



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Mogyorósi Anna

Komplex tőzsdei ajánlatok gradiens korlátjának továbbfejlesztése

TDK dolgozat

KONZULENS

Dr. Divényi Dániel

BUDAPEST, 2016

Összefoglaló

A szervezett villamosenergia-piacon (áramtőzsde) a tőzsde tagjai szabványos termékekre eladási és vételi ajánlatokat tesznek. Az ajánlatok többfélék lehetnek, munkám során a komplex ajánlatokkal foglalkoztam.

A komplex ajánlatokat az EUPHEMIA vezeti be, mely az összeurópai piac-összekapcsolás harmonizált klíringalgoritmusa. A komplex ajánlatokban összetartozó órás ajánlatokra lehet további korlátokat előírni. A MIC korláttal (Minimum Income Constraint) egy adott piaci szereplő minimális bevételi limitet szabhat a beadott ajánlataira. Az LGC korlát (Load Gradient Constraint) az egymás után következő órákban allokalható mennyiségek változását korlátozza.

Az LGC korlát elvonatkoztat attól, hogy a gépegységek gradienskorlátja a leadható teljesítményre vonatkozik: az egyes órákban konstans teljesítményt tételez fel, s az óraváltáskor szükséges változásokat (ugrásokat) korlátozza. Dolgozatomban ezt továbbfejlesztettem, s bevezettem a TGC (Trajectory Gradient Constraint) korlátot: ekkor a gép által leadott teljesítmény az órán belül lineárisan változhat, s középvértéke adja az órában termelt energiamennyiséget.

Az EUPHEMIA valójában a tőzsdei ajánlatok és korlátok formálisa matematikai leírása, egy egészértékű változókat is tartalmazó, nagyméretű optimalizálási feladat (MIQP). A feladat megoldásához AMPL szoftvert használtam. A rendelkezésemre álló modellt kiegészítettem a TGC-re vonatkozó matematikai egyenletekkel, és implementáltam a megoldó rutinba.

Végül egy mintapélda segítségével szemléltetem a korlátok működését, valamint historikus adatokon, sorozatfuttatások elemzésével összehasonlítom a különböző gradienskorlátok alkalmazásának hatásait a piaci változókra.

Abstract

On the power exchange, members of the PX put in bids to buy and offers to sell standard products. The bids can vary, in my paper I have focused on complex orders.

Complex orders are introduced by EUPHEMIA, which is the clearing algorithm of the pan-European market coupling. In complex bids, further limits can be imposed on coherent hourly orders/bids. Using the MIC (Minimum Income Constraint) a certain market participant can impose a minimum income limit on the submitted bids. Through the LGC (Load Gradient Constraint), the difference between the allocated amount of energy between two consecutive hours is limited.

The LGC does not take into consideration the fact that the gradient limit of the generation units relates to the supplied power: it presupposes constant power in each hour and limits the changes (jumps) necessary between two consecutive hours. In my thesis, I have developed and introduced the trajectory gradient constraint (TGC): in this case, the power produced by the units ramps linearly within the hour, its average will indicate the volume of the produced energy in the given hour.

In fact, the EUPHEMIA is the formal description of the problem clearing the bids/offers regarding the given constraints, actually large-scale, mixed-integer optimizing problem with quadratic terms (MIQP). I used AMPL software to solve the task. I have completed the available model with the mathematical equations relating to TGC, and implemented it in the solver script.

In the end, I have illustrated the operation of the constraints with an example, plus compare the effects of the different gradient constraints on the variables of the market analysing test cases.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	2
Abstract	3
Tartalomjegyzék	4
1 Komplex ajánlatok és korlátaik.....	6
1.1 Az egyszerű áramtőzsde működése	6
1.2 Komplex ajánlatok	9
1.3 A korlátok bemutatása	9
1.3.1 Minimum Income Constraint – MIC	9
1.3.2 Load Gradient Constraint – LGC	10
1.4 A korlátok alkalmazásának verziói.....	11
1.4.1 SS (Strict MIC, strict LGC – Szigorú MIC, szigorú LGC)	11
1.4.2 SR (Strict MIC, relaxed LGC – Szigorú MIC, lazító áras LGC)	12
2 A TGC korlát megvalósítása	16
2.1 Az LGC korlát és a TGC korlát különbségei	16
2.2 Trajectory Gradient Constraint – TGC	17
2.2.1 Új paraméterek és változók.....	17
2.2.2 Az árnyékárak bevezetése	19
2.3 Feltételes matematikai korlátok átfogalmazása BigM-ek segítségével.....	21
2.3.1 A BigM módszer használatának bemutatása általános esetre, egy egyszerű példán	21
2.3.2 A BigM módszer bemutatása egy konkrét példán.....	22
3 A TGC korlát működésének bemutatása egy egyszerű példán	24
4 Elemzés nagy mennyiségű adaton, piaci hatások vizsgálata	31
4.1 A futási idők és megoldás típusok összehasonlítása	31
4.2 A jólét összehasonlítása.....	34
4.3 ΔP értékek összehasonlítása.....	36

4.4	A korlátsértések számának és arányának összehasonlítása	38
4.5	Összefoglalás és kitekintés	41
5	Irodalomjegyzék	42
Függelék	1

1 Komplex ajánlatok és korlátaik

Az első fejezetben bemutatom az áramtőzsdét, valamint a komplex ajánlatokat és korlátaikat. A következő fejezetben az LGC és TGC gradienskorlátok közti különbségeket, valamint a TGC leírását, egyenleteit, végül pedig a BigM matematikai módszert ismertetem, amit a TGC korlátok implementálása során többször alkalmaztam. A harmadik fejezetben a TGC-vel kiegészített modell működését mutatom be két mintapéldán, az utolsó fejezetben pedig a sorozatfuttatások eredményeit elemzem több szempontból.

1.1 Az egyszerű áramtőzsde működése

A szervezett villamosenergia-piacon (áramtőzsde) a tőzsde tagjai szabványos termékekre eladási és vételi ajánlatokat tesznek. A tőzsdén a kereskedés anonim, a kínálati és keresleti görbe metszéspontja alakítja ki az árat és a kereskedett mennyiséget. Az aukció során minden órára meghatározzák a klíringárat (MCP) és a kereskedett mennyiséget (MCV). A kereskedők kínálati ajánlat esetén a minimum árat és a mennyiséget, vételi ajánlat esetén pedig a maximális árat és a mennyiséget adják meg az ajánlattételnél. A klíringárat egy algoritmus számítja ki, melynek célfüggvénye az úgynevezett „társadalmi jólét” („social welfare”) maximalizálására irányul. A jólét (welfare) tulajdonképpen az összes piaci szereplő tőzsdén realizált többletét, nyereségét jelenti.

A tőzsde működésének bemutatásához vegyünk egy egyszerű, fiktív tőzsdét, kizárólag egyfajta ajánlattípussal, amelyet órás ajánlatnak (hourly order) nevezünk. Az órás ajánlatok egy adott órára és egy adott mennyiségre vonatkoznak, típusuk lehet lépcsős vagy lineáris. Lépcsős ajánlat (stepwise hourly order) esetén minden órához egy p limitár tartozik, lineáris ajánlat (linear hourly order) esetén két, egy p_0 és egy p_1 ár szükséges. Az egyszerűség kedvéért maradjunk a lépcsős ajánlatoknál.

Az elfogadási szabályok a következőképpen alakulnak a kínálati ajánlatoknál:

- Elfogadás: Az ajánlat akkor kerül elfogadásra, ha limitára alacsonyabb, mint az órás piaci ár, vagyis ha $MCP > p_0$.
- Elutasítás: Ha az ajánlat limitára nagyobb, mint a klíringár ($MCP < p_0$), vagyis az eladó nagyobb áron adná el a piaci árnál, akkor az ajánlat elutasításra kerül.

- Parciális elfogadás: Ha $p_0 = \text{MCP}$, akkor $0 \leq q \leq q_0$ mennyiség adható el.

Vétel (kereslet) esetén értelemszerűen fordítva alakulnak az elfogadási szabályok:

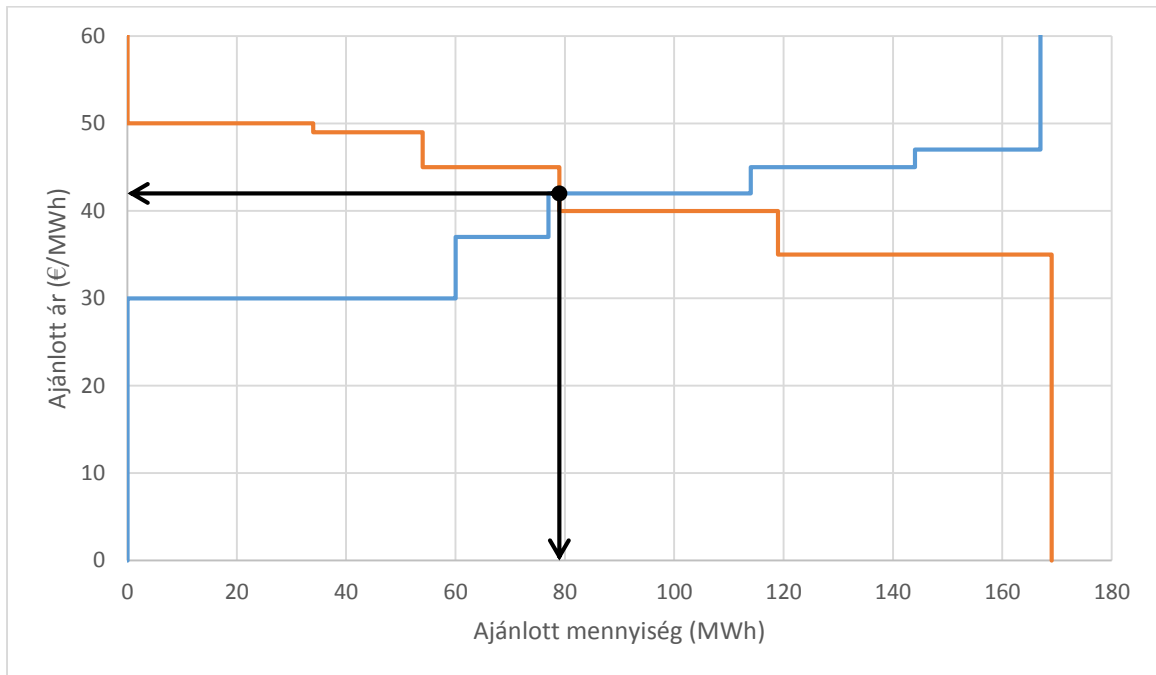
- Elfogadás: Az ajánlat akkor kerül elfogadásra, ha limitára magasabb, mint az órás piaci ár, vagyis ha $\text{MCP} < p_0$.
- Elutasítás: Ha az ajánlat limitára alacsonyabb, mint a klíringár ($\text{MCP} > p_0$), vagyis a vevő alacsonyabb áron venne az órás piaci árnál, akkor a vételi ajánlat elutasításra kerül.
- Parciális elfogadás: Ha $p_0 = \text{MCP}$, akkor $0 \leq q \leq q_0$ mennyiség adható el.

Az optimalizálási feladatban, mely feladata az elfogadott ajánlatok meghatározása, minden ajánlathoz tartozik egy ACC változó, amely megadja az egyes ajánlatok elfogadási arányát. Elfogadás esetén az értéke 1, elutasítás esetén 0, parciális elfogadás esetén $0 < \text{ACC} < 1$ lehet az értéke.

A példánkban legyenek a beadott ajánlatok a következők:

Tagok	q_0 [MWh]	p_0 [€ /MWh]
F01	-25	45
K02	37	42
K04	17	37
T02	60	30
F03	-34	50
F02	-40	40
T01	30	45
K01	-50	35
K02	23	47
F04	-20	49

Az ajánlatok ár szerinti rendezése alapján az aggregált kínálati és keresleti görbék meghatározhatóak:



1. ábra: Az aggregált kínálati és keresleti görbék

Az aggregált kínálati és keresleti görbék metszéspontja megadja a piaci árat (klíringárat), amely jelen esetben $MCP=42$ €, valamint a kereskedett mennyiséget, amelynek értéke a példánkban 79-nek adódik. A görbék metszéspontjától jobbra lévő ajánlatok elutasításra kerülnek, a balra lévők pedig el lesznek fogadva. Az egyes szereplők többlete a diagramon területként (a 49 €/MWh limitáras vételi ajánlat többletét jelöltük) jelenik meg. Ennél a példánál a klíringár meghatározása rendkívül egyszerű, akár grafiknról leolvasható, de a valóságban nem létezik ennyire leegyszerűsített tőzsde, és az egységes villamosenergia-piac bevezetésével az eddigi tőzsdék is bonyolultabbá váltak.

Az egységes európai villamosenergia-piac bevezetéséhez a tőzsdék összehangolására volt szükség, hiszen a különféle tőzsdék különféle ajánlattípusokkal működtek. A harmonizálás következtében minden tőzsdén minden ajánlat megjelenhet, amely valamelyik csatlakozó piacon jelen volt, tehát algoritmikus kezelésüket meg kell tudnunk oldani. A sokféle tőzsdei termék megnehezíti a klíringár kiszámítását, hiszen míg az órás ajánlatok esetén az egyszerűen meghatározható volt, a sokféle korlát miatt ez jóval bonyolultabbá vált.

1.2 Komplex ajánlatok

A komplex ajánlatokat az EUPHEMIA vezeti be, mely az összeurópai piac-összekapcsolás harmonizált klíringalgoritmusa. A komplex ajánlatok lényege, hogy összetartozó ajánlatokra lehet további korlátokat előírni. Egy komplex ajánlat valójában egy órás ajánlatokból álló halmaz. Az EUPHEMIA leírása szerint komplex ajánlat csak a kínálati oldalon adható be, valamint a halmaz kizárólag lépcsős ajánlatokat tartalmazhat.

Egy adott ajánlattevő megszabhat minimális bevételi limitet (MIC) vagy az órákban allokált mennyiségek változását (LGC vagy TGC) korlátozhatja. A korlátok megadása nem kötelező jellegű, hanem egy lehetőség az ajánlattevő számára.

1.3 A korlátok bemutatása

1.3.1 Minimum Income Constraint – MIC

A MIC korlát megadásával a piaci szereplő minimális bevételi limitet szabhat meg egy fix és egy változó költség megadásával a komplex ajánlatra allokált összes energiamennyiségre. Az elvárt minimális bevétel az adott komplex ajánlathoz tartozó fix költség, valamint a komplex ajánlatra allokált összes energiamennyiség az adott komplex ajánlathoz megadott változó költséggel vett szorzatának az összege.

Új paraméterek:

- FT: az m. piac o. komplex ajánlatához megadott MIC korlát fix költségeleme, az ajánlattevő által megadott paraméter.
- VT: az m. piac o. komplex ajánlatához megadott MIC korlát változó költségeleme, az ajánlattevő által megadott paraméter.
- mic: szükséges bevezetnünk egy bináris paramétert, amely által a piaci szereplő megadhatja, hogy előírja-e a MIC korlátot az adott komplex ajánlatra. Tehát a mic az m. piac o. komplex ajánlatának MIC korlátjának az előírt voltát megadó, bináris paraméter.

Új változók:

- $MIC_{o,m}^{cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának MIC korlátjának a teljesülése, bináris változó. A korlát teljesülése esetén az 1 értéket veszi fel, ellenkező esetben pedig nulla. (A változók és indexek használatában a [5] forrást követem.)

Egyenletek:

$\forall h, m$:

$$MIC_{o,m}^{cx} \Rightarrow FT_{o,m}^{cx} + VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx} \leq \sum_h MCP_{h,m} \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx}$$

1.3.2 Load Gradient Constraint – LGC

Az LGC korlát alkalmazásával a piaci szereplő az egymás után következő órákban allokkált mennyiségek változását korlátozhatja. A megengedett mennyiségváltozás óránként és irányonként különbözhet.

Új paraméterek:

- $\Delta_{h,o,m}^{+,cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatához megadott LGC korlát megengedett, FEL irányú mennyiség változása a h. órától a h+1. órára vonatkozóan.
- $\Delta_{h,o,m}^{-,cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatához megadott LGC korlát megengedett, LE irányú mennyiség változása a h. órától a h+1. órára vonatkozóan.
- lgc : az m. piac o. komplex ajánlatának LGC korlátjának az előírt voltát megadó, bináris paraméter. Értéke egyet vesz fel, ha az ajánlatra elő van írva a korlát, és nullát, ha nincs előírva.

Új változók:

- $LGC_{o,m}^{cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának LGC korlátjának a teljesülése, bináris változó. A korlát teljesülése esetén az 1 értéket veszi fel, ellenkező esetben pedig nulla.

Egyenletek:

$$LGC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow$$

$\forall h < 24$

$$\sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} - \sum_k ACC_{k,h+1,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h+1,o,m}^{cx} \leq \Delta_{h,o,m}^{-,cx}$$

$$\sum_k ACC_{k,h+1,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h+1,o,m}^{cx} - \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \leq \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

1.4 A korlátok alkalmazásának verziói

Abban az esetben is szükséges klíringeredmény, ha a korlátok teljesíthetlensége miatt nincs megoldása a feladatnak. Többféle elképzelés is létezik erre a problémára, az általam alkalmazott modellekbe az SR (Strict MIC, relaxed LGC – Szigorú MIC, lazító áras LGC) verziót építettem be [5]. Ennek megértéshez azonban előbb az SS (Strict MIC, strict LGC) modellt mutatom be.

1.4.1 SS (Strict MIC, strict LGC – Szigorú MIC, szigorú LGC)

Az SS verzióban, ha egy adott komplex ajánlatra vagy a MIC, vagy az LGC korlát nem teljesíthető, akkor a komplex ajánlat összes órás ajánlata elutasításra kerül.

$$MIC_{o,m}^{cx} = 0 \vee LGC_{o,m}^{cx} = 0 \Rightarrow \forall k, h: ACC_{k,h,o,m}^{cx} = 0$$

A korábban bemutatott MIC korlát matematikai megfogalmazása bilinearitást (két változó szorzata) tartalmaz, hiszen az egyenlőtlenség jobb oldalán a szorzatban a klíringár (MCP) és az elfogadási arány (ACC) is változó:

$$MIC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow FT_{o,m}^{cx} + VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx} \leq \sum_h MCP_{h,m} \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx}$$

A bilinearitás rendkívül megnehezíti az egyébként is bonyolult probléma megoldását, a klasszikus módszerek nem alkalmazhatóak, ezért szükséges a kiküszöbölése. Ehhez egy új változó bevezetésére van szükség, amely az m. piac o. komplex ajánlatának h. órájára beadott k. elemi ajánlatának tényleges bevételét adja meg, ez az INC (Income) változó [3].

$\forall k, h, o, m:$

$$INC_{k,h,o,m}^{cx} = ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot MCP_{h,m}$$

$\forall o, m:$

$$MIC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow FT_{o,m}^{cx} + VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx} \leq \sum_h \sum_k INC_{k,h,o,m}^{cx}$$

Ezt az egyenletet még feltételes egyenletekké szükséges bontani, hiszen csak áthelyeztük a bilinearitást, nem oldottuk fel.

A feltételes, lineáris egyenletek [3]:

$\forall k, h, o, m:$

$$ACC_{k,h,o,m}^{cx} > 0 \Rightarrow$$

$$INC_{k,h,o,m}^{cx} = q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot MCP_{h,m} + ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx} - q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}$$

$$ACC_{k,h,o,m}^{cx} < 1 \Rightarrow$$

$$INC_{k,h,o,m}^{cx} = ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}$$

Látható, hogy ha az elfogadási arány $ACC=1$, akkor az első korlát van érvényben, a bevétel megegyezik $q \cdot MCP$ -vel, amit az eredeti INC korlát is adott volna.

Ellenkező esetben, ha $ACC=0$, akkor a második korlát érvényes, és értelemszerűen nulla lesz a bevétel, ha nincs elfogadás.

Ha az elfogadás parciális, tehát $1 > ACC_{k,h,o,m}^{cx} > 0$, akkor mindkét korlát éles. Ekkor az ajánlat limitára megegyezik a piaci klíringárral ($MCP_{h,m} = p_{k,h,o,m}^{cx}$), tehát az első egyenletből csak a középső tag marad, ami megegyezik a második egyenletünkkel.

1.4.2 SR (Strict MIC, relaxed LGC – Szigorú MIC, lazító áras LGC)

Az SR verzióban az LGC korlát teljesítéséhez szükséges feltételeken lazítunk. Így megengedhetővé válik, hogy limitár feletti piaci ár (in-the-money) esetén is elutasíthassunk egy adott kínálati ajánlatot, valamint limitár alatti piaci ár esetén (out-of-the-money) is sor kerülhessen elfogadásra. A lazítás csak abban az esetben engedélyezhető, ha az LGC korlát éles.

A lazítás következménye, hogy a piaci szereplő nyereségtől esik el, valamint a célfüggvény is csökken, viszont így teljesül az LGC korlát, ezáltal összességében jobb megoldást kapunk, mintha a teljes ajánlat elutasításra kerülne (SS verzió – Strict MIC, Strict LGC).

A lazításhoz ajánlatonként, minden egyes órás átmenethez két új változót szükséges bevezetnünk, tehát pontosan 46 darabot [5]:

- $SHGP_{h,o,m}^{cx}$: az m . piac o . komplex ajánlatának a h , illetve a $h+1$. óra közötti átmenethez tartozó pozitív árnyékára.

- $SHGN_{h,o,m}^{cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának a h, illetve a h+1. óra közötti átmenetbe tartozó negatív árnyékára.

Ha az adott ajánlatban egyik óráról a másikra nő az elfogadott energiamennyiség, és emiatt fel irányú LGC korlátba ütközik, akkor az adott komplex ajánlathoz tartozó árnyékár pozitív (SHGP). Ellenkező esetben, ha egyik óráról a másikra csökken az elfogadott energiamennyiség, és emiatt le irányú LGC korlátba ütközünk, akkor az adott komplex ajánlathoz a SHGN árnyékár fog eltérni nullától.

Az árnyékárak zérustól való eltérése csökkenti a célfüggvényt, valamint a többletet, ezért az árnyékárak kizárólag akkor térnek el nullától, ha az LGC korlát sérülne, s éppen annyival, amivel már az LGC korlát már teljesül. Tehát az árnyékárral módosítjuk az ajánlatra vonatkozó klíringárat, ezzel befolyásoljuk az elfogadott mennyiséget. Technikailag mind az SHGP és az SHGN értéke nemnegatív szám lehet csak, az egyenletekben az előjelek szabják meg viselkedésüket.

Elméletben elegendő lenne egyetlen SHG árnyékár bevezetése, amely pozitív, ha fel irányú korlát sérül, és negatív a le irányú korlát sérülése esetén, hiszen egy átmenet vagy fel, vagy le irányú korlátba ütközik, a két korlátba egyszerre semmiképpen sem. Ezzel a megoldással megfelelezhető lenne az árnyékárak száma, azonban ez a leírás bonyolultabbá tenné a MIC korláthoz szükséges korrekciós tagokat, ezért inkább két árnyékárral dolgoztam.

Az árnyékárakat beállító korlátok:

$\forall h \leq 23, o, m:$

$$SHGP_{h,o,m}^{cx} > 0 \Rightarrow \sum_k ACC_{k,h+1,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h+1,o,m}^{cx} - \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} = \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

$$SHGN_{h,o,m}^{cx} > 0 \Rightarrow \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} - \sum_k ACC_{k,h+1,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h+1,o,m}^{cx} = \Delta_{h,o,m}^{-,cx}$$

Az árnyékárak bevezetésének a motivációja egy egyszerű példán bemutatható. Tegyük fel, hogy a komplex ajánlat órás ajánlatai két egymás utáni órában elfogadhatóak lennének a piaci ár szerint, viszont a fel irányú gradienskorlát sérül az órák közti átmenetben, emiatt el kéne utasítanunk az ajánlatokat. Ha az első órában valamivel többet fogadnánk el, az azt követő órában pedig kevesebbet, akkor nem sérülne a gradienskorlát. Ehhez nyilvánvalóan a piaci ár befolyásolására van szükség, ezt visszük véghez az árnyékárral. Ha az első órában látszólag

növeljük a klíringárat, akkor több energia fogadható el, ha pedig a következő órában csökkentjük a klíringárat, akkor kevesebb energia elfogadása válik lehetővé. Az árnyékárral módosított piaci klíringárat (MCP) ajánlati klíringárnak (OCP) nevezzük. Az ajánlati klíringár csak az adott ajánlatra vonatkozik, a többi ajánlatra az MCP (vagy saját OCP) értékét kell figyelembe venni.

Fontos megjegyezni, hogy bár az elfogadási arányok feltételei az ajánlati klíringárral (OCP) vannak meghatározva, a tényleges bevétel számítása a piaci klíringár (MCP) szerint történik.

Az ajánlati klíringárat meghatározó egyenletek:

$h = 1, \forall o, m:$

$$OCP_{1,o,m}^{cx} = MCP_{1,m} + SHGP_{1,o,m}^{cx} - SHGN_{1,o,m}^{cx}$$

$\forall h \in [2; 23], o, m:$

$$OCP_{h,o,m}^{cx} = MCP_{h,m} + SHGP_{h,o,m}^{cx} - SHGN_{h,o,m}^{cx} - SHGP_{h-1,o,m}^{cx} + SHGN_{h-1,o,m}^{cx}$$

$h = 24, \forall o, m:$

$$OCP_{24,o,m}^{cx} = MCP_{24,m} - SHGP_{23,o,m}^{cx} + SHGN_{23,o,m}^{cx}$$

Például, ha a h . órától a $h+1$. órára sérül a fel irányú korlát, akkor $SHGP_{h,o,m}^{cx}$ pozitív értéket vesz fel, vagyis látszólag növeli $OCP_{h,o,m}^{cx}$ értékét, míg $OCP_{h+1,o,m}^{cx}$ értéket ugyanannyival csökkenti. Így a h . órában a magasabb $OCP_{h,o,m}^{cx}$ miatt nagyobb mennyiséget tudunk elfogadni, míg a $h+1$. órában az alacsonyabb $OCP_{h+1,o,m}^{cx}$ miatt pedig kevesebbet, úgy, hogy a két órában az elfogadott mennyiségek különbsége megegyezzen $\Delta_{h,o,m}^{+,cx}$ -vel.

Ha a bevételt az ajánlati klíringárral (OCP) számítjuk, egy fiktív bevételt kapunk, amelyet PINC-nek (Pseudo Income) nevezünk.

A PINC-et leíró egyenletek analóg módon képezhetők az INC egyenletekből:

$\forall k, h, o, m:$

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} = ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot OCP_{h,o,m}^{cx}$$

$ACC_{k,h,o,m}^{cx} > 0 \Rightarrow$

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} = q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot OCP_{h,o,m}^{cx} + ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx} - q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}$$

$ACC_{k,h,o,m}^{cx} < 1 \Rightarrow$

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} = ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}$$

A pszeudobevételek összege még nem adja meg a teljes bevételt, mivel az ajánlatot valójában a piaci klíring ár (MCP) alapján számolják el. Ehhez még hozzá kell adnunk az aktív korlátok és az árnyékárak szorzatából adódó tényezőt. Ez a tényező az m . piac o . komplex ajánlatának h . és $h+1$. óra közötti átmenetéhez megadott LGC korláthoz tartozó MIC korrekciós tag, röviden CRG.

$\forall h \leq 23, o, m$:

$$SHGP_{h,o,m}^{cx} > 0 \Rightarrow CRG_{h,o,m}^{cx} = SHGP_{h,o,m}^{cx} \cdot \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

$$SHG_{h,o,m}^{cx} = 0 \Rightarrow CRG_{h,o,m}^{cx} = 0$$

$$SHGN_{h,o,m}^{cx} > 0 \Rightarrow CRG_{h,o,m}^{cx} = SHGN_{h,o,m}^{cx} \cdot \Delta_{h,o,m}^{-,cx}$$

A MIC korlát átfogalmazása CRG-vel:

$\forall o, m$:

$$MIC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow FT_{o,m}^{cx} + VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx} \leq \sum_h \sum_k PINC_{k,h,o,m}^{cx} + \sum_{h=1}^{23} CRG_{k,h,o,m}^{cx}$$

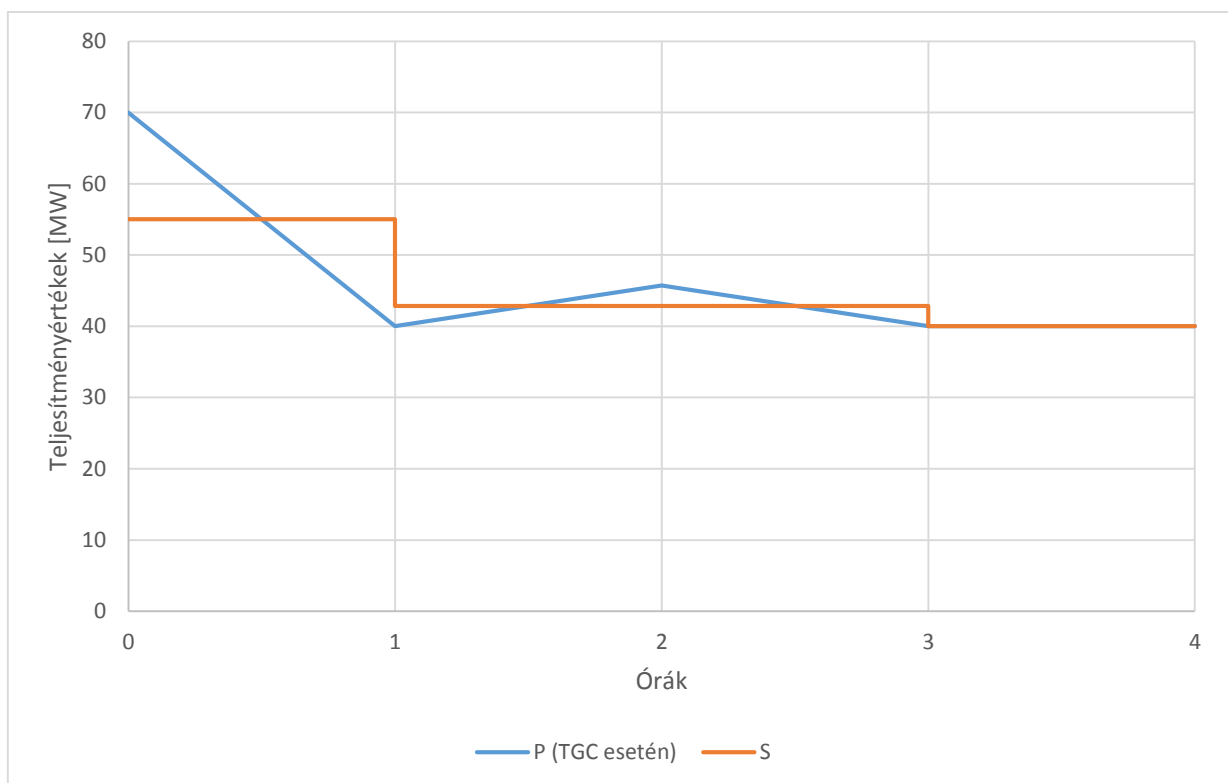
A CRG tulajdonképpen elhagyható, hiszen az egyenletbe írhatjuk az $SHGP_{h,o,m}^{cx} \cdot \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$ és az $SHGN_{h,o,m}^{cx} \cdot \Delta_{h,o,m}^{-,cx}$ szorzat összegét is.

Ha egy adott komplex ajánlatra a MIC és az LGC korlátok is elő vannak írva, az LGC korlátnak csak aktív MIC esetén kell élnie, hiszen ha az ajánlattevő által megszabott minimális bevételi limit nem teljesül, akkor semmiképp sem lesz elfogadva az ajánlat.

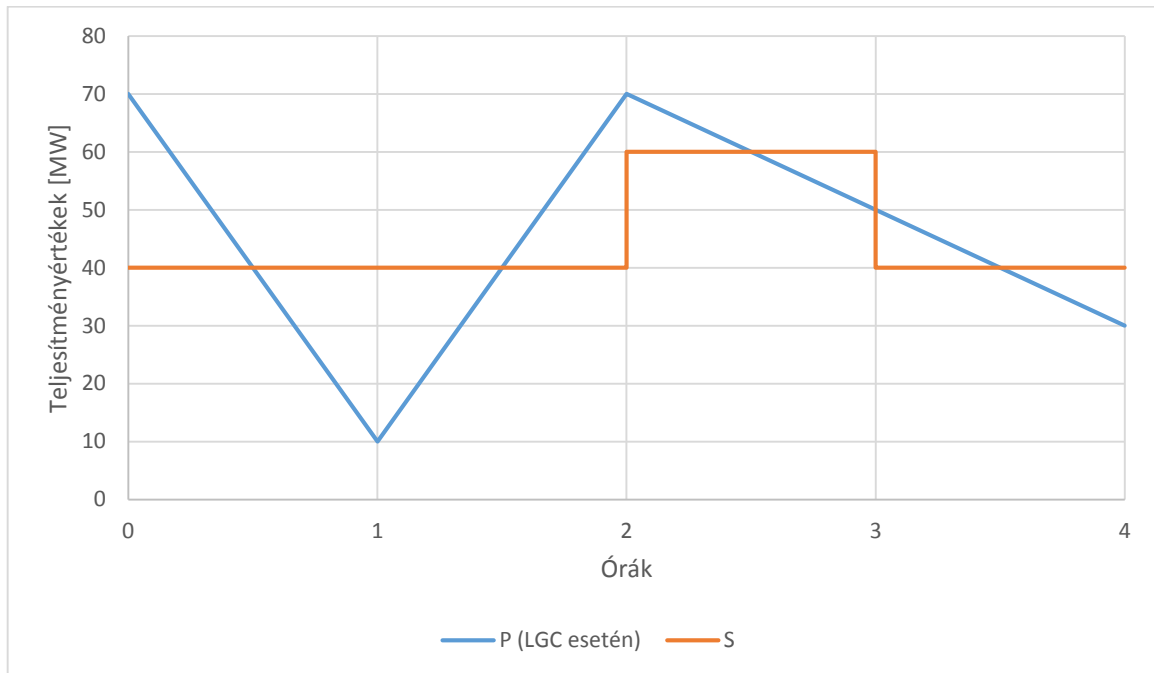
2 A TGC korlát megvalósítása

2.1 Az LGC korlát és a TGC korlát különbségei

A TGC korlát valójában az LGC korlát továbbfejlesztése. Az LGC korlát elvonatkoztat attól, hogy a gépegységek gradienskorlátja a leadható teljesítményre vonatkozik: az egyes órákban konstans energiát tételeztünk fel, s az óraváltáskor szükséges változásokat (ugrásokat) korlátoztuk. TGC korlát esetén azonban a gép által leadott teljesítmény változását az órán belül lineárisan képezzük le, s középértéke adja az órában termelt energiamennyiséget (2. ábra). Tehát a TGC korlát modellezi a gép által leadott teljesítmény változását is, amelyet az LGC korlát figyelmen kívül hagy. Összességében elmondhatjuk, hogy a TGC korlát egy jobb közelítés a gép által leadott teljesítmény változásának leírására. A TGC korlát bevezetésének ötlete az [5] kutatási jelentésből származik, az én munkám az alábbi egyenletek modellbe implementálásával kezdődött. A modellt, valamint a futtató scriptet az AMPL nyelv [2] alkalmazásával írtam meg.



2. ábra Az LGC és TGC korlátok különbségének szemléltetése egy 4 órás példán (S az adott órában allokált energia, P a TGC által modellezett lineáris teljesítményváltozás)



3. ábra Az LGC és TGC korlátok különbségének szemléltetése egy 4 órás példán (S az adott órában allokált energia, P a TGC által modellezett lineáris teljesítményváltozás)

2.2 Trajectory Gradient Constraint – TGC

2.2.1 Új paraméterek és változók

Új paraméterek:

- $P_{0,o,m}^{cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának a 0. órára megadott induló teljesítménye.
- $P_{h,o,m}^{max,cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának a h. órára megadott maximális teljesítménye.
- $P_{h,o,m}^{min,cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának a h. órára megadott minimális teljesítménye.
- $\Delta_{h,o,m}^{+,cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának a h. órában megengedett teljesítménynövekedése
- $\Delta_{h,o,m}^{-,cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának a h. órában megengedett teljesítménycsökkenése
- tgc: az m. piac o. komplex ajánlatának TGC korlátjának az előírt voltát megadó, bináris paraméter. Értéke egyet vesz fel, ha az ajánlatra elő van írva a korlát, és nullát, ha nincs előírva.

Új változók:

- $P_{h,o,m}^{cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatának h. órákor vett teljesítménye.
- $S_{h,o,m}^{cx}$: az m. piac o. komplex ajánlatára a h. órában allokált energia.
- TGC_holds: az m. piac o. komplex ajánlatának TGC korlátjának a teljesülése, bináris változó. A korlát teljesülése esetén az 1 értéket veszi fel, ellenkező esetben pedig nulla.

TGC esetén minden órához célszerű felvenni egy teljesítmény változót, valamint az órás allokált mennyiségek leírására egy S (scheduled) változót. Az S változónak konkrét szerepe nincs a modellben, célja a magyarázatok segítése.

A teljesítmények és az energia kapcsolatát leíró egyenletek, lineáris közelítést alkalmazva:

$\forall h > 1, o, m:$

$$S_{h,o,m}^{cx} = \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} = \frac{P_{h-1,o,m}^{cx} + P_{h,o,m}^{cx}}{2}$$

$h = 1, \forall o, m:$

$$S_{1,o,m}^{cx} = \sum_k ACC_{k,1,o,m}^{cx} \cdot q_{k,1,o,m}^{cx} = \frac{P_{0,o,m}^{cx} + P_{1,o,m}^{cx}}{2}$$

A TGC korlát valójában 4 korlát összessége, a teljesítményekre vonatkozó korlátokat foglalja magában.

A 4 korlát:

$\forall o, m:$

$TGC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow$

$\forall h$

$$\Rightarrow (P_{h-1,o,m}^{cx} - P_{h,o,m}^{cx} \leq \Delta_{h,o,m}^{-,cx})$$

$$\Rightarrow (P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx} \leq \Delta_{h,o,m}^{+,cx})$$

$$\Rightarrow P_{h,o,m}^{cx} \leq P_{h,o,m}^{max,cx}$$

$$\Rightarrow P_{h,o,m}^{cx} \geq P_{h,o,m}^{min,cx}$$

Az első két korlát a tulajdonképpeni gradienskorlát a TGC korlátban. A korlátok matematikai leírása kísértetiesen hasonlít az LGC korlátnál látottakhoz, viszont lényeges különbség, hogy a TGC esetében nem az óraváltáskor fellépő, hanem az órán belüli változást korlátozzuk.

A második két korlát a leadható teljesítmények értékeinek szab minimális és maximális limitet.

2.2.2 Az árnyékárak bevezetése

TGC esetén négy árnyékárt vezetünk be, minden egyes korláthoz egyet-egyét. Mindegyik árnyékár kizárólag nemnegatív értékeket vehet fel.

A 4 árnyékár:

- $SHT_{h,o,m}^{+,cx}$: az m. piac komplex ajánlatának h. órában megengedett teljesítménynövekedés korlátjához rendelt árnyékára.
- $SHT_{h,o,m}^{-,cx}$: az m. piac komplex ajánlatának h. órában megengedett teljesítménycsökkenés korlátjához rendelt árnyékára.
- $SHT_{h,o,m}^{max,cx}$: az m. piac komplex ajánlatának h. órákor megengedett maximális teljesítmény korlátjához rendelt árnyékára.
- $SHT_{h,o,m}^{min,cx}$: az m. piac komplex ajánlatának h. órákor megengedett minimális teljesítmény korlátjához rendelt árnyékára.

Az árnyékárakat beállító egyenletek:

$\forall h, o, m$:

$$SHT_{h,o,m}^{+,cx} > 0 \Rightarrow$$

$$P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx} = \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

$$SHT_{h,o,m}^{-,cx} > 0 \Rightarrow$$

$$P_{h-1,o,m}^{cx} - P_{h,o,m}^{cx} = \Delta_{h,o,m}^{-,cx}$$

$$SHT_{h,o,m}^{max,cx} > 0 \Rightarrow$$

$$P_{h,o,m}^{cx} = P_{h,o,m}^{max,cx}$$

$$SHT_{h,o,m}^{min,cx} > 0 \Rightarrow$$

$$P_{h,o,m}^{cx} = P_{h,o,m}^{min,cx}$$

A fentiek miatt módosítanunk kell az eddigi OCP-re és MIC-re vonatkozó egyenleteket.

Az ajánlati klíringár egyenletéhez szükséges a mennyiségi korlátokat ACC változókkal kifejezni ahhoz, hogy az ajánlati klíringárakban a megfelelő árnyékárak együttthatóit meg tudjuk határozni, ennek a levezetése alább [5] megtalálható.

Az ajánlati klíringár módosított egyenlete:

$\forall h, o, m$:

$$\begin{aligned}
OCP_{h,o,m} = & MCP_{h,o,m} - 2SHT_{h,o,m}^{+,cx} - 4 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{+,cx} \\
& + 2SHT_{h,o,m}^{-,cx} + 4 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{-,cx} \\
& - 2SHT_{h,o,m}^{max,cx} - 2 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{max,cx} \\
& + 2SHT_{h,o,m}^{min,cx} + 2 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{min,cx}
\end{aligned}$$

Az egyenletből látható, hogy az árnyékórák nem csak a szomszédos órákban fejtik ki hatásukat, hanem az egész napon keresztül.

A MIC korlát módosított egyenlete [5] szerint:

$\forall h, o, m$:

$$\begin{aligned}
MIC_{o,m}^{cx} & \Rightarrow FT_{o,m}^{cx} + VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx} \\
& \leq \sum_h \sum_k PINC_{k,h,o,m}^{cx} + \sum_h SHT_{h,o,m}^{+,cx} (\Delta_{h,o,m}^{+,cx} - (-1)^h 2P_{0,o,m}^{cx}) \\
& \quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{-,cx} (\Delta_{h,o,m}^{-,cx} + (-1)^h 2P_{0,o,m}^{cx}) \\
& \quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{max,cx} (P_{h,o,m}^{max,cx} - (-1)^h P_{0,o,m}^{cx})
\end{aligned}$$

$$+ \sum_h SHT_{h,o,m}^{min,cx} (-P_{h,o,m}^{min,cx} + (-1)^h P_{0,o,m}^{cx})$$

2.3 Feltételes matematikai korlátok átfogalmazása BigM-ek segítségével

A modellek matematikai leírásai gyakran tartalmaznak a változókra vonatkozó logikai feltételeket, amelyek integer-programozási formulákhoz, átfogalmazásokhoz vezetnek. Ezekben a modellekben az integer változók a logikai feltételek (például ha egy adott változó pozitív, akkor egy adott korlát van érvényben) vagy a nemlinearitások elkerülése miatt merülnek fel.

A korábbiakban bemutatott egyenletek közül számos olyan volt, amelyek úgynevezett go-no-go típusúak, tehát egy változó pozitív, vagy 1 értéke esetén érvényes az egyenlet második része, ellenkező esetben nem. A fent említett esetekben volt szükség arra, hogy átfogalmazzam a logikai korlátokat.

2.3.1 A BigM módszer használatának bemutatása általános esetre, egy egyszerű példán

Valószínűleg a matematikai programozás legegyszerűbb logikai feladata, ha csak az érdekes, hogy adott változók kielégítik-e a feltételünket.

$$COND \Rightarrow f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b$$

Vezessük be az y bináris változót, amely legyen 0, ha ismert, hogy a feltételt a változók teljesítik, és 1 ellenkező esetben. Ekkor az előző feltétel átírható:

$$COND \Leftrightarrow y$$

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) - By \leq b$$

Ahol B egy kellően nagy konstans, hogy a feltétel $y=1$ esetben is minden lehetséges $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ választására teljesüljön a feltétel:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b + B$$

Ha $y=0$, akkor tudjuk, hogy teljesül a $COND$ feltétel, tehát ebben az esetben visszajutunk az eredeti egyenlethez.

Általában könnyű kellően nagy számot találni, ami megfelel B -nek, viszont a legjobb a lehető legkisebb számot használni, ami még teljesíti a feltételt, hogy elkerüljük a számítási nehézségeket.

2.3.2 A BigM módszer bemutatása egy konkrét példán

Számos esetben volt szükség az átalakításra, viszont egyetlen egyenlet esetén mutatom csak be részletesen a módszert, a további egyenletek átalakított verziói a függelékben találhatóak meg. Az $SHT_{h,o,m}^{+,cx}$ árnyékára (TGC korlát fel irányú árnyékára) vonatkozó egyenlet átfogalmazását ismertetem lépésről lépésre az alábbiakban.

A kezdeti egyenlet:

$\forall h, o, m$:

$$SHT_{h,o,m}^{+,cx} > 0 \Rightarrow P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx} = \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

Látható, hogy az egyenlet tipikus feltételes korlát, tehát szükséges az átalakítása. Első lépésben vezessük be a SHT_pos bináris változót, amelynek értéke 1, ha a korlát teljesül, ellenkező esetben pedig a 0 értéket veszi fel.

Ahhoz, hogy ez teljesüljön, a modellfájlban a következő egyenletet kell implementálni:

$\forall h, o, m$:

$$SHT_{h,o,m}^{+,cx} \leq SHT_{h,o,m}^{pos} \cdot \text{maxpricediff}$$

Ez a korlát biztosítja, hogy $SHT_{h,o,m}^{pos}$ nulla értéke esetén $SHT_{h,o,m}^{+,cx}$ is nulla értéket vegyen fel, ha pedig $SHT_{h,o,m}^{pos}$ értéke 1, akkor teljesül a korlát, valamint a maxpricediff -fel való szorzás miatt ez az egyenlőtlenség is. Meg kell jegyezni, hogy az $SHT_{h,o,m}^{pos} = 1$ érték semmilyen korlátot nem támaszt az árnyékára, ekkor az árnyékár tetszőleges lehet. (A maxpricediff jelen esetben az általános példában látott „B” szerepét tölti be, az árakból képzett paraméter, melynek értéke megfelelően nagy számunkra.) Ugyanakkor ez az érték egy újabb korlátot ad az optimalizáláshoz, ami a célfüggvényt csökkenti: vagyis a solver kerülni fogja ezeket a megoldásokat.

Fontos megjegyezni, hogy az általános esetre bemutatott módszer másképp alakul, ha a feltétel után egyenlőséget kezelünk. Ebben az esetben nem elég egyetlen egyenlőséget átalakítani, hanem két egyenlőtlenséggel váltjuk ki az egyenlőséget. Tehát ebben az esetben, a feltétel teljesülése esetén a következő 2 egyenlőtlenségnek kell teljesülnie:

$$\text{a) } P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx} \geq \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

$$\text{b) } P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx} \leq \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

Nyilvánvaló, hogyha mindkettő teljesülését előírjuk, akkor az egyenlőség lesz az egyetlen megoldás.

Mindkét oldalhoz $P_{h-1,o,m}^{cx}$ -et hozzáadva:

$$a) \Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{cx} \leq P_{h,o,m}^{cx}$$

$$b) \Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{cx} \geq P_{h,o,m}^{cx}$$

A kellően nagy szám (BigM) megválasztásához gondoljunk bele, hogy legrosszabb esetben milyen értékeket vehetnek fel a változóink!

Az a) esetben az egyenlőtlenség nem teljesül, ha $\Delta_{h,o,m}^{+,cx}$ és $P_{h-1,o,m}^{cx}$ értéke nagyobb, mint $P_{h,o,m}^{cx}$. $\Delta_{h,o,m}^{+,cx}$ paraméter, tehát értéke konstans jelen esetben. Legrosszabb esetben $P_{h-1,o,m}^{cx}$ értéke $P_{h-1,o,m}^{max,cx}$, és $P_{h,o,m}^{cx}$ értéke pedig $P_{h,o,m}^{min,cx}$. Tehát ha a feltétel nem köt, a $\Delta_{h,o,m}^{+,cx}$, valamint $P_{h-1,o,m}^{max,cx}$ értékét hozzáadjuk az egyenlőtlenség jobb oldalához, akkor biztosan nagyobb lesz a bal oldalnál. Mivel $P_{h,o,m}^{cx}$ értéke minimum $P_{h,o,m}^{min,cx}$ kell legyen, ezért ez az értéket le is vonhatjuk a minél kisebb B eléréséhez. Így az átalakított egyenletünk a következőképpen néz ki:

$$\Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{cx} \leq P_{h,o,m}^{cx} + \left(1 - SHT_{pos,h,o,m}^{cx}\right) \cdot \left(\Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{max,cx} - P_{h,o,m}^{min,cx}\right)$$

Ha teljesül a feltétel, akkor $SHT_{h,o,m}^{pos,cx}$ értéke 1, tehát visszkapjuk az eredeti egyenletet:

$$\Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{cx} \leq P_{h,o,m}^{cx}$$

Ellenkező esetben pedig $SHT_{h,o,m}^{pos,cx}$ értéke nulla, tehát egyenletünk a megfelelő paraméterek hozzáadásával biztosan teljesül, mint azt a fentiekben bemutattam.

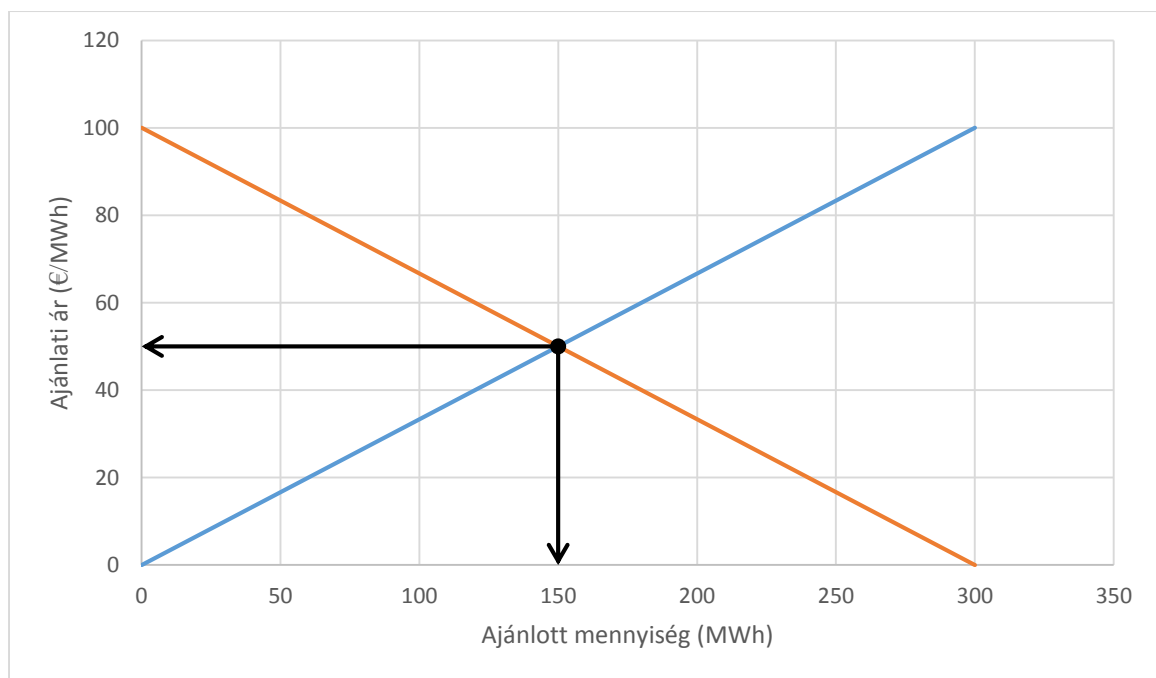
A b) eset megvalósítása ugyanezen a módon történik, azzal a különbséggel, hogy a b) egyenlet magának a TGC korlátnak is része, ezért nem szükséges jelen esetben is megvalósítani, hiszen ott már megtörtént.

3 A TGC korlát működésének bemutatása egy egyszerű példán

A TGC korlát működésének bemutatását egy egyszerű példán mutatom be, amely csak lineáris órás és komplex ajánlatokat tartalmaz. A példában az átláthatóság kedvéért 4 órára szólnak az ajánlatok, minden egyes órában egy keresleti és egy kínálati órás ajánlat, valamint egyetlen komplex ajánlat szerepel benne.

A példában szereplő órás ajánlatok adatai:

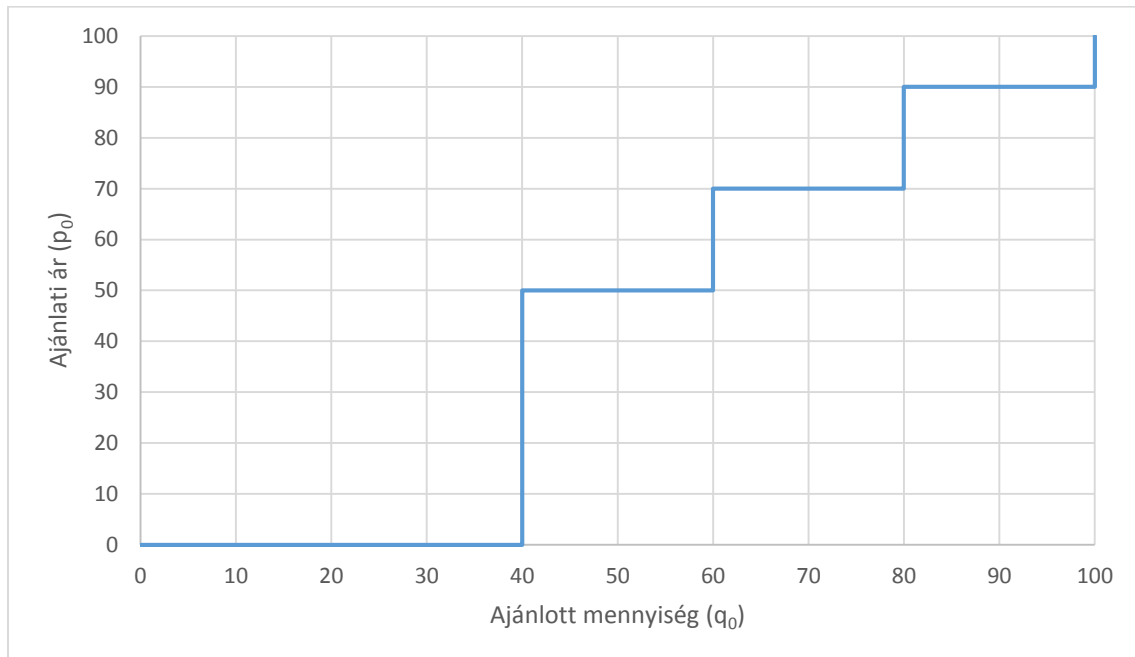
ID	q0	p00	p01	h
1	-300	100	0	1
2	-300	100	0	2
3	-300	100	0	3
4	-300	100	0	4
5	300	0	100	1
6	300	0	100	2
7	300	0	100	3
8	300	0	100	4



4. ábra Az aggregált görbék komplex ajánlat nélkül, egy órára

Látható, hogy komplex ajánlat nélkül minden órában 50 € lenne az ár, és 150 MWh az eladott mennyiség.

A komplex ajánlat mind a 4 órában az alábbi órás kínálati ajánlatokat:



5. ábra A komplex ajánlatot alkotó óras ajánlat

A TGC korlát paraméterei minden órára a következők:

- $P_{0,o,m}^{cx} = 40$
- $\Delta_{h,o,m}^{+,cx} = 30$
- $\Delta_{h,o,m}^{-,cx} = 30$
- $P_{h,o,m}^{max,cx} = 100$
- $P_{h,o,m}^{min,cx} = 40$

A MIC korlát paraméterei:

- $FT_{o,m}^{cx} = 20$
- $VT_{o,m}^{cx} = 10$

Az eredmények:

Az árnyékarak, valamint az OCP és MCP értékek:

	1. óra	2. óra	3. óra	4. óra
$SHT_{h,o,m}^{+,cx}$	0	0	0	0
$SHT_{h,o,m}^{-,cx}$	0	0	0	0
$SHT_{h,o,m}^{max,cx}$	0	0	0	0
$SHT_{h,o,m}^{min,cx}$	0	0	3.333	0

$OCP_{h,o,m}$	50	36.666	50	43.333
$MCP_{h,o,m}$	43.333	43.333	43.333	43.333

$SHT_{3,o,m}^{min,cx}$ értéke tér el egyedül nullától, erre később magyarázatot adok.

Az órás ajánlat elfogadási arányai:

	1. óra		2. óra		3. óra		4. óra	
ID	1	5	2	6	3	7	4	8
ACC	0.567	0.433	0.567	0.433	0.567	0.433	0.567	0.433

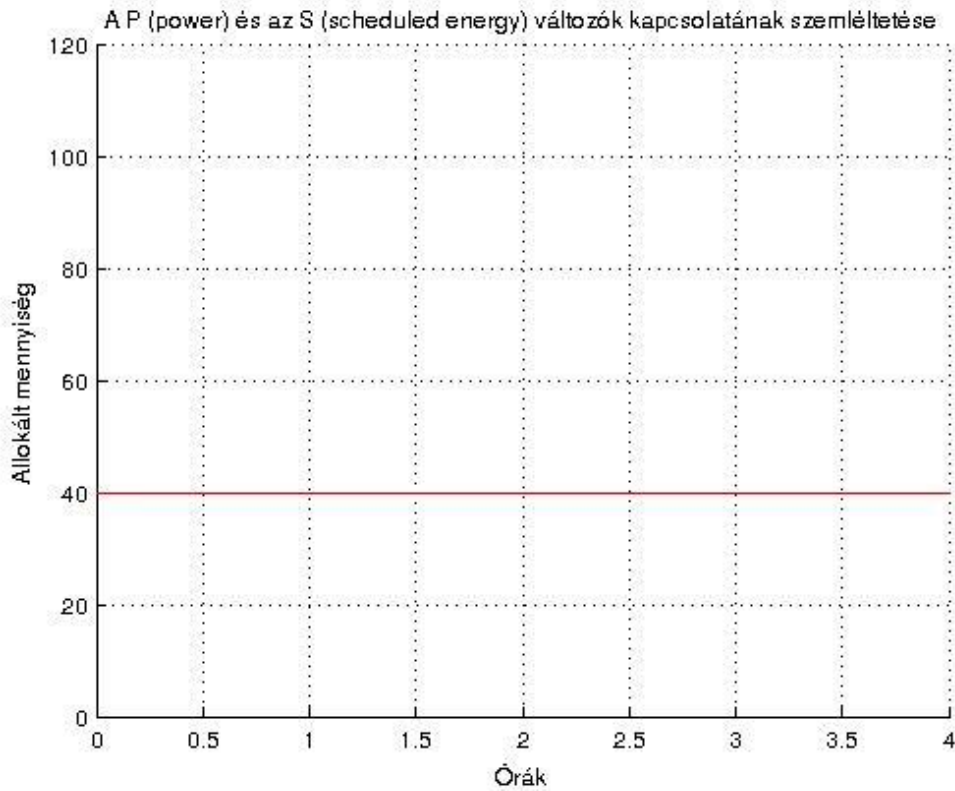
A komplex ajánlat elfogadási arányai:

	1. óra				2. óra				3. óra				4. óra			
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ACC	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

A teljesítmények és energiák értékei:

t	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00
P	40	40	40	40	40
S		40	40	40	40

Az összes teljesítmény és energiaérték a 40 értéket vette fel, tehát a teljesítmények és az energiák kapcsolatára vonatkozó korlátok is teljesülnek.



Látható, hogy egyetlen árnyékár adódott, a 3. órában az $SHT_{h,o,m}^{min,cx} = 3.333$ értéket vette fel. Mivel $P_{h,o,m}^{min,cx}$ értéke 40, és a 3. órában $P_{h,o,m}^{cx}$ is ugyanezt az értéket vette fel, ezért teljesen helyénvaló, hogy ebben az órában keletkezett árnyékár.

Az OCP egyenlete alapján ellenőrizhetőek az egyes órákra megkapott OCP értékek:

$\forall h, o, m$:

$$\begin{aligned}
 OCP_{h,o,m} = & MCP_{h,o,m} - 2SHT_{h,o,m}^{+,cx} - 4 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{+,cx} \\
 & + 2SHT_{h,o,m}^{-,cx} + 4 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{-,cx} \\
 & - 2SHT_{h,o,m}^{max,cx} - 2 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{max,cx} \\
 & + 2SHT_{h,o,m}^{min,cx} + 2 \sum_{i=h+1}^{24} (-1)^{i-h} SHT_{i,o,m}^{min,cx}
 \end{aligned}$$

Az 1. órában:

$$OCP_{1,o,m} = MCP_{1,o,m} + 2 \cdot (-1)^2 SHT_{3,o,m}^{min,cx} = 43.333 + 2 \cdot 3.333 = 50$$

A 2. órában:

$$OCP_{2,o,m} = MCP_{2,o,m} + 2 \cdot (-1)^1 SHT_{3,o,m}^{min,cx} = 43.333 - 2 \cdot 3.333 = 36.666$$

A 3. órában:

$$OCP_{3,o,m} = MCP_{3,o,m} + 2 \cdot SHT_{3,o,m}^{min,cx} = 43.333 + 2 \cdot 3.333 = 50$$

A 4. órában:

$$OCP_{4,o,m} = MCP_{4,o,m} = 43.333$$

Látható, hogy az egyenletből számított OCP értékek megegyeznek az eredménnyel, valamint a TGC korlát is teljesült. Ugyanakkor az is látható, hogy az OCP megváltozása valójában nem eredményezte sem az allokált mennyiség, sem a többletek megváltozását. Mind allokáció, mind a jólét értékét tekintve ugyanezt az eredményt kapnánk, ha minden árnyékár nulla értéket venne fel.

Változtassuk meg az óras ajánlatok paramétereit, hogy több korlát sérüljön egyszerre!

Az új paraméterek:

ID	q0	p00	p01	h
1	-300	100	0	1
2	-300	100	0	2
3	-900	100	0	3
4	-100	100	0	4
5	300	0	100	1
6	300	0	100	2
7	300	0	100	3
8	300	0	100	4

Megváltoztattam $\Delta_{h,o,m}^{+,cx}$ és $\Delta_{h,o,m}^{-,cx}$ értékét 20-ra, és $P_{0,o,m}^{cx}$ értékét felemeltem 70-re. Emellett $P_{h,o,m}^{min,cx}$ -nek minden órára a 45 értéket adtam meg.

Az eredmények:

Árak	1. óra	2. óra	3. óra	4. óra

$SHT_{h,o,m}^{+,cx}$	0	0	0	0
$SHT_{h,o,m}^{-,cx}$	9,792	0	5,417	0
$SHT_{h,o,m}^{max,cx}$	0	0	0	0
$SHT_{h,o,m}^{min,cx}$	0	0	2,5	18,125
$OCP_{h,o,m}$	50	50	50	50
$MCP_{h,o,m}$	40	40,417	70,417	13,75

Az órás ajánlat elfogadási arányai:

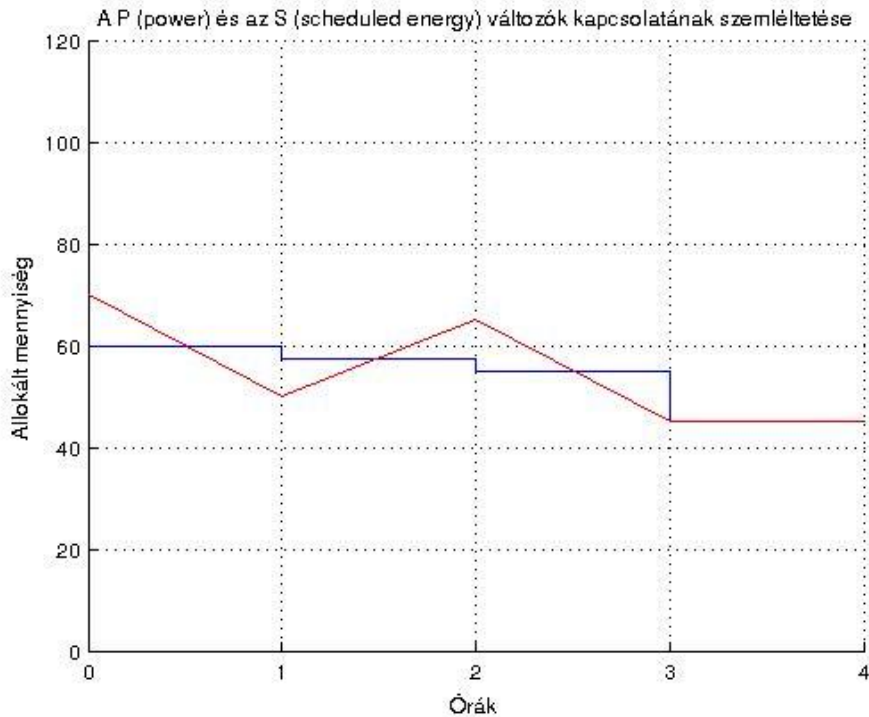
	1. óra		2. óra		3. óra		4. óra	
ID	1	5	2	6	3	7	4	8
ACC	0,6	0,4	0,596	0,404	0,296	0,704	0,8625	0,1375

A komplex ajánlat elfogadási arányai:

	1. óra				2. óra				3. óra				4. óra			
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ACC	1	1	0	0	1	0,875	0	0	1	0,75	0	0	1	0,25	0	0

A teljesítménye és az energia:

t	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00
P	70	50	65	45	45
S		60	57,5	55	45



Az OCP egyenlete alapján ellenőrizhetőek az egyes órákra megkapott OCP értékek:

Az 1. órában:

$$\begin{aligned}
 OCP_{1,o,m} &= MCP_{1,o,m} + 2 \cdot SHT_{1,o,m}^{-,cx} + 4 \cdot (-1)^2 \cdot SHT_{3,o,m}^{-,cx} + 4 \cdot (-1)^2 \cdot SHT_{3,o,m}^{min,cx} + 4 \cdot (-1)^3 \cdot SHT_{4,o,m}^{min,cx} \\
 &= 40 + 2 \cdot 9,792 + 4 \cdot 5,417 + 2 \cdot 2,5 - 2 \cdot 18,125 = 50
 \end{aligned}$$

A 2. órában:

$$\begin{aligned}
 OCP_{2,o,m} &= MCP_{2,o,m} + 4 \cdot (-1)^1 SHT_{3,o,m}^{-,cx} + 4 \cdot (-1)^1 SHT_{3,o,m}^{min,cx} + 4 \cdot (-1)^2 \cdot SHT_{4,o,m}^{min,cx} \\
 &= 40,417 - 4 \cdot 5,417 - 2 \cdot 2,5 + 2 \cdot 18,125 = 50
 \end{aligned}$$

A 3. órában:

$$\begin{aligned}
 OCP_{3,o,m} &= MCP_{3,o,m} + 2 \cdot SHT_{3,o,m}^{-,cx} + 2 \cdot SHT_{3,o,m}^{min,cx} + (-1)^1 \cdot 4 \cdot SHT_{4,o,m}^{min,cx} \\
 &= 70,417 + 2 \cdot 5,417 + 2 \cdot 2,5 - 2 \cdot 18,125 = 50
 \end{aligned}$$

A 4. órában:

$$OCP_{4,o,m} = MCP_{4,o,m} + 2 \cdot SHT_{4,o,m}^{min,cx} = 13,75 + 2 \cdot 18,125 = 50$$

Látható, hogy az egyenletből számított OCP értékek megegyeznek az eredménnyel, valamint a TGC korlát is teljesült.

4 Elemzés nagy mennyiségű adaton, piaci hatások vizsgálata

A spanyol-portugál összekapcsolt villamosenergia-piacról (OMIE) publikus adatok érhetőek el 90 napos késleltetéssel, ezeket az adatokat használtam fel az elemzés során. A futtatás a tanszéken történt, az eredmények elemzéséhez MATLAB scripteket írtam.

A vizsgálat időintervalluma egy hónap volt (2015. január), minden egyes napra lefutattam a beadott ajánlatokat az LGC és a TGC korláttal is, külön-külön. Az LGC és a TGC korlátok alkalmazásának hatásait több paraméter mentén vizsgáltam. Egyrészt a megoldó futási ideje, valamint a kapott megoldás típusa érdekelt. Másrészt a social welfare, valamint a modellezett teljesítményváltozások (ΔP) alakulását és a korlátsértések számát elemeztem LGC, illetve TGC esetén. (Az LGC korlátot tartalmazó modell valójában nem tartalmaz P teljesítményváltozókat, azonban egy megadott induló P0 teljesítmény esetén az allokáció alapján ezek számíthatók a **Hiba! A hivatkozási forrás nem alálható..** fejezetben megadott egyenletek szerint.)

4.1 A futási idők és megoldás típusok összehasonlítása

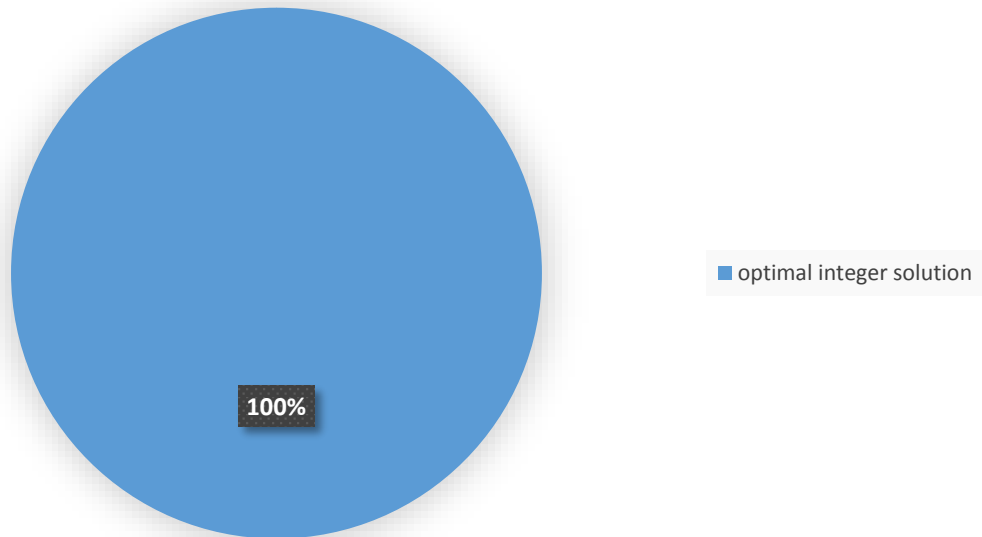
A futási időkre a run file-ban 600 s idejű maximális limitet állítottam be.

A megoldások típusainak összefoglalása és magyarázata:

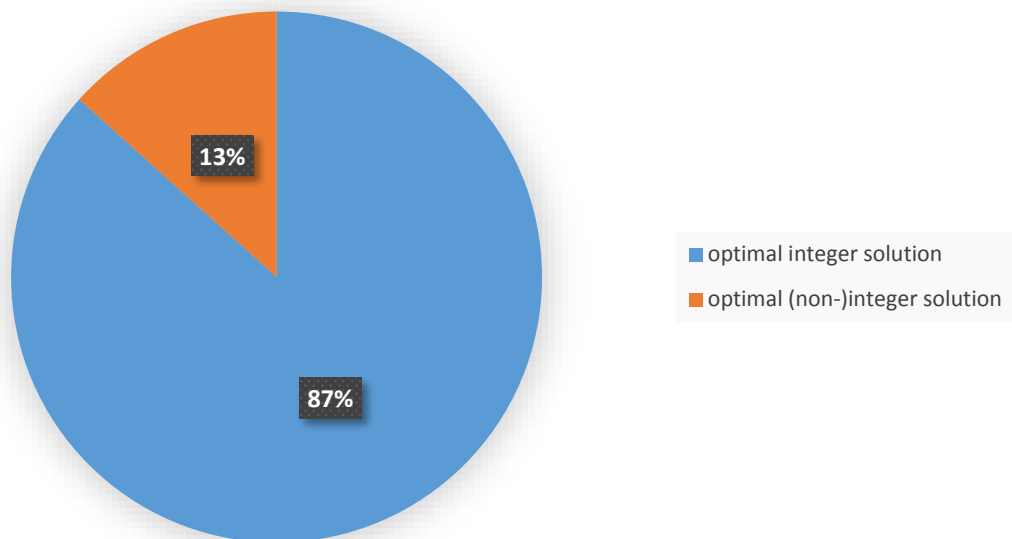
- optimal integer solution: a solver futási időn belül megtalálta a legoptimálisabb megoldást.
- optimal (non-)integer solution: a solver futási időn belül talált a toleranciasávon belüli optimális megoldást.
- time limit with integer solution: a futási idő elérte a beállított limit értékét, ezért le lett állítva a futtatás, az eddig talált megoldások közül a legoptimálisabbat adja vissza.
- optimal integer solution within mipgap or absmipgap / optimal (non-)integer solution within mipgap or absmipgap: a solver futási időn belül optimális megoldást talált, amely a beállított határon belül van.
- time limit with no integer solution: a futási idő elérte a beállított limit értékét, ezért le lett állítva a futtatás, de a solver ennyi idő alatt nem talált egyetlen megoldást sem.

Az LGC megoldások 100%-a optimális, TGC korlát esetén a megoldások 87%-a optimális, és 13%-a a toleranciasávon belül már optimális.

Megoldástípusok eloszlása LGC esetén

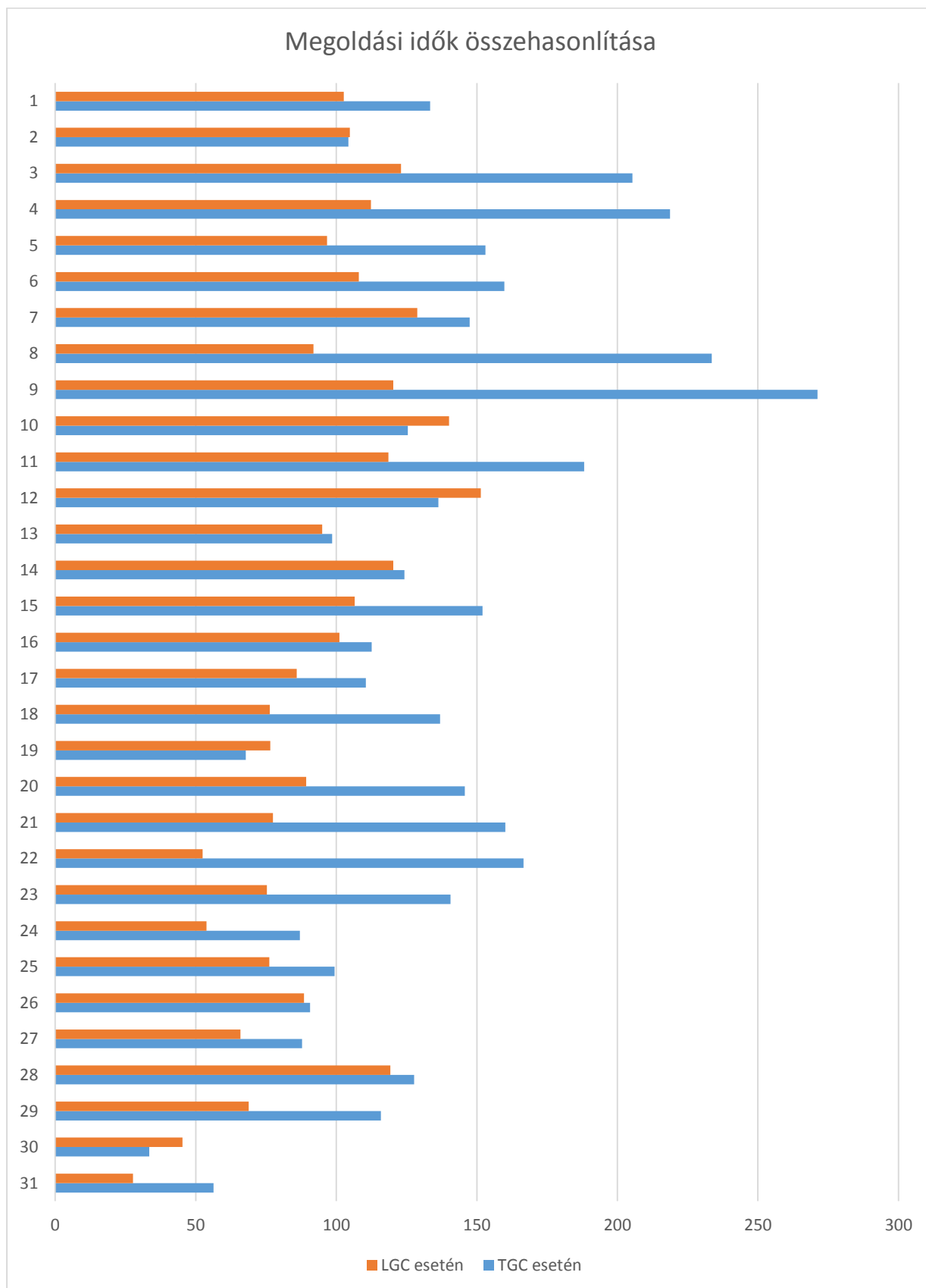


Megoldástípusok eloszlása TGC esetén



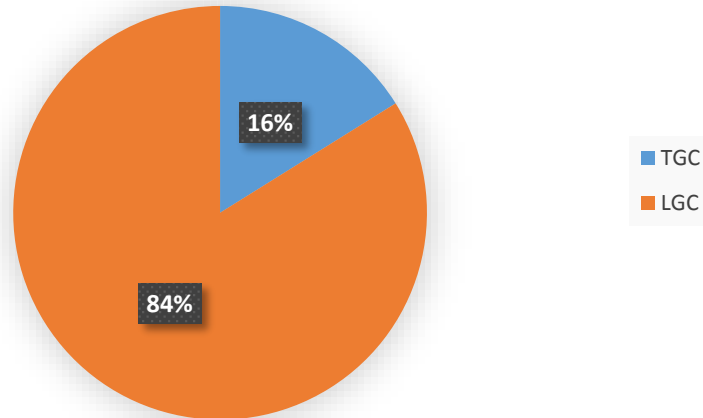
6. ábra A megoldástípusok megoszlása LGC és TGC korlátok esetén

A megoldási idők tekintetében az LGC jobb eredményeket ér el, LGC esetén az átlagos megoldási idő 93,555 s, míg TGC esetén 135,184 s. A 31 napon 5 esetében TGC esetén rövidebb idő is elég volt a megoldáshoz, a többi napon LGC esetén volt gyorsabb a megoldás megtalálása.



7. ábra Megoldási idők alakulása az adott napokra, LGC és TGC esetén

A vizsgált esetek megoszlása aszerint, hogy TGC vagy LGC alkalmazása esetén adódott rövidebb megoldási idő



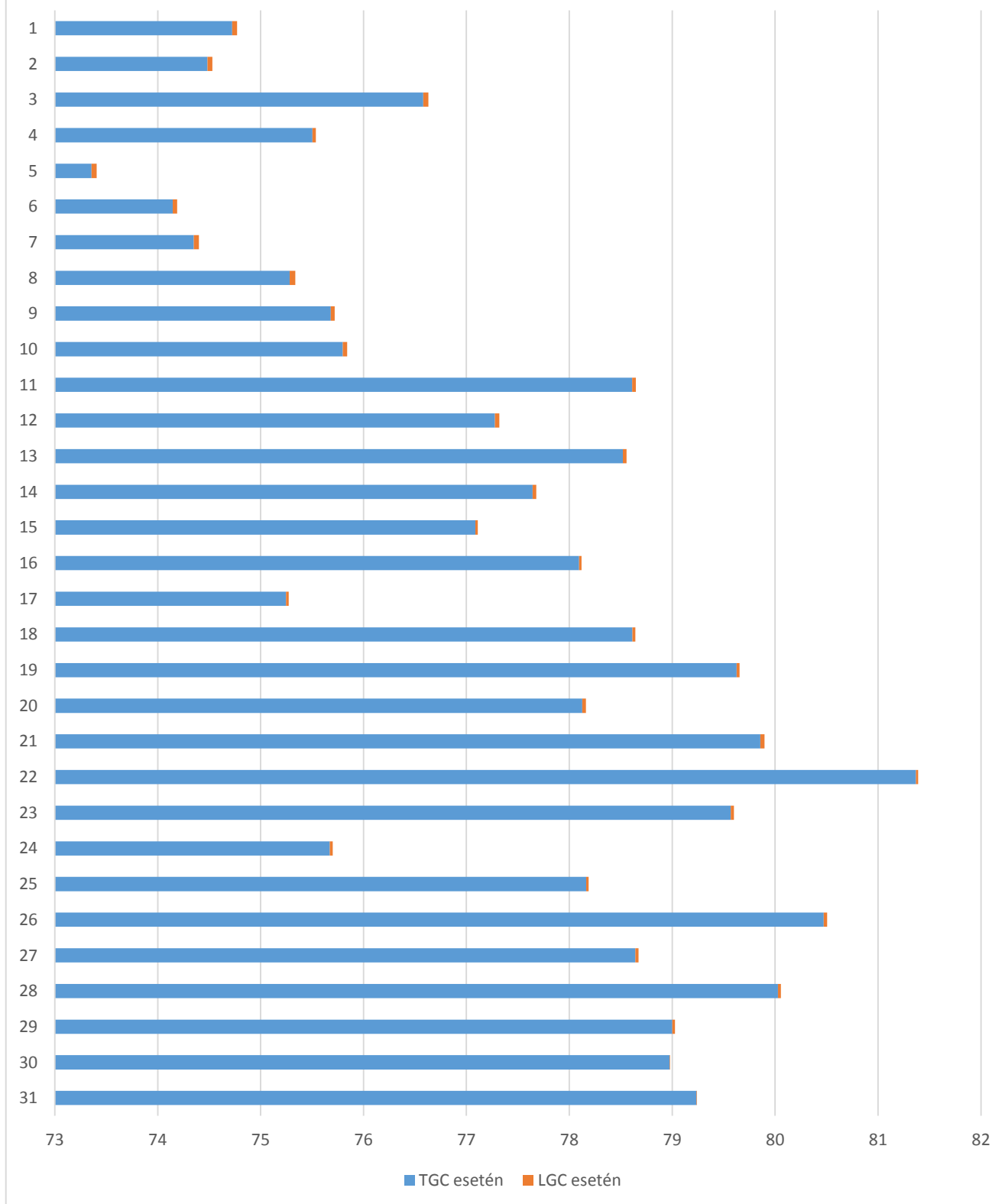
8. ábra A vizsgált esetek megoszlása aszerint, hogy TGC vagy LGC alkalmazása esetén adódott rövidebb megoldási idő

4.2 A jólét összehasonlítása

Sejthető volt, hogy a szigorúbb korlátok következményeképpen TGC esetén kisebb lesz a célfüggvény értéke, és ez a futtatások során be is igazolódott, hiszen LGC esetén minden egyes napra nagyobb érték adódott, bár nem mondható jelentősnek az eltérés, átlagosan 34 240 € (0,044%-a az LGC-re számított social welfare-ek átlagának).

Korlátok típusa	TGC	LGC
A social welfare átlagos értéke [€]	77 240 600	77 444 709

A jólét ábrázolása LGC és TGC esetén

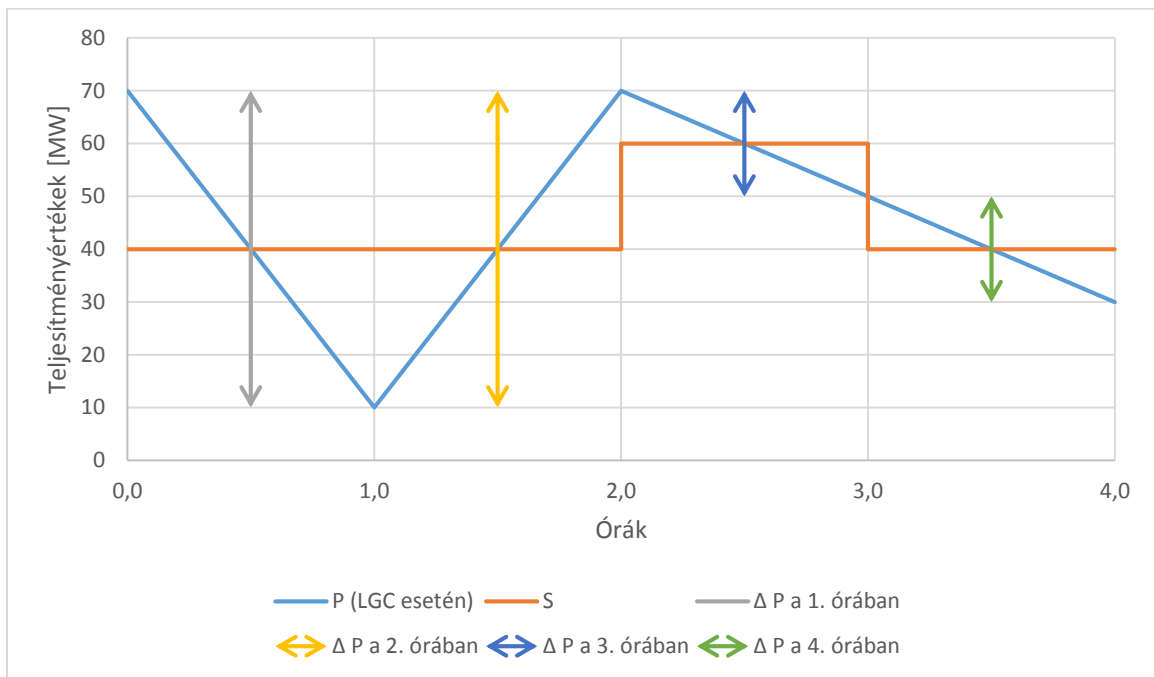


9. ábra A jólét alakulása LGC és TGC esetén

4.3 ΔP értékek összehasonlítása

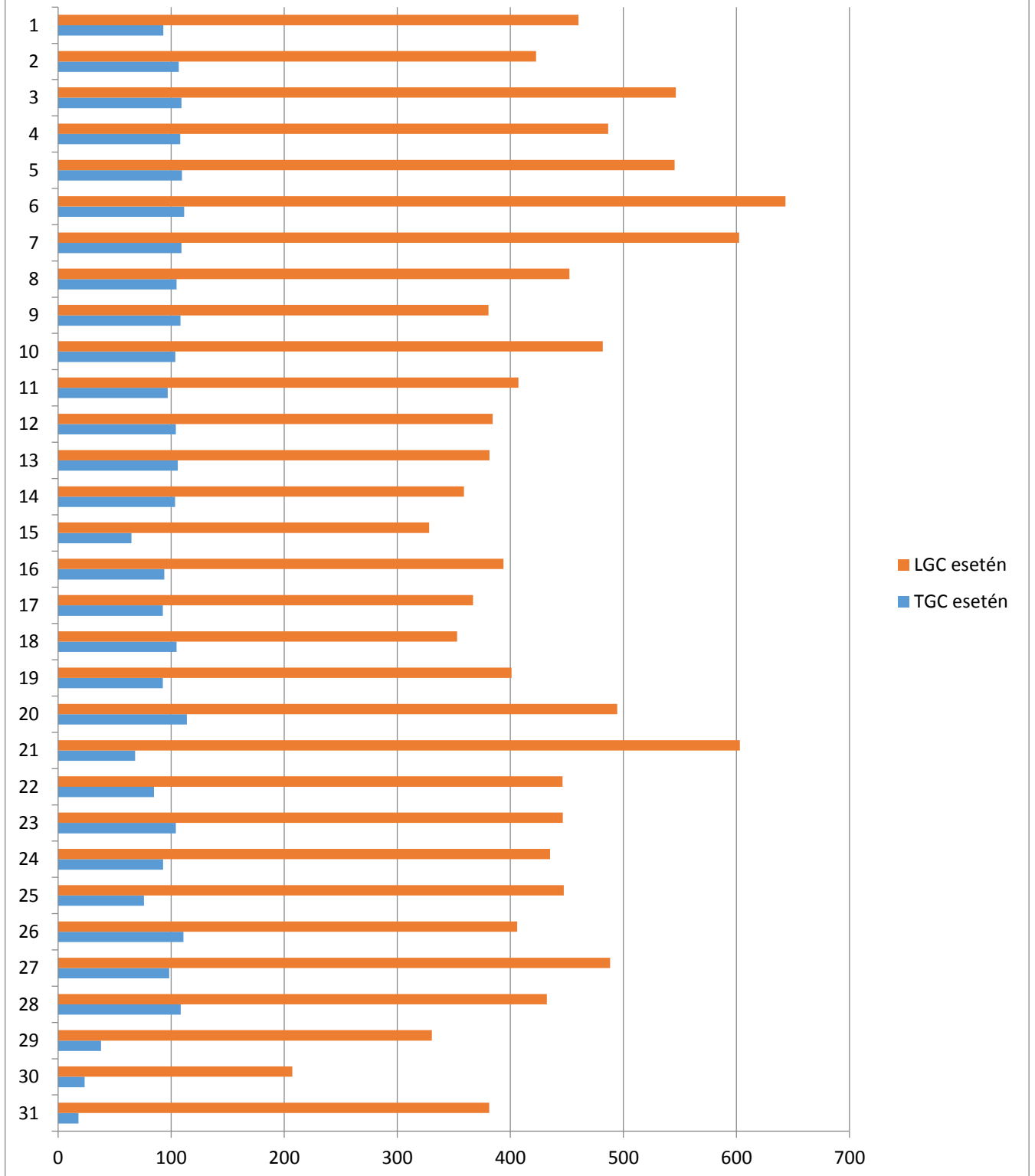
ΔP -n jelen esetben minden órára és minden komplex ajánlatra elvégzett $P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx}$ értékek abszolút értékben vett összegét értem, vagyis azt, hogy egy adott $S_{h,o,m}^{cx}$ érték eléréséhez a $P_{h,o,m}^{cx}$ értékek milyen szélsőértékeket vesznek fel.

Látható, hogy ΔP szempontjából a TGC sokkal jobb értékeket ad, hiszen TGC esetén a ΔP -k értékeinek egy napra vett óránkénti és komplex ajánlatonkénti átlaga 92,21, míg ez LGC esetén 435,91. Mivel a TGC lényege alapvetően a kisebb gradiens elérése, ezért ez nem meglepő.



10. ábra ΔP értékek szemléltetése LGC esetén 4 órára

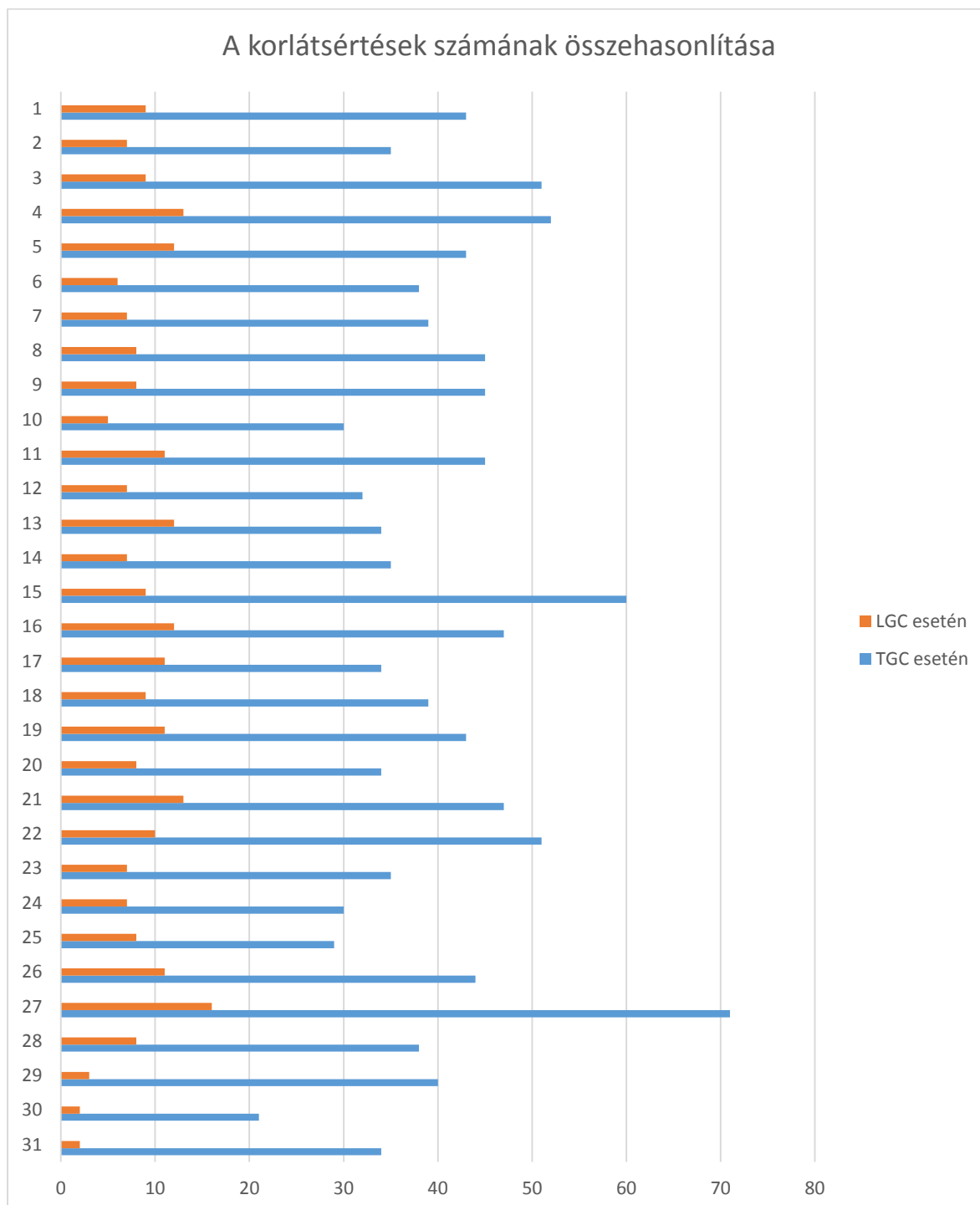
Egy komplex ajánlatra eső ΔP -k óránkénti értékeinek átlagának összehasonlítása LGC és TGC esetén, az adott napon



11. ábra Egy komplex ajánlatra eső ΔP -k óránkénti értékeinek átlagának összehasonlítása LGC és TGC esetén, az adott napon

4.4 A korlátsértések számának és arányának összehasonlítása

A korlátsértések száma könnyen meghatározható, hiszen az árnyékár kizárólag akkor vesz fel pozitív értéket, amikor valamely korlát éles. Eszerint az egyes napokon az alábbi értékek adódtak:

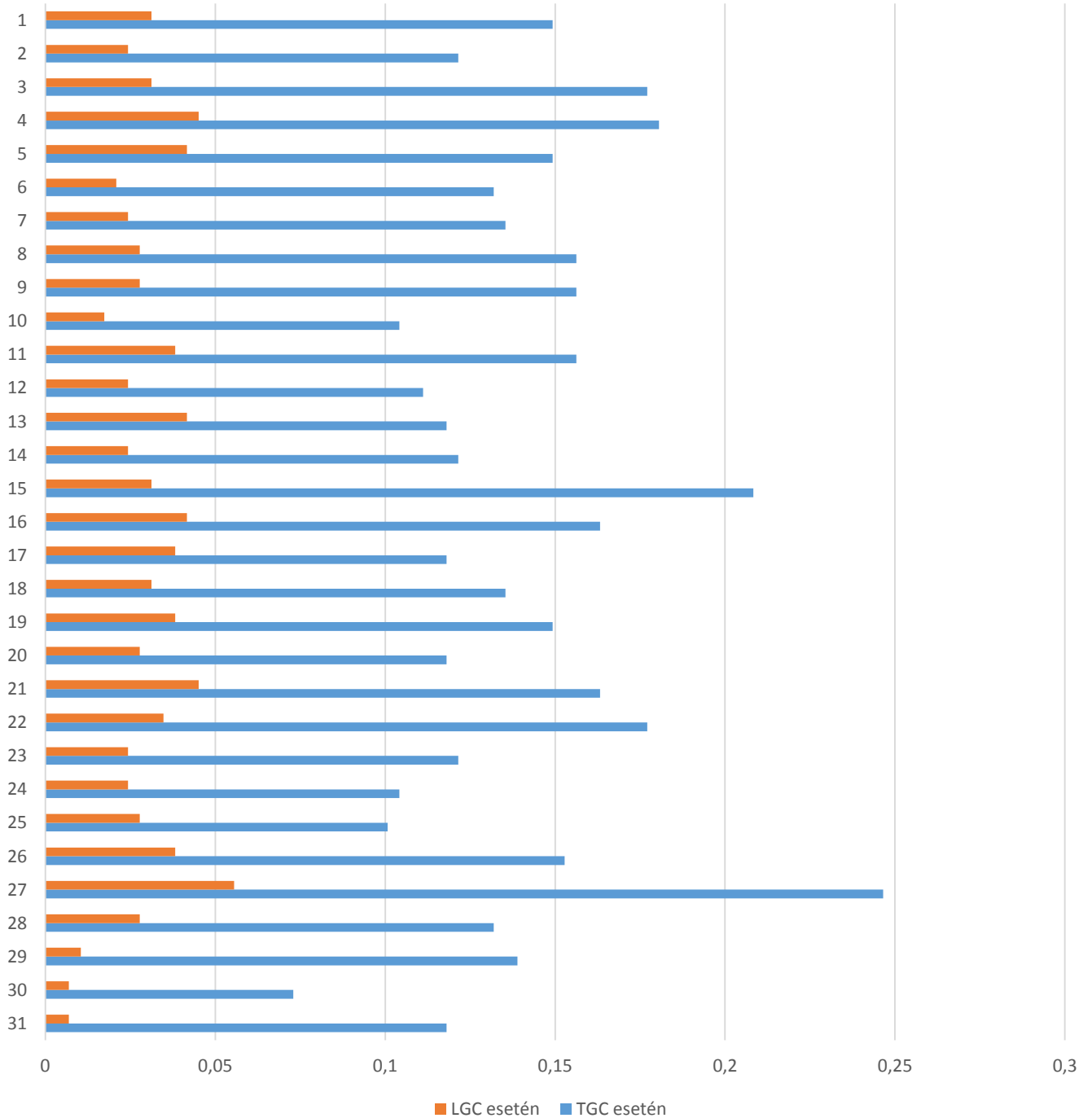


12. ábra A korlátsértések számának alakulása LGC és TGC esetén

Látható, hogy TGC alkalmazásával minden esetben nagyobb a korlátsértések száma, ami nem meglepő, hiszen több korlát és erősebb megszorítások vannak, mint LGC esetén.

Az egy komplex ajánlatra egy órában átlagosan eső korlátsértések számát is vizsgáltam, ezeknek átlaga TGC esetén 0,1416 korlátsértés/óra/komplex ajánlat, míg LGC esetén ez az érték 0,03 korlátsértés/óra/komplex ajánlat. Tehát elmondható, hogy LGC esetén 78,8 %-kal kevesebb korlátsértés van átlagosan egy adott komplex ajánlaton egy adott órában.

Egy komplex ajánlatra eső korlátsértések óránkénti számának átlaga egy adott napon



13. ábra Egy komplex ajánlatra eső korlátsértések óránkénti számának átlaga egy adott napon, TGC és LGC korlátok esetén

4.5 Összefoglalás és kitekintés

Összességében elmondható, hogy az eredmények vizsgálata alátámasztotta az előzetes elképzeléseket a TGC korlát alkalmazásának hatásairól. Várható módon csökkent a célfüggvény értéke a szigorúbb korlátok miatt, de nem jelentős mértékben. A futási idők növekedését egyértelműen a bonyolultabb modell okozta, viszont minden napra megtalálta a solver az optimális megoldást, még TGC esetén is. A korlátsértések száma TGC esetén a korlátok számának emelkedésének tudható be. A TGC korlát bevezetésének gondolatát a változás reálisabb modellezése inspirálta, tehát az alapvető felépítésében úgymond „kódolva” volt, hogy kisebb ΔP értékeket érhetünk el az alkalmazásával.

A továbbiakban a vizsgálatot szeretném egy teljes évre kiterjeszteni, és elemezni a kapott eredményeket, és egy cikket írni az elemzés eredményeiről. Az eredmények további szempontok szerinti vizsgálata, mint például $P_{0,0,m}^{cx}$ változtatásának hatása (esetleg változóvá tétele) is tanulmányozásra érdemes.

5 Irodalomjegyzék

- [1] EUPHEMIA Public Description, PCR Market Coupling Algorithm, 2016
- [2] AMPL (A Mathematical Programming Language), ampl.com
- [3] Sleisz, Á., Raisz, D. „Efficient Formulation of Minimum Income Condition Orders on the All-European Power Exchange.” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. 59(3). pp. 132-137. 2015
- [4] Divényi, D., Polgári, B., Raisz, D., Sőrés, P. „Special session on proposal of a new European co-optimized energy and ancillary service market design - part II - mathematical model, case study and prototype.” In: European Energy Market (EEM), 2016 13th International Conference on the. pp. 1-6, 6-9 June 2016. DOI: 10.1109/EEM.2016.7521362
- [5] Raisz, D., Divény, D., Sőrés, P., Sleisz, Á., Polgári, B. „Energia és tartalékajánatok kooptimalizált klíringszámításának matematikai modellje.” Kutatási jelentés. 2015

Függelék

A függelékben találhatóak összegyűjtve azok az egyenletek, amelyeknél a BigM-es módszerre volt szükség, valamint az átalakított egyenletek. Az első órára az egyenletek többségéből külön verzió kellett P_0 bevezetése miatt, viszont mivel ezek egészen hasonlóak eredetiekhez, ezért nem részletezem az átalakításukat.

A TGC korlátot leíró egyenletek:

$$[1] \ TGC_{o,m}^{cx} \Rightarrow (P_{h-1,o,m}^{cx} - P_{h,o,m}^{cx} \leq \Delta_{h,o,m}^{-,cx})$$

$$\Delta_{h,o,m}^{-,cx} + P_{h,o,m}^{cx} \geq P_{h-1,o,m}^{cx} - (1 - TGC_{holds}) \cdot (P_{h-1,o,m}^{max,cx} - \Delta_{h,o,m}^{-,cx} - P_{h,o,m}^{min,cx})$$

$$[2] \ TGC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow (P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx} \leq \Delta_{h,o,m}^{+,cx})$$

$$\Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{cx} \geq P_{h,o,m}^{cx} - (1 - TGC_{holds}) \cdot (P_{h,o,m}^{max,cx} - \Delta_{h,o,m}^{+,cx} - P_{h-1,o,m}^{min,cx})$$

$$[3] \ TGC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow (P_{h,o,m}^{cx} \leq P_{h,o,m}^{max,cx})$$

$$P_{h,o,m}^{cx} - (1 - TGC_{holds}) \cdot P_{h,o,m}^{max,cx} * 10 \leq P_{h,o,m}^{max,cx}$$

$$[4] \ TGC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow (P_{h,o,m}^{cx} \leq P_{h,o,m}^{min,cx})$$

$$P_{h,o,m}^{cx} + (1 - TGC_{holds}) \cdot P_{h,o,m}^{min,cx} \geq P_{h,o,m}^{min,cx}$$

$$[5] \ SHT_{h,o,m}^{-,cx} > 0 \Rightarrow P_{h-1,o,m}^{cx} - P_{h,o,m}^{cx} = \Delta_{h,o,m}^{-,cx}$$

$$\Delta_{h,o,m}^{-,cx} + P_{h,o,m}^{cx} \leq P_{h-1,o,m}^{cx} + (1 - SHT_{down}) \cdot (P_{h,o,m}^{max,cx} + \Delta_{h,o,m}^{-,cx} - P_{h-1,o,m}^{min,cx})$$

$$\Delta_{h,o,m}^{-,cx} + P_{h,o,m}^{cx} \geq P_{h-1,o,m}^{cx} - (1 - SHT_{down}) \cdot (P_{h-1,o,m}^{max,cx} - \Delta_{h,o,m}^{-,cx} - P_{h,o,m}^{min,cx})$$

$$[6] \ SHT_{h,o,m}^{+,cx} > 0 \Rightarrow P_{h,o,m}^{cx} - P_{h-1,o,m}^{cx} = \Delta_{h,o,m}^{+,cx}$$

$$\Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{cx} \leq P_{h,o,m}^{cx} + (1 - SHT_{up}) \cdot (P_{h-1,o,m}^{max,cx} + \Delta_{h,o,m}^{+,cx} - P_{h,o,m}^{min,cx})$$

$$\Delta_{h,o,m}^{+,cx} + P_{h-1,o,m}^{cx} \geq P_{h,o,m}^{cx} - (1 - SHT_{up}) \cdot (P_{h,o,m}^{max,cx} - \Delta_{h,o,m}^{+,cx} - P_{h-1,o,m}^{min,cx})$$

$$[7] \ SHT_{h,o,m}^{max,cx} > 0 \Rightarrow P_{h,o,m}^{cx} = P_{h,o,m}^{max,cx}$$

$$P_{h,o,m}^{cx} - (1 - SHT_{max}) \cdot P_{h,o,m}^{max,cx} * 10 \leq P_{h,o,m}^{max,cx}$$

$$P_{h,o,m}^{cx} + (1 - SHT_{max}) \cdot P_{h,o,m}^{max,cx} \geq P_{h,o,m}^{max,cx}$$

$$[8] SHT_{h,o,m}^{min,cx} > 0 \Rightarrow P_{h,o,m}^{cx} = P_{h,o,m}^{min,cx}$$

$$P_{h,o,m}^{cx} + (1 - SHT_{min}) \cdot P_{h,o,m}^{min,cx} \geq P_{h,o,m}^{min,cx}$$

$$P_{h,o,m}^{cx} - (1 - SHT_{min}) \cdot P_{h,o,m}^{max,cx} \leq P_{h,o,m}^{min,cx}$$

$$[9] MIC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow FT_{o,m}^{cx} + VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx}$$

$$\begin{aligned} &\leq \sum_h \sum_k PINC_{k,h,o,m}^{cx} + \sum_h SHT_{h,o,m}^{+,cx} (\Delta_{h,o,m}^{+,cx} - (-1)^h 2P_{0,o,m}^{cx}) \\ &\quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{-,cx} (\Delta_{h,o,m}^{-,cx} + (-1)^h 2P_{0,o,m}^{cx}) \\ &\quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{max,cx} (P_{h,o,m}^{max,cx} - (-1)^h P_{0,o,m}^{cx}) \\ &\quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{min,cx} (-P_{h,o,m}^{min,cx} + (-1)^h P_{0,o,m}^{cx}) \end{aligned}$$

$$MIC_{o,m}^{cx} \Leftrightarrow FT_{o,m}^{cx}$$

$$\begin{aligned} &+ VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k ACC_{k,h,o,m}^{cx} q_{k,h,o,m}^{cx} \\ &\leq \sum_h \sum_k PINC_{k,h,o,m}^{cx} + \sum_h SHT_{h,o,m}^{+,cx} (\Delta_{h,o,m}^{+,cx} - (-1)^h 2P_{0,o,m}^{cx}) \\ &\quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{-,cx} (\Delta_{h,o,m}^{-,cx} + (-1)^h 2P_{0,o,m}^{cx}) \\ &\quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{max,cx} (P_{h,o,m}^{max,cx} - (-1)^h P_{0,o,m}^{cx}) \\ &\quad + \sum_h SHT_{h,o,m}^{min,cx} (-P_{h,o,m}^{min,cx} + (-1)^h P_{0,o,m}^{cx}) \\ &\quad - (1 - MIC_{holds}) \cdot (FT_{o,m}^{cx} + VT_{o,m}^{cx} \sum_h \sum_k abs(q_{k,h,o,m}^{cx})) \end{aligned}$$

$$[10] ACC_{k,h,o,m}^{cx} > 0 \Rightarrow$$

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} = q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot OCP_{h,o,m}^{cx} + ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx} - q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}$$

Az átalakított egyenlet:

$$\begin{aligned} PINC_{k,h,o,m}^{cx} &\leq q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot (OCP_{h,o,m}^{cx} - (1 - ACC_{k,h,o,m}^{cx}) \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}) \\ &\quad + ACC_{k,h,o,m}^{nonexc} \cdot 4 \cdot abs(q_{k,h,o,m}^{cx}) \cdot maxpricediff \end{aligned}$$

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} \geq q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot (OCP_{h,o,m}^{cx} - (1 - ACC_{k,h,o,m}^{cx}) \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}) \\ - ACC_{k,h,o,m}^{nonecx} \cdot 4 \cdot abs(q_{k,h,o,m}^{cx}) \cdot maxpricediff$$

$$[11] ACC_{k,h,o,m}^{cx} < 1 \Rightarrow$$

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} = ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx}$$

Az átalakított egyenlet:

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} \leq ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx} + ACC_{k,h,o,m}^{full,cx} \cdot 2 \cdot abs(q_{k,h,o,m}^{cx}) \cdot maxpricediff$$

$$PINC_{k,h,o,m}^{cx} \geq ACC_{k,h,o,m}^{cx} \cdot q_{k,h,o,m}^{cx} \cdot p_{k,h,o,m}^{cx} - ACC_{k,h,o,m}^{full,cx} \cdot 2 \cdot abs(q_{k,h,o,m}^{cx}) \cdot maxpricediff$$