



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

Hadar Ádám

# **HATÁRKERESZTEZŐ KAPACITÁSOK ALLOKÁCIÓJÁNAK SZIMULÁCIÓJA**

TDK dolgozat

KONZULENS

**Dr. Divényi Dániel**

BUDAPEST, 2018

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Bevezetés .....</b>	<b>6</b>
1.1 A kapacitásaukcio definíciója, történelmi háttere.....	6
1.1.1 Az explicit kapacitásaukcio .....	6
1.1.2 Az implicit kapacitásaukcio.....	6
1.1.3 A szük keresztmetszetek problémája.....	7
1.1.4 Megoldási kísérletek a szük keresztmetszetek problémájára .....	7
1.1.5 A JAO.EU létrejötte és szerepe .....	9
<b>2 A szimulációs modell alap gondolata, felépítése .....</b>	<b>11</b>
2.1 Alapvetések, feltételezések, megfontolások .....	11
2.2 A lehetséges szimulációs platformok összehasonlítása .....	12
2.3 A résztvevő ágensek típusainak kiválasztása.....	12
2.3.1 Az ágens, mint fogalom.....	13
2.3.2 Ágens típusok .....	13
2.3.3 Az alkalmazni kívánt típus kiválasztása .....	14
<b>3 A modell felépítésének folyamata .....</b>	<b>15</b>
3.1 Első lépések: Egy volumenű ajánlat, 10 ágens .....	15
3.2 Következő lépés: több volumenű ajánlat, több ágens.....	16
3.2.1 Fokozatok a program bonyolultságának növelésében .....	16
3.3 Explicit kapacitásaukcio szimulációja egy fiktív határmetszéken.....	20
3.3.1 A határmetszék jellemző tulajdonságok – a környezet paraméterei.....	20
3.3.2 Az ágenseket jellemző paraméterek .....	20
3.3.3 A szimuláció eredménye.....	22
<b>4 Kísérlet egy valós explicit kapacitásaukcio reprodukálására .....</b>	<b>23</b>
4.1 A rendelkezésre álló adatok feldolgozása.....	23
4.1.1 A határmetszék, aukciótípus, év kiválasztása .....	23
4.1.2 Statisztikai elemzés a modell pontosságának érdekében.....	23
4.2 Az adatok implementálása a már létező modellbe.....	24
4.2.1 A választott aukcio adatai, implementálásuk.....	24

4.3 A szimuláció eredménye .....	25
4.3.1 Összehasonlítás a valós adatokkal – jó vagy rossz a modell? .....	25
<b>5 A modell továbbfejlesztése: ágensek tanulása .....</b>	<b>27</b>
5.1 Elméleti összefoglaló a tanulási módszerekről .....	27
5.1.1 Megfigyelések alapján történő tanulás .....	27
5.1.2 Tanulás döntési fa alapján.....	27
5.1.3 Megerősítéses tanulás .....	28
5.1.4 Induktív tanulás.....	29
5.2 Megfigyelések alapján történő tanulás implementálása a modellbe .....	29
5.2.1 A megfigyelés tárgya, implementáció a modellbe.....	29
5.2.2 Eredmények kiértékelése, a tanulás hatékonysága .....	32
5.3 Döntési fa alapján történő tanulás implementálása a modellbe .....	35
5.3.1 A döntési fa megalkotása, implementálás a modellbe.....	35
5.3.2 Eredmények kiértékelése, a tanulás hatékonysága .....	38
<b>6 Összefoglalás.....</b>	<b>42</b>
6.1 A megalkotott modellek összefoglalása.....	42
6.2 A modellek által szimulált aukciók jellemzése.....	42
6.2.1 Az első modellek összefoglalása .....	42
6.2.2 A tanuló ágensek modelljei által kapott eredmények összefoglalása .....	42
6.3 A létrehozott szimulációs modell továbbfejlesztésének lehetőségei – a 4M MC [11] modellezése .....	43
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>44</b>

# Összefoglaló

Az európai villamosenergia-piacok összekapcsolása, s ezzel egy egységes európai villamosenergia-piac kialakításának terve régóta él a szakma köztudatában. Az ehhez vezető folyamat célja az uniós belső villamosenergia-piac (IEM) megteremtése, mely a tagállami piacok továbbéléseként ún. multizonális felépítésű.

Az országokat összekötő hálózati elemek átviteli kapacitása legtöbbször nem elegendő a piaci árak különbségét kiegyenlíteni igyekvő nagy volumenű határkeresztezõ villamosenergia-kereskedelelemhez. Szükséges a korlátozott műszaki lehetőségeket figyelembe vevő kapacitászámítási és –elosztási, azaz allokálási eljárások alkalmazása a határkeresztezõ kereskedelem részeként. A kapacitásallokáció kulcsszerepet játszik a rövidtávú ellátásbiztonság fenntartásában, biztosítja a várható szûk keresztmetszetek elkerülését. Ezért is fontos az egyes piaci szereplõknek az általuk igényelt határkeresztezõ kapacitás sikeres allokációja.

Jelen dolgozatomban fókuszpontjában egy ilyen kapacitásaukció szimulálására képes szoftver elkészítése áll, egyszerű ágensek felhasználásával. Ehhez elõször elemzem a kapacitásaukciók mûködését, majd az úgynevezett klíringár meghatározásának háttérét, végül pedig megalkotok egy modellt, amely képes reprodukálni egy piaci szereplõ ajánlattételét.

A megalkotott modell segítségével szimulálok egy határkeresztezõ kapacitásaukciót, majd pedig kiértékelem a kapott eredményeket, megvizsgálom a modell további fejlesztésének lehetőségeit, irányát.

## **Abstract**

The demand for transfer capacities at the transmission interconnections between Control Areas in Europe is usually much higher than the capacity available for electricity trading. It is expected, that as a consequence of market opening according to the market liberalization in Europe, the demand will further increase over time.

Since 2002, the demand for cross border capacity have exceeded the offered capacities in Europe permanently. Thus, the pursue of an Integrated European Electricity Market (IEM) still holds many unsolved challenges for the system operators.

The transfer capacity of the interconnecting transmission lines is limited and most of the time is not enough to fulfill the demand for the energy transfer between the two countries, therefore making a bottleneck situation in that border. To resolve this problem, it is important to have a well-organized transmission capacity auction platform where the market participants can buy the rights of the transmission capacity. It is also important for these participants to make winning bids on the transmission rights for various amount of energy.

This thesis focuses on creating a model which is capable of simulating cross-border capacity auctions using simple agents. To make such a program – it is needed to analyze the background mechanisms of such capacity auctions. The determination method of the clearing price and the bid-making of a fictional auction participant are also key points for this work.

After the short description of the model, the simulation of a capacity auction will be presented using various numbers of agents as bidders and another agent as the auctioneer. Finally, the evaluation of the results and the possibilities of improvement, and the future objectives of this work will be described.

# 1 Bevezetés

## 1.1 A kapacitásaukción definíciója, történelmi háttere

Az Európai Bizottság már 1999-ben kitért a tagállamok által bevezetett piaci modellek, illetve a nemzeti piacok hatékony határkeresztező kereskedelemmel történő összekapcsolódásának kérdéskörére [6] hangsúlyozva, hogy egy valóban egységes (belső) villamosenergia-piac megteremtése a cél, amelyhez a határkeresztező kereskedelmet fejleszteni szükséges. Másképp mondva a hosszútávú cél az egységes Európai villamosenergia-piac létrehozása, melynek kialakításához el kell kerülni azt az állapotot, hogy egymás mellett 25 többé-kevésbé liberalizált nemzeti villamosenergia-piac működjön párhuzamosan. Ennek folyamata már az 1990-es években elkezdődött, és azóta is folyik; hazánk villamosenergia-kereskedelmét érintő legutóbbi ilyen törekvés a 4M MC [11], azaz a cseh-szlovák-magyar-román piac-összekapcsolás.

### 1.1.1 Az explicit kapacitásaukción

Az explicit allokáció esetében a villamos energiát és a határkeresztező szállításához szükséges kapacitásjogot külön-külön, egymástól független módon kell megvásárolni. Az explicit allokáció átlátható, piaci módszere a szabadpiacon az aukción. A kapacitásaukción során a hálózathasználók szervezett keretek között ajánlatot tesznek adott időszakban rendelkezésre álló átviteli kapacitás (ATC – az angol „Available Transfer Capacity” rövidítéséből) igénybevételére. [8]

Az IEM megvalósítása érdekében az Európai Bizottság már 2006-ban előírta a 1228/2003/EK rendelet módosításával a koordinált kapacitásallokációs eljárások bevezetését a kitűzött régiókban, 2007. júliusi határidővel. Az egyes regionális csoportok 2007-től kezdték saját hatáskörben kidolgozni a regionális piacintegráció lépéseit.

### 1.1.2 Az implicit kapacitásaukción

Az implicit kapacitásaukción esetében a határkeresztező energiakereskedelem során a villamos energia kereskedelme és a szállításához szükséges kapacitások értékesítése egy folyamat során történik, ellentétben az explicit kapacitásaukciónal, ahol ez két külön platformon történik. A kapacitások piaci módon történő allokációját az

energiatőzsdén a vevők és az eladók közötti fizikai elszámolással végzik egy úgynevezett elszámolóház közbeiktatásával. Az implicit kapacitásaukciós módszereket jellemzően a napi tőzsdei kereskedések során alkalmazzák. [8]

Az implicit aukciók során az energia árát kiszámító algoritmus figyelembe veszi az egyes árzónák közötti, szállításra rendelkezésre álló kapacitás értékét. Ebből következően az egyes árzónák aukciós ára függ az exportáló és importáló területeken a helyi kereslet és kínálat egyensúlyából adódó lokális piaci áraktól.

### **1.1.3 A szűk keresztmetszetek problémája**

Az európai villamosenergia-piac liberalizációjának elsődleges célja a szabad kereskedés korlátjainak lehető legnagyobb mértékű lebontása, egy belső, nagy európai villamosenergia-piac létrehozása. Ennek egyik fő fizikai akadályát jelenleg a határkeresztező szállításokat korlátozó infrastrukturális szűk keresztmetszetek jelentik, melyek gyakran a határmetszéken, a szomszédos rendszerirányítói hálózatokat összekötő távvezetéseken jelentkeznek. A kontinentális Európa országainak átviteli hálózata sűrűn aláhurkolt topológiájú és jellemzően rövid távvezetésekkel rendelkezik.

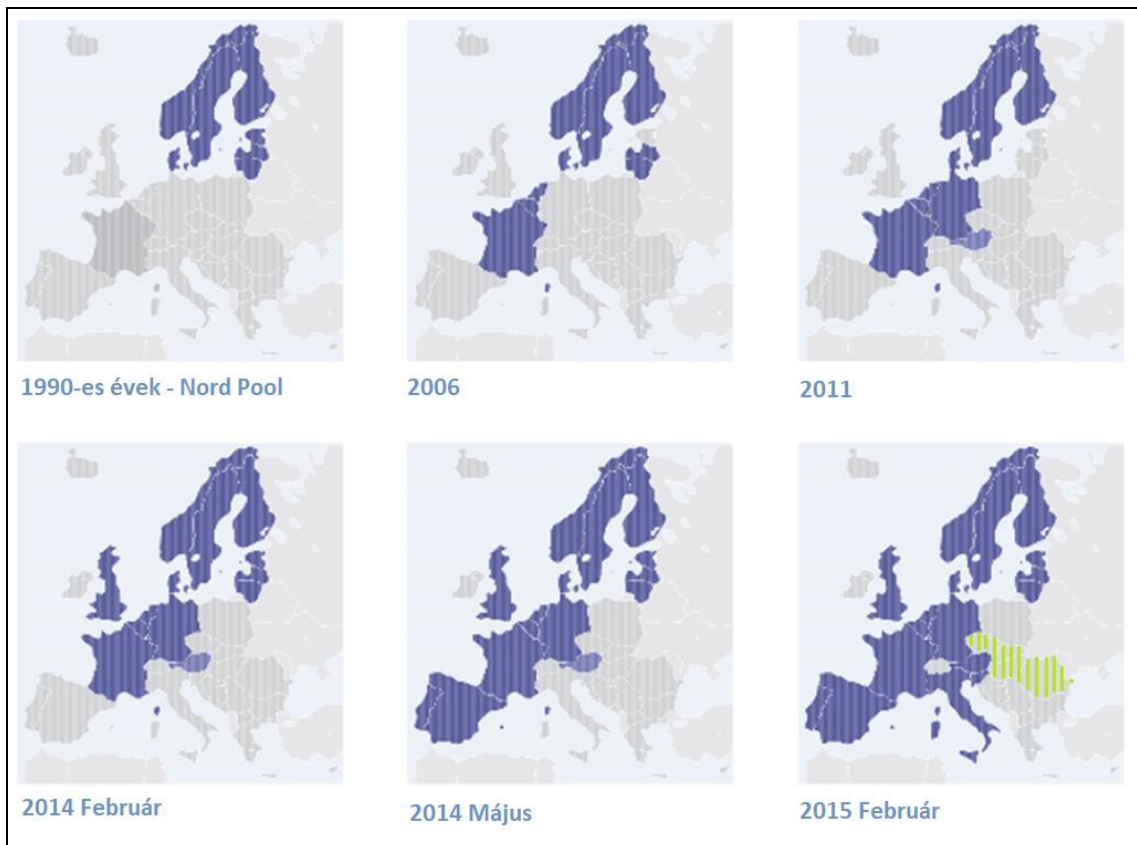
A hálózati szűk keresztmetszetek kialakulásának oka elsősorban a hálózati ágak termikus határárama, amely miatt a rajtuk átvihető energiának minden távvezeték esetében van egy maximuma. Emiatt a gyakorlatban az egyes országok határai között futó villamos távvezetékek átviteli kapacitása legtöbbször nem elegendő az országok piaci igényei szerint keletkező nagy volumenű határkeresztező kereskedelem lebonyolításához. A gyakorlatban ezt nevezzük a szűk keresztmetszet problémájának. [6]

### **1.1.4 Megoldási kísérletek a szűk keresztmetszetek problémájára**

Az egész Európát átfogó, szervezett másnapi villamosenergia-piacra való törekvés történelmileg több, Európán belüli együttműködéssel valósult meg, hosszú évtizedek alatt. Az 1990-es években lokálisan a skandináv országok között létrejött egy megállapodás, melyből megszületett a Nord Pool. [9] Ez a fajta piaci együttműködés hasonló a piac-összekapcsoláshoz, annyi különbséggel, hogy ebben a résztvevő országok villamosenergia-piaci szereplői, elsősorban a termelők kötelezően részt vesznek.

A multiregionális összekapcsolás (MRC, az angol „Multi-Regional Coupling” rövidítéséből) [10] során az ezt követő évtizedek alatt Nyugat-Európában az

Olaszország és Ausztria, Franciaország, valamint Szlovénia közötti piac-összekapcsolt országok csatlakoztak a nagy Nyugat-Európai összekapcsolt piacú országokhoz, melyek a Benelux államok, Franciaország, Németország – így összekapcsolva Európa külön piaccal rendelkező területeit. 2015 májusában a Közép-Nyugat Európai országok (Franciaország, a Benelux államok és Németország) átálltak az áramlás alapú kapacitásaukciós modellre, így még jobban elősegítve az országaik közt kialakuló másnapi villamosenergia-piaci árak konvergenciáját.

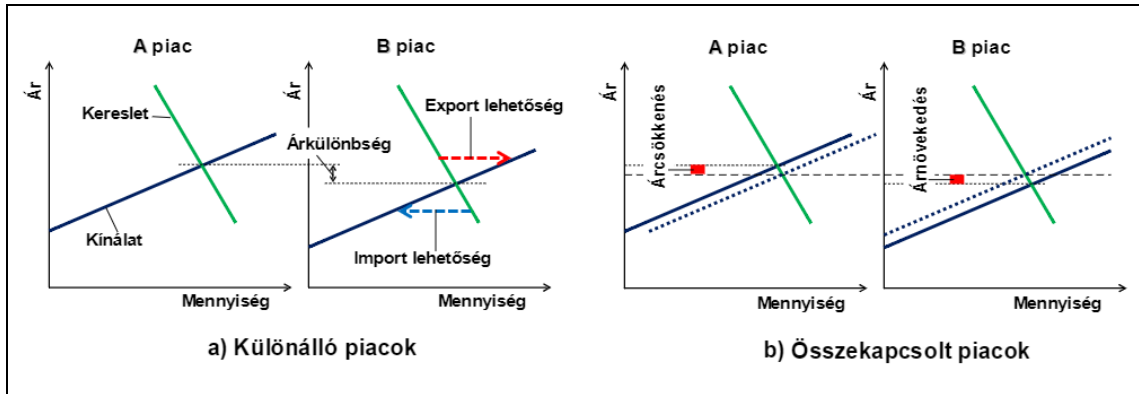


**1. Ábra: A multiregionális összekapcsolás folyamata [12]**

Míndeközben Közép-Kelet Európában Csehország, Szlovákia, Magyarország és Románia között 2014. november 19-én [11] a résztvevő országok nemzeti szabályozó hatóságai létrehozták a piac-összekapcsolást. A projekt technikai és gazdasági célja, hogy elősegítse a négy ország piacainak összekapcsolását, valamint a további, Nyugat-Európai piacok irányába történő kibővítését. A megvalósítás előtt a felek megállapodtak egy olyan megoldás kialakításában, amely a lehető legnagyobb mértékben kompatibilis a nyugat-európai (Multi-Regional Coupling – MRC) régióval. A piac-összekapcsolás alapmotivációja az országok között fennálló szűk keresztmetszetek átviteli kapacitás



allokációjának hatékonyabbá tétele volt. A piac-összekapcsolás hatásait a 2. ábra szemlélteti.



2. Ábra: a piac-összekapcsolás hatása a két ország másnapi villamosenergia-piaci kereskedelmére [8]

Piac-összekapcsolás nélkül, amint az a 2. a) ábrán is látható, két szomszédos ország villamosenergia-piacán eltérő árak alakulhatnak ki. Az adott piac egyensúlyi áránál nagyobb árak esetében növekvő mennyiségű exportra adódik lehetőség, míg kisebb árak esetén növekvő mennyiségű importra. A piac-összekapcsolással elérhető új ár meghatározásához a két ország export, illetve import igényeit egyeztetni szükséges, melyeket görbéként ábrázolva az azok metszéspontjában kialakuló metszésponti ár lesz az összekapcsolt piacokon kialakuló új ár. Ez az ár az olcsóbb piac esetében ár növekedést, míg a drágább piac esetében árcsökkenést fog eredményezni. Mivel a piac-összekapcsolás szervezett piacokhoz kapcsolódik, a keresleti és kínálati görbék egyes pontjait a tőzsdékre beadott eladási, illetve vételi ajánlatokkal helyettesíthetjük a valóságban. Amennyiben a két piacot (ez esetben villamosenergia-piacot) összekötő kereskedési útvonalon szék keresztmetszet áll fenn, a piacok közti csere – esetünkben csak a szabad határkeresztező kapacitás mértékéig lesz lehetséges, amely miatt a két piac árai nem tudnak kiegyenlítődni.

### 1.1.5 A JAO.EU létrejötte és szerepe

2015 június 24-én az európai kapacitás allokációs iroda (CAO az angol „Capacity Allocation Office” rövidítéséből) a CASC.EU-val (Capacity Allocation Service Company) összefogva megállapodtak, hogy létrehoznak egy egységes határkeresztező kapacitás allokációs platformot, a JAO-t (Joint Allocation Office rövidítéséből). [7]

A JAO egy 22 TSO-t (az angol Transmission System Operator rövidítése, magyarul: rendszerirányító) foglal egybe mintegy 19 országból. Feladata a TSO-k közt az éves, havi, illetve napi explicit kapacitásallokációs jogok aukciójának szervezése, valamint koordinálása egy erre szolgáló aukciós platform segítségével. Összesen 29 európai határmetszéken vehet részt az adott piaci szereplő a 19 résztvevő országok között. [7]

## 2 A szimulációs modell alap gondolata, felépítése

### 2.1 Alapvetések, feltételezések, megfontolások

Az alap gondolat a jao.eu-n elérhető kapacitásaukciók eredményeinek vizsgálatából ered, mivel minden fent lévő adat anonim módon szerepel, így rendkívül nehéz az egyes résztvevők ajánlatainak meghatározása, azaz, hogy hány és milyen ajánlatot adott le egy résztvevő. Emellett nehéz az aukcióban résztvevők ajánlattételi stratégiájának feltárása is, mely az előzővel együtt egy ilyen aukción ajánlatot tevő résztvevő számára fontos információ, felhasználása akár hozzájárulhat az aukcióban való sikeres részvételhez. A platformról a kapacitásaukció végeredményét, illetve a beérkezett ajánlatok aggregált görbáját lehetséges lekérni, amely megnehezíti annak háttér folyamatainak tanulmányozását, megértését.

Az elsődleges cél egy olyan szimulációs modell létrehozása, amely képes egy egyszerű kapacitásaukció szimulálására. Az aukcióban résztvevő szereplők felhasználói beavatkozás nélkül tesznek ajánlatot, valamint a kezdeti paraméterek beállítása után – az aukció szimulációja lefut. Ezt követően az aukció résztvevőit modellező egyszerű, reflexszerű ágensek ajánlattételének fejlesztése a cél, mely során a modell fokozatos bővítése mellett az egyes ágensek ajánlattételének javítása érdekében különböző tanulási módszerek kerülnek alkalmazásra a modellben.

Egy kapacitásaukció modellezéséhez először is szükséges meghatározni egy ilyen aukció paramétereit. Jelen dolgozat csupán az explicit kapacitásaukció modellezésével foglalkozik, amely során a résztvevők különböző mennyiségű átviteli kapacitásmennyiség allokálására tesznek ajánlatokat különböző árakon. [16] A beérkezett ajánlatokat ezután ár szerint csökkenő sorrendbe rendezve meghatározható az úgynevezett klíringár. Ez úgy határozható meg, hogy a csökkenő sorrendbe rendezett ajánlatokat egyesével összegezzük a rendelkezésre álló átviteli kapacitásmennyiség (ATC) értékéig, majd, amikor az ajánlatok összértéke eléri, vagy épp meghaladja az ATC értékét, a legutolsó hozzáadott ajánlatért felajánlott ármennyiség lesz a klíringár. A klíringártól függően kerülnek ki a nyertes ajánlatok, azok elszámolási ára pedig meg fog egyezni a klíringár értékével. Így kerülnek kiválasztásra az aukció nyertes résztvevői, valamint a jog az általuk nyert kapacitásmennyiség allokálására.

## 2.2 A lehetséges szimulációs platformok összehasonlítása

Egy ilyen aukciót sokféleképp, számos programozási nyelven írt programmal lehetséges szimulálni. A megvizsgált nyelvek közé tartozik a C, C++, JAVA, MATLAB. A program írásához való platform kiválasztásnál szempont volt az, hogy a nyelv támogassa a mesterséges intelligenciával való szimulációt, valamint az annak továbbfejlesztését különböző módszerek implementálásával, mint például az ágensek különböző tanulási módszerei. [14]

A C, illetve C++ nyelvek nagy előnye a hardverközeli programozásra való lehetőség, illetve a gyorsaság. Előnye még a C++ nyelvnek a szimuláció szempontjából, hogy erősen objektum-orientált, így az egyes résztvevők akár bonyolult objektumokként is leképezhetők lennének. Hátrányuk azonban az adattárolás nehézsége, a beolvasás, illetve írás bonyolultsága, valamint az, hogy nagy adatmennyiségek esetén lassan végezhető el a mátrixműveletek, mint például a transzponálás.

A JAVA nyelv kifejezetten támogatja a mesterséges intelligenciával való szimulációt, a BME Informatikai mérnök – képzésén szerepel is a mintatantervben egy „Mesterséges Intelligencia” nevű tárgy, amely során a hallgatók JAVA alapú mesterséges intelligencia-entitások írásával foglalkoznak, melyeket különböző problémák megoldására tanítanak be. Számos cikk foglalkozik JAVA alapú, ágens-alapú modellezéssel, melyek mind bonyolult és speciális problémák, helyzetek szimulációját végzik. Az általam szimulálni kívánt aukcióhoz a JAVA programozási nyelv megfelelő lett volna, azonban a szimulációhoz a teljes fejlesztőkörnyezet használatát el kellett volna sajátítani az alapoktól, valamint a JAVA nyelvben való programozás - előismeretek hiányában rengeteg időbe került volna, és nem hozott volna annyival jobb eredményeket, mint az általam választott nyelvben való szimuláció.

A választás végül a MATLAB nyelvre esett. Ezen a nyelven ugyanis számos, mesterséges intelligenciát alkalmazó tanulmány látott már napvilágot, többek között az ágens-alapú mikrogrid-vezérlésről, [15] a lakások aukcióját végző ágens-alapú szimulációig. [14]

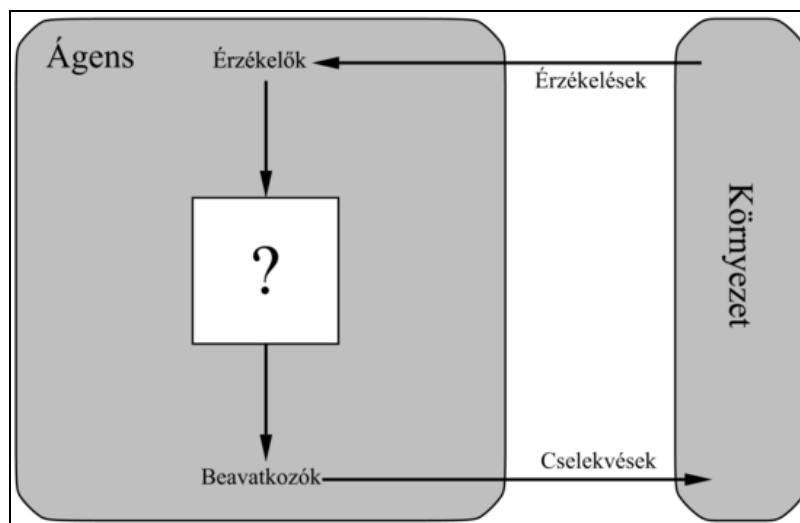
## 2.3 A résztvevő ágensek típusainak kiválasztása

A mesterséges intelligenciával való szimulációhoz használt módszerek közül a MATLAB számos lehetőséget ajánl, mint például a neurális hálókkal való szimuláció és

ágens-tanítás, a simulink-kel való folyamat-vezérelt szimuláció, [15] valamint az egyszerű ágensekkel való szimuláció. [14] A választás az egyszerű ágensekkel való szimulációra esett, mivel ez a módszer a leginkább szabadon alakítható, így a modell fejlesztéseit így a legegyszerűbb implementálni.

### 2.3.1 Az ágens, mint fogalom

Ennélfogva egy ágens az ő bizonyos tulajdonságokkal bíró környezetében létezik, melynek történéseit az érzékelői segítségével nyomon követi [17] és egy belső döntési mechanizmus segítségével eldönti, hogy hogyan reagáljon rájuk.



3. Ábra: Kapcsolat az ágens és a környezete között [17]

Ha a környezet összes lehetséges történésehez képesek vagyunk meghatározni az adott ágensünk lehetséges cselekvéseit, akkor teljesen definiáltuk az ágens, az a környezetében bekövetkező bármilyen változást érzékelve képes megfelelően reagálni rájuk. Formálisan ez azt jelenti, hogy az ágens viselkedését annak az ágensfüggvénye írja le, ami a környezet adott történéseit egy cselekvésre képezi le. Egy ágens környezetével való kapcsolatát mutatja be a 3. ábra.

### 2.3.2 Ágens típusok

Az ágenseknek öt fő fajtáját [13] különböztetjük meg:

1. **Egyszerű reflexszerű ágens**, amely az adott történésre megadott cselekvéssel válaszol
2. **Modell-alapú ágens**, amely információt tárol arról, hogy hogyan működik környezete és egy benne felállított hasznossági függvény szerint súlyozva a lehetséges cselekvéseit – reagál rájuk

3. **Cél vezérelt ágens**, mely nyomon követi a környezetének változásait, és az előre felállított céljai elérésének érdekében a cselekvésével alkalmazkodni próbál hozzá, annak érdekében, hogy a kitűzött célhoz közelebb kerüljön
4. **Tanuló ágens**, amely igyekszik felfedezni a környezetét, annak minden történésére reagálni próbál, és az azokra kapott visszajelzések alapján felépíti saját magában a környezet modelljét
5. **Haszon-orientált ágens**, mely a környezetéről felépített modellt súlyozza egy hasznossági függvénnyel, mely után a lehető legnagyobb haszon javára hozza meg a döntéseit

Ezekben belül természetesen még rengeteg alfajtája létezik még az ágenseknek, mind a modelljeik szerint, mind a tanulási módszereik szerint, mind pedig a bonyolultságuk szerint, ezek néhány fajtája a későbbiekben ismertetésre is kerül.

### **2.3.3 Az alkalmazni kívánt típus kiválasztása**

Az egyszerű, egytermékes szimulációhoz elegendő a reflexszerű ágens, a modell realiztikusságának növelésével azonban az általuk figyelt környezeti történések bővítése mellett az egyes ágensek ajánlattételi módjának fejlesztése is szükséges. Ez magában hordozza azt is, hogy a szimuláció realiztikusságának növeléséhez két vagy több lefuttatott aukció eredményei szükségesek, melyek során a résztvevő ágensek képesek tanulni és módosítani az ajánlattételüket annak függvényében, hogy az előző aukcióban nyertek-e, vagy sem.

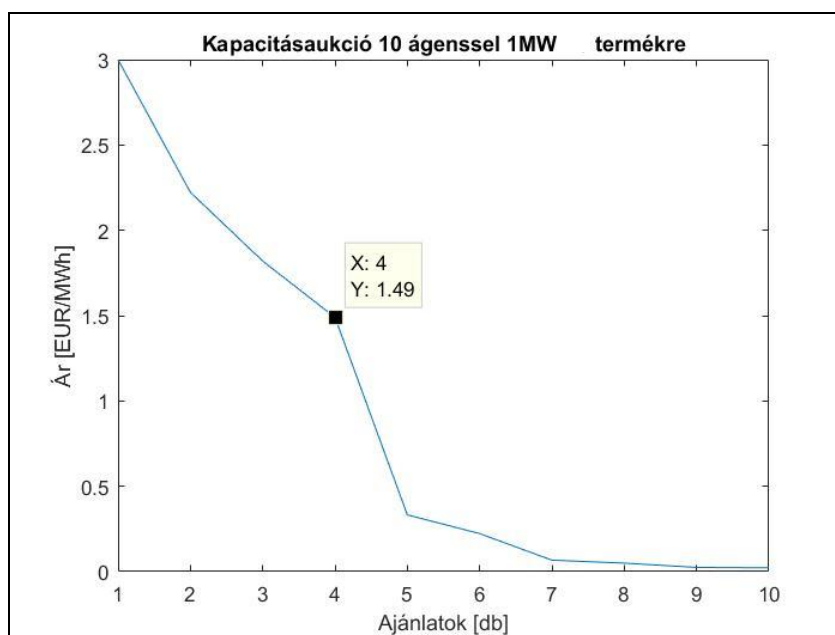
## 3 A modell felépítésének folyamata

### 3.1 Első lépések: Egy volumenű ajánlat, 10 ágens

Az általam MATLAB-ban megalkotott modell működését két fő kezdeti paraméter beállításával tudom befolyásolni. Ezek a paraméterek: az aukcióban résztvevő ágensok száma, valamint a rendelkezésre álló átviteli kapacitásmennyiség (ATC).

Az első megalkotott modellben az ágensok mindössze egy termékre tehetnek ajánlatot, kezdetben minden ágens csupán egyet.

Egy ilyen szimuláció eredményét mutatja be a 4. ábra, melyen 10 ágens 1 MW-ra adott árajánlatai látszódnak. A rendelkezésre álló kapacitásmennyiség 4 MW volt, amellyel a klíringár 1,49 EUR/MWh-ra adódott, ezt az ábrán fekete négyzet jelöli. Amint az leolvasható, 4 MW-os ATC-hez 4 nyertes ágens tartozik, amely megfelel az elvártaknak, mivel ezen első modell esetében minden ágens 1 MW-ra adott le ajánlatot.



4. Ábra: Kapacitásaukció szimulációja egy termékkel, 10 résztvevővel

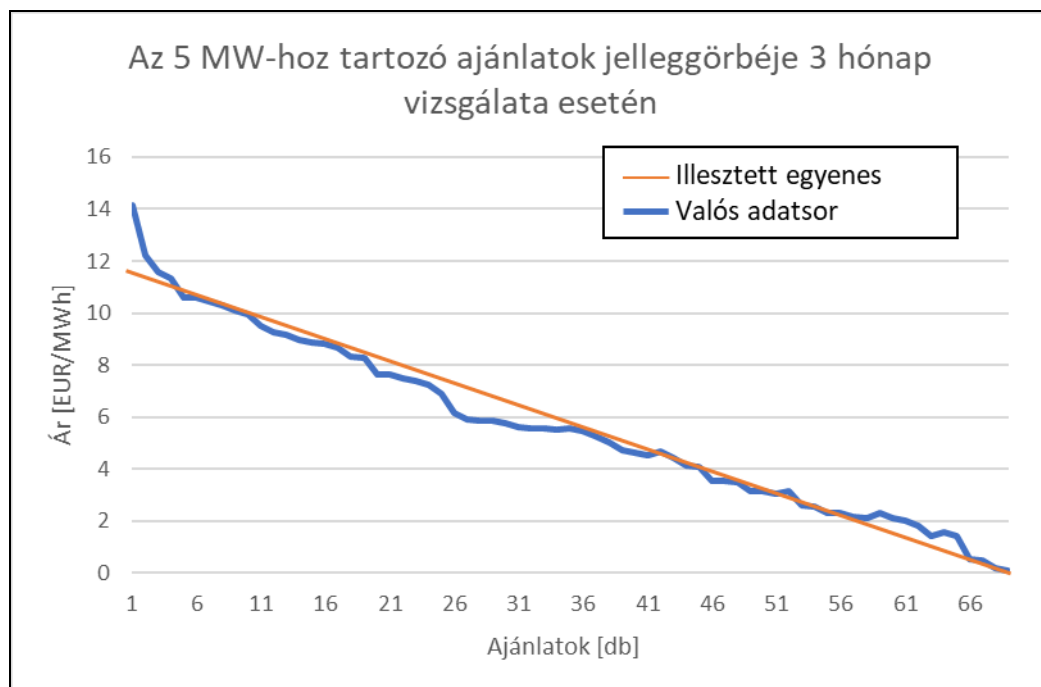
Az egyes ágensok reflexszerűek, a környezettől kapott igényre véletlenszerűen adnak ajánlatot, mely maximális értéke minden ágens esetében 3 [EUR/MWh], minimális értéke pedig 0,01 [EUR/MWh].

## 3.2 Következő lépés: több volumenű ajánlat, több ágens

### 3.2.1 Fokozatok a program bonyolultságának növelésében

A szimuláció első verziója helyes eredményeket adott ugyan, relevanciájukat tekintve egy valós kapacitásaukciótól nagyon messze álltak. A következő lépés az egyes ágens ajánlattételi stratégiájának finomítása, illetve kiterjesztése volt. A második verzióban minden ágens három különböző mennyiségre adhatott le ajánlatot, melyek az 1 [MW], a 3 [MW], valamint az 5 [MW] voltak. Az árak azonban, amiket az egyes ágensek tettek, még mindig véletlenszerűek voltak 0 és 4 [EUR/MWh] között.

A következő lépésben az ágens ajánlattételi stratégiája került finomításra. A JAO.EU-n elérhető havi kapacitásaukciók ajánlatait alapul véve megvizsgáltam, hogy a valóságban átlagosan milyen jelleget követ az aukcióban résztvevők ajánlattétele. Ehhez megvizsgáltam 2017-ben a SK-HU határmetszéken folytatott havi kapacitásaukciókra beérkező ajánlatok közül az 5 [MW] -os ajánlatokhoz tartozó ár értékeket. Az ezekből összeálló görbe látható az 5. ábrán.



5. Ábra A valós ajánlatok ár értékeinek jelleggörbéje

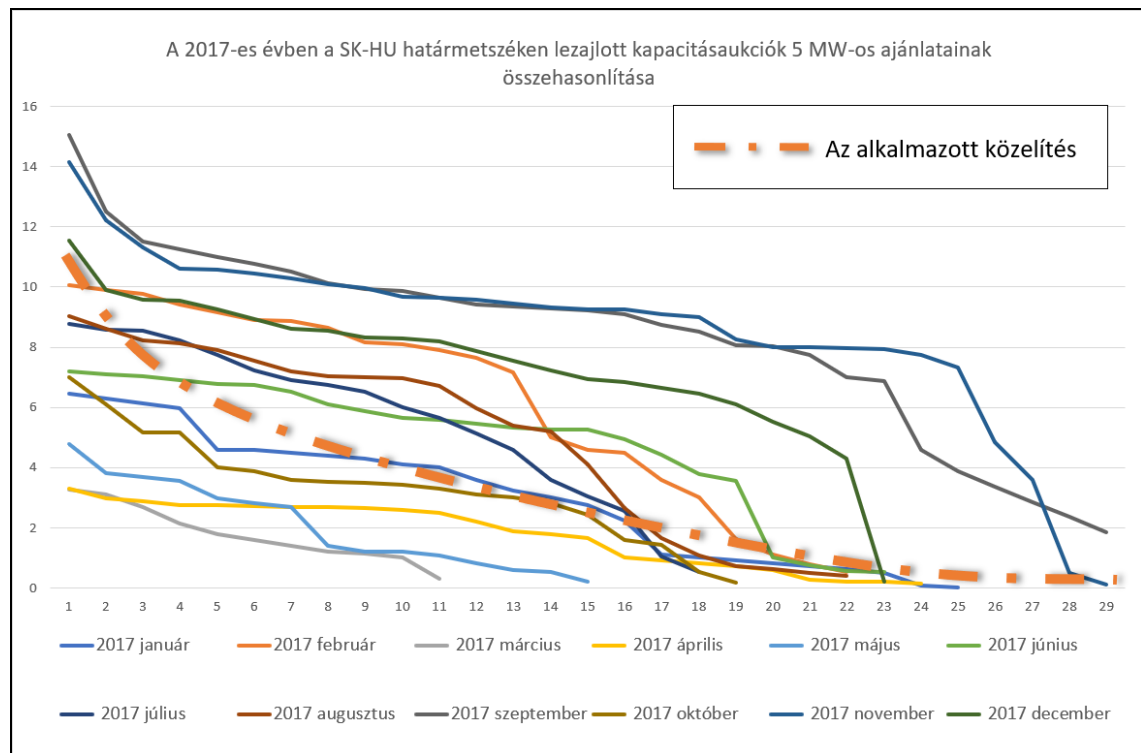
Amint látható az ábrán, az egyes piaci szereplők ajánlattétele lineáris jelleget mutat, az egyes aukciók során a beérkező ajánlatok azonban általában a lineárisnál nagyobb fokú,  $1/x$  szerint csökkenő, vagy exponenciálisan lecsengő görbékkel közelíthető jelleget mutattak az egyes hónapok aukcióira beérkező ajánlatokat tekintve,



mely jellegek aukciónként változnak, így én az exponenciálisan lecsengő jellegű közelítést választottam a modellezéshez.

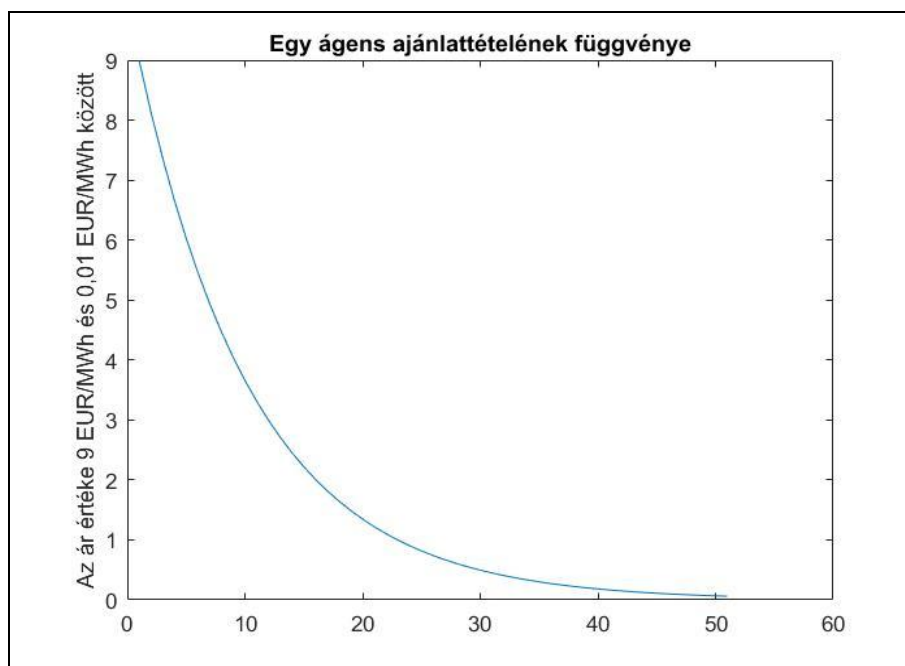
A 6. ábrán az egyes hónapok aukciói során az 5 MW-os mennyiségre beérkezett árajánlatok láthatók. Az 5 MW-os mennyiséget az egyes aukciókba beérkező ajánlatok közül – mint az egyik leggyakoribbat választottam; Emellett hasonlóan gyakori volt az 1 MW-os, a 10 MW-os, valamint a 20 MW-os mennyiségű ajánlat is.

Amint az az ábráról leolvasható, az egyes hónapok aukcióira változó számú ajánlat érkezett be, mely megnehezítette az adatok elemzését. Az általam alkalmazott közelítést mutatja a narancssárga szaggatott vonal, melyet a modellben az exponenciális eloszlásfüggvény sűrűségfüggvényének egy lineárisan felskálázott, 50 pontot alkotó értékhalmozásával közelíték.



**6. Ábra: Az alkalmazott közelítés háttere**

Ez alapján egy közelítéssel élve az egyes ágensek ajánlattételi stratégiáját úgy módosítottam az új modellben, hogy egy ágens egy termékre 0,01 és 9 [EUR/MWh] között, exponenciális eloszlást követve tegyen ezentúl ajánlatot. Pontosabban az exponenciálisan csökkenő jelleget mutató, 50 pontból álló ár-görbéből az adott ágens, az aukció során az adott termékhez kiválaszt egy pontot, amelynek értéke az általa leadni kívánt árajánlat lesz. Ez a görbe látható a 7. ábrán.



**7. Ábra: Egy ágens ajánlattételi stratégiája az új modellben**

Ez egyben azt is jelenti, hogy az ágensek immár nem véletlenszerű értékekkel licitálnak, hanem ezen a görbén az 50 pont közül ajánlatonként egyet kiválasztva, melynek valószínűsége is egyben exponenciális eloszlást fog követni.

Ennek a jelentősége a későbbiekben mutatkozik majd meg, mivel ezzel a változással bevezethetővé vált a tanuló ágenstípus. Tanulni a későbbiekben az egymást követő számos futtatás során fog tudni egy adott ágens, mégpedig egy `have_won` nevezetű flag bittel, mely minden aukció során azt mutatja meg az adott ágens számára, hogy az előző aukció során nyert-e, vagy sem. Amennyiben nyert az ágens, értéke 1 lesz, egyébként, beleértve az inicializáláskor felvett értékét is – 0 lesz.

Annak érdekében, hogy egy ágens még változatosabb, a valósághoz még közelebb álló ajánlatokat tegyen, bevezetésre került még egy `bid_type` nevű változó is. Ennek értéke 0, 1 vagy 2 lehet, mely számok jelzik, hogy az adott ágens milyen ajánlattételi stratégiával rendelkezik, azaz, hogy hány ajánlatot tesz, és ezek az ajánlatok milyen volumenű kapacitásokra milyen ár mellett vonatkoznak. Az ágens `bid_type` változóik értékeit a modellben első lépésben véletlenszerűen választják ki, azonban a következő, realiztikusabb modellezés érdekében ezek értékei a jövőben szintén a `have_won` flagbit függvényében alakulnak majd.

Amennyiben `bid_type` változó függvényében az egyes ágens ajánlatainak lehetséges értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

	<b>Kapacitásmennyiség (MW)</b>	<b>Ár (EUR/MWh)</b>	<b>Ajánlatok száma (db)</b>
bid_type = 0	1 – 50	0,5 – 9	5
bid_type = 1	50 – 100	0,6 – 4	7
bid_type = 2	60 – 150	0,01 – 3	3

**1. Táblázat: az egyes ágensek ajánlattételi intervallumai bid\_type függvényében**

Amint az a táblázatból látszik, egy ágens az új modellben 3, 5, vagy 7 ajánlatot adhat le. Ennek bevezetése a valós havi kapacitásaukciók elemzésével vetődött fel. Egy valós kapacitásaukció során ugyanis egy résztvevő általában nem csupán egy ajánlattal indul, hanem legalább hárommal. Ez az egyes aukciók résztvevőinek számából, valamint a beérkezett ajánlatok mennyiségének összevetéséből egyértelműen látszik, melyet a 2. táblázat foglal össze. Megvizsgáltam a 2018-as év havi kapacitásaukcióit, a SK-HU határmetszéken, melyek eredményeképp

<b>Hónap</b>	<b>Résztvevők száma (db)</b>	<b>Beérkezett ajánlatok száma (db)</b>	<b>Ajánlatok száma/ résztvevők száma (átl. db)</b>
január	23	147	6
február	32	169	5
március	32	137	4
április	31	127	4
május	29	141	5
június	34	172	5
július	28	138	5
augusztus	29	140	5
szeptember	18	106	6
október	25	107	4
november	28	169	6
<b>Teljes év átlaga:</b>	<b>19</b>	<b>141</b>	<b>5</b>

**2. Táblázat: Valós havi kapacitásaukciók átlagos ajánlatainak száma**

A valós adatokkal összevetve az általam elkészített szimulációs modell ágensei átlagosan megközelítőleg annyi ajánlatot adnak le aukciónként, mint a szlovák-magyar határmetszék havi kapacitásaukcióinak résztvevői, ezek a számok pedig már sokkal

közelebb állnak egy valóságos kapacitásaukciót jellemző értékekhez, mint álltak az első szimulációs modellben.

A további szimulációkhoz – mivel a továbbiakban mind a modellezés, mind pedig az ajánlattétel javítása is a munkám célja – az ágensek ilyen fokú bonyolultsága, valamint az ajánlattételi stratégiája csupán egy fokozatként megfelelő, vagyis a következő szimuláció az így kialakított környezetben, az így létrehozott ágensek segítségével fog történni, mely után bevezetésre kerül az ágensek tanulási képessége, valamint a tanulásra való módszerek implementálása az ágensek

### **3.3 Explicit kapacitásaukció szimulációja egy fiktív határmetszéken**

#### **3.3.1 A határmetszék jellemző tulajdonságok – a környezet paraméterei**

A modell elsődleges, a környezetet jellemző paramétere az ATC értéke, azaz a kapacitásaukció során a rendelkezésre álló átviteli kapacitásmennyiség. Emellett minden inicializáláskor beállítható a szimuláció során az aukció(k)ban résztvevő ágensek száma (`number_of_agents`), a szimuláció hossza, azaz, hogy hány, ugyanolyan paraméterekkel rendelkező kapacitásaukció szimulációja történjen az adott futtatás során (`length_of_simulation`). Ennek értéke egyetlen határmetszéken történő egyetlen explicit kapacitásaukció szimulációja esetében 1, azonban a tanuló ágensek bevezetése esetén a jövőben értéke 2-vagy több lesz.

Az ATC értékét a fiktív határmetszék szimulációja során 300 MW-ra választottam, míg az aukcióban résztvevő ágensek számát 22-re, a szimuláció hosszát pedig 1-re.

#### **3.3.2 Az ágenseket jellemző paraméterek**

Minden ágens rendelkezik 5 darab belső változóval, melyek meghatározzák annak cselekvését. Ezek inicializálása a szimuláció elején történik, azaz minden szimuláció során az adott ágens máshogy fog viselkedni, így az eredmények nem lesznek statikusak, bizonyos határokon belül minden szimuláció más végeredménnyel fog járni.

Az ágensek tulajdonságait leíró változók egy Nx6-os mátrixban vannak tárolva, melynek az értékadása az inicializáció során az alábbiak szerint történik.

- Az ágensek első tulajdonsága az `agent_ID` – ez különbözteti meg az ágensek által leadott ajánlatokat egymástól. Ennek kezdetben az értéke minden ágens esetében más, kezdve 1-től egészen N-ig, ami ezesetben megegyezik a már korábban említett `number_of_participants` változó értékével.
- A második tulajdonságuk az ajánlattételüket jellemző `bid_type` változó, melynek értékei csak a 0,1,2 számok lehetnek. A `bid_type` változó értékei szerinti ajánlattételi módszereket szemlélteti az 1. táblázat.
- A harmadik és negyedik jellemző attribútuma egy ágensnek a modellben a `have_won` és a `previous_have_won` flagbitek. Ezek azt szolgáltatják jelezni, hogy az adott ágens az előző, illetve a kettővel ezelőtti aukció során nyert-e, vagy sem. A sikeres aukciót 1-gyes, a sikertelent 0-s szám kódolja.
- Az ötödik attribútuma egy ágensnek a `determination` nevezetű változója (magyarul: eltökéltség). Ez azt hivatott a későbbi szimulációk során mérni, hogy egy ágensnek mennyire van motivációja indulni egy aukción. Az elkötelezettség értéke 1-ről indul és minden aukció, amin veszít az adott ágens – csökkenti ennek értékét 0,1-gyel. Amennyiben az elkötelezettség leesik 0-ra, az az ágens a következő kapacitásaukción nem fog indulni.
- A hatodik és egyben utolsó attribútuma egy ágensnek a `prev_interval` nevezetű, vagyis az előző aukció során az ágens árajánlatának intervallumát tároló változó. Ennek értéke 10 és 50 között változhat, megmutatva, hogy az 50 pontból álló ajánlattételi görbének melyik intervallumáról választ árajánlatot az ágens.

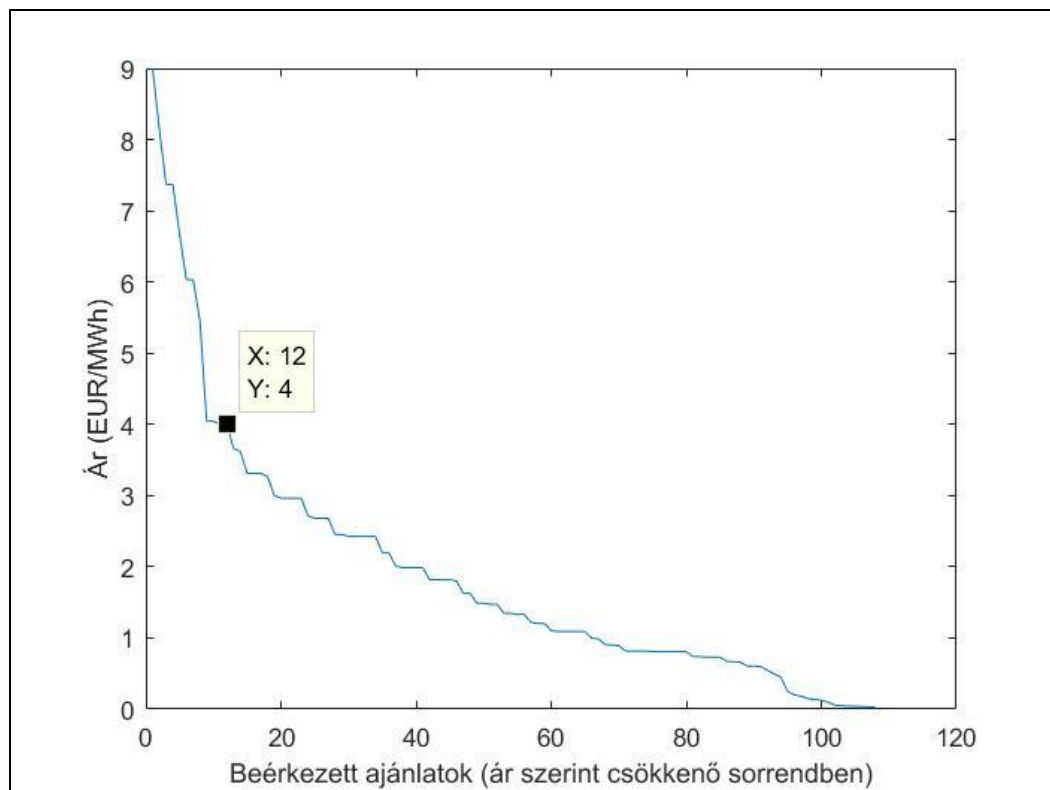
### 3.3.3 A szimuláció eredménye

A fent említett paraméterek mellett a szimuláció a következő eredményeket hozta:

- A klíringár értéke 4 EUR/MWh-ra adódott
- A 22 résztvevő ágens közül mindössze 8 nyert, összesen 12 ajánlattal. Ezek közül az ajánlattételi stratégiája (`bid_type`) 6-nak volt 0-ás, 2-nek 1-es, valamint 0-nak 2-es.

Ez arra enged következtetni, hogy ebben a modellben azok az ágensok, akik a 0-s stratégiát kapták, sikeresebben vettek részt az aukcióban, mint azok, akik az 1-es, vagy 2-est. Ez főként annak az oka, hogy a 0-s stratégia szerint egy ágens 5 ajánlatot is lead, amelyek viszonylag kisebb kapacitásmennyiséghez (1 és 50 MW közötti) társulnak, viszonylag magas árral (0.5 és 9 EUR/MWh közötti érték)

A szimuláció eredményeképp megjelennek a képernyőn a beérkezett ajánlatok ár szerint csökkenő sorrendbe rendezett értékei, melyről a nyertes ajánlatok számának ismeretében könnyedén leolvasható a klíringár értéke is. Ez a rendezett ajánlat-sorozat a 8. ábrán látható, alább.



8. Ábra: Fiktív határmetszék explicit kapacitásaukciójának eredménye 1 futtatás esetén

## **4 Kísérlet egy valós explicit kapacitásaukció reprodukálására**

A megalkotott modell ellenőrzése céljából mintegy referenciaként céлом volt egy valós kapacitásaukció reprodukálásának megkísérlése. Ehhez szükséges volt egy alkalmas határmetszék (annak elemzéséhez elegendő rendelkezésre álló adattal) kiválasztása. Ezek után kiválasztottam a reprodukálási kísérlet alanyát, egy valós, már lezajlott explicit kapacitásaukciót, melyet az arról rendelkezésre álló adatok segítségével megpróbáltam reprodukálni. A kiválasztott aukció nem volt semmilyen szempontból különleges, véletlenszerűen választottam ki a már lezajlott aukciók közül.

### **4.1 A rendelkezésre álló adatok feldolgoása**

#### **4.1.1 A határmetszék, aukciótípus, év kiválasztása**

Alkalmas határmetszékként egy, általam már ismert és sokat tanulmányozott határmetszékét választottam, a szlovák-magyart. Az aukciótípus kiválasztásánál két aukciótípus állt fenn lehetőségként: éves, valamint havi. Az éves explicit kapacitásaukciónak az a hátránya, hogy a rendelkezésre álló adatmennyiség sokkal kevesebb, mint a havi aukció esetében. Ez érthető, hiszen míg 2016 óta éves kapacitásaukcióból mindössze három volt, havi aukcióból ezalatt mintegy 35 zajlott le.

#### **4.1.2 Statisztikai elemzés a modell pontosságának érdekében**

A SK-HU határmetszék statisztikai elemzésének fókuszpontjában az aukcióban résztvevők, valamint a nyertes résztvevők álltak.

A 3. táblázat tartalmazza a kigyűjtött adatokat, valamint azok átlagait, melyet támpontként használtam a szimulációban résztvevők számának meghatározásához.

Emellett a határmetszék jellemző harmadik fontos mennyiségről is készítettem statisztikai elemzést, a rendelkezésre álló határkeresztező kapacitásmennyiségről. Ennek értéke az évek során alig változott, 2016-ban minden hónapban 451 MW volt, míg 2017-ben és 2018-ban 450 MW volt. Ez alapján a reprodukálni kívánt, SK-HU határmetszék ATC értékét a modellben 450 MW-ra állítottam be.

Az aukcióban résztvevők száma az elmúlt 3 évben átlagosan 26 volt aukciónként, melyből átlagosan 12 résztvevő nyert. Ez egyfajta irányszám a kapacitásaukciónak sikeres modellezésének érdekében, mivel, ha sokszor lefuttatva a szimulációt átlagosan ehhez közeli eredmények jönnek ki, az azt jelenti, hogy az ágensek ajánlattevő módszere hasonló ahhoz, ahogyan a valós piaci szereplők gondolkodnak ajánlattevéskor.

Hónap:	2016-os év résztvevői/nyertesei	2017-es év résztvevői/nyertesei	2018-as év résztvevői/nyertesei	Az egyes hónapok átlagai
Január	18/10	25/10	23/14	22/11
Február	23/15	24/10	32/14	26/13
Március	22/6	27/13	32/17	27/12
Április	24/12	28/11	31/14	28/12
Május	25/12	29/16	29/14	28/14
Június	24/12	26/14	34/14	28/13
Július	21/8	21/14	28/12	23/11
Augusztus	26/8	26/12	29/13	27/11
Szeptember	22/11	26/13	18/13	22/12
Október	25/7	20/13	25/18	23/13
November	30/12	29/14	28/14	29/13
December	31/11	26/13	N/A	28/12
Átlag:	24/10	26/13	28/14	26/12

3. Táblázat: a SK-HU havi explicit kapacitásaukciók statisztikai adatai az elmúlt 3 év alapján

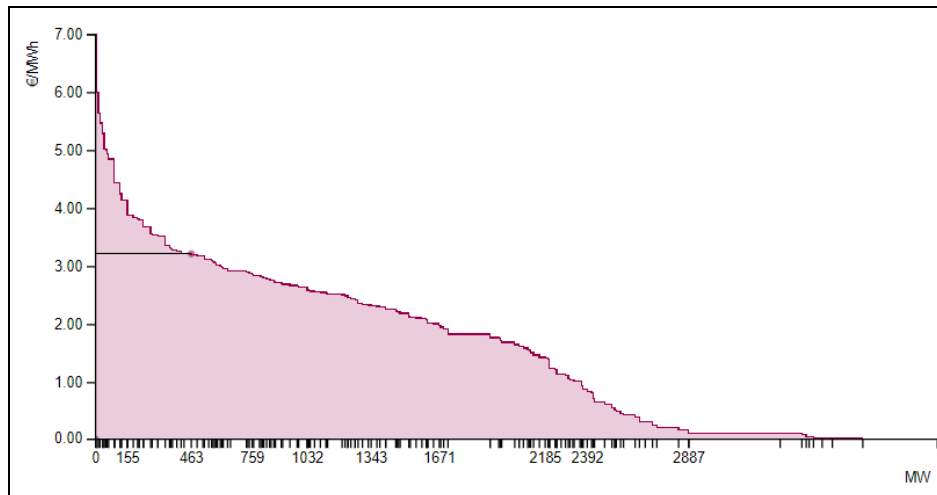
## 4.2 Az adatok implementálása a már létező modellbe

### 4.2.1 A választott aukció adatai, implementálásuk

A választott, már lefolyt kapacitásaukción a SK->HU irányában a 2018 június havi aukción, melynek eredménye a JAO.EU oldalon elérhető. Ennek 34 résztvevője volt, melyből 14-en nyertek kapacitásjogot 3,21 EUR/MWh ár mellett. A rendelkezésre álló



kapacitás 450 MW volt, az összesen igényelt kapacitásmennyiség pedig 5387 MW volt, ami a résztvevők összesen beérkező 171 ajánlatából állt össze.



**9. Ábra: A választott kapacitásaukciónak eredménye [7]**

A szimuláció végeredményeként egy ehhez hasonló végeredmény reprodukálása az elvárás a modellel szemben.

### 4.3 A szimuláció eredménye

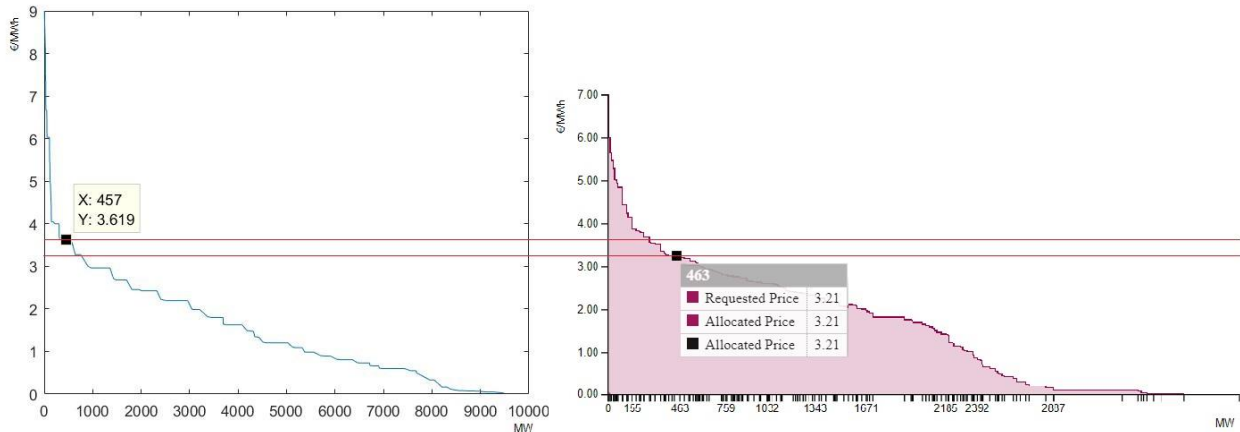
A szimulációhoz először a bemeneti paraméterek beállítása volt szükséges. A résztvevők számát 34-re állítottam, a rendelkezésre álló átviteli kapacitás mennyiségét pedig 450-re, az elérhető adatok alapján.

A lefuttatott szimuláció eredményeként a klíringár értéke 3.6193 EUR/MWh-ra adódott, amely 0,4093 EUR/MWh-val nagyobb, mint a valóságban lezajlott kapacitásaukciónak klíringára. A szimuláció végeredményében a 34 résztvevő ágens közül 15-en nyertek, ami 3-mal több nyertest jelent, mint a valós kapacitásaukciónban. Emellett a beérkező ajánlatok száma, amely a valós aukciónban 171 volt, a reprodukációs kísérlet során 172-re adódott, amely nagyon közel áll a valóságban beérkezett ajánlatok számához. Ezzel szemben azonban az összes beérkezett ajánlat értéke, azaz az összes igényelt kapacitásmennyiség 9480 MW-ra adódott, amely majdnem kétszer akkora, mint a valós aukciónra beérkezett összes igényelt kapacitásmennyiség, ami 5387 MW volt.

#### 4.3.1 Összehasonlítás a valós adatokkal – jó vagy rossz a modell?

A kapott eredmények összehasonlításának első lépése a két, eredményként kapott görbe összehasonlítása. Ezek a 10 a.) és 10 b.) ábrán láthatók. A beérkezett

ajánlatok mennyiségét illetően, valamint a klíringár értékében a modell elég pontosan reprodukálta a valós eredményeket, azonban az ajánlatok volumenét illetően messze nagy volumenű ajánlatok érkeztek be az eredetihez képest. Ez az ágensek ajánlattevő stratégiájának tudható be, valamint annak, hogy ebben a modellben mindegyik ágens kvázi véletlenszerűen kapja meg a három ajánlattevési stratégia egyikét.



**10. Ábra: A szimulált (bal oldalon) és a valós (jobb oldalon) [7] aukció eredményeinek összehasonlítása**

## **5 A modell továbbfejlesztése: ágensek tanulása**

### **5.1 Elméleti összefoglaló a tanulási módszerekről**

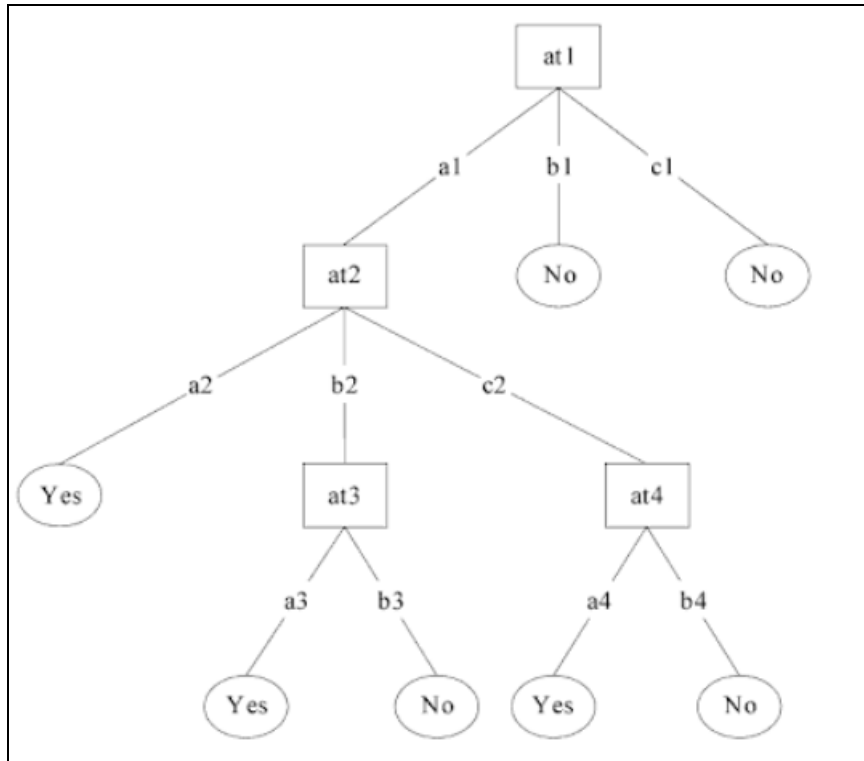
Az ágensek tanulásának elsődleges célja az, hogy javítsák a cselekvésre való képességüket a jövőben, hogy a döntéseik hasznosságát javítsák. Egy olyan ágens döntéshozatala, amely valamilyen elven tanul - jellemezhető két alkotóelemmel. Ezek egyike egy cselekvő rész, amely a környezet változásait érzékelve eldönti, hogy arra reagálva milyen cselekvést válasszon, és egy tanuló rész, amely képes módosítani a cselekvő részt annak érdekében, hogy a későbbiek során az ágens jobb döntéseket hozzon.

#### **5.1.1 Megfigyelések alapján történő tanulás**

A megfigyelések alapján történő tanulás során az ágens figyeli a környezetének számára releváns tulajdonságait, valamint az általa hozott döntések eredményét és egy meghatározott cél érdekében módosítja a saját döntési mechanizmusát. Ebben a legfontosabb eszköze a visszacsatolás, mely segítségével a környezetéből nyert információk jellegéből kiindulva módosítja a saját cselekvő komponensét.

#### **5.1.2 Tanulás döntési fa alapján**

A döntési fát jól jellemezhető problémák, feladatok megoldásához szokás használni. Ez azt jelenti, hogy a megoldandó probléma számos jellemzője (attribútuma) ismert az adott környezetben, melyben az ágens is létezik. Egy ilyen fa bemenetként a környezetének egy attribútumokkal leírt állapotát kapja meg, kimenetként pedig egy döntést ad vissza, amelyet az ágens felhasznál ahhoz, hogy a cselekvését módosítsa, vagy speciális esetekben közvetlenül ez az eredmény is lehet maga a cselekvés. [18] Abban az esetben, ha a döntési fa eredményeképp csak logikai eredmények születhetnek, a fát logikai döntési fának is szokás nevezni. Egy döntési fa felépítését mutatja be a 11-ik ábra.



11. Ábra: Egy általános döntési fa elemei [18]

A fában lévő csomópontok jellemzik a megoldandó feladat egyes attribútumait, az egyes attribútumokból kiinduló élek pedig az adott attribútum lehetséges értékeinek megfelelő tovább haladási útvonalakat, lehetséges további döntéseket reprezentálnak. [20]

Döntési fát lehetséges megalkotni egy ágens erre való betanításával, ugyanakkor egy előre megalkotott döntési fa segítségével is vezérelhetünk egy ágenszt egy döntés meghozatalára.

### 5.1.3 Megerősítéses tanulás

A megerősítéses tanulás során az ágens cselekvéseinek a környezetre vett hatását úgy érzékeli, hogy egyfajta visszacsatolásként kap információt arról, hogy az adott cselekvésével számára jó, vagy rossz hatást fog gyakorolni a környezetére. Amikor a cselekvésével a megtanulni kívánt probléma megoldásához közelebb álló eredményt adott kimenetként, akkor „jutalmat kap”, amikor pedig nem, akkor büntetést. [19] Akkor nevezzük a megoldáshoz kialakítandó stratégiát optimálisnak, amikor az a várható összjutalom maximális értékét adja, vagyis mindig a megtanulandó döntési stratégia irányába dönt az ágens. Ehhez természetesen az ágens rendelkezésére kell, hogy álljon a teljes környezeti modell, valamint a jutalomfüggvény, ami szerint a jutalmakat kapja, mivel ebben a tanulási módszerben nincs kijelölt tanító, amely

megmondja az ágens számára, hogy mit tegyen melyik helyzetben, hanem neki magának kell megismernie a jutalomfüggvény és a környezetének kapcsolatát és megalkotni az optimális döntési stratégiát az adott problémára.

#### **5.1.4 Induktív tanulás**

Az induktív tanulás folyamata, ahogyan az a nevéből is érezhető – megegyezik az induktív logikával. Egy ágens a környezetében egy adott problémára úgy keres megoldást, hogy előre ismertetünk vele néhány információt magáról a problémáról. Ezen információk között szerepel a probléma területével kapcsolatos néhány általános információ, mint például a probléma attribútumainak száma, jellege, a válaszként várt cselekvés jellege, valamint – ami a legfontosabb – az ágens megkapja magának a problémának néhány előre megadott megoldását adott bemeneti attribútumokra. A tanulás során az ágensnek ezekből az információkból kell felépítenie a probléma megoldásának egy általános alakját. [19]

## **5.2 Megfigyelések alapján történő tanulás implementálása a modellbe**

### **5.2.1 A megfigyelés tárgya, implementáció a modellbe**

A tanítás fókuszpontjába az egyes ágensek sikerességét állítottam, mivel az elsődleges cél az ágensek tanításával kapcsolatban az volt, hogy az aukciók során való tanulással egyre jobb és jobb ajánlatokat tudjon tenni egy ágens, így egyre sikeresebb ajánlatokat adjon be. A sikeresség egy ágens esetében elsősorban azt jelenti, hogy a lehető legtöbb aukción nyerjen kapacitásjogot, miközben azért a kapacitásjogért nem fizet irreálisan magas (a modellben 8-9 EUR/MWh körüli ár jelenti ezt) árat. Ennek érdekében úgy kell ajánlatot tennie, hogy az általa felajánlott ár elég nagy legyen ahhoz, hogy nyerjen, mindezt nem túl magas klíringáron.

Ezen cél elérésének érdekében az ágensek a saját ajánlattételük és annak sikerességét mérendően három fő paramétert figyeltek:

1. Azt, hogy az előző aukcióban nyertek-e
2. Hogy milyen ajánlatot adtak le az előző aukcióban
3. Valamint azt, hogy a kettővel ezelőtti aukcióban nyertek-e

A tanításhoz ezen paraméterek értékeit figyelték, és bizonyos értékek esetén módosították az ajánlattételi módszerüket, mely az 1. táblázatban már ismertetésre került. A `bid_type` által kódolt ajánlattételi módszert annyiban módosítják, hogy az ajánlatok mennyiség – ár párai közül az ár értékének meghatározását befolyásolják. A befolyásolás jellegét és mértékét foglalja össze a 4. táblázat.

Egy ágens, amennyiben kétszer egymás után nyert – a következő aukcióban 10%-kal növeli az ár ajánlattételi intervallumát, mely intervallumból azután véletlenszerűen választ ajánlati árat. Ez az intervallum természetesen az 50 pontból álló, korábban ismertetett értékgörbére vonatkozik, melynek módosításának hatását a következőkben egy példán keresztül szemléltetem.

Amennyiben az ágens jelenleg az 50 pontból álló görbének az ár értékét tekintve felső 30 pontja közül választotta ki az ár ajánlatát, 10%-kor intervallumnövelés azt fogja jelenteni, hogy ezután a felső 35 pont közül fogja kiválasztani a leadni kívánt ajánlatot, így csökkentve az árajánlat várható értékét. Fordított irányban is igaz: amennyiben 20%-kal csökkentett az intervallum szélességén, ezután a felső 30 pont helyett csak a felső 20 pont közül választ majd ajánlatot, amely – tekintve, hogy exponenciális lecsengésű a görbe – nagyban megnövelni az árajánlat várható értékét.

<b>Az elmúlt két aukció eredménye</b>	<b>Ár intervallum módosítása (EUR/MWh)</b>
Nyert, majd ismét nyert	+10%
Nyert, majd veszített	-10%
Veszített, majd nyert	nincs módosítás
Veszített, majd ismét veszített	-20%

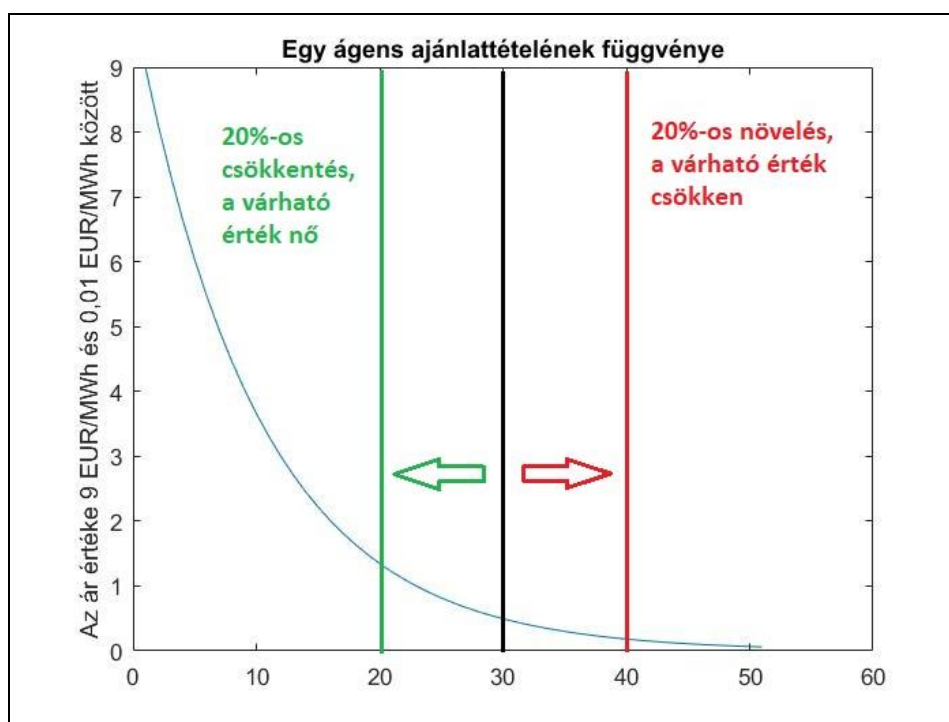
**4. Táblázat: az ár meghatározását befolyásoló módosítások mértéke a különböző esetekre**

Amennyiben az előző aukcióban nyert az ágens, azelőtt pedig veszített – nem módosítja az ajánlattételi intervallumát, mivel az előző módszer sikeresnek bizonyult a kettővel ezelőttihez képest, vagyis az ágens sikerebben adott le ajánlatot.

Amennyiben az előző aukcióban az ágens veszített, azelőtt viszont nyert, az ajánlattételi intervallumát 10%-kal csökkenteni fogja a következő aukcióhoz, mivel így ő „hajlandó többet fizetni” a sikeresség érdekében.

Végző soron pedig – amennyiben az ágens kétszer egymás után veszített a kapacitásaukciókon – drasztikus lépésként 20%-ot csökkent az ár ajánlattételi intervallumán – így átlagosan nagyobb árat lesz hajlandó fizetni az igényelt kapacitásmennyiségért, amely elősegíti a sikerességét, mivel így előrébb kerül az ajánlattevők között.

Mindezek mellett pedig minden ágens figyeli a saját ár ajánlattevő intervallumát, és amennyiben az intervallum túl magas árú ajánlatokhoz vezetné, (vagyis az intervallumnak már a felső 20%-ban lenne ajánlatot) visszaáll az alapértelmezett ajánlattevő módszeréhez. Ezeket a módosításokat hivatott szemléltetni a 12. Ábra.



**12. Ábra: A módosítással megváltozó ajánlattételi intervallum. Ennek felső határa fix, az ágens az alsó határt képes megváltoztatni – ezzel az intervallumot keskenyebbé vagy szélesebbé tenni**

A megfigyelendő paramétereket implementálva az ágensekbe beállítottam a szimuláció paramétereit. A `length_of_simulation` értékét először 10-re állítottam, mivel első körben szerettem volna megvizsgálni a tanulás hatását kevés számú futtatással. A rendelkezésre álló átviteli kapacitás értékét 500 MW-ra állítottam be, az ágensok számát pedig 34-re, hogy minél változatosabb végeredményei lehessenek a szimulációnak.

Ezek után ugyanezen beállítások mellett elvégeztem egy 100 futtatásból álló szimulációt is, melyben már szignifikáns volt az ágensok tanulásának hatása az ajánlattételi módszereikre.

### 5.2.2 Eredmények kiértékelése, a tanulás hatékonysága

A 10 futtatásból álló szimuláció eredményeként az egyes aukciók során kialakult klíringárak a 13. ábrán láthatók. Amint az ábra is mutatja, a klíringár a 4 EUR/MWh-s érték körül változott. Ez köszönhető annak, hogy a tanulás során az egymást követő aukciókon az egyes ágensek a sikeresség érdekében egyre nagyobb és nagyobb árú ajánlatokat tesznek, mindaddig, amíg az ár, amit kínálnának érte, el nem ér egy bizonyos felső határt, a felső 20%-át az intervallumnak. Ezen felső 20% alsó határa nagyjából 4 EUR/MWh körül van a görbén, amely miatt az egyes ágensek ajánlatai eköré az ár köré fognak konvergálni.



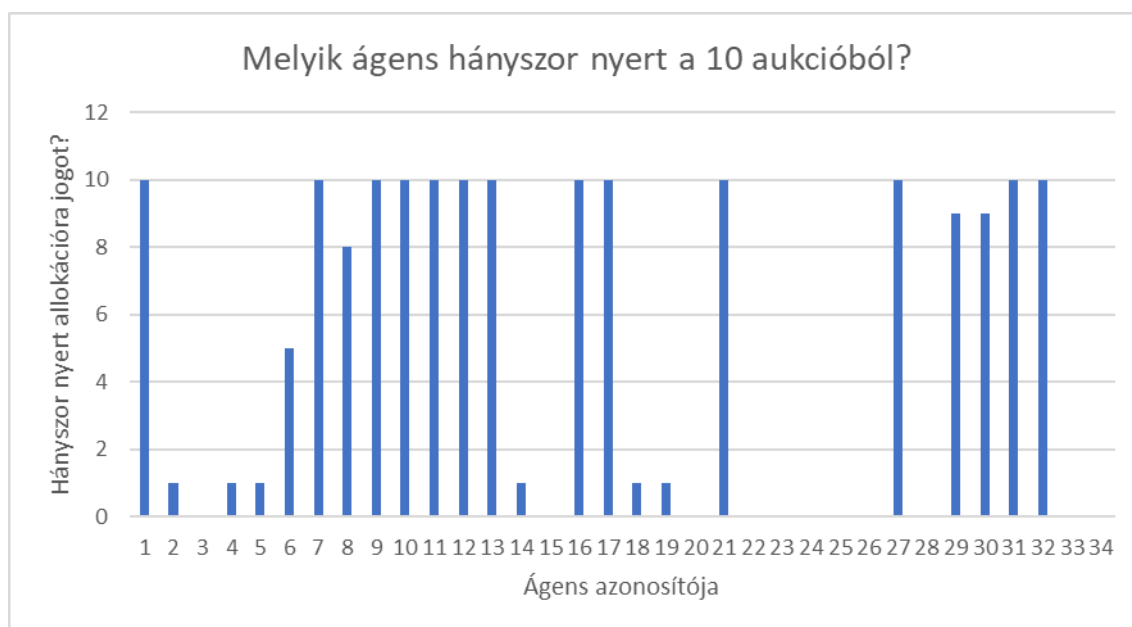
13. Ábra: A klíringár alakulása a 10 aukció során

A 14. ábra mutatja, hogy a 34 résztvevő ágensből a 10 szimuláció során hány nyert – és hányszor nyert kapacitásjogot. A cél a nyert és nem nyert ágensek számainak arányát javítani, azaz elérni, hogy minél több ágens vegyen részt sikeresen a kapacitásaukción. Összevetve a legutóbbi modellel, ahol átlagosan a résztvevők ~40%-a nyert, már a 10 aukció alatti tanulás is javította a nyert és nem nyert ágensek arányát, ugyanis amit az a 14. ábrán is látszik, a 34 résztvevő ágens közül mindössze 11 nem nyert, ami több, mint 67%-os sikerességi arányt jelent.





**14. Ábra: A klíringár alakulása a 100 kapacitásaukción**



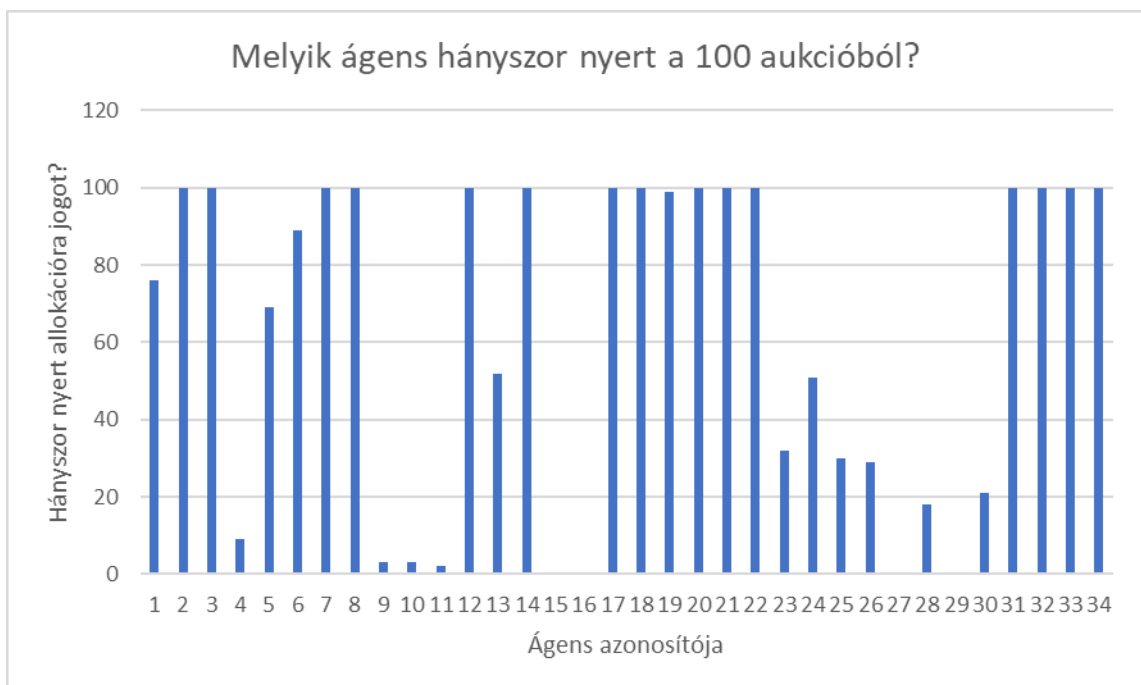
**15. Ábra: Az egyes ágensnek által nyert aukciók száma összesen 10 aukció esetén**

100 aukció esetében az eredmények sokkal jobbakkal lettek, ugyanis mind a sikeresen résztvevő ágensek száma, mind az általuk átlagosan nyert aukciók száma is nőtt. Ez mutatja, hogy a tanulás hatásos, az ágensek sok futtatás esetén egyre jobb ajánlatokat tesznek, így egyre több ágens nyer kapacitásjogot.

A 15. ábrán látható a klíringár alakulása a 100 aukció alatt. Látható, hogy az elején igen változó értékek adódnak, pontosan amiatt, hogy az ágensek kezdetben kissé ciklikusan váltakoznak nagyon jó és nagyon rossz ajánlat között, miközben az ajánlattételi intervallumuk lassanként beszűkül az optimális ár köré, amely – mivel ugyanolyan paraméterek mellett végeztem a szimulációt – ismét nagyjából 4

EUR/MWh-ra adódott. Ezt az árat a szimulációk számának növekedésével egyre jobban megközelíti a klíringár, majd az utolsó néhányban már végig 4 EUR/MWh-ra adódott az értéke.

A 16. ábrán látható az egyes ágensek által nyert aukciók száma, mely – összevetve a 10 aukció szimulációs eredményével – láthatóan nagyobb sikerességi arányt mutat. Ez annak tudható be, hogy a tanulási folyamat leginkább nagymennyiségű rendelkezésre álló adat, illetve sok futtatás során lesz egyre hatékonyabb. A sikerességi arány ebben az esetben több, mint 88%-ra adódott, tekintve, hogy csupán 4 ágens vett részt mind a 100 aukción sikertelenül.



**16. Ábra: Az ágensek által nyert aukciók száma 100 kapacitásaukció lefuttatása után**

Egy ágens a 100 aukcióból átlagosan 61-szer tett sikeres ajánlatot, amely sajnos nem a legjobb arány, azonban a modell pontosításával ez a szám szignifikánsan növelhető (lásd: döntési fa).

## 5.3 Döntési fa alapján történő tanulás implementálása a modellbe

### 5.3.1 A döntési fa megalkotása, implementálás a modellbe

A döntési fa megalkotása során cél volt, hogy egy részletesebb, több történést lefedő cselekvéshalmazt hozzak létre az ágensek számára, a modell realiztikusságának növelése, valamint az egyes ágensek döntési stratégiájának megalkotásának realiztikusabbá tételéhez szükséges volt egy olyan döntési mechanizmus, mellyel a környezetben előforduló történések nagy százalékára képes az ágens reagálni. Így az ágens most már képes reagálni nem csupán a saját sikerességére, hanem az aukciókon kialakult klíringár értékére is, ár szempontjából így még effektívebbé téve az ajánlattevést.

A 17. ábrán látható döntési fa egyes ágai logikai jellegűek, az egyes csomópontjai pedig a már említett attribútumok egyikének valamely értékét vizsgálja meg. Az ágens eszerint a modell szerint alapvetően háromféleképp tud reagálni arra, hogyha valami történik az egyik aukció során:

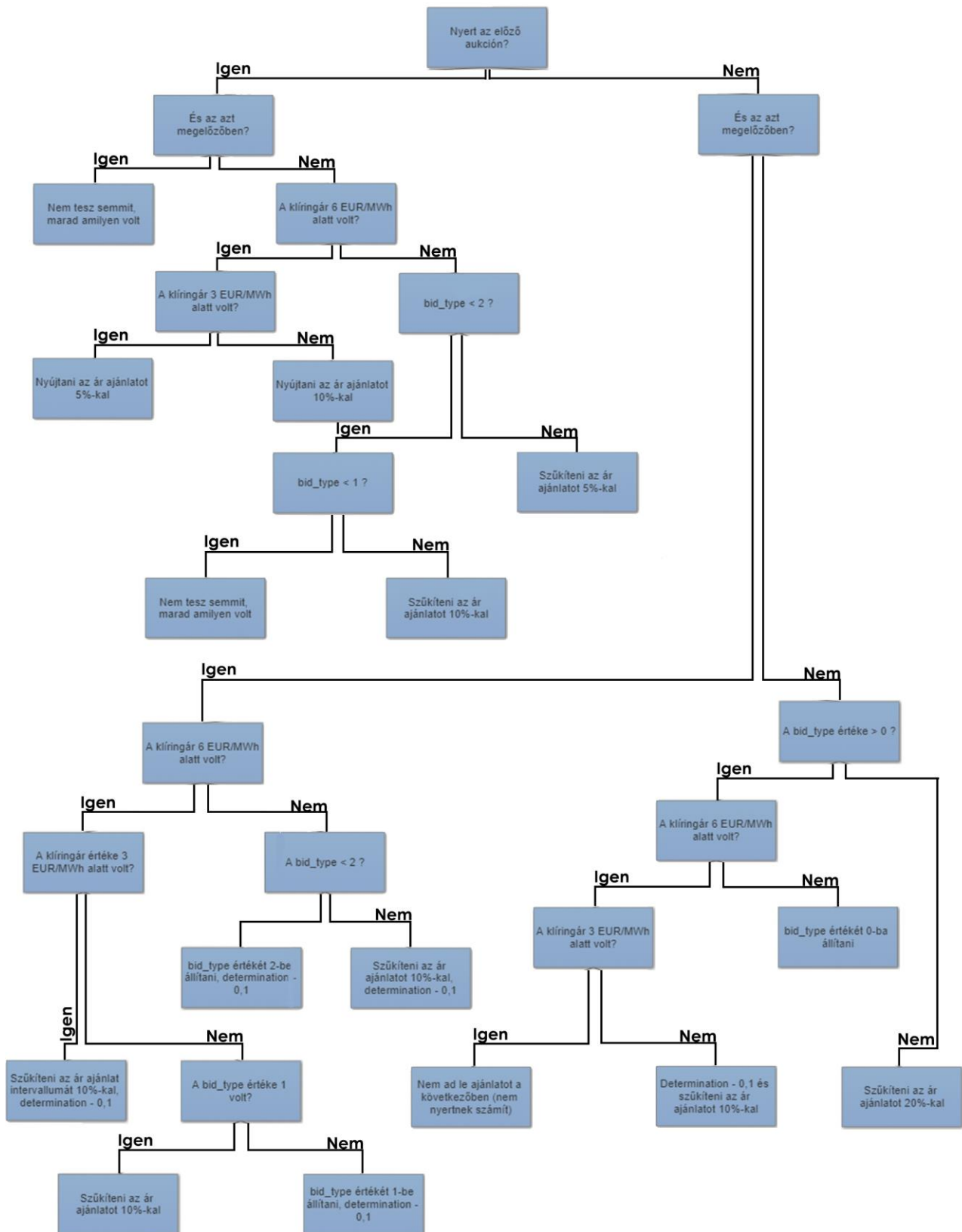
1. Módosítja az ajánlattételi módszerét (és így a leadott ajánlatainak számát is a `bid_type` változóval, lásd: 1. ábra)
2. Módosítja az ár értékgörbén a kiválasztás intervallumának szélességét, így hatva az általa beadott árajánlat várható értékére pozitív vagy negatív irányban
3. Nem ad le ajánlatot, amennyiben túl sokszor nem nyert egymás után (ezt reprezentálja a `determination` változó, azaz az ágens elhivatottsága)

A szimuláció paraméterei hasonlóak a megfigyeléses tanuláshoz használt paraméterekhez: a résztvevők száma ugyanúgy 34, az első szimuláció során 100, majd 1000 aukció lefuttatásának eredményét vizsgálom, a rendelkezésre álló átviteli kapacitás értéke ez esetben azonban 600 MW. Ennek függvényében vizsgálom, hogy az aukciók során változik-e a résztvevő ágensek sikerességi aránya, vagy sem.

Az ágensek által figyelt attribútumokat így összesítve a következőkre választottam:

1. Az előző aukció során kialakult klíringár értéke, melyet három intervallumba csoportosítva képes döntést hozni egy ágens:
  - a. 3 EUR/MWh alatti értékek – azaz „olcsó” aukció
  - b. 3 és 6 EUR/MWh közötti értékek – az „átlagos” aukció
  - c. 6 EUR/MWh feletti értékek - „drága” aukció
2. Az ágens ajánlattételi típusa, melyet a `bid_type` változó indikál (1. táblázat)
3. Az előző aukció során leadott ajánlat árának intervalluma

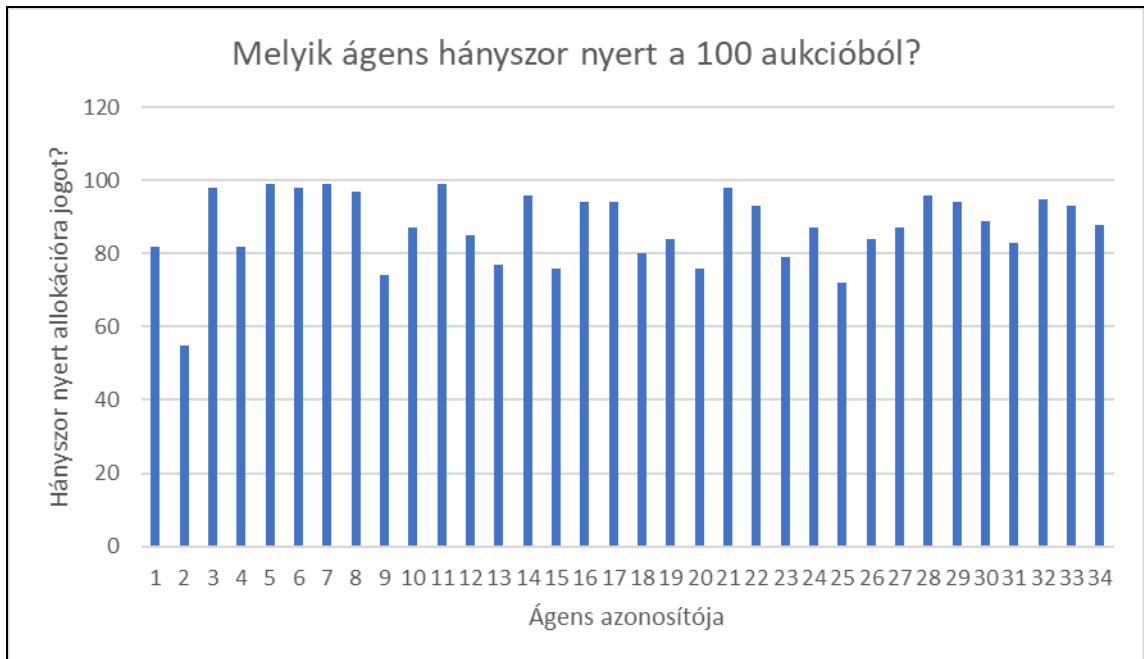
Az ezek segítségével megalkotott döntési fát mutatja a 17. Ábra. Amint látható a fán, az ágensek árajánlatai ebben a modellben már sokkal változatosabbak, több környezeti változásra képesek reagálni.



17. Ábra: Az ágensek tanítására megalkotott döntési fa

### 5.3.2 Eredmények kiértékelése, a tanulás hatékonysága

Első szimulációként a fentebb említett beállításokkal vizsgáltam 100 egymást követő aukció eredményét, mely során a 18. ábrán látható eredményeket tapasztaltam. A döntési fa segítségével az ágensok sokkal sikeresebbek lettek 100 aukció során, mint a korábbi, megfigyeléses tanulás segítségével. Ennek oka a döntési fa által lefedett történések száma, mivel azok segítségével sokkal nagyobb és részletesebb spektrumban vizsgálhatja az adott ágens a környezetét.

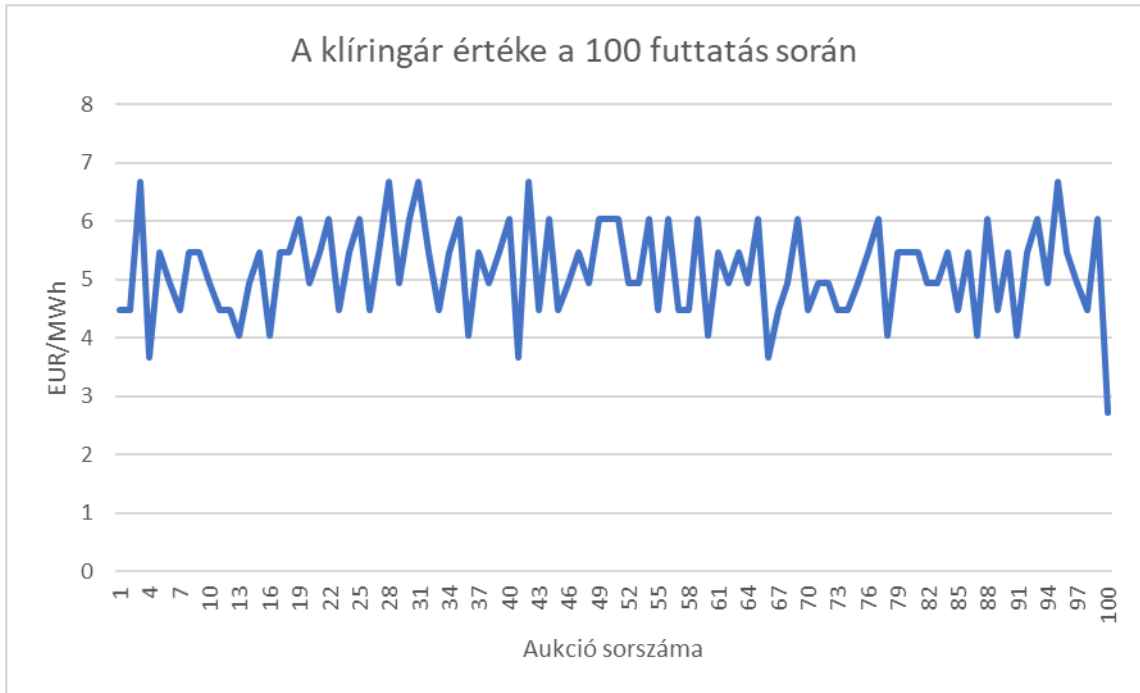


**18. Ábra:** Az ágensok által nyert aukciók száma 100 kapacitásaukció lefuttatása után döntési fával

A sikerességi arány ez esetben 100%-os volt, egy ágens átlagosan a 100 aukcióból 87-en úgy vett részt, hogy sikerült nyernie, ami az előző modell 61-es értékéhez képest szignifikánsan jobb. Mindezek ellenére, ha megnézzük a 19. ábrát, látható, hogy sem a görbe jellege, sem a klíringár értéke nem változott szignifikánsan, ami elsősorban annak tudható be, hogy egy ilyen bonyolultságú döntési fa esetében a 100 futtatás viszonylag kevésnek számít.

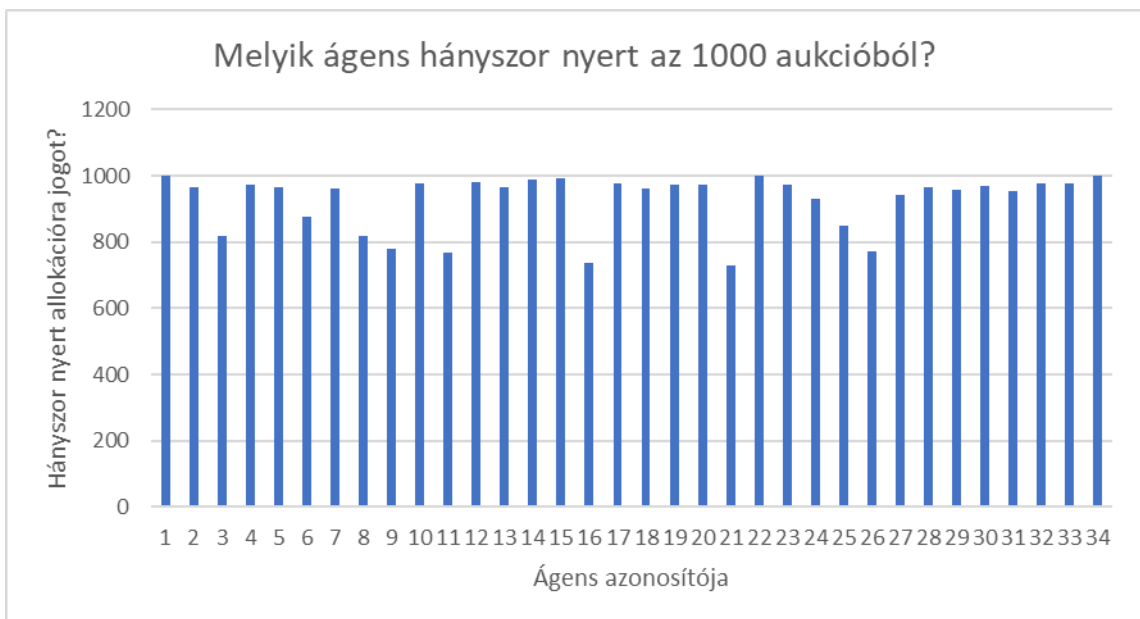
A klíringár változását mutatja a 19. ábra, melyből látszik, hogy nagy ugrások nem voltak az értékben, azonban folyamatosan változott, kisebb periódusokkal, mint a megfigyeléses tanulás esetében, melyből arra a következtetésre jutottam, hogy az egyes ágensok ezzel a tanulási módszerrel sokkal gyorsabban, kevesebb szimuláció lefuttatása után voltak képesek alkalmazkodni a megváltozott környezetükhöz, ami pedig egy

előnyös tulajdonság, és azt jelenti, hogy az ágensek gyorsan és hatékonyan képesek ezzel a módszerrel tanulni.



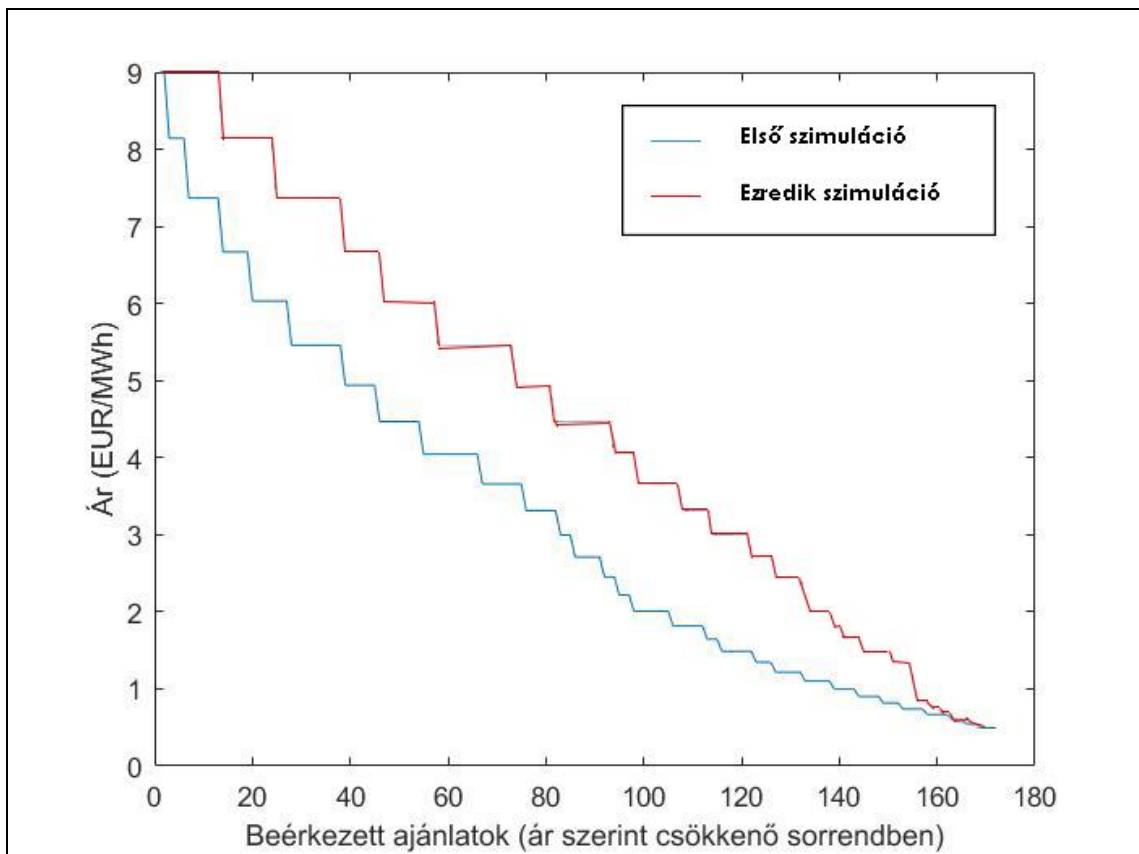
19. Ábra: A klíringár értékének változása döntési fával való tanulás során, 100 futtatás után

Fent látható a 100 futtatás eredményeképp kapott klíringár-görbe, melyen az látszik, hogy a megfigyeléssel tanulás során kapott görbéhez képest ez sokkal változatosabb értékészlettel rendelkezik, és itt már nincs egy „optimális ár”, ami felé konvergál a klíringár értéke.



20. Ábra: az első és 1000-ik aukció eredményének összehasonlítása

1000 aukció szimulációja során már sokkal ígéretesebb eredmények jöttek ki. Ebben az esetben a sikerességi arány szintén 100%-os volt, hasonlóan a 100 futtatás során kapott eredményekhez, azonban az egyes ágensek által átlagosan megnyert kapacitásaukciók száma is növekedett. Ennek értéke ágensenként átlagosan 924 nyertes aukció volt az 1000-ból, ami levetítve a megfigyeléses tanulás 100 futtatás által kapott eredményeire azt jelenti, hogy átlagosan egy ágens 100 aukcióból 92-n sikeresen adott le ajánlatot. Ez 30-cal több, mint a megerősítéses tanulás esetében volt, vagyis ~ 49,2%-kal sikeresebb részvételt jelentett egy ágens számára az aukciókon.

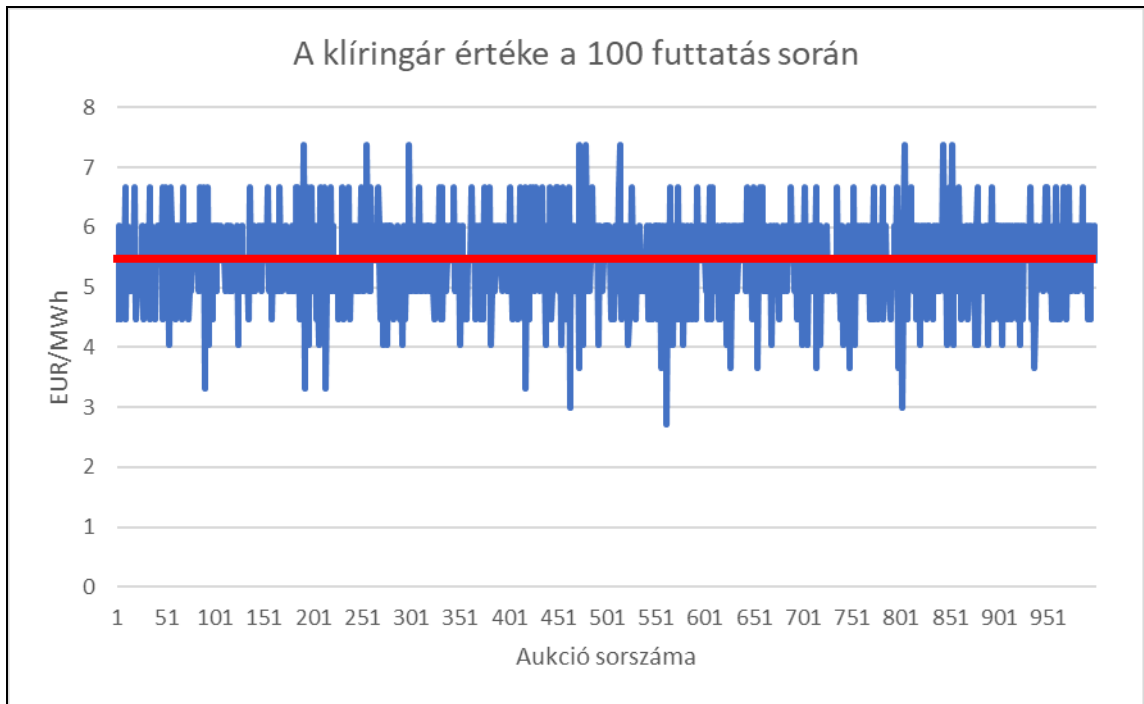


**19. Ábra: Az aukció eredménye az első és az 1000-ik futtatás után**

A 19. ábrán látható az első, illetve 1000-ik aukció eredménye; melyek között immáron jelentős különbség figyelhető meg. A beérkező ajánlatok átlagosan nagyobb árajánlatúak, mivel mindegyik ágens sikeresebben szeretne részt venni az aukción, és 999 futtatás után már nagyjából kialakította a saját ajánlattételi stratégiáját is.

Az 1000 aukció során kialakult klíringár értékeit mutatja be a 20. ábra, melyen látható, hogy 1000 futtatás során már kitűnik az a bizonyos szint a klíringár értékében, amely körül változik az értéke az egyes aukciók során. Ez nagyjából 5,5 EUR/MWh, mely az ábrán piros vonallal be is van jelölve.





**20. Ábra: A klíringár értékének változása 1000 aukció során döntési fával való tanulás esetén**

## **6 Összefoglalás**

### **6.1 A megalkotott modellek összefoglalása**

Jelen dolgozatom során több szimulációs modellt is megalkottam, melyek bonyolultsága, az általuk produkált eredmények realiztikussága az egyes modellekkel egyre nőtt.

A fejlesztés során szem előtt tartottam, hogy szekvenciálisan kerüljenek bele az újabb és újabb funkciók, az egyes ágensek bonyolultságának fokozatai között ne legyenek nagy ugrások, s az általuk figyelt környezeti változók mennyisége is fokozatosan növekedjen. Ennek függvényében mind az ágensek felépítését, mind pedig a környezet attribútumait fokozatosan fejlesztettem, hogy az egyes verziók által kapott eredmények még összehasonlíthatók legyenek, mivel az új funkciók hatékonyságát így volt lehetséges összehasonlítani.

### **6.2 A modellek által szimulált aukciók jellemzése**

#### **6.2.1 Az első modellek összefoglalása**

Az első modellek teljesen az alapszintű aukció szimulációját valósították meg. Először csak egy termék, véletlenszerű árajánlat adás volt jellemző, aztán fokozatosan egyre több termék, többfajta árajánlat, majd pedig egészen részletes árajánlat – skála került kialakításra. Az ajánlattevés mechanizmusának realiztikusabbá tételéhez szükséges volt többfajta árajánlat-tevési mód bevezetése, mely segítségével az egyes ágensek három főbb ár-intervallum közül választhattak, hogy melyikből adnak le ajánlatot.

#### **6.2.2 A tanuló ágensek modelljei által kapott eredmények összefoglalása**

A tanuló módszerek bevezetése kulcskérdés volt a megalkotott ágensek ajánlattételének sikeresebbé tételéhez, eddig a pontig ugyanis statikusan tettek ajánlatot, nem törődve sem a környezetükkel, sem pedig a saját sikerességük növelésével.

A sikeresség növelésének érdekében bevezetésre került első körben a megfigyelésre alapuló tanulás, majd pedig a döntési fa alapján történő tanulás. A

megfigyeléses tanulással kialakított új ajánlattételi módszer azonnal szignifikáns változást hozott az egyes ágensek sikerességében, az eddigi modellekhez képest majdnem másfélszer sikeresebbek lettek így az ágensek az aukciókon.

A következő tanulási módszer azonban még ennél is hatékonyabbnak bizonyult, ugyanis a döntési fa segítségével az egyes ágensek által érzékelhető környezeti történések nagy százalékát sikerült lefedni, melyek mindegyikére képes volt reakcióként megváltoztatni valamely, már korábban említett belső attribútumának értékét az adott ágens. Ez a modell hozta a legsikeresebb ágensmodellt, így a további modellezéshez ezt remek kiindulási alapnak tekintem.

### **6.3 A létrehozott szimulációs modell továbbfejlesztésének lehetőségei – a 4M MC [11] modellezése**

Következő lépésként szeretném a megalkotott ágensmodellek segítségével modellezni a cseh-szlovák-magyar-román összekapcsolt piacú (4M MC) árzónák közti explicit, illetve implicit határkeresztező kapacitásaukciókat, mely modell összetettsége miatt ez a jelenlegi munkám továbbviteleként, a szakdolgozat-témám lesz majd a félévben. Ahhoz, hogy egy ilyen rendszert modellezni tudjak, szükséges lesz átalakítani a modellt úgy, hogy az egyes ágensek képesek legyenek kezelni a több határmetszéken való ajánlattételt, valamint az implicit aukciókban való részvételt.

## Irodalomjegyzék

- [1] R. D. Gawali and B. B. Meshram, "Agent-based autonomous Examination Systems," 2009 International Conference on Intelligent Agent & Multi-Agent Systems, Chennai, 2009, pp. 1-7.  
doi: 10.1109/IAMA.2009.5228095  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5228095&number=5228011>
- [2] A. L. Symeonidis, I. N. Athanasiadis, and P. A. Mitkas. A retraining methodology for enhancing agent intelligence. *Knowledge-based Systems*, 20(4):388-396, 2007.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2006.06.003>
- [3] M. Wooldridge. *Intelligent Agents*. In G. Weiss, editor, *Multiagent Systems: A modern approach to distributed Artificial Intelligence*, chapter 1, pages 27-78. MIT Press, 2000.  
ISBN: 9780262731317
- [4] C. Grigore and R. Collier, "Supporting Agent Systems in the Programming Language," 2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, Lyon, 2011, pp. 9-12.  
doi: 10.1109/WI-IAT.2011.174  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6040692&number=6036728>
- [5] Bertalan Zsolt: „Nemzetközi együttműködés és határkeresztező villamosenergiakereskedelem”  
URL: [ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/Energiaellatas%20es%20-gazdalkodas%20-%20B/\\_\\_\\_3\\_energagazdalk\\_B\\_1\\_2015.pdf](ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/Energiaellatas%20es%20-gazdalkodas%20-%20B/___3_energagazdalk_B_1_2015.pdf)
- [6] Gordos Péter: „Villamos energia határkeresztező kereskedelme az Európai Unió belső villamosenergia-piacán, főbb akadályok, továbblépési lehetőségek” Ph.D. értekezés, Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest, 2004
- [7] Forrás: Joint Allocation Office (JAO)  
URL: <http://www.jao.eu>
- [8] Gerse Károly: *Villamosenergia-piacok*, 2014
- [9] Forrás: Nord Pool Group,  
URL: <https://www.nordpoolgroup.com/About-us/History/>
- [10] Sőrés Péter Márk: *Áramlás alapú kapacitáskalkulációs eljárás alkalmazása villamosenergia-piacok összekapcsolása során*, BME, 2012
- [11] Forrás: HUPX, Hungarian Power-Exchange  
URL: <https://www.hupx.hu/hu/Piacosszekapcsolas/piacosszekapcsolastort/Lapok/4mmc.aspx>

- [12] Forrás: ENTSO-E, URL: <https://www.entsoe.eu/about/market/>
- [13] Stuart Russell and Peter Norvig, "Artificial Intelligence- A Modern Approach ", Pearson Education, Second Edition, 2003
- [14] S. Ochotny, B. Simoski: "Influence of speculative behaviour on the real estate economic bubbles", Vrije Universiteit Amsterdam, 2013
- [15] M. K. Kouluri, R. K. Pandey: *Intelligent Agent Based Micro grid Control*, 978-1-4577-0878-7/11/\$26.00, IEEE-IAMA 2011
- [16] Ing. P. Solc: *Coordinated auction project in Central Europe*, 2nd CIGRE/IEE PES Symposium, New Orleans 5-7 Oct. 2005
- [17] BME-MIT Mesterséges Intelligencia Almanach, URL: <http://mialmanach.mit.bme.hu/aima/ch02s01>
- [18] S.B. Konstantis: *Supervised Machine Learning: A review of Classification techniques Emerging Artificial intelligence Applications in Computer Engineering* I. Maglogiannis et al. (Eds.) IOS Press, 2007, page: 3-27.
- [19] CSSE. Includes material c S. Russell & P. Norvig 1995, 2003. CITS4211 Agents that Learn Slide 142 URL: <http://teaching.csse.uwa.edu.au/units/CITS4211/Lectures/wk5.pdf>
- [20] Forrás: Imperial College, London, Department of Computing, egyetemi tananyag URL: <http://www.doc.ic.ac.uk/~sgc/teaching/pre2012/v231/lecture11.html>