

6. fejezet

Tesztelés

A modellek fejlesztése és tesztelése során, a saját számítógépemen dolgoztam. A felhasznált környezet paraméterei:

Hardver:

- Lenovo Z50-75 laptop
- AMD FX-7500 Radeon R7, 10 Compute Cores 4C+6G 2.10 GHz processzor
- 8 GB DDR3 RAM

Szoftverek:

- Microsoft Windows 8.1 Pro 64 bites operációs rendszer
- GUSEK (GLPK Under Scite Extended Kit) v0.2.21
- GLPSOL GLPK LP/MIP Solver, v4.63
- Gurobi Optimizer v8.1.1

A fejlesztés során a GUSEK GUI-t használtam és a GLPSOL programmal futtattam a modelleket. A végleges modellt valós adatokon Gurobival teszteltem. A következőkben az elkészült MILP modellek futási eredményeit mutatom be.

Feladatosztály 1

Ehhez az osztályhoz két modell tartozott: Modell 1A és Modell1B. A modellek a probléma megközelítésében eltértek egymástól, azonban mivel ugyanazokat a halmazokat és paramétereket használták a modell felírásakor, ezért az adatfájljuk megegyezett. A feladatosztály célja az átmeneti távolságok minimalizálása. A közös .dat fájl a .ábrán látható. A felhasznált adatok nem valós adatokon alapulnak, csupán a fejlesztéshez szükséges első teszteléseket segítették.

```

set Helyek := A B C D;
param tav: A B C D :=
  -> A 0 14 17 8
  -> B 14 0 5 10
  -> C 17 5 0 20
  -> D 8 10 20 0
; #km

param ido: A B C D :=
  -> A 0 21 26 12
  -> B 21 0 8 15
  -> C 26 8 0 30
  -> D 12 15 30 0
; #perc

param jaratszam := 12;

param : honnan hova mikortol meddig:=
1 A B 10 35
2 C D 10 45
3 A C 70 100
4 B A 40 65
5 B C 20 30
6 C A 105 135
7 D A 50 65
8 B D 110 130
9 A D 140 155
10 D B 160 180
11 D C 55 90
12 C B 95 105
;

param buszszam := 3;

```

.ábra: Feladatosztály 1-hez tartozó .dat fájl

A kimeneti .out fájlok több ezer sorból állnak, ezért printf függvények segítségével jobban átlátható kimenetet generáltam. A két modell futási eredményeinek összehasonlítása az alábbi, táblázatban található.

.táblázat: Modell 1A és Modell 1B futási eredményének összehasonlítása

	Modell 1A	Modell 1B
Busz 1	<ul style="list-style-type: none"> 00:20-00:30: járat 5 végrehajtása B-ből C-be (5 km) 00:30-00:40: átmenet járat 5 és járat 4 között (5 km) 	<ul style="list-style-type: none"> 00:20-00:30: járat 5 végrehajtása B-ből C-be (5 km) 00:30-00:40: átmenet járat 5 és járat 4 között (5 km)

	<ul style="list-style-type: none"> • 00:40-01:05: járat 4 végrehajtása B-ből A-ba (14 km) • 01:05-02:20: átmenet járat 4 és járat 9 között (0 km) • 02:20-02:35: járat 9 végrehajtása A-ból D-be (8 km) • 02:35-02:40: átmenet járat 9 és járat 10 között (0 km) • 02:40-03:00: járat 10 végrehajtása D-ből B-be (10km) 	<ul style="list-style-type: none"> • 00:40-01:05: járat 4 végrehajtása B-ből A-ba (14 km) • 01:05-01:10: átmenet járat 4 és járat 3 között (0 km) • 01:10-01:40: járat 3 végrehajtása A-ból C-be (17 km) • 01:40-01:45: átmenet járat 3 és járat 6 között (0 km) • 01:45-02:15: járat 6 végrehajtása C-ből A-ba (17 km) • 02:15-02:20: átmenet járat 6 és járat 9 között (0 km) • 02:20-02:35: járat 9 végrehajtása A-ból D-be (8 km)
Busz 2	<ul style="list-style-type: none"> • 00:10-00:45: járat 2 végrehajtása C-ből D-be (20 km) • 00:45-00:50: átmenet járat 2 és járat 7 között (0 km) • 00:50-01:05: járat 7 végrehajtása D-ből A-ba (8 km) • 01:05-01:10: átmenet járat 7 és járat 3 között (0 km) • 01:10-01:40: járat 3 végrehajtása A-ból C-be (17 km) • 01:40-01:45: átmenet járat 3 és járat 6 között (0 km) • 01:45-02:15 járat 6 végrehajtása C-ből A-ba (17 km) 	<ul style="list-style-type: none"> • 00:10-00:35: járat 1 végrehajtása A-ból B-be (14 km) • 00:35-00:55: átmenet járat 1 és járat 11 között (10 km) • 00:55-01:30: járat 11 végrehajtása D-ből C-be (20 km) • 01:30-01:35: átmenet járat 11 és járat 12 között (0 km) • 01:35-01:45: járat 12 végrehajtása C-ből B-be (5 km) • 01:45-01:50: átmenet járat 12 és járat 8 között (0 km) • 01:50-02:10: járat 8 végrehajtása B-ből D-be (10 km) • 02:10-02:40: átmenet járat 8 és járat 10 között (0 km) • 02:40-03:00: járat 10 végrehajtása D-ből B-be (10 km)
Busz 3	<ul style="list-style-type: none"> • 00:10-00:35: járat 1 végrehajtása A-ból B-be (14 km) • 00:35-00:55: átmenet járat 1 és járat 11 között (10 km) • 00:55-01:30: járat 11 végrehajtása D-ből C-be (20 km) 	<ul style="list-style-type: none"> • 00:10-00:45: járat 2 végrehajtása C-ből D-be (20 km) • 00:45-00:50: átmenet járat 2 és járat 7 között (0 km) • 00:50-01:05: járat 7 végrehajtása D-ből A-ba (8 km)

	<ul style="list-style-type: none"> • 01:30-01:35: átmenet járat 11 és járat 12 között (0 km) • 01:35-01:45: járat 12 végrehajtása C-ből B-be (5 km) • 01:45-01:50: átmenet járat 12 és járat 8 között (0 km) • 01:50-02:10: járat 8 végrehajtása B-ből D-be (10 km) 	
Cél	15 km	15 km
Futási idő	0.3 mp	312.2 mp
Memória	2.2 MB	26.3 MB

Például Modell 1B-nél a 3-as busz menetrendje úgy néz ki, hogy elvégzi a 2-es járatot, majd 5percet várakozik D helyen és elvégzi a 7-es járatot is.

Amennyiben az átmenet értéke 0 km, akkor az előző járat érkezési és a következő járat indulási helye megegyezik.

A cél a köztes kilométerek minimalizálása volt, ami mindkét modell esetben 15 kilométerre jött ki.

Mindkét modell talált optimális megoldást, de a táblázatból szépen látszik az indok, amiért továbbfejlesztésre a Modell1A-t választottam: gyorsabban végezte el a feladatát kevesebb memóriahasználattal.

Feladatosztály 2

A második feladatosztályban található Modell 2 az 1A továbbfejlesztéseként már depókat is rendel minden buszhoz. A modell célja megegyezik az előző feladatosztályban megfogalmazottal. Az előző modellek által használt adatfájllal futtattam ezt a modellt is, ám ebben az esetben a .ábrán található **depo** paraméter kiegészítéssel. A .táblázatban pedig a futási eredmény látható.

```
param depo:=
1 A
2 B
3 A
;
```

.ábra: A depo paraméter értékei

.táblázat: Modell2 futási eredménye

Busz 1	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-00:10: átmenet depó (A) és járat 1 között (0 km)• 00:10-00:30: járat 1 végrehajtása A-ból B-be (14 km)• 00:35-00:50: átmenet járat 1 és járat 7 között (10 km)• 00:50-01:05: járat 7 végrehajtása D-ből A-ba (8 km)• 01:05-01:10: átmenet járat 7 és járat 3 között (0 km)• 01:10-01:40: járat 3 végrehajtása A-ból C-be (17 km)• 01:40-01:45: átmenet járat 3 és járat 6 között (0 km)• 01:45-02:15: járat 6 végrehajtása C-ből A-ba (17 km)• 02:15-02:15: átmenet járat 6 és depó (A) között (0 km)
Busz 2	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-00:20: átmenet járat 5 és depó (B) között (0 km)• 00:20-00:30: járat 5 végrehajtása B-ből C-be (5 km)• 00:30-00:40: átmenet járat 5 és járat 4 között (5 km)• 00:40-01:05: járat 4 végrehajtása B-ből A-ba (14 km)• 01:05-02:20: átmenet járat 4 és járat 9 között (0 km)• 02:20-02:35: járat 9 végrehajtása A-ból D-be (8 km)• 02:35-02:40: átmenet járat 9 és járat 10 között (0 km)• 02:40-03:00: járat 10 végrehajtása D-ből B-be (10 km)• 03:00-03:00: átmenet járat 10 és depó (B) között (0 km)
Busz 3	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-00:10: átmenet depó (A) és járat 2 között (17 km)• 00:10-00:45: járat 2 végrehajtása C-ből D-be (20 km)• 00:45-00:55: átmenet járat 2 és járat 11 között (0 km)• 00:55-01:30: járat 11 végrehajtása D-ből C-be (20 km)• 01:30-01:35: átmenet járat 11 és járat 12 között (0 km)• 01:35-01:45: járat 12 végrehajtása C-ből B-be (5 km)• 01:45-01:55: átmenet járat 12 és járat 8 között (0 km)• 01:55-02:10: járat 8 végrehajtása B-ből D-be (10 km)

	<ul style="list-style-type: none"> 02:10-02:22: átmenet járat 8 és depó (A) között (8 km)
Cél	40 km
Futási idő	1 mp
Memória	3.3 MB

A depók bevezetésével láthatjuk a célként definiált minimum értékének, a futási időnek és a memóriahasználatnak a növekedését is.

Feladatosztály 3

A harmadik feladatosztályhoz egy modell tartozott: Modell 3, aminek a célja továbbra is a köztes kilométerek minimalizálása volt. Ebben a modellben két új paraméter került bevezetésre: a járatok valós távolságát jelző `tav2` és a buszok által egy töltéssel megtehető kilométerek számát jelölő `maxtav`. Az adatfájlban szereplő értékeiket a . és a . ábrán láthatjuk. A modell futási eredményét a . táblázat mutatja.

```
param tav2:=
1 16
2 21
3 19
4 16
5 8
6 19
7 10
8 12
9 10
10 12
11 21
12 8
;
```

.ábra: A `tav2` paraméter értékei

```
param maxtav:=
1 200
2 300
3 250
;
```

.ábra: A maxtav paraméter értékei

.táblázat: Modell3 futási eredménye

Busz 1	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-00:10: átmenet depó (A) és járat 2 között (17 km) • 00:10-00:45: járat 2 végrehajtása C-ből D-be (21 km) • 00:45-00:50: átmenet járat 2 és járat 7 között (0 km) • 00:50-01:05: járat 7 végrehajtása D-ből A-ba (10 km) • 01:05-01:10: átmenet járat 7 és járat 3 között (0 km) • 01:10-01:40: járat 3 végrehajtása A-ból C-be (19 km) • 01:40-01:45: átmenet járat 3 és járat 6 között (0 km) • 01:45-02:15: járat 6 végrehajtása C-ből A-ba (19 km) • 02:15-02:15: átmenet járat 6 és depó (A) között (0 km) • Összes futott km / maxtav: 86 / 200
Busz 2	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-00:20: átmenet depó (B) és járat 5 között (0 km) • 00:20-00:30: járat 5 végrehajtása B-ből C-be (8 km) • 00:30-00:40: átmenet járat 5 és járat 4 között (5 km) • 00:40-01:05: járat 4 végrehajtása B-ből A-ba (16 km) • 01:05-02:20: átmenet járat 4 és járat 9 között (0 km) • 02:20-02:35: járat 9 végrehajtása A-ból D-be (10 km) • 02:35-02:40: átmenet járat 9 és járat 10 között (0 km) • 02:40-03:00: járat 10 végrehajtása D-ből B-be (12 km) • 03:00-03:00: átmenet járat 10 és depó (B) között (0 km) • Összes futott km / maxtav: 51 / 300
Busz 3	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-00:10: átmenet depó (A) és járat 1 között (0 km) • 00:10-00:35: járat 1 végrehajtása A-ból B-be (16 km) • 00:35-00:55: átmenet járat 1 és járat 11 között (10 km) • 00:55-01:30: járat 11 végrehajtása D-ből C-be (21 km) • 01:30-01:35: átmenet járat 11 és járat 12 között (0 km) • 01:35-01:45: járat 12 végrehajtása C-ből B-be (8 km) • 01:45-01:50: átmenet járat 12 és járat 8 között (0 km) • 01:50-02:10: járat 8 végrehajtása B-ből D-be (12 km) • 02:10-02:22: átmenet járat 8 és depó (A) között (8 km) • Összes futott km / maxtav: 75 / 250
Cél	40 km

Futási idő	1.3 mp
Memória	3.2 MB

Minden busznál jeleztem az összesen megtett távolságot illetve a maximálisan megtehető távolságot, valamint a táblázatban a járatok hossza is szerepel.

Mint a táblázatból láthatjuk a célfüggvény értéke megegyezett a Modell 2-esével és a járatok ütemezését a kiegészítésekkel együtt is hasonlóan hajtotta végre ez a modell. A futási idő és memóriahasználatban sincs túl nagy eltérés.

Feladatosztály 4

Az osztályhoz tartozó Modell4-ben már figyelembe vettem azt is, hogy elektromos buszokról van szó és a modell célja is megváltozott: innentől kezdve az összes fogyasztás minimalizálása lett a cél. A `maxtav` paraméter helyére a `maxtoltes` paraméter került, ami a buszok akkumulátorának kWh-ban mért kapacitását jelöli. A `fogyasztas` paraméter a buszok kilométerenkénti kilowattóra fogyasztását jelöli, ami járművenként eltérő lehet. A `.dat` fájl többi értéke egyezik az eddigiekben bemutatottal. Az adatok továbbra is szabadon választott számok. A `maxtoltes` és `fogyasztas` paraméterek a `.ábrán` láthatók, Modell4 futási eredménye pedig a `.táblázatban`.

```
param : maxtoltes fogyasztas:=
1 200 2
2 300 4
3 250 3
;
```

.ábra: a maxtoltes és fogyasztas paraméterek értékei

.táblázat: Modell 4 futási eredménye

Busz 1	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-00:10: átmenet depó (A) és járat 2 között (17 km) • 00:10-00:45: járat 2 végrehajtása C-ből D-be (21 km) • 00:45-00:55: átmenet járat 2 és járat 11 között (0 km) • 00:55-01:30: járat 11 végrehajtása D-ből C-be (21 km) • 01:30-01:35: átmenet járat 11 és járat 12 között (0 km) • 01:35-01:45: járat 12 végrehajtása C-ből B-be (8 km)
--------	---

	<ul style="list-style-type: none"> • 01:45-01:50: átmenet járat 12 és járat 8 között (0 km) • 01:50-02:10: járat 8 végrehajtása B-ből D-be (12 km) • 02:10-02:22: átmenet járat 8 és depó (A) között (8 km) • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 87 / 174 / 200
Busz 2	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-00:20: átmenet depó (B) és járat 5 között (0 km) • 00:20-00:30: járat 5 végrehajtása B-ből C-be (8 km) • 00:30-00:40: átmenet járat 5 és járat 4 között (5 km) • 00:40-01:05: járat 4 végrehajtása B-ből A-ba (16 km) • 01:05-02:20: átmenet járat 4 és járat 9 között (0 km) • 02:20-02:35: járat 9 végrehajtása A-ból D-be (10 km) • 02:35-02:40: átmenet járat 9 és járat 10 között (0 km) • 02:40-03:00: járat 10 végrehajtása D-ből B-be (12 km) • 03:00-03:00: átmenet járat 10 és depó (B) között (0 km) • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 51 / 204 / 300
Busz 3	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-00:10: átmenet depó (A) és járat 1 között (0 km) • 00:10-00:35: járat 1 végrehajtása A-ból B-be (16 km) • 00:35-00:50: átmenet járat 1 és járat 7 között (10 km) • 00:50-01:05: járat 7 végrehajtása D-ből A-ba (10 km) • 01:05-01:10: átmenet járat 7 és járat 3 között (0 km) • 01:10-01:40: járat 3 végrehajtása A-ból C-be (19 km) • 01:40-01:45: átmenet járat 3 és járat 6 között (0 km) • 01:45-02:15: járat 6 végrehajtása C-ből A-ba (19 km) • 02:15-02:15: átmenet járat 6 és depó (A) között (0 km) • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 74 / 222 / 250
Cél	600 kWh
Futási idő	0.9 mp
Memória	3.2 MB

A táblázatban jelöltem a buszok által összesen megtett távolságot, az összes energiafogyasztást és az akkumulátorkapacitást is. A célfüggvényben megfogalmazott összes fogyasztási érték jelen esetben 600 kWh volt. A futási idő és a memóriahasználat az előző modellhez hasonlóan alakult.

Feladatosztály 5

Ebben az osztályban már lehetett tölteni az akkumulátort a különböző töltőjáratok valamelyikén. Az ötödik feladatosztályhoz tartozó két modell: Modell5, Modell5v2. Mindegyik modell célja a fogyasztás minimalizálása.

A . ábrán láthatóak azok a modell5.dat fájlban található adatok, amik a modell4.dat-hoz képest változtak. A . táblázatban Modell5 futási eredménye olvasható.

```
set MindenJarat := j1 j2 j3 j4 j5 j6 j7 j8 j9 j10 j11 j12 t1 t2 t3 t4 t5;
set Toltojaratok := t1 t2 t3 t4 t5;

param : honnan hova mikortol meddig tav2:=
j1 A B 0 25 16
j2 C D 50 85 21
j3 A C 100 130 19
j4 B A 150 175 16
j5 B C 200 210 8
j6 C A 250 280 19
j7 D A 300 315 10
j8 B D 350 370 12
j9 A D 400 415 10
j10 D B 450 470 12
j11 D C 500 515 21
j12 C B 550 560 8
t1 A A 120 180 0
t2 A A 180 240 0
t3 A A 240 300 0
t4 A A 300 360 0
t5 A A 360 420 0

param : depo maxtoltes fogyasztas:=
1 A 100 2
2 B 200 4
3 A 150 3
;
```

.ábra: Változások a modell5.dat-ban modell4.dat-hoz képest

.táblázat: Modell 5 futási eredménye

Busz1	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-00:00: átmenet depó (A) és járat 1 között (0 km) 100→ 100 kWh• 00:00-00:25: járat 1 végrehajtása A-ból B-be (16 km) 100 → 68 kWh• 00:25-00:50: átmenet járat 1 és járat 2 között (5 km) 68 → 58 kWh• 00:50-01:25: járat 2 végrehajtása C-ből D-be (21 km) 58 → 16 kWh• 01:25-02:00: átmenet járat 2 és töltőjárat 1 között (8 km) 16 → 0 kWh• 02:00-03:00: töltőjárat 1 végrehajtása A töltőhelyen 0 → 100 kWh
-------	---

	<ul style="list-style-type: none"> • 03:00-04:10: átmenet töltőjárat 1 és járat 6 között (17 km) 100 → 66 kWh • 04:10-04:40: járat 6 végrehajtása C-ből A-ba (19 km) 66 → 0 kWh • 04:40-05:00: átmenet járat 6 és töltőjárat 4 között (0 km) 0 → 0 kWh • 05:00-06:00: töltőjárat 4 végrehajtása A töltőhelyen 0 → 100 kWh • 06:00-06:40: átmenet töltőjárat 4 és járat 9 között (0 km) 100 → 100 kWh • 06:40-06:55: járat 9 végrehajtása A-ból D-be (10km) 100 → 80 kWh • 06:55-08:20: átmenet járat 9 és járat 11 között (0km) 80 → 80 kWh • 08:20-08:35: járat 11 végrehajtása D-ből C-be (21 km) 80 → 34 kWh • 08:35-09:01: átmenet járat 11 és depó (A) között (17 km) 34 → 0 kWh • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 134 / 268 / 100
Busz 2	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-03:20: átmenet depó (B) és járat 5 között (0 km) 200 → 200 kWh • 03:20-03:30: járat 5 végrehajtása B-ből C-be (8 km) 200 → 168 kWh • 03:30-05:50: átmenet járat 5 és járat 8 között (5 km) 168 → 148 kWh • 05:50-06:10: járat 8 végrehajtása B-ből D-be (12 km) 148 → 100 kWh • 06:10-07:30: átmenet járat 8 és járat 10 között (0 km) 100 → 100 kWh • 07:30-07:50: járat 10 végrehajtása D-ből B-be (12 km) 100 → 52 kWh • 07:50-09:10: átmenet járat 10 és járat 12 között (5 km) 52 → 32 kWh • 09:10-09:20: járat 12 végrehajtása C-ből B-be (8 km) 32 → 0 kWh • 09:20-09:20: átmenet járat 12 és depó (B) között (0 km) 0 → 0 kWh • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 50 / 200 / 200
Busz 3	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-01:40: átmenet depó (a) és járat 3 között (0 km) 120 → 120 kWh • 01:40-02:10: járat 3 végrehajtása A-ból C-be (19 km) 120 → 63 kWh • 02:10-02:30: átmenet járat 3 és járat 4 között (5 km) 63 → 48 kWh • 02:30-02:55: járat 4 végrehajtása B-ből A-ba (16 km) 48 → 0 kWh • 02:55-03:00: átmenet járat 4 és töltőjárat 2 között (0 km) 0 → 0 kWh • 03:00-04:00: töltőjárat 2 végrehajtása A töltőhelyen 0 → 150 kWh • 04:00-05:00: átmenet töltőjárat 2 és járat 7 között (8 km) 150 → 30 kWh • 05:00-05:15: járat 7 végrehajtása D-ből A-ba (10 km) 30 → 0 kWh • 05:15-06:00: átmenet járat 7 és töltőjárat 5 között (0 km) 0 → 0 kWh • 06:00-07:00: töltőjárat 5 végrehajtása A töltőhelyen 0 → 150 kWh • 07:00-07:00: átmenet töltőjárat 5 és depó (A) között (0 km) 150 → 150 kWh • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 58 / 174 / 150
Cél	642 kWh
Futási idő	463.1 mp
Memória	40.3 MB

A táblázatban a járatok végén jelöltem a töltöttségi szint változást. Mindegyik busz töltöttsége a maximumról indul, ám az ütemezés végén lemehet 0-ra is, de fel is töltheti magát a műszak végén. Ez a modellben nincsen lekorlátozva.

Ha egy átmenetnek az indulási és érkezési helye ugyanaz, és az időtartama 0-nál nagyobb, akkor a busz addig azon a helyen várakozik.

Modell 5 – nél nőtt meg először drasztikusan a futási idő.

A . ábrán olvashatóak, azok az adatok, amik eltérnek a Modell5v2-ben az 5-ös modell adatfájljától.

Modell5v2-t elkezdtem futtatni, de még 1 óra után sem végzett, ezért a --tmlim kapcsoló segítségével beállítottam egy 10 perces időkorlátot, és az azalatt kijött legjobb eredményt tartalmazza az 5v2 futási eredményét tartalmazó .táblázat.

```
set Jaratok := j1 j2 j3 j4 j5 j6 j7 j8 j9 j10 j11 j12;

param : honnan hova mikortol meddig tav2:=
j1 A B 0 25 16
j2 C D 50 85 21
j3 A C 100 130 19
j4 B A 150 175 16
j5 B C 200 210 8
j6 C A 250 280 19
j7 D A 300 315 10
j8 B D 350 370 12
j9 A D 400 415 10
j10 D B 450 470 12
j11 D C 500 515 21
j12 C B 550 560 8
;

set Toltohelyek:= A C;

param idoszelet :=180;

param buszszam := 7;

param : depo maxtoltes fogyasztas:=
1 A 100 2
2 B 200 4
3 A 150 3
4 B 100 2
5 A 200 4
6 A 100 2
7 B 150 3
;
```

.ábra: modell5v2.dat

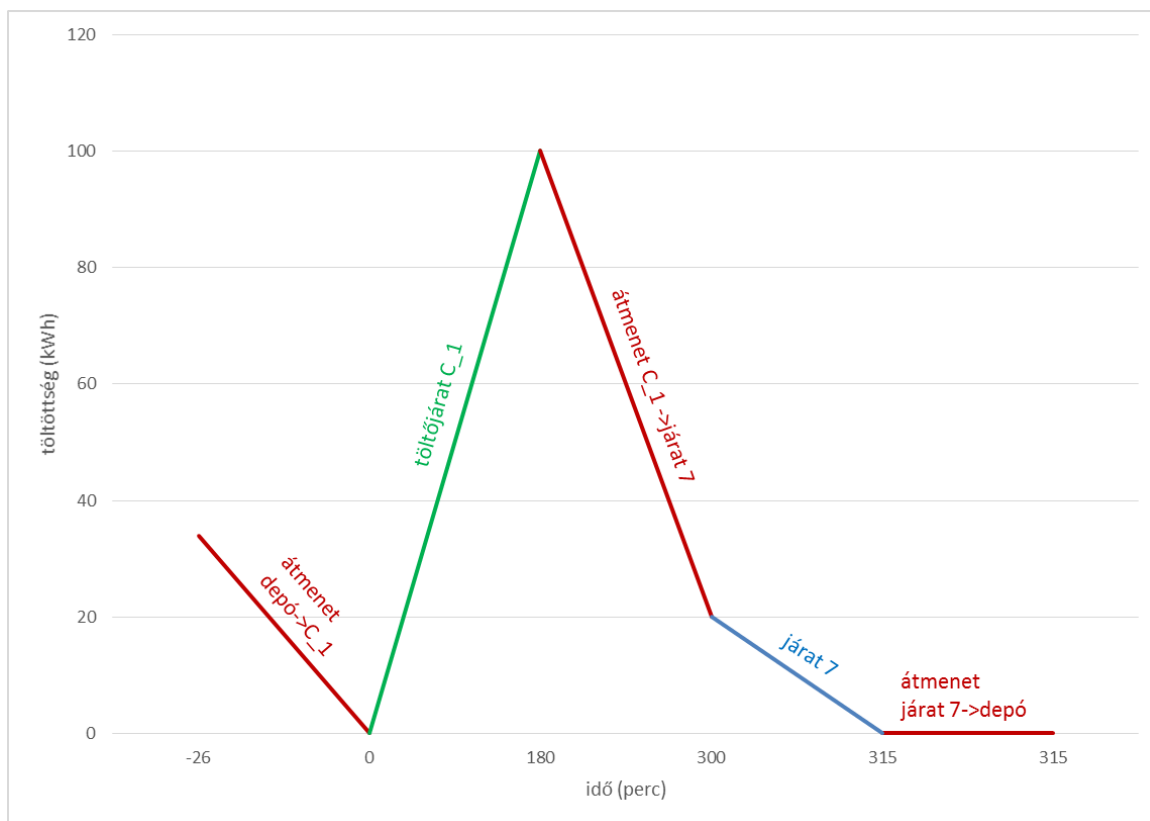
.táblázat: Modell5v2 futási eredménye 10 perc alatt

Busz 1	<ul style="list-style-type: none">• -00:26-00:00: átmenet depó (A) és töltőjárat C_1 között (17 km) 34 → 0 kWh• 00:00-03:00: töltőjárat C_1 végrehajtása C töltőhelyen 0 → 100 kWh• 03:00-05:00: átmenet töltőjárat C_1 és járat 7 között (20 km) 100 → 20 kWh• 05:00-05:15: járat 7 végrehajtása D-ből A-ba (10 km) 20 → 0 kWh• 05:15-05:15: átmenet járat 7 és depó (A) között (0 km) 0 → 0 kWh• Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 47 / 94 / 100
Busz 2	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-00:50: átmenet depó (B) és járat 2 között (5 km) 184 → 164 kWh• 00:50-01:25: járat 2 végrehajtása C-ből D-be (21 km) 164 → 80 kWh• 01:25-03:00: átmenet járat 2 és töltőjárat C_2 között (20 km) 80 → 0 kWh• 03:00-06:00: töltőjárat C_2 végrehajtása C töltőhelyen 0 → 200 kWh• 06:00-06:00: átmenet töltőjárat C_2 és töltőjárat C_3 között (0 km) 200 → 0 kWh• 06:00-09:00: töltőjárat C_3 végrehajtása C töltőhelyen 0 → 200 kWh• 09:00-09:08: átmenet töltőjárat C_3 és depó (B) között (5 km) 200 → 180 kWh• Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 51 / 204 / 200
Busz 3	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-06:00: átmenet depó (A) és töltőjárat A_3 között (0 km) 0 → 0 kWh• 06:00-09:00: töltőjárat A_3 végrehajtása A töltőhelyen 0 → 150 kWh• 09:00-09:00: átmenet töltőjárat A_3 és depó (A) között 150 → 150 kWh• Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 0 / 0 / 150
Busz 4	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-03:20: átmenet depó (B) és járat 5 között (0 km) 98 → 98 kWh• 03:20-03:30: járat 5 végrehajtása B-ből C-be (8 km) 98 → 82 kWh• 03:30-04:10: átmenet járat 5 és járat 6 között (0 km) 82 → 82 kWh• 04:10-04:40: járat 6 végrehajtása C-ből A-ba (19 km) 82 → 44 kWh• 04:40-06:40: átmenet járat 6 és járat 9 között (0 km) 44 → 44 kWh• 06:40-06:55: járat 9 végrehajtása A-ból D-be (10 km) 44 → 24 kWh• 06:55-07:30: átmenet járat 9 és járat 10 között (0 km) 24 → 24 kWh• 07:30-07:50: járat 10 végrehajtása D-ből B-be (12 km) 24 → 0 kWh• 07:50-07:50: átmenet járat 10 és depó (B) között (0 km) 0 → 0 kWh• Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 49 / 98 / 100
Busz 5	<ul style="list-style-type: none">• 00:00-00:00: átmenet depó (A) és járat 1 között (0 km) 144 → 144 kWh

	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-00:25: járat 1 végrehajtása A-ból B-be (16 km) 144 → 80 kWh • 00:25-05:50: átmenet járat 1 és járat 8 között (0 km) 80 → 80 kWh • 05:50-06:10: járat 8 végrehajtása B-ből D-be (12 km) 80 → 32 kWh • 06:10-06:22: átmenet járat 8 és depó (A) között (8 km) 32 → 0 kWh • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 36 / 144 / 200
Busz 6	<ul style="list-style-type: none"> • 00:00-01:40: átmenet depó (A) és járat 3 között (0 km) 80 → 80 kWh • 01:40-02:10: járat 3 végrehajtása A-ból C-be (19 km) 80 → 42 kWh • 02:10-02:30: átmenet járat 3 és járat 4 között (5 km) 42 → 32 kWh • 02:30-02:55: járat 4 végrehajtása B-ből A-ba (16 km) 32 → 0 kWh • 02:55-02:55: átmenet járat 4 és depó (A) között (0 km) 0 → 0 kWh • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 40 / 80 / 100
Busz 7	<ul style="list-style-type: none"> • -00:21-00:00: átmenet depó (B) és töltőjárat A_1 között (14 km) 42 → 0 kWh • 00:00-03:00: töltőjárat A_1 végrehajtása A töltőhelyen 0 → 150 kWh • 03:00-03:00: átmenet töltőjárat A_1 és töltőjárat A_2 között (0 km) 150 → 0 kWh • 03:00-06:00: töltőjárat A_2 végrehajtása A töltőhelyen 0 → 150 kWh • 06:00-08:20: átmenet töltőjárat A_2 és járat 11 között (8 km) 150 → 87 kWh • 08:20-08:35: járat 11 végrehajtása D-ből C-be (21 km) 87 → 24 kWh • 08:35-09:10: átmenet járat 11 és járat 12 között (0 km) 24 → 24 kWh • 09:10-09:20: járat 12 végrehajtása C-ből B-be (8 km) 24 → 0 kWh • 09:20-09:20: átmenet járat 12 és depó (B) között (0 km) 0 → 0 kWh • Összes futott km / Összes fogyasztás / Akkumulátorkapacitás: 51 / 153 / 150
Cél	773 kWh
Futási idő	600 mp
Memória	79 MB

Ez a megoldás 51.5%-os gappal dolgozik (ennyire messze lehet az optimumtól). A busznak az ütemezés elején nem kötelező maximális töltöttségről indulnia, illetve a modellben előfordulnak töltésvesztések és egymás után két töltőjárat elvégzése és olyan busz is, amihez csak töltőjárat volt hozzárendelve. Ezek az esetek nem lettek a modellben lekorlátozva, ahogy az sem, hogy csak 0-ról indulhat és, hogy ne kezdhetne töltőjárat.

Példaként a .ábrán Busz 1 ütemezése látható: kézzel a járatot, zölddel a töltőjáratot, míg pirossal az átmeneteket jelöltem. A vízszintes tengelyen az idő, a függőlegesen a töltöttség szerepel.



.ábra: Busz 1 menetrendje

Modell 5v2 tesztelése Gurobival

A modellhez valós adatokat különböző forrásból szereztem be. Kiválasztottam két győri járatot (17B és 19) és a 2019-es munkanapos menetrend adataikat használtam a járatok kezdési és befejezési idejének meghatározásához. A távolság és időadatokat a Google Térkép segítségével a járatok útvonala mentén végighaladva határoztam meg. A buszok töltöttségi és fogyasztási adatait az alábbi cikkből vettem: [<https://azuzlet.hu/bemutattak-az-ikarus-elso-elektromos-autobuszat-szekesfehervaron/>]

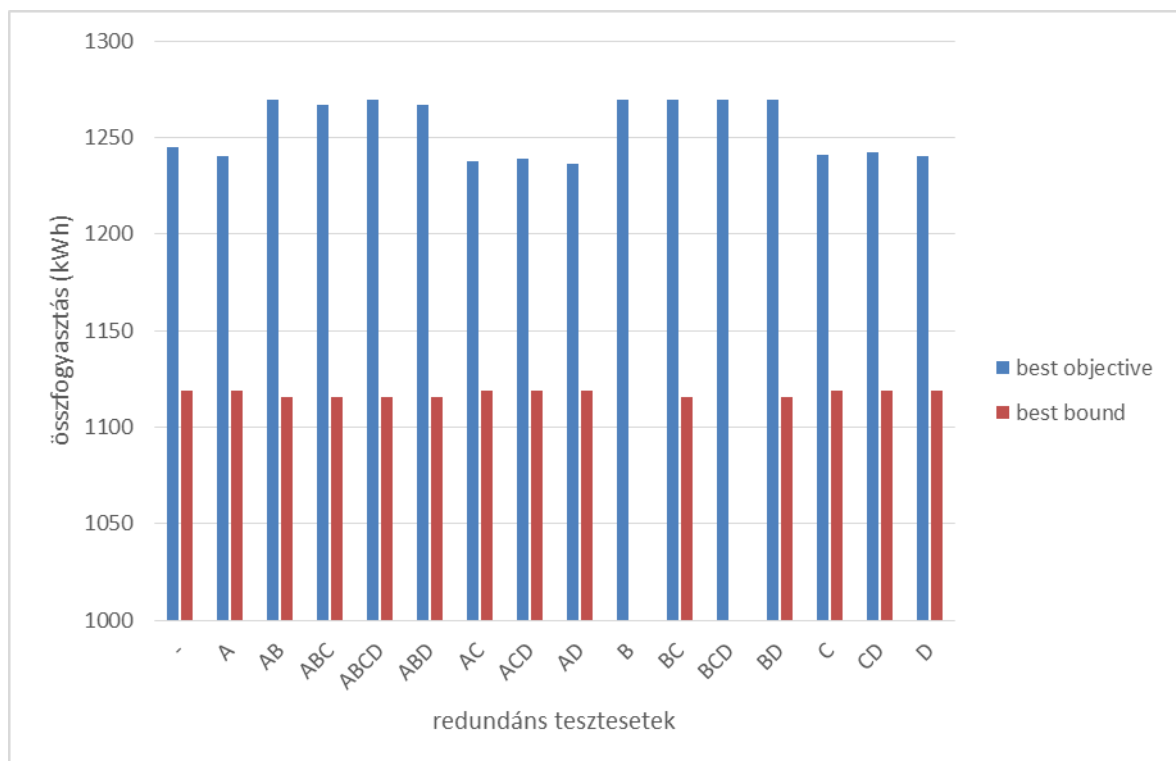
A modellben 82 járat elvégzésére 20 busz áll rendelkezésre. A 17 B járatok a Virágpiacról indulnak a Révai Miklós utca felé, míg a 19-es járatok a Révai Miklós utcából a Széchenyi István Egyetem felé. A buszok depója a 3 állomás valamelyikén van. A Révai utcában feltételeztem egy töltőhelyet, a töltés időtartama 6 óra.

Kétféle tesztesztályt vizsgáltam: egy redundáns és egy inkrementális osztályt. A redundáns esetben azt néztem meg, hogy a Modell 5v2-ben előforduló redundáns korlátozások ki-be kapcsolása hogyan hat a célfüggvény értékére. Az inkrementális esetben is a Modell 5v2-t használtam, amiben 1-től 20-ig növeltem a buszok számát és figyeltem, hogy ez hogyan hat a célfüggvényre (fogyasztás minimalizálása). A tesztelés során a legjobb határértéket (best bound) és az optimális megoldástól való távolságot (gap) is figyeltem. Az egyes teszteket 10 percig futtattam a Gurobival.

A redundáns tesztesztály négy korlátozás (és azok kombinációinak) hatását céltzott figyelni a célfüggvényre vetítve. Ez a négy korlátozás a következő:

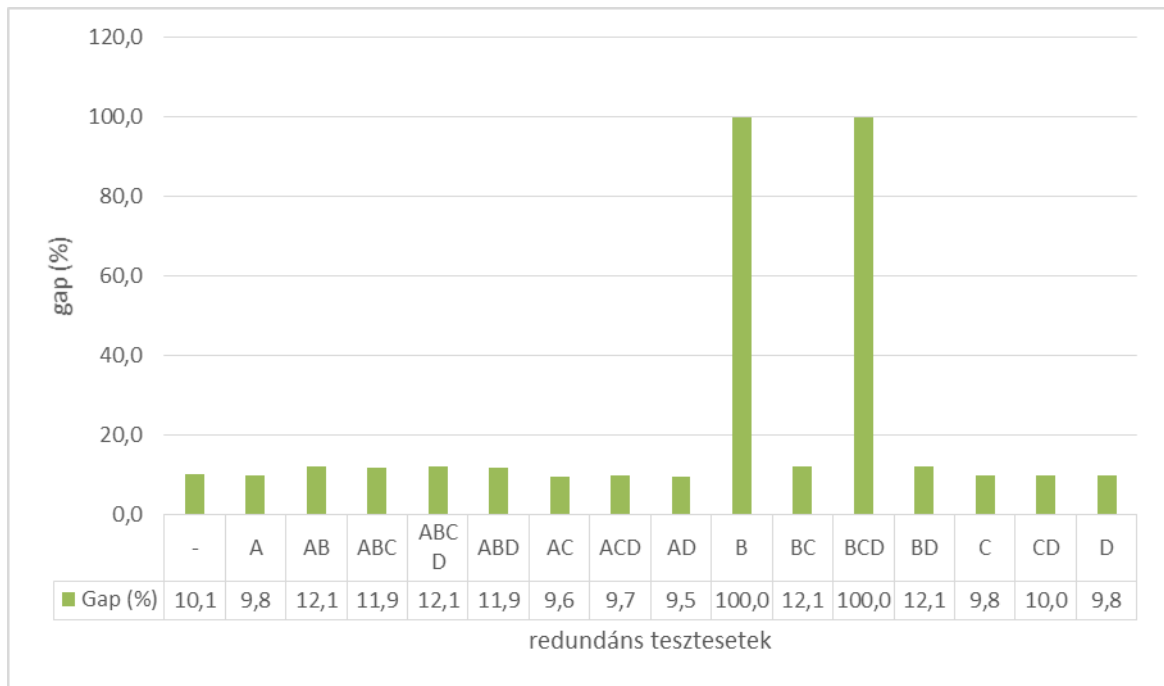
- A: Atmenet_elesito1
- B: Atmenet_elesito2
- C: ElsoHozzarendeles2
- D: UtolsoHozzarendeles2

A tesztesztály eredményei a . és . ábrán láthatóak.



.ábra: A redundáns tesztesztály optimális és határértékei

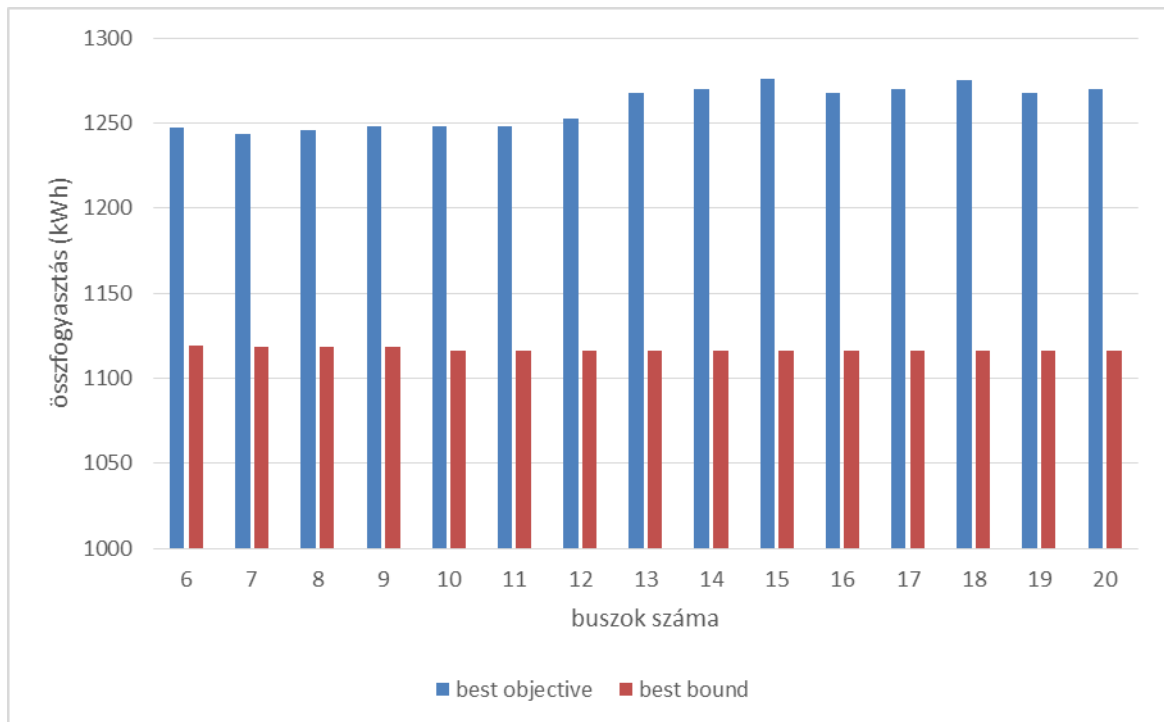
A best bound, vagyis az a határérték, aminél kisebb megoldás már nem lehet jelen esetben B és BCD kombinációján kívül elég egyenletesnek mondható. Abban a két kivételes esetben nem talált a megoldó olyan határértéket, ami megszabná az alsó határt. Ennek következtében a gap is 100%-os lesz, ami a következő ábrán jól látszik is.



.ábra: A redundáns tesztesztály gap %-ai

A redundáns tesztesztályban az AD megoldás bizonyult a leghatékonyabbnak, ebben az esetben a célfüggvény értéke 1236,5 kWh volt. (gap 9,5%)

Az inkrementális tesztesztály eredményei a .ábrán láthatóak.



.ábra: Az inkrementális tesztesztály optimális és határértékei

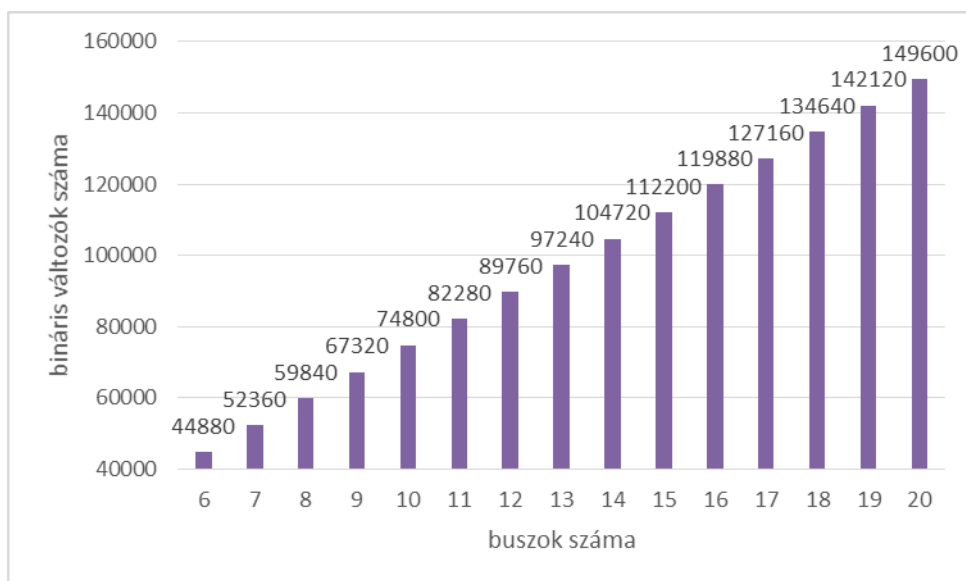
Az ábrán azért vannak 6-tól számozva az adatsorok, mivel a modell, 6 alatti buszszámmal infeasible, vagyis nem megoldható.

A 12-es buszszámtól kezdődően nagyobb lett a megtalált célfüggvény-érték és ezzel együtt a gap is.

Az inkrementális tesztesztályban a 7 buszt tartalmazó eset bizonyult a leghatékonyabbnak: 1243,75 kWh fogyasztással.(gap 10,1%).

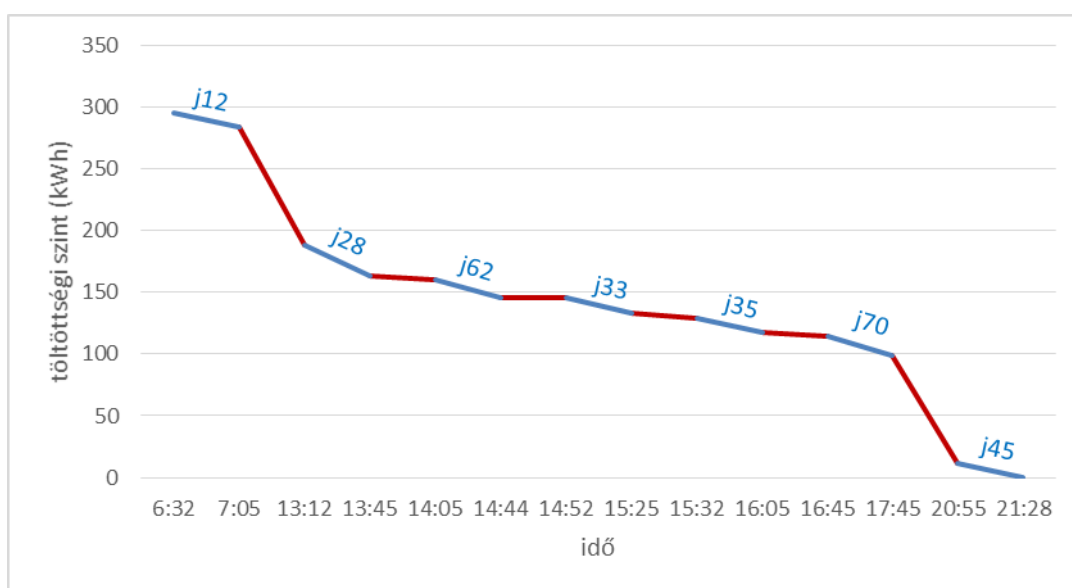
A buszszám növekedésével azt várná az ember a célfüggvényről, hogy monoton nemnövekvően változnak az értékek. Ez abban az esetben így is lenne, ha a solver az optimumig futna. Az általam vizsgált 10 perces futási periódusok miatt alakulhatott úgy, hogy kevesebb busszal jobb eredményt kaptam.

A probléma mértékének érzékeltetése szempontjából fontosnak tartottam a modellekben levő bináris változók számának növekedését ábrázolni (.ábra).



.ábra: A bináris változók számának növekedése

A 7 buszt tartalmazó modellből egy példának kiemeltem a 2-es busz menetrendjét. (.ábra)



.ábra: Busz 2 menetrendje a 7 buszos inkrementális esetben