



**Gazdálkodástani
Doktori Iskola**

TÉZISGYŰJTEMÉNY

Nagy Tamás

**Az Európai Unió Emissziókereskedelmi Rendszerében résztvevő
gázerőmű reálopciók döntési modelljének alkalmazásai**

című Ph.D. értekezéséhez

Témavezető:

Dr. Kerekes Sándor
egyetemi tanár, az MTA doktora

Budapest, 2013

Környezetgazdaságtani és Technológiai Tanszék

TÉZISGYŰJTEMÉNY

Nagy Tamás

**Az Európai Unió Emissziókereskedelmi Rendszerében résztvevő
gázerőmű reálopciók döntési modelljének alkalmazásai**

című Ph.D. értekezéséhez

Témavezető:

Dr. Kerekes Sándor
egyetemi tanár, az MTA doktora

© Nagy Tamás

TARTALOMJEGYZÉK

I.	KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK ÉS A TÉMA INDOKLÁSA	2
II.	A FELHASZNÁLT MÓDSZEREK	6
II.1.	Az alkalmazott reálopciók modell.....	6
II.2.	Az alaptermékek sztochasztikus ármodellje.....	8
II.3.	Spread opciók árazása	10
III.	AZ ÉRTEKEZÉS EREDMÉNYEI	11
III.1.	Az erőmű szén-dioxid-kibocsátásának származtatása.....	11
III.2.	Az erőmű jövedelemtermelő képességének értékelése.....	17
III.3.	Az MNPB függvény és az egyéni kvóta keresleti függvény származtatása ...	22
IV.	FŐBB HIVATKOZÁSOK	25
V.	A TÉMAKÖRREL KAPCSOLATOS SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE.....	28

I. KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK ÉS A TÉMA INDOKLÁSA

A Kiotói Protokollt ratifikáló fejlett országok vállalták, hogy csökkentik az üvegházhatású gázok kibocsátását. Az Európai Unió a szén-dioxid kibocsátás költséghatékony csökkentése érdekében létrehozta az Európai Emissziókereskedelmi Rendszert (EU ETS), amelyben az éves maximálisan kibocsátható mennyiség a rendszer szintjén van rögzítve. A jelenlegi kereskedési szakaszban az európai vállalatok összesen évente hozzávetőlegesen 2 milliárd tonna kvótát kapnak térítésmentesen az állami hatóságoktól, ami közel tízezer megfelelésre kötelezett vállalat között oszlik el. A megfelelésre kötelezetteknek évente, a megelőző évben történt tényleges kibocsátásaikkal megegyező mennyiségű emissziós kvótát kell visszaadniuk. A résztvevők év közben szabadon kereskedhetnek az emissziós egységgel (EUA), így elérhető, hogy a lehető legkisebb költséggel valósuljon meg az emisszió csökkentés.

Az egyes vállalatok a hatalmas, ingyenesen juttatott vagyon kezelésénél szembesültek először annak kérdésével, hogy ténylegesen mennyi kvótára lesz szükségük, mennyi kvótát és milyen ütemezésben adjanak el, illetve vásároljanak. A piaci szereplők tanúi lehettek annak, hogy 2006 tavaszán 8 nap alatt, közel harmadára zuhant a kvóta ára (2006. április 24: 29.43 EUR/tonna, 2006. május 2: 10.90 EUR/tonna). A hirtelen esés oka az volt, hogy nyilvánosságra kerültek a tényleges kibocsátási adatok, melyekből a piaci szereplők számára egyre valószínűbbé vált, hogy a kvótákat túlosztották. Az áresés egy kvótafelesleggel rendelkező szereplő számára hatalmas anyagi veszteséget, egy esetlegesen kvótahiánnyal küzdő vállalat számára viszont jelentős nyereséget jelentett.

Az emissziókereskedelmi rendszer legjelentősebb szereplői, a villamos erőművek, a pénzügyi intézményekkel szemben kevésbé fejlett kockázatkezelési eljárásokkal rendelkeznek. A Disszertáció célja, hogy környezetgazdasági, vállalatgazdasági, reálopció és sztochasztikus pénzügyi módszertant ötvöző, gyakorlatban használható döntési, értékelési és pénzügyi kockázatkezelési módszereket adjon az EU ETS résztvevő villamos erőművek részére.

Az alábbi kérdésekre kerestem választ:

- A piaci adatokra épülve milyen módszerrel jelezhető előre a vállalat szén-dioxid kibocsátása, annak várható értéke és sűrűségfüggvénye? A kapott eredményeket milyen mértékben módosítják különböző technológiai és piaci tényezők változásai?

- Mekkora költséget jelent egy erőmű számára az EU ETS szabályainak való megfelelés? Mennyi kvótát célszerű birtokolnia a vállalatnak a kockázatának minimalizálása érdekében, azaz hogyan határozható meg az adott pillanatban tartandó, „optimális” kvótamennyiség?
- Mennyire érzékeny az erőmű jövedelemtermelő képességének értéke a különböző technológiai és piaci tényezők megváltozására. Milyen fedezeti eljárást kövessen az erőmű a piaci kockázatok csökkentése érdekében?
- Hogyan tudjuk meghatározni a hatékonyságnövelő beruházások értékét? A kapott érték milyen technológiai és piaci tényezők megváltozására érzékeny?
- Miért és mekkora veszteséget szenved el az erőmű, ha hosszú távú termelési szerződések keretében állandóan üzemel?
- Hogyan számítható a környezet gazdasági elemzések középpontjában álló MNPB (Marginal Net Private Benefit) függvény? Hogyan határozható meg az egyéni kvótakeresleti függvény?

A Disszertációhoz kapcsolódó irodalmak közül az emissziókereskedelmi rendszerhez kapcsolódó tanulmányokat érdemes kiemelni. A hazai szerzők közül Dobos (2002) a kereskedhető szennyezési jogok rendszerének hatását vizsgálja komparatív statikai modellel egy standard mikroökonómiai (árelfogadó, profitmaximalizáló) vállalatra. Lesi és Pál (2004) disszertációjukban elsősorban a hatékony szabályozással és a szabályozás hazai erőművekre vonatkozó hatásaival foglalkoztak. Fazekas (2009) disszertációjában az EU ETS magyarországi hatásait elemezte, a magyar cégek rendszerhez való hozzáállását személyes interjúk alapján vizsgálta.

A Disszertáció témájához közelebb álló publikációk a kvótaárat sztochasztikus tényezőként felfogva modellezik. Daskalakis és szerzőtársai (2009) az első kereskedési szakasz (2005-2007) áradatait elemezve különböző árfolyammodellek illeszkedését teszteli. Seifert, Uhrig-Homburg és Wagner (2008) egy sztochasztikus egyensúlyi modellt alkotottak, amivel a piac érettségét vizsgálták. Reilly and Paltsev (2005) az EPPA-EURO (Emissions Prediction and Policy Analysis) modellre támaszkodva becsülte az első kereskedési szakaszban várható kvótaárat. Alberola és szerzőtársai (2008) a 2005 és 2007 közötti első kereskedési periódust vizsgálták ökonometriai módszerekkel. A szerzők szerint az áramár, a kiugró időjárás változások és a politikai, szabályozói döntések a három legjelentősebb faktor, amelyek befolyásolják a kvótaárat. Benz és Trüch (2009) az árat meghatározó tényezőket két nagy csoportra osztották: szabályozói (policy)

faktorokra, valamint fundamentális faktorokra. Az előbbiek hosszabb távon, az utóbbiak első sorban rövidebb távon befolyásolják a kvótaárát. Mansanet-Bataller, Pardo és Valor (2007) pénzügyi és időjárási faktorok hatását vizsgálták a kvóta árára. Oberndorfer (2009) valamint Veith és szerzőtársai (2009) a szén-dioxid árának és az európai áram termelő vállalatok részvényárainak összefüggését elemezték. Kanen (2006) az energiahordozók áraival való kapcsolatot elemezve megállapította, hogy az olaj ára határozza meg a gázárát, a gázár viszont egyaránt hatással van az áram és a szén-dioxid kvóta árára. Convery és szerzőtársa szerint (2007) elsősorban az energiahordozók árai határozzák meg a szén-dioxid árát.

A témával foglalkozó számos szerző reálopciók modell¹ használva vont le következtetéseket. Laurikka (2006) sztochasztikus, reálopciót tartalmazó szimulációs modellt alkotott, melyben az EU ETS hatását vizsgálja egy kombinált ciklusú (IGCC) erőműre. Megállapítja, hogy a diszkontált cash flow (DCF) módszer nem alkalmas az ilyen típusú beruházások értékelésére, mivel az EU ETS jelentős mértékű kockázatot hordoz és benne számos reálopciók szituáció lehetséges. Hlouskova és szerzőtársai (2005) egy liberalizált energiapiacra termelő erőmű reálopciók modelljét ismertették. A modellt az erőmű értékelésére, valamint az eredmény kockázati profiljának meghatározására használták. A modellben az üzemanyag költsége mellett nem számoltak kvótaköltséggel, viszont figyelembe vették a különböző technikai korlátozó tényezőket (minimum üzemelési és pihenési idő, alsó és felső kapacitáskorlát, indítási és leállítási idő valamint költségek). Herbelot (1994) áramtermelő vállalat döntését modellezi. A szerző binomiális modellel számította az árát az alacsonyabb kén-tartalmú szénre való áttérésnek illetve egy csővégi scrubber, valamint szén-gázosító blokk installáció opciójának. Megvizsgálta, hogy különböző tényezők milyen mértékben befolyásolják a kapott értéket. Abadie és Chamorro (2008) egy széntüzelésű erőművet elemez, melynek lehetősége van arra, hogy befektessen szén-dioxid megkötő (CCS) technológiába. A két sztochasztikus változó a kvóta és az áram ára. A szerzők kétdimenziós binomiális modell segítségével elemzik az optimális befektetési döntést. Cragg és szerzőtársai (2011) a kvótapiacra is résztvevő erőmű reálopciók döntési modelljét három termék függvényében fejezik ki. Bemutatják, hogy az erőmű jelentős mértékben tudja kockázatát csökkenteni, amennyiben a két hagyományos termékre (áramár és tüzelőanyagár) szóló fedezeti stratégiát kiegészíti a

¹ A reálopciókról részletesebben lásd Dixit és Pindyck (1994) valamint Bélyácz (2011)

kvótára vonatkozó ügyletekkel. A fedezés eredményeképpen a vállalat profitjának szórása jelentős mértékben csökken.

A Disszertáció a reálopciók modelljét alkalmazó publikációkhoz szeretne csatlakozni. Az új eredmények elsősorban a szén-dioxid emisszió sűrűségfüggvényének származtatására és az EU ETS szabályainak való megfeleléshez kapcsolódó költségek értékének meghatározásához kapcsolódnak. Emellett az erőmű értékét négytermékes (völgy- és csúcsidőszaki áramát tartalmazó) modellre támaszkodva állapítom meg, aminek előnye, hogy jobban tükrözi a rugalmasabb gázturbinás erőművek termelési ütemezését, amelyben a magas keresletű órákban termelnek, az alacsonyabb áramárral rendelkező napszakban pihennek. Az erőmű értékeléséhez kapcsolódóan megvizsgálom egy elméleti, 5 százalékpontos hatékonyságnövelő beruházás értékét. Kiemelt hangsúlyt kapnak a különböző technológiai és piaci faktorok erőmű és a beruházás értékére gyakorolt hatásai. A reálopciók modellre támaszkodva meghatározásra kerül a hosszú távú szerződés keretében, feltétel nélkül termelő erőmű által elszenvedett pénzügyi veszteség mértéke. Ennek aktualitását az adja, hogy a hazai erőművek sok esetben fix ütemezés szerint termelnek: a magas eladási áron kötött termelési szerződések azt a látszatot keltik, hogy nagyon jó feltételek mellett kötötték le fixen a kapacitásaikat, holott ebben az esetben elveszítik az erőmű rugalmas működtetéséből adódó opciós érték egy részét. Végül a reálopciók modell segítségével levezetem az erőmű MNPB (Marginal Net Private Benefit, egyéni tiszta határhaszon) függvényét, ami környezetgazdasági modellekben központi szerepet játszik. Ehhez kapcsolódóan levezetésre kerül az erőmű egyéni kvótakeresleti függvénye, ami elengedhetetlen a hatékony aukciós stratégia meghatározásához. Az aktualitását ennek az adja, hogy 2013-tól a jelenlegi nagyrészt ingyenes allokációt fokozatosan felváltja az aukciós értékesítés, ami még komplexebb döntési környezetet eredményez az erőműveknek.

II. A FELHASZNÁLT MÓDSZEREK

II.1. Az alkalmazott reálopció modellel

A Disszertációban reálopció modellel alkalmazok az erőmű döntéseinek, kibocsátásának és realizált eredményének előrejelzésére. Az ilyen típusú modellel olyan értékelési (döntési) helyzetben használandó, amikor az egyes kimenetek bizonytalanok, és a pénzáramlások mellé valószínűségeket tudunk rendelni. Továbbá olyan szituációkban is célszerű alkalmazni, amikor jövőbeli döntések egymással összefüggnek. Az ilyen helyzetekben a hagyományos diszkontált cash flow (DCF) modellek nem adnak jó eredményt.

A villamos energiát termelő erőmű egy feltételes konverziós eszköz, ami termelési döntéstől függően – feltételesen működve – állít elő az inputokból (gáz és emissziós kvóta) outputot (villamos energia). A rövid távú profitmaximalizáló döntés szempontjából a fix költségek nem relevánsak. A lényegi változó költségeket a döntési modellel háromfelé bontottam, a vállalati különbözet (spread, fedezet) a következő képlet szerint számolható:

$$\text{Spread} = \text{Megtermelt energia árbevétele} - \text{Szükséges energiahordozó költsége} - \text{Szükséges emissziós egységek költsége} - \text{Egyéb változó költségek} \quad 1.$$

Legyen η az erőmű *termikus hatékonysága*, ami megmutatja, hogy egységnyi bemenő fajhőből mennyi villamos energiát hoz létre az erőmű. Ennek értéke 0% és 100% közé esik (a magasabb érték mutatja a hatékonyabb erőművet). Mutassa δ a tüzelőanyag *szén-intenzitását*, azaz, hogy az egységnyi energiatartalmú tüzelőanyag elégetése során mekkora mennyiségű szén-dioxid szabadul fel (dimenziója tCO₂/MWh). Amennyiben az áramarat S_{pow} (EUR/MWh_{out}), a gázarat S_{gas} (EUR/MWh_{in}), az emissziós egység árát S_{eua} (EUR/tCO₂), az *egyéb változó költség* tagot pedig v (EUR/MWh_{out}) jelöli, akkor az egységnyi megtermelt energiára jutó különbözet (*spread*) értéke (EUR/MWh_{out}) a következő lesz:

$$\text{spread} = S_{pow} - S_{gas}/\eta - S_{eua} \cdot \delta/\eta - v \quad 2.$$

Az árkülönbség képletében az egységnyi megtermelt villamos energiára jutó tüzelőanyag költséget úgy kaphatjuk meg, hogy a gázarat elosztjuk a termikus hatékonysággal. A kvóta esetében a δ/η szorzó azt mutatja, hogy egységnyi output előállítása mennyi széndioxid kibocsátást eredményez.

A bemutatott spread nagyon hasonló a piacokon elterjedt *clean spark spread*-hez (a különböző spread fogalmakról részletesebben lásd Alberola – Chevallier – Cheze, 2008), annyi kiegészítéssel, hogy a modellbeli technológiai faktorokat (termikus hatékonyság, tüzelőanyag szén-intenzitása) kell használni az egységnyi megtermelt energiára jutó különbség értékének számításakor, valamint tartalmaz egy egyéb változó költség tagot.

A haszonmaximalizáló vállalat csak abban az esetben termel, ha a realizálható különbség pozitív, ellenkező esetben jobban jár, ha szünetelteti a termelését. Az egységnyi megtermelt energiára vetített profitfüggvény (π) a fedezetből származtatható:

$$\pi = \max(\text{spread}, 0) = \max(S_{pow} - S_{gas}/\eta - S_{eua} \cdot \delta/\eta - v, 0) \quad 3.$$

Tézis 1: Egy EU ETS résztvevő gázerőmű által realizálható, egységnyi megtermelt energiára jutó spread (árrés) feltételes értéke megfeleltethető három alaptermékre (áram, gáz, emissziós kvóta) szóló spread opció kifizetésfüggvényének, aminek kötési árfolyama az egyéb változó költség tag (v). Az opciós megfeleltetés lehetővé teszi, hogy a feltételes követelések árazására kidolgozott sztochasztikus pénzügyi eszköztárat alkalmazva megoldást adjunk különböző döntési, értékelési és modellezési problémákra.

A valóságban a villamos energiát nem, illetve csak magas költségek mellett lehet tárolni. A gyakorlatban a termelést az aktuális és a várható kereslethez igazítják, az azonnali árat napon belül, órás bontásban jegyzik. Erős szezonalitást figyelhetünk meg a villamos energia áralakulásában (Marossy, 2011). Az áramár napon belül a gazdasági aktivitás szerint változik: a nappali csúcsidőszakban a kiemelkedő fogyasztás magas árat eredményez, az esti órákban az alacsony igénybevétel miatt jelentős mértékű árcsökkenés tapasztalható. A valóságos helyzet pontosabb közelítése érdekében az alapvetően háromtermékes (áram, gáz, eua) modellt négytermékesre terjesztettem ki, amiben a napot két egyenlő részre osztottam: a csúcsidőszak a legnagyobb kereslettel rendelkező és emiatt magasabb áru órákat tartalmazza 8:00 – 20:00 között, a völgyidőszak az

alacsonyabb keresletű és ezért alacsonyabb árú időszakot fedi le 20:00 – 8:00 között. A modellben a gáz és az emissziós kvóta ára a napon belül állandó. A négytermékes modell előnye, hogy segítségével jobban közelíthetjük a gázturbinás erőmű valóságos viselkedését, amiben az a jövőbeli piaci helyzet és erőforrások függvényében a völgyidőszakban jellemzően pihen, a csúcsidőszakban pedig a magasabb áramárnak köszönhetően működik.

A modellben egy 100 MW-os nyitott ciklusú gázturbinás erőművet (open cycle gas turbine) tételeztem fel, aminek a termikus hatékonysága (a bemenő és kimenő energia hányadosa) 38% (Comission of the European Communities, 2008). A tüzelőanyagként hasznosított gáz szén intenzitása 0.2014 tCO₂/MWh, az egyéb változó költség 3 EUR/MWh. A technológiai korlátok (minimális üzemelési idő, felfutási idő stb.) hatásait elhanyagoltam.

II.2. Az alaptermékek sztochasztikus ármodellje

A reálopciók modellben a jövőbeli spread értéke sztochasztikus. A 4 termék áralakulására geometriai Ornstein-Uhlenbeck folyamatot (más néven egyfaktoros Schwartz modellt (Schwartz, 1997)) tételeztem fel:

$$dS = \lambda(\theta - \ln S)Sdt + \sigma Sdz \quad 4.$$

A sztochasztikus modellt az EEX energiatőzsdéről származó, 2008. február 28 és 2012. május 31-e közötti árakra illeszttem. Az árakat csak azokra a napokra vettem figyelembe, amelyekre mind a négy termék rendelkezett árral. Mivel emissziós egység árak csak a munkanapokra vonatkozóan szerepeltek, ezért összesen 1010 megfigyelési nappal rendelkeztem, a megfigyelési napok között eltelt időt $\delta = 1/252$ értéknek tételeztem fel. A logaritmikus modell természete miatt további kisebb korrekcióra volt szükség: a negatív árakkal rendelkező napokat (ilyen a bázisidőszaki áram esetében 4 alkalommal fordul elő) kizártam az adatsorból. A regresszió eredményeként kapott paraméterek a következők voltak:

	Völgy	Csúcs	Gáz	EUA
R^2	0.3574	0.5303	0.9934	0.9929
$S(0)$	38.8167	67.6667	23.4700	6.2600
$\exp(\mu)$	46.5685	68.0518	21.7829	6.8357
λ	129.6231	79.9205	0.8251	0.2804
σ	5.3291	4.1001	0.4545	0.4375

1. táblázat: A geometriai Ornstein-Uhlenbeck folyamat regressziós illesztésének eredménye.

A regresszió determinációs együtthatójának értéke (R^2) völgy és csúcsidőszaki áram esetében viszonylag alacsony, a másik két alaptermék esetében viszont meglehetősen magas. A geometriai Ornstein-Uhlenbeck folyamat feltételezését megtartottam, mivel így lehetővé vált az analitikus közelítési képlet alkalmazása, ami bizonyos esetekben nagyságrenddel gyorsította a számítás menetét.

A négy termék árváltozásai közötti korrelációs együtthatókat és a kapcsolódó hipotézisvizsgálat² eredményeit a következő táblázat tartalmazza:

Korreláció	Völgy	Csúcs	Gáz	EUA	p-érték	Völgy	Csúcs	Gáz	EUA
Völgy	1.0000	0.4830	0.0190	-0.0192	Völgy	1.0000	0.0000	0.5481	0.5439
Csúcs	0.4830	1.0000	0.0275	-0.0051	Csúcs	0.0000	1.0000	0.3845	0.8717
Gáz	0.0190	0.0275	1.0000	0.1655	Gáz	0.5481	0.3845	1.0000	0.0000
EUA	-0.0192	-0.0051	0.1655	1.0000	EUA	0.5439	0.8717	0.0000	1.0000

2. táblázat: A maradéktagok közötti korrelációs együtthatók és a statisztikai próba p-értékei.

A völgy- és csúcsidőszaki áramár pozitívan korrelál (0.48, a p érték 0, a kapcsolat szignifikáns). A pozitív kapcsolat utal arra, hogy az árat meghatározó keresleti és kínálati tényezők egy része adott napra vonatkozik, egyszerre befolyásolva mindkét napszak árát. A tökéletes korreláció hiánya ugyanakkor azt jelzi, hogy erős a napon belüli (akár órákra vonatkozó) piaci tényezők szerepe. A gáz és emissziós kvóta ára közötti korreláció szintén szignifikáns, pozitív irányú, de gyengébb (0.17). Ennek oka az lehet, hogy ha növekszik a gáz ára, az növeli az egyéb, nagyobb szén-intenzitású tüzelőanyagot használó erőművek termelési részesedését, emiatt a kibocsátás növekszik, a kvóta ára emelkedik. A többi összefüggés szignifikanciája kicsi, ezért az eredmények bizonytalanabbak, az interpretáció is kevésbé megbízható.

² A nullhipotézis szerint a tagok közötti korreláció zérus, az alternatív hipotézis szerint a korrelációs együttható nem egyenlő nullával

II.3. Spread opciók árazása

A várható kibocsátás és erőmű értékének számításához spread opciókat kell árazni, amik a vanília európai call opciókhoz képest (ezekről részletesebben lásd Hull (1999, pp.301-303), Benedek (1999), valamint Száz – Király (2005)) komplexebb kérdések megoldását igényli. A különbözet opciók árazásánál a legnagyobb probléma, hogy az általában logaritmusan normálisnak feltételezett eszközárak összegének eloszlása nem log-normális, zárt analitikus formulával le nem írható. A log-normális változók összegének kérdése több mint 50 éve a matematikusok (Fenton, 1960), mérnökök és pénzügyi szakemberek érdeklődésének középpontjában áll. Figyelemre méltó, hogy például a modern portfólió elméletben is (Markowitz, 1952) normális eloszlással közelítik a portfólió hozameloszlását.

A spread opciókra zárt képletet eddig csak arra az esetre tudtak adni, amikor két eszközt tételezünk fel, és a kötési árfolyam nulla (Margrabe, 1978). Általánosabb esetekre nem rendelkezünk analitikus megoldással. A Kirk-féle formula (Kirk, 1995) két eszközből álló spread opció árára ad közelítő megoldást. Carmona és Durrleman (2003) egy viszonylag pontos, de nehezebben implementálható árazási módszert fejlesztett ki. Milevsky és Posner (1995) reciprok gamma eloszlással közelítette a portfólió értékének sűrűségfüggvényét. Borovkova, Permana és Weide (2007) negatív irányba eltolt log-normális sűrűségfüggvényt használt, ami megengedi a negatív portfólióértékek felvételét, és így alkalmas a spread opciók árazására.

A korai közelítő megoldások elsődleges problémája, hogy általában vagy csak két termékre szóló spread opciókra adnak megoldást, vagy kevés eszközből álló kosár esetén meglehetősen pontatlanok. Deng et al. (2008) levezetett egy olyan megoldást, ami több eszközre szóló spread opciókra vonatkozik, viszonylag gyors és pontos eredményt ad. A Disszertációban az ő módszerüket használom.

A reálopciók modellben szereplő opciókat nem a kockázat semleges mérték szerint áraztam, mert a piac nem teljes: a jövőbeli kibocsátás mennyisége nem kereskedett

termék; és nem tudunk alacsony tranzakciós költségek mellett vásárolni illetve eladni az adott típusú erőmű osztható részét³. Emiatt az értékelésnél a fizikai mértéket használtam⁴. Az analitikus közelítés mellett Monte Carlo szimulációt is használtam olyan esetekre, amikor az analitikus képlet nem használható. Erre példa a kibocsátás sűrűségfüggvényének származtatása, ami nem oldható meg várható értéket biztosító árazási képlet segítségével. Az erre a célra is alkalmazott több dimenziós Monte Carlo szimuláció háttérben adott korrelációs struktúrájú többdimenziós normális eloszlások előállításai állnak (részletesebben lásd Glasserman (2003, p.65) illetve Nagy (2011a)).

III. AZ ÉRTEKEZÉS EREDMÉNYEI

III.1. Az erőmű szén-dioxid-kibocsátásának származtatása

A profitmaximalizáló módon üzemeltetett erőmű csak akkor termel, amennyiben a jövőbeli azonnali árak alapján számított spread pozitív. Mivel a kibocsátás a termelés lineáris következménye, ezért a vállalati emisszió is meghatározható. Hozzunk létre egy Bernoulli típusú kétértékű (0/1) termelési döntési változót (Λ). Ha a spread pozitív, a vállalat termelésével profitot realizálhat, az erőmű működik ($\Lambda = 1$) és szén-dioxidot bocsát a légkörbe; ha a spread negatív, a vállalat termelés esetén veszteséget realizálna, emiatt kapacitásait nem működteti ($\Lambda = 0$) és a kibocsátása nulla.

Tézis 2.1.1: A jövőbeli τ naphoz tartozó termelést illetve állást jelentő kétértékű (0/1) termelési döntési változó (Λ) feltételes értéke megfeleltethető a spread-re vonatkozó európai típusú bináris opció kifizetésfüggvényének (bnO^{PO}), aminek τ a lejáratja és v a kötési árfolyama. $S(0)$ vektorral az alaptermékek kiinduláskori árfolyamait, w vektorral pedig a súlyokat jelöljük:

$$\Lambda_{\text{peak}}(\tau) = bnO_{\text{peak}}^{PO}(S_{\text{peak}}(0), w, v, \tau) = \begin{cases} 1 & \text{ha } w' \cdot S_{\text{peak}}(\tau) > v \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

³ Az energiatermelő vállalatok ugyan vannak tőzsdén jegyezve, de jellemzően több erőművet birtokolnak, illetve egyéb eszközöket is tartalmaz mérlegük.

⁴ A fizikai és a kockázatmentes mértékkel kapcsolatos megfontolásokat lásd bővebben (Medvegyev, 2009)

$$\Lambda_{\text{off-peak}}(\tau) = \text{bno}_{\text{off-peak}}^{\text{PO}}(\mathbf{S}_{\text{off-peak}}(0), \mathbf{w}, v, \tau) =$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{ha } \mathbf{w}' \cdot \mathbf{S}_{\text{off-peak}}(\tau) > v \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1/\eta \\ -\delta/\eta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{\text{peak}}(\tau) = \begin{bmatrix} S_{\text{pow}}^{\text{peak}}(\tau) \\ S_{\text{gas}}(\tau) \\ S_{\text{eua}}(\tau) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{\text{off-peak}}(\tau) = \begin{bmatrix} S_{\text{pow}}^{\text{off-peak}}(\tau) \\ S_{\text{gas}}(\tau) \\ S_{\text{eua}}(\tau) \end{bmatrix} \quad 5.$$

Tézis 2.1.2: A jövőbeli τ időpontra vonatkozó P termelés valószínűsége egyenlő a τ naphoz tartozó kétértékű döntési változó $E[\Lambda(\tau)]$ várható értékével, amit a spread-re vonatkozó bináris spread opciók várható kifizetésének feleltethetünk meg.

$$P(\text{spread}_{\text{peak}}(\tau) > 0) = P(\text{spread}_{\text{peak}}(\tau) > 0) \cdot 1 + P(\text{spread}_{\text{peak}}(\tau) \leq 0) \cdot 0 =$$

$$= E[\Lambda_{\text{peak}}(\tau)] = E[\text{bno}_{\text{peak}}^{\text{PO}}(\mathbf{S}_{\text{peak}}(0), \mathbf{w}, v, \tau)]$$

$$P(\text{spread}_{\text{off-peak}}(\tau) > 0) =$$

$$= E[\Lambda_{\text{off-peak}}(\tau)] = E[\text{bno}_{\text{off-peak}}^{\text{PO}}(\mathbf{S}_{\text{off-peak}}(0), \mathbf{w}, v, \tau)] \quad 6.$$

Amennyiben a napi maximálisan megtermelhető villamos energiát Γ jelöli, akkor az erőmű egy nap alatt, termelés esetén, $\Gamma \cdot \delta/\eta$ mennyiségű szén-dioxidot bocsát ki.

Tézis 2.1.3: Az erőmű jövőbeli τ naphoz tartozó várható kibocsátása megegyezik a bináris spread opció várható kifizetésének és a $\Gamma \cdot \delta / \eta$ napi maximális kibocsátás szorzatával. Egy hosszabb, a jelentől T időpontig terjedő időszak várható $Q_c(\mathbf{0}, T)$ kibocsátása a négytermékes modellben megkapható a jövőbeli napokhoz tartozó bináris opciók segítségével, a következő képlet szerint:

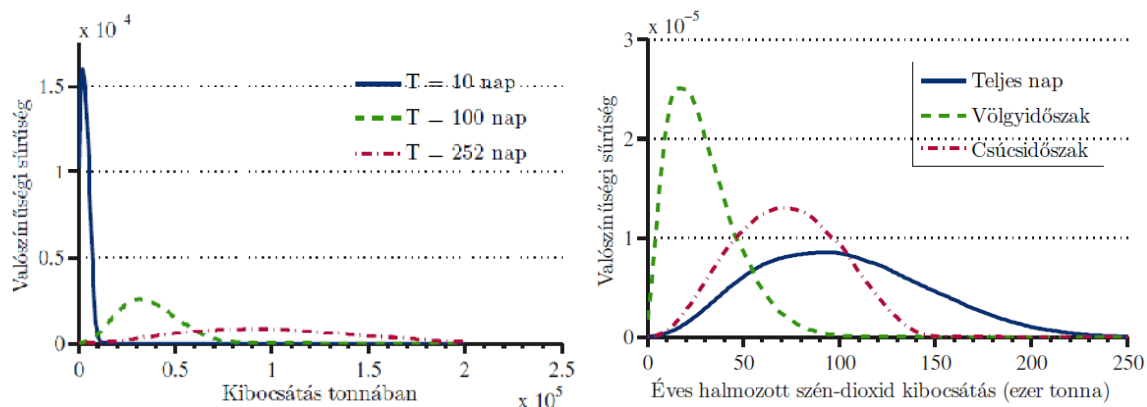
$$E[Q_c(\mathbf{0}, T)] = \Gamma \cdot \delta/\eta \cdot \sum_{\tau=0}^T \frac{E[\text{bno}_{\text{off-peak}}^{\text{PO}}(\mathbf{S}_{\text{off-peak}}(0), \mathbf{w}, v, \tau)] + E[\text{bno}_{\text{peak}}^{\text{PO}}(\mathbf{S}_{\text{peak}}(0), \mathbf{w}, v, \tau)]}{2} \quad 7.$$

A kibocsátás sűrűségfüggvénye

A kibocsátás várható értéke mellett az emisszió sűrűségfüggvénye is megkapható a reálopciók modell segítségével. Ehhez szükségünk van a Λ döntési változó Ω halmazos értékeire.

Tézis 2.2.1: Amennyiben a szimulált spread alapján számított Λ bináris döntési változó halmazosával létrehozott Ω halmazos döntési változó T naphoz tartozó realizációit megszorozzuk a napi maximális kibocsátással és a kapott értékekre

normalizált hisztogramot illesztünk, megkapjuk a kiindulási naptól T napig terjedő időszak halmozott kibocsátásának sűrűségfüggvényét.



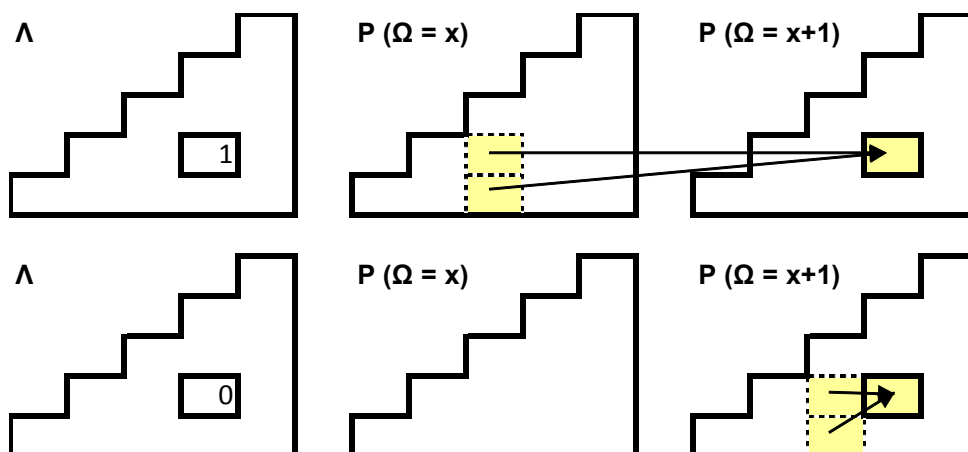
1. ábra: A halmozott kibocsátás Kernel sűrűségfüggvénye eltérő hosszúságú időszakokra (bal), illetve az éves kibocsátás sűrűségfüggvényei (jobb) két napszak vonatkozásában.

A halmozott kibocsátás sűrűségfüggvénye az illesztett modell paramétereitől mellett az időszak elején szélsőségesen jobbra ferde, a zérus emisszió valószínűsége kiemelkedően nagy. A ferdeség mögött az a jelenség áll, hogy az egymást követő napok kibocsátásai korrelálnak egymással: a kiinduló árak alapján számolt negatív árrés miatt az erőmű a kezdeti napon nem termel, és nagy valószínűséggel az azt követő napon is zérus alatti lesz a spread értéke és a kapacitásait szintén szünetelteti. Az idő előre haladtával a pozitív kibocsátású napok száma emelkedik, a halmozott kibocsátás függvény szimmetrikusabb lesz és ellapul. Az éves kibocsátás napszakokra vonatkozó bontása alapján megállapítható, hogy a völgyidőszak esetében az alacsony kibocsátás értékek a valószínűek, a kapott függvény jobbra ferde. A csúcsidőszak esetében a magasabb keresletű órákban az áram ára nagyobb és ezért a spread értéke is magasabb, az erőmű nagyobb valószínűséggel termel, a sűrűségfüggvény jobbra levő ferdesége csökken.

Disszertációban bemutatok egy alternatív módszert a sűrűségfüggvény meghatározására. A halmozott emisszió mennyisége útfüggő: az adott időponthoz tartozó spread érték mellett az is lényeges, hogy korábban a spread folyamata milyen utat járt be. A szokásos binomiális fákat általában a pénzáramlások kiindulási időpontra vonatkozó jelenértékét kalkulálják visszafelé számolva. Esetünkben viszont az emissziós folyamat feltételes – adott halmozott kibocsátáshoz tartozó – valószínűségeit kell számítani egy jövőbeli időpontra vonatkozóan.

Tézis 2.2.2: A halmozott kibocsátás sűrűségfüggvénye modellezhető összekapcsolódó binomiális fák módszerével, amiben a spread-et egydimenziós folyamattal írjuk le. A

folyamathoz tartozó valószínűségi fát, adott halmazott döntési (kibocsátási) szintekhez tartozó valószínűségi rész-fákra bontjuk. A rész-fákban levő valószínűségek egymással speciális összefüggésben állnak: amennyiben az adott állapothoz tartozó spread érték termelést implicál, akkor az eggyel alacsonyabb halmazott döntési (kibocsátási) szint előző lépéseire tartozó valószínűségekből számítjuk az adott valószínűséget. Amennyiben az adott spread állást eredményez, akkor ugyanazon valószínűségi fa előző lépéseire tartozó valószínűségeket használjuk fel.



2. ábra: A valószínűségi fák összefüggésének szemléltetése két különböző esetben (felső sor: $\Lambda=1$, alsó sor: $\Lambda=0$).

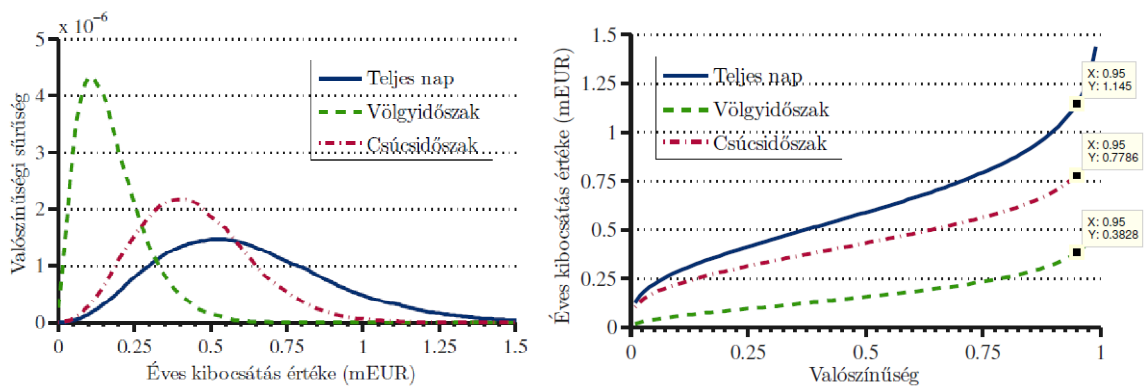
A keresett sűrűségfüggvény megkapható, ha az adott lépéshez tartozó valószínűségeket rész-valószínűségi fákként összesítjük és a kapott értékeket a halmazott kibocsátás függvényében ábrázoljuk.

A megfelelés költségének meghatározása

Az erőmű megfelelési kötelezettséggel rendelkezik: a teljes évi kibocsátásnak megfelelő mennyiségű kvótát kell visszaadnia a hatóságnak.

Tézis 2.3: A reálopciók modell segítségével meghatározható a jövőbeli kibocsátás lefedéséhez szükséges kvótapozíció értéke, a megfelelés közvetlen költsége. Értéke függ az adott időszak alatti kibocsátás mennyiségétől és az emissziós kvóta jövőbeli áralakulásától.

A költség eloszlásából kockázatos értéket (Value at Risk, VaR (Jorion, 1999, p.97)) számíthatunk, ami megmutatja, hogy adott konfidenciaszint mellett maximum mekkora költséggel jár a kibocsátás kvótával való lefedése:



3. ábra: Éves kibocsátás jövőértékének sűrűségfüggvénye és inverz eloszlásfüggvénye, valamint a 95%-os valószínűséghez tartozó pontok.

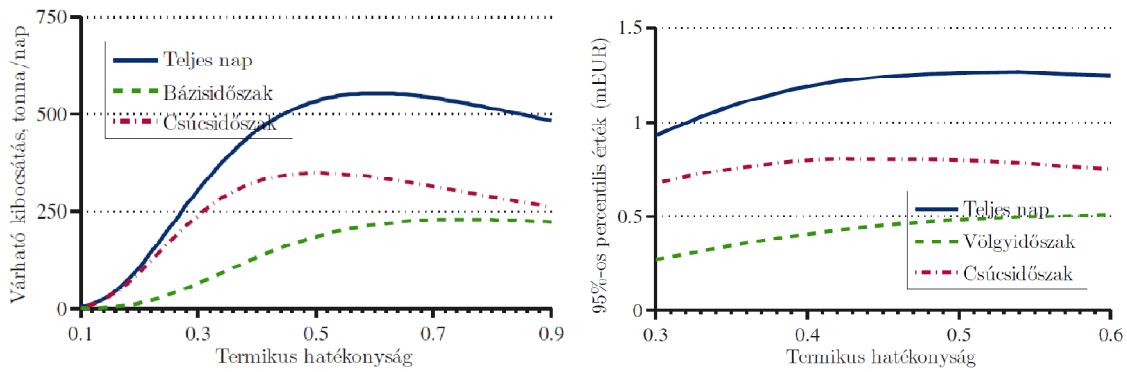
Az erőműnek az éves kibocsátása fedezése 95%-os megbízhatósággal kisebb költséget jelent, mint 1.15 millió Euró.

A kibocsátásra vonatkozó érzékenységvizsgálatok

A reálopciók modell segítségével választ kaphatunk olyan kérdésekre is, hogy az emisszió milyen mértékben függ különböző technológiai és piaci faktoroktól.

Tézis 2.4: A napi maximális emisszió mennyisége ($\Gamma \cdot \delta / \eta$), rögzített Γ napi kapacitás mellett, fordítottan arányos a termikus hatékonysággal. A termikus hatékonyság növekedése ezért látszólag csökkenti a vállalati emissziót. A reálopciók modellben azonban megfigyelhető egy ezzel ellentétes hatás is: a növekvő hatékonyság növeli a spread értékét az egységnyi energia megtermelésének csökkenő erőforrásigénye miatt. Megnö a termelés valószínűsége, ami ceteris paribus magasabb emissziót eredményez.

A várható kibocsátás a termikus hatékonyság változásával az alábbiak szerint módosul:



4. ábra: A várható kibocsátás (bal) és a jövőbeli kibocsátás lefedésének költségére vonatkozó 95%-os VaR érték (jobb) alakulása a termikus hatékonyság függvényében.

A termikus hatékonyság mellett különböző piaci faktorok hatását vizsgáltam: az alaptermékek kiindulási árait és hosszú távú átlagait, a volatilitást, valamint a korrelációs együtthatót.

Tézis 2.5: A modellben az áram azonnali árának változása nem változtatja meg a jelentősen a kibocsátás mennyiségét és a megfelelés költségét. Ennek oka, hogy az illesztés eredményeképpen kapott áram volatilitása és átlaghoz való visszatérési sebessége magas, az azonnali árban bekövetkező változás hatása gyorsan elenyészik. A kevésbé volatilis és lassabban visszahúzó gáz azonnali árának változása viszont jelentős hatást gyakorol a kibocsátásra: alacsony gázár esetén a várható emisszió felveszi az elméleti maximális (állandó termelés melletti) értékét, magas gázár esetében a várható kibocsátás jelentősen lecsökken.

A kvótaár elmozdulása a modellben hozzávetőlegesen ötöd akkora hatást gyakorol a spread értékére, mint a gázár változása. Ennek oka az, hogy a spread képletében a gázár a termikus hatékonyság reciprokéval, a kvóta ár viszont a reciprokéval mellett a gáz szén-intenzitásával ($0.2014 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{\text{in}}$) is szorozódik. A kibocsátás mennyiségét nem, a megfelelés várható költségét viszont nagymértékben befolyásolja a kvótaár: magas piaci ár esetén a megfelelés költsége jelentős, alacsony ár kevésbé számottevő költséget eredményez az erőmű számára. Különösen akkor magas a megfelelés költsége, ha alacsony gázár párosul magas kvótaárral. Ez a szituáció akkor lehetséges, ha az energiahordozó ára esik, és a szabályozó hatóságok jelentős mértékben szűkítik a rendelkezésre álló kvótamennyiséget.

III.2. Az erőmű jövedelemtermelő képességének értékelése

Az erőmű jövedelemtermelő képességének értéke szintén meghatározható a reálopciók modellre támaszkodva. A jövőbeli τ nap völgy (off-peak) és csúcsidőszakában (peak) realizált, egységnyi megtermelt energiára vonatkozó π profit feltételes értéke megfeleltethető európai típusú spread opciók $spo^{PO}(\mathbf{S}(0), \mathbf{w}, v, \tau)$ kifizetésfüggvényének, ahol $\mathbf{S}(0)$ a kiindulási árfolyamok vektora, \mathbf{w} az egyes termékekhez tartozó súlyok vektora, amiben az első termékhez pozitív, a többi termékhez negatív súly tartozik, v a kötési árfolyam és τ a lejárat idő:

$$\begin{aligned}\pi_{off-peak}(\tau) &= spo^{PO}(\mathbf{S}_{off-peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau) \\ \pi_{peak}(\tau) &= spo^{PO}(\mathbf{S}_{peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau)\end{aligned}\quad 8.$$

Ha spo^{Pr} jelöli az opció árát, akkor a τ jövőbeli nap várható profitjának jelenértéke megkapható a két opciós ár számtani átlagának és a Γ napi maximális kapacitás szorzatából:

$$\begin{aligned}PV[E^Q[\Pi(\tau)]] &= \\ &= PV\left[E^Q\left[\Gamma \cdot \frac{spo^{PO}(\mathbf{S}_{off-peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau) + spo^{PO}(\mathbf{S}_{peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau)}{2}\right]\right] = \\ &= \Gamma \cdot \frac{spo^{Pr}(\mathbf{S}_{off-peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau) + spo^{Pr}(\mathbf{S}_{peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau)}{2}\end{aligned}\quad 9.$$

Tézis 3.1: Az opciós analógia segítségével kifejezhetjük az erőmű, mint eszköz jövedelemtermelő képességének pénzügyi értékét. Ez megegyezik a T élettartama alatt realizálható várható különbözetelek jelenértékeinek összegével, amit a modellben a völgy- és csúcsidőszaki spread-re vonatkozó európai típusú, adott lejárat naphoz tartozó opciók árainak halmozott összegéből, a napi maximális kapacitás felével való szorzás segítségével számolhatunk:

$$V = \frac{\Gamma}{2} \cdot \sum_{\tau=0}^T [spo^{Pr}(\mathbf{S}_{off-peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau) + spo^{Pr}(\mathbf{S}_{peak}(0), \mathbf{w}, v, \tau)] \quad 10.$$

Az értékelésnél 30 éves élettartamot tételeztem fel, továbbá azt, hogy a karbantartási költségeket és a megújító beruházásokat a v egyéb változó költség tag (ami esetünkben a

spread opciók kötési árfolyama) tartalmazza, valamint az adók hatásait elhanyagoltam. Az erőmű a modell feltevései mellett 97.3 millió Eurót ér.

Az értékelésre használt spread opciók érzékenyek különféle technológiai és árfolyammozgáshoz köthető paraméterek megváltozására, ezért célszerű megvizsgálni, hogy mely tényezők befolyásolják jelentősen az opciók és rajtuk keresztül az erőmű értékét. Ceteris paribus a termikus hatékonyság, az alaptermék kiindulási és hosszú távú átlagárának, az árak volatilitásának, valamint a gáz és kvótaár közötti korrelációs együttható értékének hatását vizsgáltam.

Tézis 3.2: A reálopciók modell segítségével megállapítható, hogy a termikus hatékonyság növekedése közel lineárisan növeli az erőmű értékét. 1 százalékpontos javulásra a modellbeli erőmű értékét hozzávetőlegesen 5 millió Euróval emeli, legjobban a 37-40%-os hatékonyságú erőművek értéke növekszik a termikus hatékonyság javulására.

A modellben az azonnali áramárak nem befolyásolják jelentősen az erőmű értékét, mert a magas volatilitás és az átlaghoz történő gyors visszahúzás miatt a kiinduló árak hatása hamarabb elenyészik. Az inputok (elsősorban a gáz) azonnali árának emelkedése számottevően csökkenti az erőmű értékét. Az adott technológiai paraméterek mellett, a korábban bemutatott okok miatt, a gáz árának változása közel ötször akkora hatással bír az erőmű értékére, mint az emissziós kvóta ára.

Amennyiben az azonnali árak helyett a hosszú távú átlagokat változtatjuk, akkor jelentős mértékben változik az erőmű értéke. Az áram átlagának növekedése emeli, az input árak növekedése csökkenti az erőmű értékét. Az árak változékonyságának, a volatilitásnak az emelkedése növeli az erőmű értékét. A hatás a négy alaptermék közül a gáz esetében a legjelentősebb.

A korrelációs együtthatók közül a modell illesztése során a völgy és csúcsidőszaki áramár közötti érték volt szignifikánsan pozitív. Az erőmű értékét nem befolyásolja ennek az együtthatónak a változása, mert a számítás során a két napszakra vonatkozó opcióárak összegét számoljuk, és a kétféle áramár különböző opciós formulában szerepel. A másik szignifikáns korrelációs együttható a gáz és kvótaár közötti, ez hatással van az erőmű értékére, mivel a két érintett alaptermék ugyanazon opciós képletben szerepel. A modell eredményeire támaszkodva ugyanakkor megállapítható, hogy a gáz és az EUA között levő korrelációs együttható változása nem befolyásolja számottevően az erőmű értékét.

Az erőmű értékének fedezése, az optimális kvótapozíció

Ha az erőművet nem kívánjuk indokolatlan, árfolyamváltozásból adódó kockázatnak kitenni, akkor azt fedezni kell az alaptermékek árfolyamváltozásából eredő értékváltozás ellen. Ezt megtehetjük dinamikus delta hedge segítségével, aminek során olyan fedezeti ügyleteket kötünk, hogy a négy termékre vonatkozó összesített delta paraméterek zérushoz közeli legyenek. Mivel az áram volatilitása meglehetősen magas, és az alaptermék árak közül a gázár a legmeghatározóbb, ezért célszerű legalább a gáz árváltozása ellen fedezni az erőművet.

Tézis 3.3: A négy termékre szóló dinamikus delta hedge stratégia alapján számított, az emissziós kvótára vonatkozó, delta paraméter megmutatja, hogy mennyi kvótát érdemes az erőműnek a jövőbeli kibocsátásai fedezése érdekében adott pillanatban tartania. A teljes év kibocsátását tekintve, az optimális kvótapozíció a jövőbeli kibocsátásokra vonatkozó összesített delta paraméternek és a múltbeli, tényszerű kibocsátások fedezéséhez szükséges kvóta mennyiségének az összegével egyenlő.

Hatékonyságnövelő beruházás értéke

Az erőmű értékelési modellje segítségével levezethető egy 5 százalékpontos hatékonyságnövelő beruházás értéke, melyet a következő képlet szerint számítottam:

$$V_{inv} = V_{gen}(\eta = 43\%) - V_{gen}(\eta = 38\%) \quad 11.$$

A beruházás értéke a modellbeli paraméterek mellett 28.2 millió Euró. A reálopciók modell segítségével megvizsgáltam, hogy a kapott érték mennyire érzékeny a különböző faktorok megváltozására.

A spread képletében a termikus hatékonyság az inputok áraival kapcsolatban szerepel. Emiatt elsősorban az inputok árai befolyásolják a hatékonyságnövelő beruházás értékét. Az áram hatása annyiban merül ki, hogy a magasabb hatékonyságú esetben magasabb áramár nagyobb valószínűséggel fog pozitív spread-et eredményezni.

Tézis 4: Az azonnali árak közül a gáz és az emissziós kvóta árának növekedése csökkenti, az áram hosszú távú átlagárának növekedése növeli az elméleti, 5 százalékpontos hatékonyságnövelő beruházás értékét. A volatilitások közül egyedül a gázárhoz kötődő befolyásolja jelentősebben, pozitív mértékben a beruházás értékét. A gáz és kvótaár közötti korrelációra a beruházás értéke érzéketlen.

Konstans termelés hosszú távú termelési szerződések birtokában

Az erőműveket sok esetben nem a piaci árak alapján, profitmaximalizáló módon üzemeltetik, hanem hosszú távra szóló termelési szerződések kötése mellett bizonyos periódusokban állandóan üzemben tartják. A modellbeli feltevések mellett (például technológiai korlátok elhanyagolása) az erőmű ezzel elveszíti az opciók értékének egy részét.

Tézis 5.1: Az állandó, piaci áraktól független termelés esetén az erőmű értéke kifejezhető spread-re szóló határidős swap (csere) kontraktusok összegeként. A jövőbeli τ napon megtermelt egységnyi energián realizált, konstans működtetés miatt keletkező veszteség (lcp) a spread opciók (spo) és swap-ok (ssw) értékének különbségeként becsülhető:

$$lcp(\overline{S(0)}, w, v, \tau) = spo^{Pr}(\overline{S(0)}, w, v, \tau) - ssw^{Pr}(\overline{S(0)}, w, v, \tau) \quad 12.$$

Amennyiben az erőművet hosszabb, T időpontig terjedő, időszakban üzemeltetik állandóan, akkor a veszteség jelenértéke a következő formula szerint számolható:

$$\frac{\Gamma}{2} \cdot \sum_{\tau=0}^T [lcp(\overline{S_{base}(0)}, w, v, \tau) + lcp(\overline{S_{peak}(0)}, w, v, \tau)] \quad 13.$$

Az európai opció mindig többet ér, mint az azonos kötési árfolyammal rendelkező swap ügylet, ezért az erőmű mindig veszít értékéből, ha állandóan üzemel. A veszteség abból adódik, hogy negatív spread esetén jobban jár, ha nem termel, és piaci vásárlással tesz eleget esetleges szállítási kötelezettségének. Fontos hangsúlyozni, hogy ez a megállapítás akkor is igaz, ha kiemelkedően magas áron sikerül termelési kötelezettségre szerződnie, ugyanis a szállítási szerződés önmagában, termeléstől függetlenül rendelkezik értékkel. Ez az érték akkor is realizálható, ha az erőművet feltételesen működtetik, mert az erőmű szabadon dönthet arról, hogy saját megtermelt energiával, vagy piaci ügylettel tesz eleget kötelezettségének.

3 különböző ideig (1 év, 3 év, 5 év) tartó állandó üzemelés miatti veszteségre vonatkozó számítási eredményeket a következő táblázat tartalmazza:

Adatok millió Euró-ban	1 év	3 év	5 év
Opció érték (spo)	3.34	12.09	21.04
Swap értéke (ssw)	-7.05	-16.17	-22.79
Állandó termelés miatti veszteség (lcp)	10.39	28.26	43.82

3. táblázat: Az állandó üzemelés miatti veszteség, 3 különböző esetben (az erőmű 1, 3 illetve 5 évig állandóan üzemel).

Megvizsgáltam, hogy a veszteség mértéke hogyan függ különböző technológiai és piaci faktorok megváltozásától.

Tézis 5.2: A termikus hatékonyság emelkedése esetén (például hatékonyságnövelő beruházás) az állandó üzemeltetés miatti veszteség csökken. Ennek oka, hogy a növekvő hatékonyság miatt a negatív spread valószínűsége csökken, így ritkábban racionális az erőművet pihentetni, és piaci vásárlással eleget tenni a szállítási kötelezettségnek.

A reálopció döntési modell segítségével megállapítható, hogy az átlaghoz lassabban visszahúzó inputok kiindulási árának növekedése növeli a veszteséget, ennek oka az, hogy a növekvő erőforrás árak miatt a negatív spread esélye nagyobb lesz, így magasabb

azon napok aránya, amikor a konstans üzemeltetés helyett piaci ügyletekkel kellene eleget tenni szállítási kötelezettségének. A kapott értékek különösen érzékenyek a gázár emelkedésére. Az áram hosszú távú átlagának növekedése csökkenti, az inputok hosszú távú árának emelkedése növeli az állandó termelés miatti veszteséget. Az áram esetében a volatilitás növekedése növeli az állandó termelés miatti veszteséget, a gáz és emissziós kvóta volatilitásának szűkebb intervallumon történő módosítása nem változtatja meg jelentősen a vizsgált értéket. A gáz és kvótaár közötti korrelációs együttható hatása elhanyagolható.

III.3. Az MNPB függvény és az egyéni kvóta keresleti függvény származtatása

Az MNPB (Marginal Net Private Benefit, egyéni tiszta határhaszon) függvény (Kerekes és Szilávik, 2003, pp. 92-93.) a környezetgazdaságtani elemzések egyik fő sarokköve. Értéke megmutatja, hogy egységnyivel növelve a termelést (vagy szennyezést), mennyivel növekszik a vállalat profitja. A függvény a kvótaköltség nélküli bevételre vonatkoztatva megmutatja, hogy egységnyi szennyezésen várhatóan milyen nagyságú emissziós költség nélküli spread-et realizálhat az erőmű.

Tézis 6.1: A kvótára vonatkozó rezervációs ár⁵ értéke az emissziós egység nélküli, két termékre vonatkozó spread opció $spo2^{Pr}$ árából származtatható a következők szerint:

$$P_{off-peak}^{EUA,reservation} = \eta/\delta \cdot spo2_{off-peak}^{Pr}(S_{off-peak}(0), w, v, \tau)$$

$$P_{peak}^{EUA,reservation} = \eta/\delta \cdot spo2_{peak}^{Pr}(S_{peak}(0), w, v, \tau)$$

$$\text{ahol } w = \begin{bmatrix} 1 \\ -1/\eta \end{bmatrix}, S_{off-peak}(0) = \begin{bmatrix} S_{pow}^{off-peak}(0) \\ S_{gas}(0) \end{bmatrix}, S_{peak}(0) = \begin{bmatrix} S_{pow}^{peak}(0) \\ S_{gas}(0) \end{bmatrix} \quad 14.$$

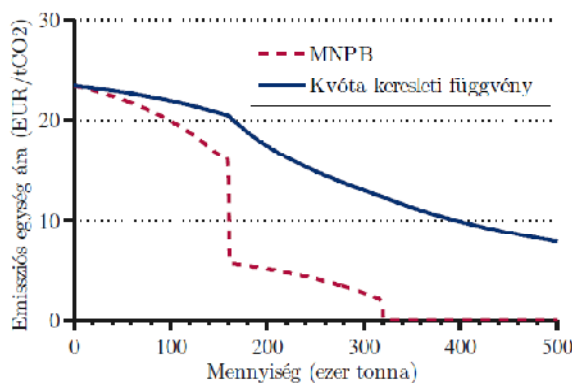
A formulákban szereplő opcióárakat η/δ tényezővel kellett megszorozni, hogy egységnyi megtermelt energia helyett egységnyi kibocsátásra vonatkozó értéket kapjunk.

⁵ A rezervációs ár modelljében nem számoltam a felesleges kvóta piaci értékesítésének alternatívájával.

A rezervációs árakból megkapható a környezetgazdasági elemzésekben központi szerepet játszó MNPB függvény.

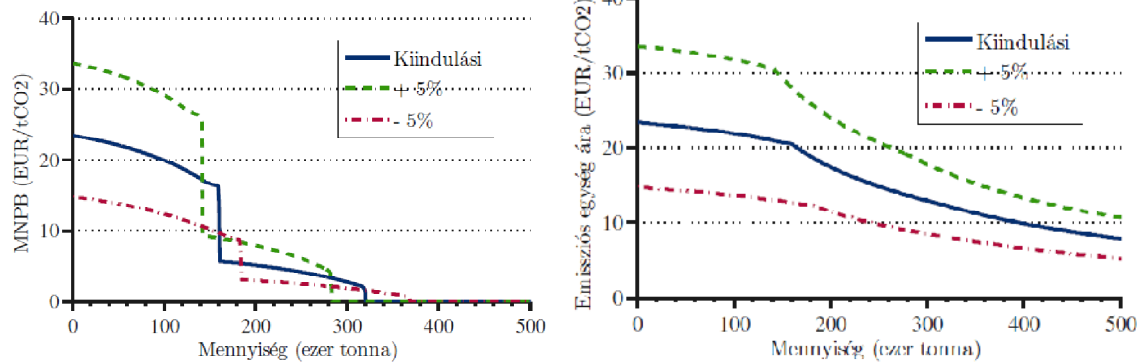
Tézis 6.2: Adott időszakra vonatkozó kvótaköltség nélküli MNPB függvényt megkaphatjuk, ha az időszak napjaihoz tartozó, két termékre vonatkozó spread opciók árait csökkenő sorrendbe rakjuk és a halmozott kibocsátási mennyiség függvényében ábrázoljuk.

A harmadik kereskedési szakasztól (2013-2020) kezdve a hatóságok az eddig túlnyomórészt ingyenes juttatás helyett növekvő mértékben aukció keretében fogják résztvevőkhöz juttatni a kvótákat. Az MNPB függvényt integrálva és a mennyiséggel leosztva kapható meg az egyéni kvótakeresleti függvény, amit a megfelelő aukciós stratégia kialakításához feltétlenül tudni szükséges.



5. ábra: Az emissziós egységre vonatkozó kvótaköltség nélküli MNPB és az egyéni keresleti függvény 1 éves kibocsátást figyelembe véve.

A kapott egyéni keresleti függvény 23 Euró/tonna körüli értékről indul, ez a csúcsidőszakhoz tartozó legértékesebb spread opciót képviseli. Az MNPB függvény két lépcsős, a magasabb rész a csúcsidőszakra vonatkozó, értékesebb opciókat tartalmazza, az alsó lépcső a völgyidőszakhoz tartozókat. Az egy év alatt maximálisan elérhető kibocsátás 321 ezer tonna, ami felett a kibocsátáson realizálható határbevétel zérus, mert az erőmű nem tud a maximális kapacitása felett termelni, és eredményt sem tud realizálni a további szennyezésen. A modellre támaszkodva meghatározható, hogyan reagálnak az eredményül kapott függvények a vizsgált tényezők megváltozására. A termikus hatékonyság +/- 5 százalékpontos változása a következő ábra szerint változtatja a függvényeket:



6. ábra: Adott halmazott szennyezési szinthez tartozó MNPB és az egyéni kvóta keresleti függvény eltolódása a termikus hatékonyság +/- 5 százalékpontos változására.

Tézis 6.3: A termikus hatékonyság emelkedés növeli az MNPB függvény meredekségét és csökkenti a vízszintes tengely metszéspontját, a kvótakeresleti függvény felfelé tolódik.

A villamos energia hosszú távú átlagának emelkedése a két függvényt felfelé tolja, az árcsökkenés hatása ezzel ellentétes. A völgyidőszaki áram árának változása az MNPB alul levő szintjét változtatja, ami az alacsonyabb keresletű napszakhoz tartozó opcióárakból ered; a csúcsidőszakra vonatkozó ár változása a felső szakaszt tolja el.

A gázár emelkedése lefelé tolja a függvényeket, az árcsökkenés hatása ezzel ellentétes. Az azonnali gázáremelkedés az MNPB felső szakaszának meredeksége növekszik, árcsökkenésre a meredeksége csökken. A gázár hosszú távú átlagának változása esetén a hatás iránya megegyezik, jellege fordított: az áremelkedés kevésbé meredekké teszi az MNPB függvényt, az árcsökkenés a meredekséget növeli.

A Disszertációban bemutatott sokféle alkalmazás alapján belátható, hogy a liberalizált piacon működő erőmű nem nélkülözheti a modern kockázatkezelési módszereket. A négytermékes reálopciók modell egy gyakorlatban jól alkalmazható eszköz az optimális, profitmaximalizáló döntések és ezekből következő hatások előrejelzéseire.

IV. FŐBB HIVATKOZÁSOK

- ABADIE, L. M. - CHAMORRO, J. M. (2008): European CO₂ prices and carbon capture investments. *Energy Economics*, 2008, 30[6], pp. 2992–3015.
- ALBEROLA, E. - CHEVALLIER, J. – CHÉZE, B. (2008): Price drivers and structural breaks in European carbon prices 2005–2007, *Energy Policy*, 2008, 36[2], pp. 787–797.
- BÉLYÁ CZ, I. (2011): Stratégiai beruházások és reálopciók. Aula kiadó, Budapest, 2011
- BENEDEK, G. (1999): Opcióárazás numerikus módszerekkel, *Közgazdasági Szemle*, 1999, 46[9], pp. 905–929.
- BENZ, E. - TRÜCK, S., (2009): Modeling the price dynamics of CO₂ emission allowances, *Energy Economics*, 2009, 31[1], pp. 4-15.
- BOROVKOVA, S. - PERMANA, F. J., - V.D. WEIDE, H. (2007): A Closed Form Approach to the Valuation and Hedging of Basket and Spread Options, *The Journal of Derivatives*, 2007, 14[4], pp. 8-24.
- CARMONA, R. – DURRLEMAN, V. (2003): Pricing and hedging spread options. *SIAM Review*, 2003, 45[4], pp. 627-685.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITITES (2008): Energy Sources, Production Costs and Performance of Technologies for Power Generation, Heating and Transport. *Second Strategic Energy Review*. Comission Staff Working Document, 13.11.2008, SEC(2008) 2872, Brussels, 2008.
- CONVERY, F. J. - REDMOND, L. (2007): Market and price developments in the European Union Emissions Trading Scheme. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2007. 1[1], pp. 88–111.
- CRAGG, M. – GOLDBERG, R. – KHATCHATRIAN, V. – DeFONSEKA, J. (2011): Cleaning Up Spark Spreads: How Plant Owners Can Reduce Risk Through Carbon Markets, elérhető: http://www.brattle.com/_documents/UploadLibrary/Upload933.pdf, letöltve: 2011.05.10
- DASKALAKIS, G. – PSYCHOYIOS, D. - MARKELLOS, R. N. (2009): Modeling CO₂ emission allowance prices and derivatives: Evidence from the European trading scheme, *Journal of Banking & Finance*, 2009, 33[7], pp. 1230–1241.
- DENG, S. – LI, M. – ZHOU, J. (2008): Closed-form approximations for spread option prices and greeks. *Journal of Derivatives*, 2008, 16(4), pp. 58–80.

- DIXIT, R. K. – PINDYCK, R. S. (1994): *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1994.
- DOBOS, I. (2002): Szennyezési jogok hatása a vállalati termelési stratégiára, BKÁE *Vállalatgazdaságtan Tanszék Műhelytanulmány sorozat*, 25, Budapest
- FAZEKAS, D. (2009): Szén-dioxid piac az Európai Unió új tagállamaiban - Magyarországi empirikus elemzés, Ph.D. értekezés, *Budapesti Corvinus Egyetem*
- FENTON, L. (1960): The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission Systems. *IRE Transactions on Communication Systems*, 1960, 8[1], pp. 57–67.
- GLASSERMAN, P. (2003): *Monte Carlo Methods in Financial Engineering*. Springer-Verlag, New York, 2003.
- HERBELOT, O., (1992): Option Valuation of Flexible Investments: The Case of Environmental Investments in the Electric Power Industry, PhD értekezés, *Massachusetts Institute of Technology*, elérhető: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/13217>, letöltve 2010.02.21
- HLOUSKOVA, J. - KOSSMEIER, S. - OBERSTEINER, M. - SCHNABL, A. (2005): Real options and the value of generation capacity in the German electricity market, *Review of Financial Economics*, 2005, 14[3-4], pp. 297–310.
- HULL, J. C. (1999): *Opciók, határidős ügyletek és egyéb származtatott termékek*. Panem-Prentice-Hall, Budapest, 1999
- JORION, P. (1999): *A kockázatos érték*. Panem, Budapest, 1999
- KANEN, L. M. (2006): *Carbon Trading & Pricing*. Environmental Finance Publications, 2006.
- KEREKES, S. – SZLÁVIK, J. (2003): *A környezeti menedzsment közgazdasági eszközei*. KJK-KERSZÖV, Budapest, 2003.
- KIRK, E. (1995): Correlation in the energy markets, in *Managing energy price risk*, Risk Publications and Enron, London
- LAURIKKA, H. (2006): Option value of gasification technology within an emissions trading scheme. *Energy Policy*, 2006, 34[18], pp. 3916–3928.
- LESI, M., PÁL, G. (2004): Az üvegház hatású gázok kibocsátásának szabályozása, és a szabályozás hatása a villamos-energia termelő vállalatokra Magyarországon. Ph.D. értekezés. *Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem*

- MANSANET-BATALLER, M. - PARDO, A. - VALOR, E. (2007): CO2 prices, energy and weather. *The Energy Journal*, 2007, 28[3], pp. 334–346.
- MARGRABE, W. (1978): The value of an option to exchange one asset for another. *Journal of Finance*, 1978, 33[1], pp. 177–186.
- MARKOWITZ, H. M. (1952): Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, 1952, 7[1], pp. 77–91.
- MAROSSY, Z. (2011): A villamos energia áralakulásának egy új modellje. *Közgazdasági Szemle*, 2011, 58[3], pp. 253—274.
- MEDVEGYEV, P. (2009): A származtatott termékek árazása és annak problémái az egyensúlyelmélet szempontjából. *Közgazdasági Szemle*, 2009, 56[9], pp. 769–789.
- MILEVSKY, M.A. - POSNER, S.E. (1995): Asian options, the sum of lognormals and the reciprocal gamma distribution. *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 1995, 33[3], pp. 409-422.
- OBERNDORFER, U. (2009): EU emission allowances and the stock market: evidence from the electricity industry. *Ecological Economics*, 2009, 68[4], pp. 1116–1126.
- REILLY, J., M - PALTSEV S. (2005): An analysis of the European emission trading scheme. Working paper 2007, elérhető: http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt127.pdf, letöltve: 2011.08.02
- SCHWARTZ, E. S. (1997): The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging, *The Journal of Finance*, 1997 július, 52[3], pp. 923–973.
- SEIFERT, J. – UHRIG-HOMBURG, M. - WAGNER, M. (2008): Dynamic behavior of CO2 spot prices. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2008, 56[2], pp. 180–194.
- SZÁZ, J. - KIRÁLY, J. (2005): Derivatív pénzügyi termékek árdinamikája és az új típusú kamatlábmodellek. *Sigma*, 2005, 36[1-2], pp. 31-60.
- VEITH, S. - WERNER, J. R. - ZIMMERMANN, J. (2009): Capital market response to emission rights returns: evidence from the European power sector. *Energy Economics*, 2009, 31[4], pp. 605–613.

V.A TÉMAKÖRREL KAPCSOLATOS SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

Magyar nyelvű publikációk

Könyvrészlet

NAGY, T. (2012): Optimális kvótapozíció EU ETS-ben résztvevő villamoserőmű esetében (reálopciók megközelítés), in: *Fenntartható fejlődés, Élhető régió, Élhető települési táj*, 2. kötet, pp. 149-160., Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest, 2012

Referált szakmai folyóirat

NAGY, T. (2011d): Vállalati kockázati faktorok az EU ETS rendszerben, *Vezetéstudomány*, 2011, 42[9], pp. 53-66., Budapest

NAGY, T. (2013): A villamos erőművek szén-dioxid-kibocsátásának modellezése reálopciók segítségével, *Közgazdasági Szemle*, 2013, 60[3], pp. 318-341., Budapest

Angol nyelvű publikációk

Referált szakmai folyóirat

NAGY, T. (2011b): Simulation of carbon-dioxide emission by option model. *Society and Economy*, 2011, 33[1], pp. 219-236., DOI:10.1556/SocEc.33.2011.1.15

Konferencia kiadvány

NAGY, T. (2010): Effect of price uncertainty to power sector innovations, *Springwind 2010*, konferencia kötet, pp. 408-414., Pécs, 2010

NAGY, T. (2011c): Simulation of carbon-dioxide emission by option model. *EMAN-EU Conference Proceedings, Accounting for Climate Change – What and How to measure*, pp. 263-277.

NAGY, T. (2011e): Dynamic hedging of a Gas Turbine under EU-ETS. *Chinese-European Cooperation for a Long-term Sustainability*, poszter szekció

Egyéb publikáció

NAGY, T. (2011a): (Weighted) Sum of 'n' Correlated Lognormals: Probability Density Function – Numerical calculation. SSRN, elérhető: <http://ssrn.com/abstract=1757781>