

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

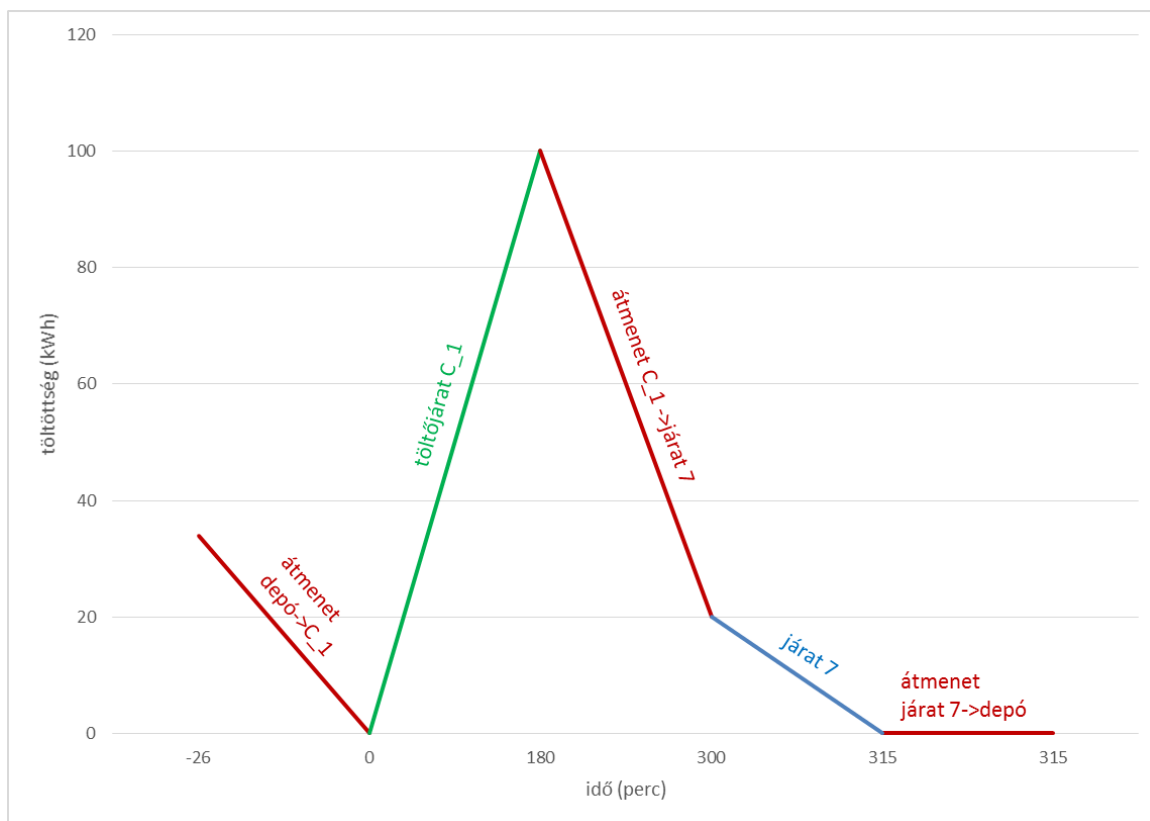
.táblázat: Modell5v2 futási eredménye 10 perc alatt

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/>]

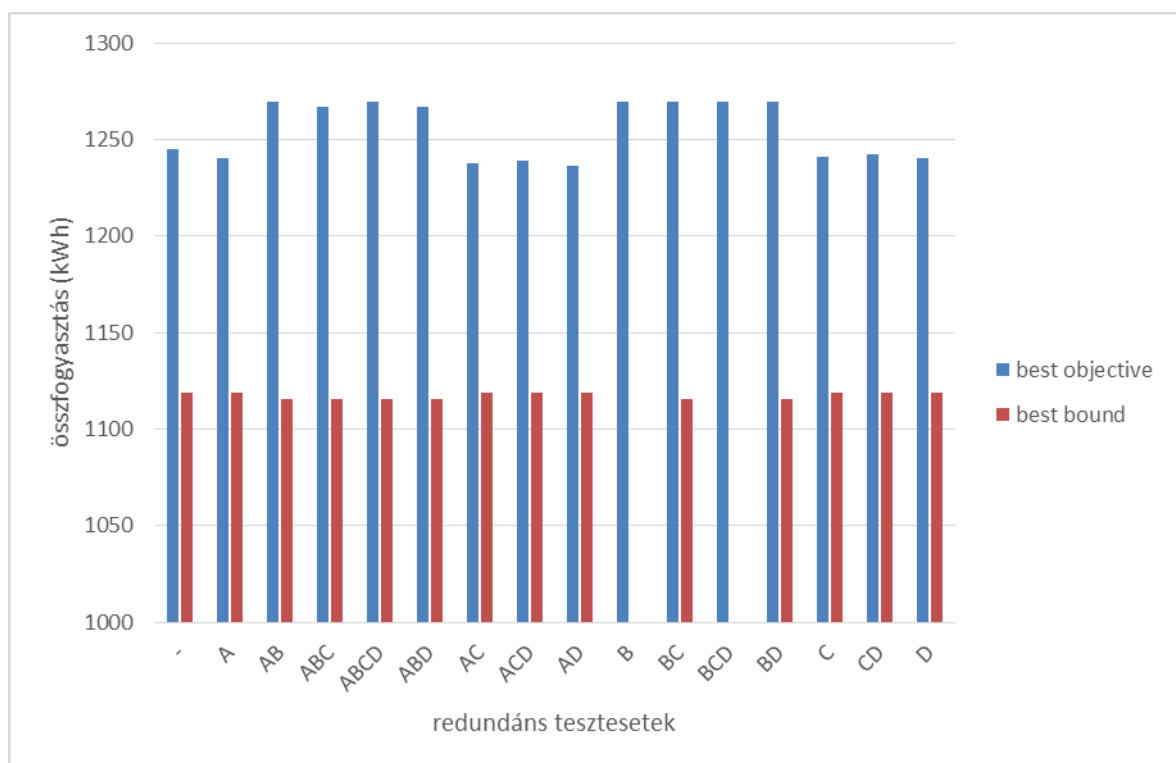
A modellben 82 járat elvégzésére 20 busz áll rendelkezésre. A 17 B járatok a Virágpiacról indulnak a Révai Miklós utca felé, míg a 19-es járatok a Révai Miklós utcából a Széchenyi István Egyetem felé. A buszok depója a 3 állomás valamelyikén van. A Révai utcában feltételeztem egy töltőhelyet, a töltés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

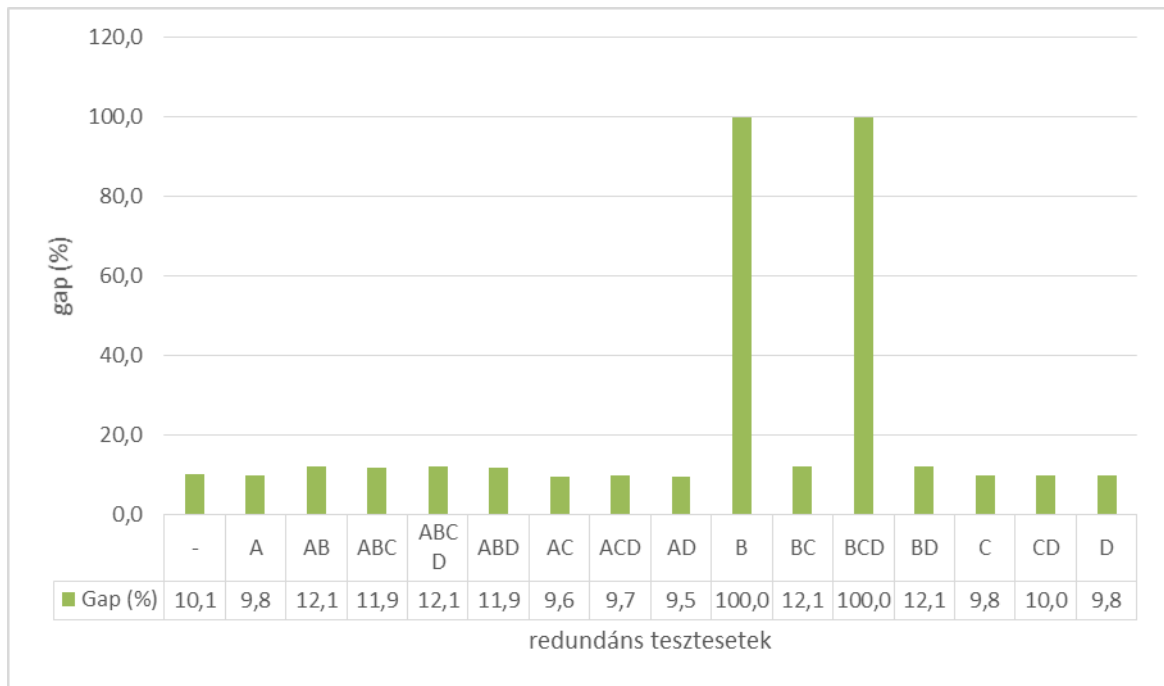
- A: Atmenet_elesito1
- B: Atmenet_elesito2
- C: ElsoHozzarendeles2
- D: UtolsoHozzarendeles2

A tesztesztály eredményei a . és . ábrán láthatóak.



.ábra: A redundáns tesztesztály optimális és határértékei

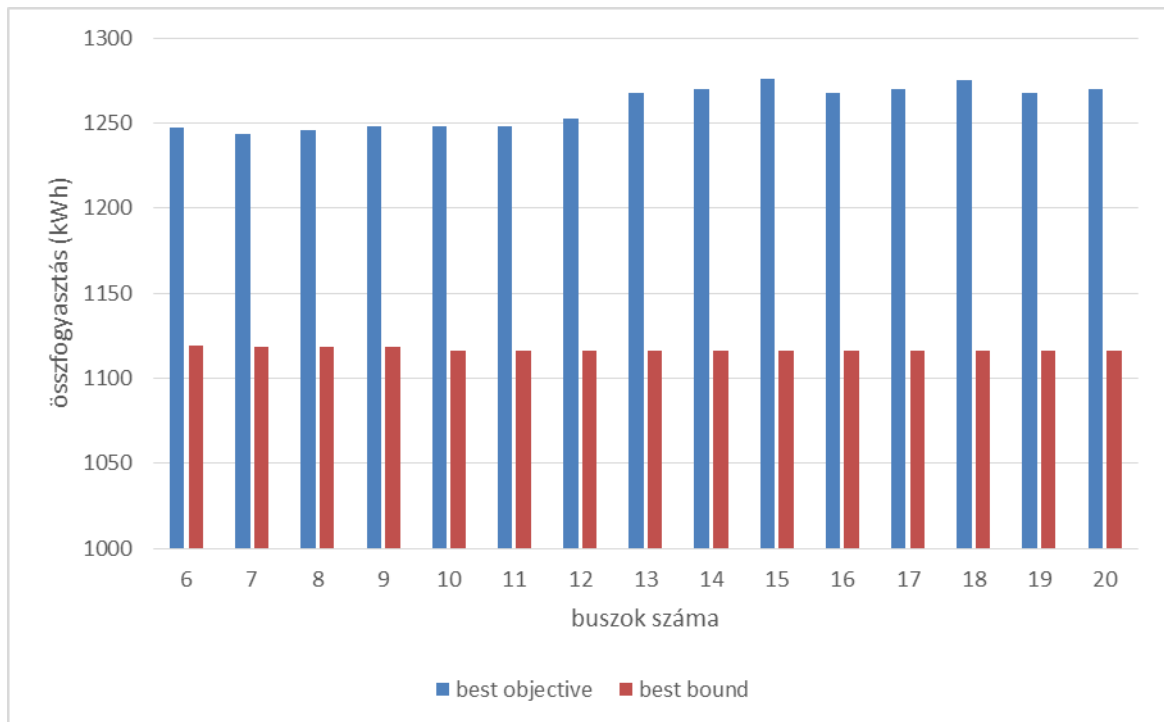
A best bound, vagyis az a határérték, aminél kisebb megoldás már nem lehet jelen esetben B és BCD kombinációján kívül elég egyenletesnek mondható. Abban a két kivételes esetben nem talált a megoldó olyan határértéket, ami megszabná az alsó határt. Ennek következtében a gap is 100%-os lesz, ami a következő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

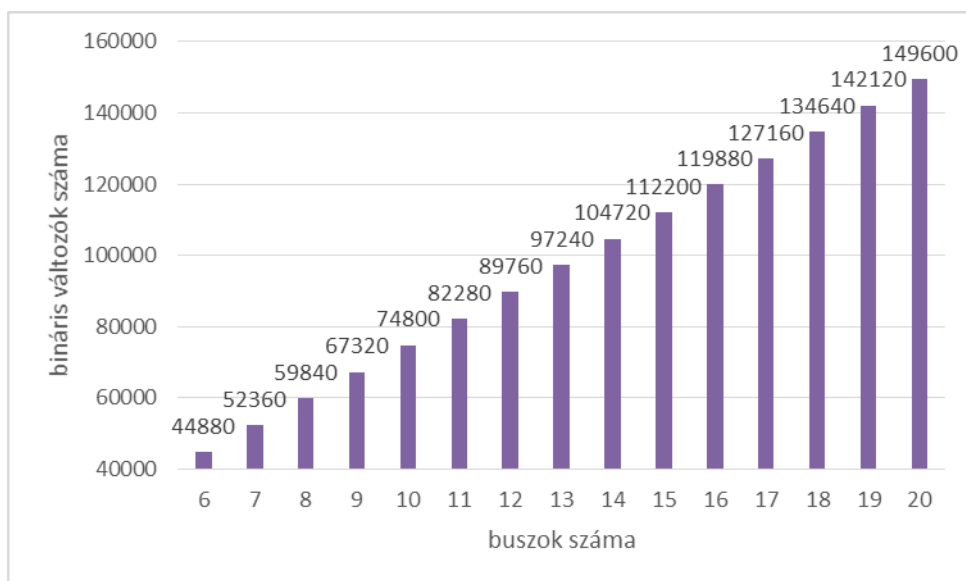
Az ábrán azért vannak 6-tól számozva az adatsorok, mivel a modell, 6 alatti buszszámmal infeasible, vagyis nem megoldható.

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%).

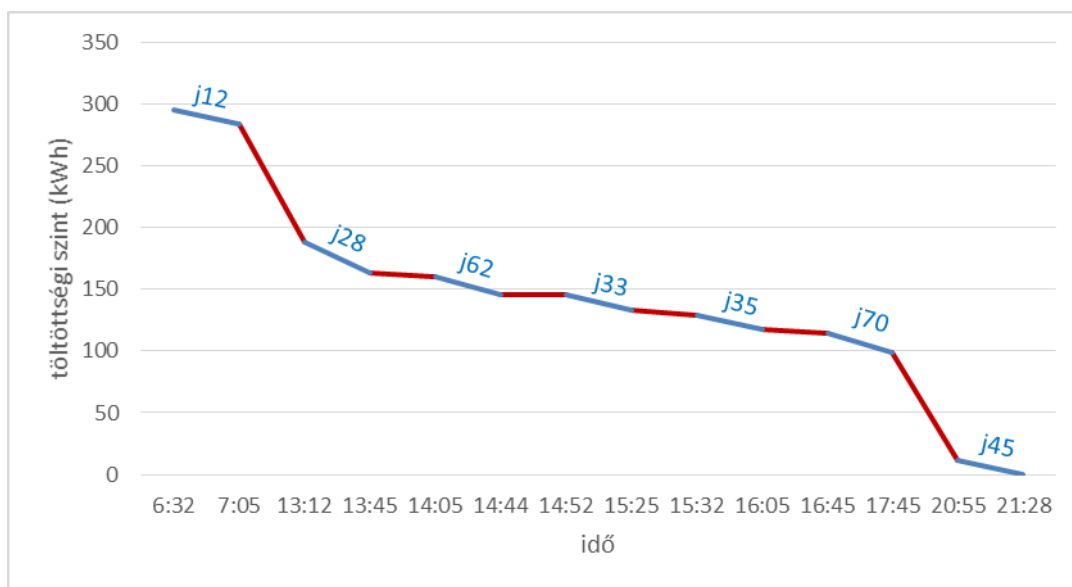
A buszszám növekedésével azt várná az ember a célfüggvényről, hogy monoton nemnövekvően változnak az értékek. Ez abban az esetben így is lenne, ha a solver az optimumig futna. Az általam vizsgált 10 perces futási periódusok miatt alakulhatott úgy, hogy kevesebb busszal jobb eredményt kaptam.

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

Végeztem még egy olyan futtatást is ahol a 8 buszos esetet néztem 1 órás töltésidővel és 150 kWh-ás kapacitással. Ebben az esetben a célfüggvény értéke 1245.5-ről 1264.5-re növekedett, az alsó határ (best bound) pedig 1116 lett, vagyis csökkent az előző esethez képest (1118.75).

Az illetékes vezetőknek kell eldönteni, hogy mi éri meg nekik jobban. Több nagyobb kapacitású, de lassan töltő járműveket beszerezni, vagy kevesebb kisebb kapacitású gyorsöltésűt. Ez pedig a járműütemezési probléma többi területére is hatással lehet, viszont a modellel letesztelhető, hogy számunkra melyik eset a jövedelmezőbb.