{w_{i-1}} - H_{w_i}$
$- b(w_{i-1} - w_i)(i - 1) - s_i$ //32. sor: maradék frissítése
33. $L = 1$ // 33–34. sor: s elfogadása
34. **return** L

A következő állítás jellemzi ChHHl futási idejét.

8.6. Tétel. (Iványi, [34]) ChHHl futási ideje a legjobb $\Theta(1)$ és a legrosszabb $\Theta(n)$ között változik.

Bizonyítás. A 1–6. sorok végrehajtása $\Theta(1)$ időt igényel. Mivel ezek a sorok a nemgrafikus sorozatok jelentős részét kiszűrik, a legjobb futási idő $\Theta(1)$. A 7–11. sorok végrehajtása $\Theta(n)$ ideig tart. Mivel w szigorúan monoton csökken a program végrehajtása során, ezért a 12–24. sorok $O(n)$ időt igényelnek, így az algoritmus futási ideje minden esetben $\Theta(n)$. □

Legyen $b = 3$ és $s = (13, 10, 5, 5, 4, 1)$. Az ötödik és tizedik sorok feltételei nem teljesülnek és $r_1 = 0$. Ha $i = 2$, akkor $w_i = 5$, és teljesül a 20. sor feltétele, így s *nem* $(0, 1, 6)$*-grafikus.*

A következő példában b maradjon 3, viszont s-et változtassuk meg: legyen $s' = (13, 10, 5, 5, 4, 3)$. Az előző esethez képest annyi a változás, hogy $r_1 = 2$ az első maradék, majd $i = 2$ esetén $w_i = 2$, nem teljesül a 20. sor feltétele és $r_2 = 0$. $i = 3$ esetén teljesül a 19. sor $H_{i-1} \geq H_n/2$ feltétele, ezért s' $(0, 1, 6)$*-grafikus.*

A következő példában legyen $b = 1$ és $s = (4, 3^3, 1)$. Az 5. és 10. sorok feltételei nem teljesülnek és $r_1 = 0$. Ha $i = 2$, akkor $w_i = 4$, és nem teljesül a 20. sor

18. táblázat. ChHHl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében kiszűrt nem $(0, 2, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0									
2	3	0								
3	22	3	0							
4	132	26	2	0						
5	824	164	31	4	0					
6	5 084	1 026	276	75	3	0				
7	31 902	6 288	2 018	829	111	5 0				
8	201 366	39 090	13 282	7 231	1 837	203	4	0		
9	1 281 918	244 833	84 340	53 594	20 681	4 259	298	6	0	
10	8 207 232	1 548 774	529 578	365 461	183 262	59 726	8 709	470	5	0
11	52 819 163	9 866 545	3 331 910	2 385 963	1 404 590	632 058	155 070	17 213	660	7

feltétele, az $i = 3$ esetben pedig a 19. sorban teljesül a $H_{i-1} \geq H_n/2$ feltétel, azaz s $(0, 1, 5)$-*grafikus.*

A 18. táblázat a ChHHl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében kiszűrt nem $(0, 2, n)$-grafikus sorozatok számát tartalmazza $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

A 19. táblázat a ChHHl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében kiszűrt $(0, 2, n)$-grafikus sorozatok számát tartalmazza $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

19. táblázat. ChHHl i-edik ($i = 1, \ldots, 11$) menetében kiszűrt $(0, 2, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	2	0								
3	1	9	0							
4	1	7	42	0						
5	1	10	29	224	0					
6	1	14	49	183	1 297	0				
7	1	18	70	345	1 143	7 658	0			
8	1	23	97	559	2 326	7 262	46 489	0		
9	1	28	125	846	4 038	15 927	46 074	286 007	0	
10	1	34	159	1 191	6 520	29 629	107 724	295 609	1 779 026	0
11	1	40	193	1 624	9 668	50 663	213 399	728 610	1 900 061	11 154 877

A 20. táblázat a ChHHl algoritmus hatékonyságát jellemzi $(0, 2, n)$-szabályos sorozatok és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

20. táblázat. ChHHl hatékonysági jellemzői $a = 0$, $b = 2$ és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n / jellemző	X	Y	Z	X'	Y'	Z'
2	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$	$1,000000000$
3	$1,120000000$	$1,900000000$	$1,342857143$	$0,560000000$	$0,950000000$	$0,671428571$
4	$1,187500000$	$2,820000000$	$1,576190476$	$0,395833333$	$0,940000000$	$0,525396825$
5	$1,232649071$	$3,803030303$	$1,759906760$	$0,308162268$	$0,950757576$	$0,439976690$
6	$1,280785891$	$4,788212435$	$1,957042957$	$0,256157178$	$0,957642487$	$0,391408591$
7	$1,322698224$	$5,770438549$	$2,137870128$	$0,220449704$	$0,961739758$	$0,356311688$
8	$1,363989613$	$6,751572493$	$2,320248929$	$0,194855659$	$0,964510356$	$0,331464133$
9	$1,402468979$	$7,733105601$	$2,496464714$	$0,175308622$	$0,966638200$	$0,312058089$
10	$1,439464334$	$8,714770487$	$2,670148311$	$0,159940482$	$0,968307832$	$0,296683146$
11	$1,474743645$	$9,697001722$	$2,839981439$	$0,147474365$	$0,969700172$	$0,283998144$

9. (a, b, n)-gráfok

Chungphaisan tételének közvetlen következménye az alábbi állítás.

9.1. Következmény. *Legyen $n \geq 2$. Az $s = (s_1, \ldots, s_n)$ (a, b, n)-szabályos sorozat akkor és csak akkor (a, b, n)-grafikus, ha az $s' = (s_1 - a(n-1), \ldots, s_n - a(n-1))$ sorozat $(0, b-a, n)$-grafikus.*

Bizonyítás. Egy (a, b, n)-gráfban minden csúcspár elemei legalább a éllel össze vannak kötve. Ezért ha minden csúcspár esetén eltávolítunk a élet, egy $(0, b-a, n)$-*gráfot* kapunk. □

A 9.1. következmény szerint a következő három táblázat adatai megegyeznek a $(0, 3, n)$-szabályos sorozatokra vonatkozó hasonló adatokkal.

A 21. és 22. táblázatok a ChEGl i-edik – ahol ($i = 1, \ldots, 4$), illetve ($i = 5, \ldots, 10$) – menetében kiszűrt nem $(2, 5, n)$-grafikus sorozatok számát tartalmazza $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

A 23. táblázat a CL i-edik ($i = 1, \ldots, 10$) menetében kiszűrt $(2, 5, n)$-grafikus sorozatok számát tartalmazza $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

A következő 24. táblázat a ChEGl algoritmus hatékonyságát jellemzi $a = 2$, $b = 5$ és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

10. $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok párhuzamos leszámlálása

A 8. táblázat 1-től 29 csúcsig tartalmazza a grafikus sorozatok számát. A táblázat úgy készült, hogy párhuzamosítottuk az Erdős–Gallai-gyorsan algoritmust. Az eredmény az Erdős–Gallai-leszámláló (EGe) algoritmus, amely minden szóba jövő sorozatot tesztel.

21. táblázat. ChEGl i-edik ($i = 1, \ldots, 4$) menetében kiszűrt, nem $(2, 5, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	6	0	0	0
3	57	7	0	0
4	475	83	7	0
5	4099	732	163	13
6	35500	6287	2068	441
7	312188	53601	20775	7766
8	2769457	463794	188643	97976
9	24768128	4061297	1658351	1021804
10	222858957	35952854	14508359	9681500
11	2015400842	320927140	127636563	87804078

22. táblázat. ChEGl i-edik ($i = 5, \ldots, 10$) menetében kiszűrt, nem $(2, 5, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	14	0	0	0	0	0
7	921	21	0	0	0	0
8	24374	1921	23	0	0	0
9	405996	71152	3572	31	0	0
10	5136605	1554803	186666	6402	34	0
11	55159143	24279000	5343051	452411	10751	43

Mivel viszonylag sok processzor vett részt a számolásban, viszont bizonytalan volt, hogy az egyes processzorok meddig vehetnek részt a számolásban, a feladatot *szeleteknek* nevezett kisebb részekre bontottuk. Célszerű volt, hogy a szeletek feldolgozása hasonló ideig tartson.

23. táblázat. ChEGl i-edik ($i = 1, \ldots, 10$) menetében kiszűrt $(2, 5, n)$-grafikus sorozatok száma $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

n/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	19	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	8	141	0	0	0	0	0	0	0
5	1	11	40	1129	0	0	0	0	0	0
6	1	15	60	317	9561	0	0	0	0	0
7	1	19	81	497	2395	82435	0	0	0	0
8	1	24	108	720	3838	19074	722192	0	0	0
9	1	29	136	1016	5733	30725	153657	6385472	0	0
10	1	35	170	1366	8387	47136	247112	1259718	56880031	0
11	1	41	204	1804	11644	70961	385774	2010389	10453559	509514569

24. táblázat. ChEGl hatékonysági jellemzői $a = 2$, $b = 5$ és $n = 1, \ldots, 11$ csúcs esetén.

$\frac{n}{\text{jellemző}}$	X	Y	Z	X'	Y'	Z'
2	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
3	1,109375000	1,950000000	1,309523810	0,554687500	0,975000000	0,654761905
4	1,171681416	2,933333333	1,541258741	0,390560472	0,977777778	0,513752914
5	1,219093269	3,944961897	1,739334195	0,304773317	0,986240474	0,434833549
6	1,266350711	4,951175407	1,942282176	0,253270142	0,990235081	0,388456435
7	1,309250339	5,956536499	2,135146661	0,218208390	0,992756083	0,355857777
8	1,350304891	6,960496382	2,325332905	0,192900699	0,994356626	0,332190415
9	1,389017669	7,963928944	2,510223895	0,173627209	0,995491118	0,313777987
10	1,426027860	8,966857120	2,691252565	0,158447540	0,996317458	0,299028063
11	1,461490194	9,969401198	2,868359205	0,146149019	0,996940120	0,286835921

Az Erdős–Gallai-lineáris algoritmus egyik lehetséges alkalmazása, hogy meghatározzuk a grafikus sorozatok számát olyan n értékekre, amelyekre eddig a nagy számolásigény miatt nem volt ismert: Sloane *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences* című honlapja [77] az $n = 23$ értékig tartalmazta a grafikus sorozatok számát. Ezt kiegészítettük $n = 29$ csúcsig [79].

Az Erdős–Gallai-leszámláló (EGe) algoritmus a lineáris legrosszabb eset mellett azt is igyekszik kihasználni, hogy ha lexikografikus sorrendben ellenőrizzük a szóba jövő sorozatokat, akkor a szomszédos sorozatok bizonyos tulajdonságai nagyon hasonlóak, ezért adott sorozat jellemzői az őt megelőző sorozat jellemző adataiból konstans várható idő alatt meghatározhatóak.

Igyekeztünk az ellenőrizendő sorozatok számát is csökkenteni.

Ennek egy egyszerű megoldása, hogy eleve csak a páros sorozatokat állítjuk elő. További ötlet, hogy csak a nullamentes sorozatokat vizsgáljuk. A nullát tartalmazó $(0, 1, n)$-grafikus sorozatok között ugyanis a 4.7. lemma szerint pontosan $G(n-1)$ nullamentes grafikus sorozat van. A 4.2. lemma szerint aszimptotikusan a szabályos sorozatok fele tartalmaz legalább egy nullát. Szimulációs vizsgálataink szerint ez a páros sorozatokra is igaz.

Lényeges gyorsítást jelent az is, hogy a sorozatokat csak az ugró pontokban vizsgáljuk.

Az EGe program azt is kihasználja, hogy a szomszédos sorozatok ellenőrző pontjainak a listája átlagosan konstans idő alatt származtatható a megelőző sorozat adataiból. A kiindulási értékek szintén könnyen számíthatók: az első – $q = (n-1)^n$ – sorozatra a C lista üres (azaz egyáltalán nem kell ellenőrzést végeznünk), a súlypontok listája pedig kezdetben $w = (n-1)^{n-1}$.

Az Erdős–Gallai-leszámláló algoritmus előállítja és megvizsgálja az n-páros, nullamentes sorozatokat, és kimenetként megadja a $G_z(n)$ értéket. Az algoritmus kihasználja, hogy a páros sorozatok lexikografikusan csökkenő sorozatában szomszédos sorozatok több lényeges paramétere hasonló, ezért ezek a paraméterek a vizsgált s' sorozatot megelőző s sorozat adott paraméteréből gyorsan meghatározhatóak.

Az ugrópontok $C(s')$ listája rendszerint megegyezik a $C(s)$ listával, és legfeljebb a végén változik egy vagy két elem.

Mivel a futási idő csökkentése érdekében az Erdős–Gallai-leszámláló algoritmus csak nullamentes sorozatokat állít elő és tesztel, a szeletekre bontás alapja a (20) képlet.

Feltételeztük, hogy a $(0, n-1, n)$-szabályos nullamentes sorozatok halmazának szeletekre való felbontásánál az egyes szeletek futási ideje arányos a hozzájuk tartozó $R(1, n-1, n)$-szabályos sorozatok számával.

Most tekintsünk egy példát: az $n = 29$-re írt programban az $n = 28$ esetben szerzett tapasztalatok alapján feltettük, hogy a tiszta futási idő összesen körülbelül 6000 nap lesz. Feltételezve, hogy a gépek egy részét csak éjszakára kapjuk meg, egy szelet maximális futási idejét 12 órára állítottuk. Ez pontosan 12 órás szeletek mellett 12000 szeletet jelentett volna. A tényleges adatokat a 25. táblázat tartalmazza.

11. Köszönetnyilvánítás.

A szerzők köszönik Burcsi Péter és Király Zoltán (Eötvös Loránd Tudományegyetem), Kása Zoltán (Sapientia Magyar Tudományegyetem), valamint az ismeretlen lektor jobbító észrevételeit. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Euró-

25. táblázat. Teljes futási idő és szeletek száma $n = 25, \ldots, 29$ csúcs esetén.

n	Futási idő (nap)	Szeletek száma
25	26	435
26	70	435
27	316	435
28	1130	2 001
29	6733	15 119

pai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg (a támogatás száma TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003).

Hivatkozások

[1] Ascher, M.: *Mu torere: an analysis of a Maori game.* Math. Mag. **60(2)**, (1987) 90–100.

[2] Avis, D., Fukuda, K.: *Reverse search for enumeration.* Discrete Appl. Math. **2**, (1993) 21–46.

[3] Barnes, T. M., Savage, C. D.: *A recurrence for counting graphical partitions.* Electron. J. Combin. **2**, (1995) R11, 10 pp.

[4] Barnes, T. M., Savage, C. D.: *Efficient generation of graphical partitions.* Discrete Appl. Math. **78(1–3)**, (1997) 17–26.

[5] Barrus, M. D.: *Havel-Hakimi residues of unigraphs*, Inf. Proc. Letters **112**, (2012) 44–48.

[6] Beasley, L. B., Brown D. E., Reid, K. B.: *Extending partial tournaments.* Math. Comput. Modelling **50(1)**, (2009) 287–291.

[7] Bereg S., Ito, H.: *Transforming graphs with the same degree sequence.* In: (ed. H. Ito et al.) The Kyoto Int. Conf. on Computational Geometry and Graph Theory, LNCS **4535.** Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. (2008) 25–32.

[8] Berger, A., Müller-Hannemann, M.: *Uniform sampling of digraphs with a fixed degree sequence.* In: (ed. D. M. Thilikos) WG2010, LNCS **6410**, (2010), 220–231.

[9] Berger, A.: *A note on the characterization of digraph sequences*, arXiv, arXiv:1112.1215v1 [math.CO] (6 December 2011).

[10] Berger, A., Müller-Hannemann, M.: *How to attack the NP-complete dag realization problems in practice*, arXiv, arXiv:1203.36v1, (2012).

[11] Bozóki, S., Fülöp, J., Poesz, A.: *On pairwise comparison matrices that can be made consistent by the modification of a few elements.* CEJOR Cent. Eur. J. Oper. Res. **19**, (2011) 157–175.

[12] Bozóki S., Fülöp J., Rónyai, L.: *On optimal completion of incomplete pairwise comparison matrices.* Math. Comput. Modelling **52**, (2010) 318–333.

[13] Brualdi, A. R., Kiernan K.: *Landau's and Rado's theorems and partial tournaments,* Electron. J. Combin. **16(#N2)**, (2009) (6 pp).

[14] Burns, J. M.: *The number of degree sequences.* PhD Dissertation, MIT, (2007).

[15] Busch A. N., Chen G., Jacobson M. S.: *Transitive partitions in realizations of tournament score sequences.* J. Graph Theory **64(1)**, (2010), 52–62.

[16] Cormen, T. H., Leiserson, Ch. E., Rivest, R. L., Stein, C.: *Introduction to Algorithms.* Third edition, The MIT Press/McGraw Hill, Cambridge/New York, 2009. Magyarul: *Algoritmusok.* Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (2003).

[17] Coudum, S. A.: *A simple proof of the Erdős-Gallai theorem on graph sequences.* Bull. Austral. Math. Soc. **33**, (1986) 67–70.

[18] Chungphaisan, V.: *Conditions for sequences to be r-graphical.* Discrete Math. **7**, (1974) 31–39.

[19] Del Genio, C. I., Kim, H., Toroczkai, Z., Bassler, K. E.: *Efficient and exact sampling of simple graphs with given arbitrary degree sequence.* PLoS ONE **5(4)**, e10012 (2010).

[20] Erdős, P., Gallai, T.: *Gráfok előírt fokú pontokkal.* Mat. Lapok **11**, (1960) 264–274.

[21] Erdős, P., Király, Z., Miklós, I.: *On the swap-distances of different realizations of a graphical degree sequence*, arXiv, arXiv:1205.2842v1 [math.CO] (13 May 2012).

[22] Erdős, P. L., Miklós, I., Toroczkai, Z.: *A simple Havel-Hakimi type algorithm to realize graphical degree sequences of directed graphs.* Electron. J. Combin. **17(1)**, (2010) R66, 10 pp.

[23] Erdős, P., Richmond L. B.: *On graphical partitions.* Combinatorica **13(1)**, (1993) 57–63.

[24] Frank, A.: *Connections in Combinatorial Optimization.* Oxford University Press, Oxford, (2011).

[25] Frank, D. A., Savage, C. D., Sellers, J. A.: *On the number of graphical forest partitions. Ars Combin.* **65**, (2002) 33–37.

[26] Garg, A., Goel, A., Tripathi, A., *Constructive extensions of two results on graph sequences.* Discrete Appl. Math. **159(17)**, (2011) 2170–2174.

[27] Hakimi, S. L.: *On the realizability of a set of integers as degrees of the vertices of a simple graph.* J. SIAM Appl. Math. **10**, (1962) 496–506.

[28] Havel, V.: A remark on the existence of finite graphs (cseh). *Časopis Pěst. Mat.* **80**, (1955), 477–480.

[29] Hell, P., Kirkpatrick, D.: *Linear-time certifying algorithms for near-graphical sequences.* Discrete Math. **309(18)**, (2009) 5703–5713.

[30] Iványi, A.: *Football sorozatok tesztelése.* In: XXV. Magyar Operációkutatási Konferencia Kivonatai (Debrecen, 2001. október 17–20.), 52–52.

[31] Iványi, A.: *Reconstruction of complete interval tournaments.* Acta Univ. Sapientiae, Inform., **1(1)**, (2009) 71–88.

[32] Iványi, A.: *Reconstruction of complete interval tournaments. II.* Acta Univ. Sapientiae, Math., **2(1)**, (2010) 47–71.

[33] Iványi, A.: *Deciding the validity of the score sequence of a soccer tournament.* In (ed. A. Frank): Open problems of the Egerváry Research Group, Budapest, (2012). http://lemon.cs.elte.hu/egres/open/.

[34] Iványi, A.: *Degree sequences of multigraphs.* Annales Univ. Budapest., Comput. **37**, (2012) 195–214.

[35] Iványi, A., Lucz, L., Móri F. T., Sótér, P.: *On the Erdős-Gallai and Havel-Hakimi algorithms.* Acta Univ. Sapientiae, Inform. **3(2)**, (2011) 230–268.

[36] Iványi, A., Lucz, L., Móri F. T., Sótér, P.: *Number of graphical partitions (degree-vectors for simple graphs with n vertices.* Elérhető: http://oeis.org/A004251.

[37] Iványi, A., Pirzada, S.: *Comparison based ranking.* In (ed. A. Iványi): Algorithms of Informatics, Vol. **3**. AnTonCom, Budapest (2011) 1262–1311.

[38] Iványi, A., Schoenfield, J. E.: *Deciding football sequences.* Acta Univ. Sapientiae, Inform., **4(1)**, (2012) 130–183.

[39] Kéri G.: *On qualitatively consistent, transitive and contradictory judgment matrices emerging from multiattribute decision procedures.* Central Eur. J. Oper. Res. **19(2)**, (2011) 215–224.

[40] Kim, H., Toroczkai, Z., Miklós, I., Erdős, P. L., Székely, L. A.: *Degree-based graph construction.* J. Physics: Math. Theor. A **42(39)**, (2009) 392–401.

[41] Kleitman, D. J., Wang, D. L.: *Algorithms for constructing graphs and digraphs with given valencies and factors.* Discrete Math. **6**, (1973) 79–88.

[42] Kleitman, D. J., Winston K. J.: *Forests and score vectors.* Combinatorica **1(1)**, (1981) 49–54.

[43] Knuth, D. E.: *The Art of Computer Programming. Volume 4A, Combinatorial Algorithms.* Addison–Wesley, Upper Saddle River, (2011).

[44] Kohnert, A.: *Dominance order and graphical partitions.* Elec. J. Comb. **11(1)**, (2004) 17 pp.

[45] Kovács, G. Zs., Pataki, N.: *Rangsorolási algoritmusok elemzése.* TDK dolgozat. ELTE TTK, Budapest, (2002) 39 oldal.

[46] LaMar, M. D.: *Algorithms for realizing degree sequences of directed graphs.* arXiv-0906:0343ve [math.CO], (7 June 2010).

[47] Landau, H. G.: *On dominance relations and the structure of animal societies. III. The condition for a score sequence.* Bull. Math. Biophys. **15**, (1953) 143–148.

[48] Liljeros, F., Edling, C. R., Amaral, L., Stanley, H., Åberg, Y.: *The web of human sexual contacts.* Nature **411**, (2001) 907–908.

[49] Lovász, L.: *Combinatorial Problems and Exercises* (corrected version of the second edition). AMS Chelsea Publishing, Boston, 2007. Magyarul: *Kombinatorikai problémák és feladatok.* Typotex, Budapest, (1999).

[50] Lucz, L.: *Párhuzamos Erdős-Gallai algoritmus.* TDK dolgozat, ELTE IK, Budapest (2011). Elérhető: http://people.inf.elte.hu/lulsaai/Holzhacker/TDK/.

[51] LUCZ, L.: *Football league numbers: the possible point series for a league of n teams playing each other twice.* OEIS, A064422 számú sorozat. Elérhető: http://oeis.org/A064422.

[52] LUCZ, L.: *Football league numbers with distinct point totals.* OEIS A209467 számú sorozat, Elérhető: http://oeis.org/A209467.

[53] LUCZ, L.: *Gráfok foksorozatainak elemzése*, Programtervező informatikus diplomamunka, ELTE IK, Budapest, (2012). Elérhető: http://people.inf.elte.hu/lulsaai/diploma.

[54] LUCZ, L., SÓTÉR, P.: *Foksorozatokat ellenőrző algoritmusok.* TDK dolgozat. ELTE IK, Budapest, (2011). Elérhető: http://people.inf.elte.hu/lulsaai/Holzhacker/TDK/

[55] MEIERLING, D., VOLKMANN, L.: *A remark on degree sequences of multigraphs.* Math. Methods Oper. Res. **69(2)**, (2009) 369–374.

[56] METROPOLIS, N., STEIN, P. R.: *The enumeration of graphical partitions.* European J. Comb. **1(2)**, (1980) 139–153.

[57] MIKLÓS, I., ERDŐS, P. L., SOUKUP, L.: A remark on degree sequences of multigraphs. (2011) (benyújtva).

[58] MILLER, J. W.: *Reduced criterion for degree sequences*, arXiv, arXiv:1205.2686v1 [math.CO] (11 May 2012), 18 pages.

[59] MOON, J. W.: *Topics on Tournaments.* Holt, Rinehart, and Winston, New York, (1968).

[60] NARAYANA, T. V., BENT, D. H.: Computation of the number of score sequences in round-robin tournaments. Canad. Math. Bull. **7(1)**, (1964) 133–136.

[61] NEWMAN, M. E. J., BARABÁSI, A. L.: *The Structure and Dynamics of Networks.* Princeton University Press, Princeton, NJ, (2006).

[62] ÖZKAN, S.: *Generalization of the Erdős-Gallai inequality.* Ars Combin. **98**, (2011) 295–302.

[63] PÉCSY G., SZŰCS, L.: *Parallel verification and enumeration of tournaments.* Stud. Univ. Babeş-Bolyai, Inform. **45(2)**, (2000) 11–26.

[64] PIRZADA, S.: *Graph Theory.* Orient Blackswan, Hydarabad (2012), to appear.

[65] PIRZADA S., IVÁNYI A.: *Minimal digraphs with given imbalance sequences.* Acta Univ. Sapientiae **4(1)**, (2012) 61–76.

[66] PIRZADA, S., IVÁNYI, A., SHAH, N.: *Imbalances of bipartite multitournaments.* Annales Univ. Budapest., Comp. **37** (2012) 215–228.

[67] PIRZADA, S., IVÁNYI, A., KHAN, M. A.: *Score sets and kings.* In (ed. A. Iványi): Algorithms of Informatics, Vol. **3**, ed. A. Iványi. AnTonCom, Budapest (2011) 1451–1490.

[68] PIRZADA, S., NAIKOO, T. A., SAMEE, U. T., IVÁNYI, A.: *Imbalances in directed multigraphs.* Acta Univ. Sapientiae, Inform. **2(1)**, (2010) 47–71.

[69] PIRZADA, S., ZHOU G., IVÁNYI A.: *On k-hypertournament losing scores,* Acta Univ. Sapientiae, Inform. **2(2)**, (2010) 184–193.

[70] RØDSETH, Ø. J., SELLERS, J. A., TVERBERG, H.: *Enumeration of the degree sequences of non-separable graphs and connected graphs.* European J. Comb. **30(5)**, 1309–1319.

[71] RUSKEY, F., COHEN, R., EADES, P., SCOTT, A.: *Alley CAT's in search of good homes.* Congr. Num., **102**, (1994) 97–110.

[72] Schoenfield, J. E.: *The number of football score sequences*, in: ed. by N. J. A. Sloane, *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences,* (2012). http://oeis.org/A064626

[73] Sierksma, G., Hoogeveen, H.: *Seven criteria for integer sequences being graphic.* J. Graph Theory **15(2)**, (1991) 223–231.

[74] Siklósi, B.: *Soros és párhuzamos algoritmusok összehasonlítása sportversenyekkel kapcsolatos problémákban.* Programtervező matematikus diplomamunka. ELTE TTK, Budapest, (2001), 69 oldal.

[75] Simion, R.: *Convex polytopes and enumeration.* Advances in Applied Math. **18(2)**, (1996) 149–180.

[76] Sloane N. J. A., Plouffe S.: *The Encyclopedia of Integer Sequences.* Academic Press, (1995).

[77] Sloane N. J. A. (szerk.): *Encyclopedia of Integer Sequences.* (2012) http://oeis.org

[78] Sloane N. J. A.: *The number of ways to put $n+1$ indistinguishable balls into $n+1$ distinguishable boxes.* In (ed. N. J. A. Sloane): The On-line Encyclopedia of the Integer Sequences. (2012) http://oeis.org/A0017000

[79] Sloane N. J. A.: *The number of degree-vectors for simple graphs.* In (ed. N. J. A. Sloane): The On-Line Encyclopedia of the Integer Sequences. (2012) http://oeis.org/A004251

[80] Sloane N. J. A.: *The number of bracelets with n red, 1 pink and $n-1$ blue beads.* In (ed. N. J. A. Sloane): The On-Line Encyclopedia of the Integer Sequences. (2012) http://oeis.org/A0005654

[81] Soroker, D.: *Optimal parallel construction of prescribed tournaments.* Discrete Appl. Math. **29(1)**, (1990) 113–125.

[82] Stanley, R.: *Enumerative Combinatorics. Vol. 2.* Cambridge University Press, Cambridge, (1997).

[83] Stanley, R.: *A zonotope associated with graphical degree sequence.* In: Applied Geometry and Discrete Mathematics, Festschr. 65th Birthday Victor Klee. DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science. **4**, (1991) 555-570.

[84] Takahashi, M.: *Optimization Methods for Graphical Degree Sequence Problems and their Extensions*, PhD thesis, Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University, Tokyo, (2007). http://hdl.handle.net/2065/28387

[85] Tripathi, A., Tyagy, H.: *A simple criterion on degree sequences of graphs.* Discrete Appl. Math. **156(18)**, (2008) 3513–3517.

[86] Tripathi, A., Vijay, S.: *A note on a theorem of Erdős & Gallai.* Discrete Math. **265(1–3)**, (2003) 417–420.

[87] Tripathi, A., Venugopalan, S., West, D. B.: *A short constructive proof of the Erdős-Gallai characterization of graphic lists.* Discrete Math. **310(4)**, (2010) 833–834.

[88] Weisstein, E. W.: *Degree sequence.* From MathWorld—Wolfram Web Resource, (2011).

[89] Weisstein, E. W.: *Graphic sequence.* From MathWorld—Wolfram Web Resource, (2011).

[90] Winston, K. J., Kleitman, D. J.: *On the asymptotic number of tournament score sequences.* J. Combin. Theory Ser. A. **35**, (1983) 208–230.

(Beérkezett: 2011. július 17., módosítva 2012. november 19.)

IVÁNYI ANTAL
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C
e-mail: tony@inf.elte.hu

LUCZ LORÁND
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C
e-mail: lorand.lucz@gmail.com

DEGREE SEQUENCES OF MULTIGRAPHS

Antal Iványi, Loránd Lucz

Let a, b and n integers, $0 \leq a \leq b$ and $n \geq 1$. (a, b, n)-graphs are loopless multigraphs in which any two vertices are connected with an least a and at most b edges and contain n vertices. Havel in 1955 [28], Erdős and Gallai in 1960 [20], Hakimi in 1962 [27], Tripathi, Venugopalan and West in 2010 [87] proposed a method to decide, whether a sequence of nonnegative integers can be the degree sequence of a $(0, 1, n)$-graph. These methods are at least quadratic in worst case. Takahashi [84] in 2007 while Hell and Kirkpatrick [29] in 2009 proposed linear algorithm. Chungphaisan in 1974 [18] extended Havel-Hakimi and Erdős-Gallai theorem for $(0, b, n)$-graphs. We extend Erdős-Gallai-Chungphaisan theorem for (a, b, n)-graphs and propose a linear time algorithm, based on our theorem. We also propose a linear time version of the testing Havel-Hakimi algorithm and extend it for $(0, 2, n)$-graphs.