

I. Századvég-MET energetikai tanulmányíró verseny

Választott témakör (megfelelőt aláhúzni)

- A megújuló energiaforrásokat felhasználó villamosenergia termelő egységek hozambizonytalanságához kapcsolódó hálózati megoldások
- Fejlesztési lehetőségek Magyarország energetikai hulladékhasznosításában
- Nukleáris fejlesztések hatásai és kockázatai
- Az Európai Unió és Magyarország gázpiacát érintő kihívások és arra adható megoldások
- Az energiaszektor és az ipar fejlesztésének kölcsönhatásai

Urbán András, Velenyák Tamás

2016 Január 3.

IV. generációs atomerőművel történő energiatermelés műszaki és gazdasági aspektusai

Készítette:

Urbán András, Velenyák Tamás
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Gépészmérnöki Kar / Gazdasági és Társadalomtudományi Kar
Gépészmérnök Msc, Energetikai mérnök Msc / Pénzügy Ma

Egyetemi konzulens

Kiss Attila
Tudományos segédmunkatárs (Nukleáris Technológia Intézet)

Budapest, 2015 Január 3

Rezümé

Napjainkban egyre jelentősebb kérdéssé vált a folyamatos, megbízható és környezetvédelmi szempontokból megfelelő energiatermelés kérdésköre. A fosszilis energiaforrások kimerülőben vannak, illetve a jelenlegi felhasználásuk jelentős terhelést jelent az ökoszférára is. A megújuló energiaforrások ugyan környezetkárosító hatással nem bírnak, ám a vízerőművek kivételével nagymértékben ki vannak szolgáltatva az időjárás változékonyságának, így az alacsony csúcskihasználási óraszámuknak köszönhetően alap energiaforrásként nem alkalmazhatóak.

Dolgozatunkban egy IV. generációs atomerőművi egység segítségével megvalósított kapcsolt energiatermelés lehetőségét vizsgáljuk. Ez alatt nem az atomerőművek esetén jellemző kis teljesítményű távhő kiadásra alkalmas rendszert értjük, hanem a reaktorhoz kapcsolódó nagyméretű ipartelep kogenerációját, ahol a nagymértékű hőenergia igényt a nukleáris létesítmény segítségével elégítjük ki. Az erőmű és annak primer körének felépítése illetve tulajdonságai jelentős mértékben eltérnének a napjainkban elterjedt nyomott vizes konstrukciótól. Az reaktor hűtőközege és moderátora a most használt könnyűvíz helyett hélium, illetve grafit lesz. A hélium, mint gáz alkalmazása hűtőközegként abban a tekintetben fontos számunkra, hogy ennek segítségével 700, vagy akár 1000°C-os primerköri kilépő hőmérséklet érhetünk el, ami jelentősen meghaladja a víz esetében elérhető, körülbelül 300°C-ot. Ez azért fontos a számunkra, mivel a végfelhasználót lényegesen jobb minőséggel rendelkező gőzzel tudjuk ellátni, mint az eddig használt konstrukciók esetében.

Ennek szemléltetésére a számítógépes modellalkotás tűnt a legmegfelelőbb megoldásnak, amit a Cycle-Tempo programkörnyezetben valósítottunk meg. Az általunk alkalmazott program lehetőséget biztosít a hőkörfolyamatok modellezésére, illesztési és optimalizációs feladatok elvégzésére. A vizsgálatok során több potenciális telephely is elemzés alá került, amelyek a modell globális jellege miatt összehasonításra kerültek. A modellekből származó eredmények alapján lehetőségünk volt megállapítani, a műszaki szempontból legoptimálisabb tűnő konstrukciót.

A mérnöki szempontú vizsgálatokon túl, a piac igényinek való megfelelést is fontos szempontnak tartjuk, így az elkészült körfolyamathoz illesztettünk egy gazdasági modellt is. Ennek a keretein belül elsődlegesen az új erőmű létesítésével járó költségek megtérülését vizsgáltuk, amely számos előre nehezen becsülhető paramétertől függ. Mivel ezen elemek kismértékű változása nagyban befolyásolhatja a projekt sikerességét, így ezen változókhoz illesztettünk több érzékenység vizsgálatot is. Ezek megmutatják számunkra, hogy mely tényezők miként befolyásolják a beruházás végkimenetelét, és hogy melyekre kell nagyobb hangsúlyt fektetni a pontosabb végeredmény érdekében.

De hiába a messzemenő műszaki és gazdasági optimum elemzések összessége; Vajon megéri-e a jövő társadalmának pénzt és időt áldoznia ezen elgondolásnak?

Tartalomjegyzék

2.1.	A IV. generációs atomerőmű	1
2.2.	A kapcsolt energiatermelésben rejlő lehetőségek	2
2.3.	Kitekintés, potenciális felhasználási lehetőségek	3
2.4.	Biztonsági megfontolások	5
3.1.	A Cycle-Tempo (CT) program bemutatása	8
3.2.	A modell bemutatása részegységenként	9
3.2.1.	Primer kör	11
3.2.2.	Turbinarendszer	12
3.2.3.	Szeparált hőkiadási körök kialakítása az ipar számára	14
3.2.4.	A kondenzátor hűtővíz köre	15
3.2.5.	Tápvíz előmelegítő sorok kialakítása	16
3.2.6.	A releváns paraméterek összefoglalása	17
3.3.	Paraméteranalízis, az opcionális telephelyek bemutatása	18
3.4.	A telephelyek kritikai értékelése és összehasonlítása	25
4.1.	A gazdasági modell bemutatása	27
4.2.	A HTR beruházásának költségei, gazdasági alapadatok	30
4.3.	A telephelyekhez tartozó gazdasági kockázatelemzés	32

Ábrajegyzék

1. ábra: Chemelot Site telephelyének vizionált, sematikus kapcsolási rajza	10
2. ábra A duplikált primer hurkos kialakítás sematikus rajza	11
3. ábra Siemens ipari gőzturbina katalógus kínálata.....	13
4. ábra: Turbina strukturális megvalósítása a modellben.....	13
5. ábra A hőkiadási körök megvalósításának sematikus rajza.....	14
6. ábra: Kondenzátor hűtővízkörének sematikus rajza	16
7. ábra: A tápvíz előmelegítő rendszer kialakításának sematikus rajza.....	17
8. ábra: A körfolyamat egészét összefoglaló T-s diagram.....	18
9. ábra: A maximálisan kiadható villamos energia az egyes esetekben (MW_e)	19
10. ábra: Az első nézőpont szerinti eredmények összefoglalása	20
11. ábra: A második nézőpont szerinti eredmények összefoglalása	21
12. ábra: A hatékonysági mutatók által definiált optimum tartomány bemutatása..	22
13. ábra. Paraméteranalízis eredményeinek összefoglalása Gdansk esetében.....	25
14. ábra: Kapcsolt hő- és villamos energiatermelés sematikus ábrája.....	27
15. ábra: Az NPV változása különböző teljesítmények és energiaárak esetén.....	33
16. ábra: Érzékenységvizsgálat $2 \times 400 \text{ MW}_{th}$ -os HTR-rel megvalósított Chemelot Site telephelyéhez	35
17. ábra: Érzékenységvizsgálat $2 \times 500 \text{ MW}_{th}$ -os HTR-rel megvalósított Chemelot Site telephelyéhez	37

Táblázatjegyzék

1. táblázat A modellben megvalósuló turbina konstrukció paraméterei.....	13
2. táblázat: Hőkiadási körökre jellemző termodinamikai paraméterek	15
3. táblázat: Kondenzátor hűtővíz-körére jellemző paraméterek összefoglalása	15
4. táblázat: Tápvíz előmelegítési sorokhoz tartozó nyomásértékek.....	16
5. táblázat: Fő paramétereket összefoglaló táblázat.....	17
6. táblázat: A maximálisan kiadható villamos energia az egyes esetekben.....	19
7. táblázat: Változó villamos energia melletti nézőpont az egyes esetekben	20
8. táblázat: Fix villamos energia melletti nézőpont az egyes esetekben.....	20
9. táblázat: A hatékonysági mutatók összefoglalása a vizsgálati esetekben	22
10. táblázat: Gdansk paraméteranalízise két vizsgálati esetben az első nézőpont szerint.....	23
11. táblázat: Gdansk telephelyéhez tartozó rendszermodellre jellemző paraméterek összefoglalása	24
12. táblázat: A kritikai értékelések összefoglalása	25
13. táblázat: Az NPV kiszámításához használt jelölések magyarázata	28
14. táblázat: Az NPV számítás költségelemei és azok érzékenységvizsgálat során felvett értékei	31
15. táblázat: Energiaárak alakulása különböző scenáriók esetén.....	33

1. Bevezetés

A folyamatosan és megbízhatóan rendelkezésre álló hő- illetve villamos energiatermelés a fenntartható energiagazdálkodás szempontjából egyre központibb kérdéssé válik. A megbízhatóságon túl, a környezetvédelem kiemelt fontosságú tényezővé nőtte ki magát az utóbbi évszázad végén. Az üvegházhatású gázok környezetbe történő kibocsátásának ilyen léptékben való növekedése hosszú távon nem biztosítja a fenntartható fejlődés koncepcióját. Ezen megfontolásból, szükséges egy olyan energiaforrás széleskörű vizsgálata, amely ezen igényeknek megfelel és képes teljesíteni a koncepció alappilléreit. Napjainkban az atomerőművekkel kapcsolatos társadalmi megítélés összességében még mindig negatívnak mondható a rég- és közelmúltban bekövetkezett baleseteknek köszönhetően. A megújuló energiaforrásokat gyakran a nukleáris iparral szembe helyezik - versenytársként kezelik őket - ahelyett, hogy egymás kiegészítő partnereként tartanánk őket számon egy ország energiamixén belül.

Az egyes energiatermelési célokat szolgáló erőművi berendezések kérdéskörében már régóta jelenlévő probléma a hasznosítatlanul környezetbe távozó energiamennyiség. Ez a hőmennyiség a nukleáris létesítmények esetében jelentősebb szerepet képvisel, hiszen a napjainkban alkalmazott atomerőművek esetén a hőmérsékleti korlátok jelentős határt szabnak a termikus hatásfoknak. Fontos megemlíteni ebben az esetben, hogy az egyes hatásfoknövelő eljárásoknak még napjainkban is jelentős anyagtechnológiai korlátjai vannak. Így, a mérnöki tudomány kiteljesedésével párhuzamosan, az anyagszerkezeti technológiák analízisére is szükség van. Ezt a környezetbe kidobott hőt olyan eljárásokkal tudjuk hasznosítani, mint például a kapcsolt energiatermelés, ahol az ipari folyamatok folyamatosan fennálló folyamathő igényét látjuk el.

Az ipari létesítmények komplex energiaigényét jelenleg kizárólag fosszilis alapú kapcsolt energiatermelés segítségével elégítik ki, mivel az ipartelepek számára a megújuló energiaforrásokra épülő energiatermelés nem elfogadható megoldás. Ennek fő oka, hogy a berendezések teljes mértékben ki vannak szolgáltatva az időjárás viszontagságainak, amelyből fakadó teljesítményingadozást, egy nagyfogyasztó nem engedhet meg magának. Amennyiben szeretnénk alternatívát nyújtani a szén illetve földgáz alapú energiatermelésnek, az atomenergetika tűnik a legcélravezetőbb megoldásnak. Magas paraméterű folyamathő igények kielégítésére a jelenleg használt nukleáris létesítmények nem alkalmasak, ezért egy új generációs atomerőművi egység vizsgálata válik célszerűvé a nukleáris alapú kapcsolt energiatermelés optimális megvalósítására.

Célunk egy olyan lehetséges jövőkép tanulmányozása illetve bemutatása, amely keretein belül egy IV. generációs atomerőmű segítségével, több nagyméretű ipari komplexum végfelhasználói igényeit elégítjük ki mind villamos energia, mind folyamathő terén. Számos potenciális nagyfogyasztót vizsgáltunk, amelyek közül két

telephely különböző konstrukciós kialakításai bizonyultak a legalkalmasabbnak. Érdekességképp, hazai telephelyek is szóba kerültek az elemzések elvégzése során, ám ezek nem bizonyultak megfelelőnek a demonstrációs modell elkészítéséhez. A hőkörfolyamati modellezést egy erre a célra specializált program segítségével készítettük el. A modellalkotás során egy olyan globális sémakép megalkotását végeztük el, amelyen széleskörű paraméteranalízis végezhető el. Ezáltal lehetőségünk nyílik a műszakilag optimális konstrukció kiválasztására.

A széleskörű műszaki vizsgálatokon, és optimumkereséseken túl, a projekt piacképes jövőbeli kilátásait egy gazdasági elemzés segítségével lehet alátámasztani. Az e téren végzett vizsgálataink során nettó jelenérték számítás illetve kockázatelemzés segítségével értékeltük a projekt megtérülését. Első megközelítésre a bevételi oldal kiszámítása könnyű feladatnak tűnhet, mert csak két értékesítendő termék állítható elő, a hő- illetve villamos energia. Ezen termékek speciális mivoltából, illetve korlátozott és különlegesen szabályozott piacából adódóan, jövőbeli áraik meghatározása nehéz feladatnak bizonyult. A projekt legszámottevőbb kiadása, az erőmű beruházási költsége úgyszintén nagy bizonytalanságot hordoz magában. Ez több oknak is köszönhető, egyrészt, hogy nem egy standardizált termékről van szó, mivel minden potenciális jövőbeli telephelynek a lokális adottságaihoz kell igazítani az árat. Másrészt ideáig nem épült ilyen típusú és méretű reaktor, tehát az összköltség csak számítások, becslések szintjén valósult meg, tényleges késztermék még nem áll mögötte. A fent említett bizonytalanságok megértésére és szemléltetésére a nettó jelenérték számítást kiegészítettük egy érzékenységi vizsgálattal, amelyben azt vizsgáltuk, hogy a bemenő paraméterek változásai miként befolyásolják a projekt gazdasági szempontú végkimenetelét.

2. A téma bemutatása és aktualitása

A következő alfejezetekben a releváns irodalmi háttéranyagok és a téma aktualitásának felvázolásra kerül sor, főként konkrét példák bemutatásán keresztül.

2.1. A IV. generációs atomerőmű

Az atomerőműveket fejlettségi szintjük, koncepcionális kialakításuk és biztonsági szintjük alapján több különböző generációba lehet sorolni [1]. Az első generációs erőművek a nukleáris technológia prototípusai voltak, az 1950-es, 60-as évekre jellemzőek. A második generációs erőművek a legelterjedtebbek napjainkban, ebből a típusból üzemel a legtöbb a világban. Ezek döntő többségében könnyű, vagy nehéz-vizes reaktorok. Erre a generációra jellemző, hogy itt már megjelent a standardizálás, illetve ezek nagy darabszámban beszerezhetőek voltak a piacon (a paksi atomerőműben jelenleg üzemelő négy VVER-440/V213-as atomreaktorok is ebbe a kategóriába tartoznak [1]).

A harmadik (III), illetve III+ generációs erőművek ezek továbbfejlesztett változatai, mind gazdasági, mind műszaki szempontból optimalizálásra kerültek, de alapvető működési elvében nem térnek el a második generációs típusoktól.

A dolgozatunkban vizsgált energiaforrásunk egy IV. generációs reaktor koncepció [1]. A nukleáris iparban megjelenő legújabb generáció energiatermelő blokkként még nem üzemel, kutatási fázisban jár a technológia, biztató eredményekkel. Számos jelentősen eltérő koncepció kialakítás tartozik ebbe a kategóriába, többek közt a gyorsneutronos, a tenyésztőreaktor illetve a gázhűtéses reaktortípusok is. Az általunk kitűzött cél eléréséhez az optimálisnak tűnő reaktortípus egy gázhűtéses, grafit moderátoros típus a VHTR vagy HTR (Very High Temperature Reactor, a továbbiakban VHTR vagy HTR). Ez a típus számos tulajdonságában eltér a napjainkban alkalmazott atomerőművektől. A legalapvetőbb eltérés a reaktor hűtőközegének és moderátorának az anyag típusa [1].

A jelenleg legelterjedtebbnek számító könnyűvizes típusal szemben hélium, mint gáz hűtőközeg kerül alkalmazásra, a blokk moderátora pedig grafit lesz a tervek szerint.

A hélium, mint gáz alkalmazása hűtőközeggé egy létfontosságú változtatás az ipari kapcsolt energiatermelés szempontjából. Ezen hűtőközeg segítségével 700, vagy akár 1000°C-os primerköri kilépő hőmérsékletet érhetünk el, – amennyiben sikerül megfelelően hőálló, fémötvözetű anyagot előállítani – ami jelentősen meghaladja a víz esetében megvalósítható, körülbelül 300°C-ot. Könnyűvíz esetében azért adódik ilyen alacsonyra a hőmérsékleti korlát, mert a közeg moderátorként is viselkedik a rendszerben, így az üzemanyag pálcák körül azt folyékony halmazállapotban kell tartani. A fizikai paramétereiből (lásd a víz nyomás-hőmérséklet állapotábráját [2]) adódik, hogy a nyomás további növelésével a hőmérséklet nem növelhető tovább úgy, hogy továbbra is megfelelő halmazállapotban legyen jelen a zónában. A magas hőmérsékleten való alkalmazhatóságon túl, a hélium azért előnyös mint hűtőközeg, mert a hőkapacitása viszonylag magas, továbbá kémiaiilag semleges és nem éghető. Ezen tulajdonságai mind elősegítik azt, hogy egy IV. generációs atomreaktor aktív zónáján folyamatosan átviramló hűtőközeggé alkalmazzuk.

A grafit, mint moderátor alkalmazása azért vált szükségessé, mert az itt alkalmazott hűtőközeg, a hélium nem képes a keletkező gyors neutronok lassítására, továbbá a megjelenő magas hőmérsékletek következtében a víz sem alkalmazható, mivel a korábban említett okok miatt nem lenne jelen a rendszerben a számunkra megfelelő, folyadék halmazállapotban. Az erőmű egészét tekintve egy további berendezés vált szükségessé, a gőzfejlesztő, amit a III. generációs erőművek közül a nyomottvizes típusban is alkalmaznak. A mi konstrukciónkban azért megkerülhetetlen, mert a hélium munkavégző képessége nem megfelelő energiatermelési szempontból. Ezen megfontolásból, a hűtőközeg energiáját a gőzfejlesztőben átadja az oda megérkező és ott elgőzölgő víznek. A tápvíz az előmelegítési sort követően az elvárt nyomáson érkezik a berendezésbe, közel a telítési állapothoz. Ott megtörténik az anyag elgőzölgése, majd túlhevítése, és ezután kerül a légnemű anyag (vízgőz) a főgőz ágba [3].

A korábban említett igen magas hőfoknak köszönhetően vélnek jelentős potenciált felfedezni, – a jelenlegi helyzettől eltérve – a nem kizárólag villamos energiatermelés célú felhasználására, hanem ezen túl, magas termodinamikai paraméterű (nyomás, de elsősorban hőmérséklet) folyamathó is kiadható az erőműből. Az így rendelkezésünkre álló több száz °C hőmérsékletű gőz végfelhasználása változatos. Lehetséges ezt egyes ipari folyamatokhoz kapcsolni (például, vegyiparban, acélgégyártásban, papíriparban, gyógyszergyártásban, stb.), hidrogént termelni, de felhasználhatjuk tengervíz sótalanítás támogatásához, illetve távhőszolgáltatáshoz is, továbbá ezek tetszőleges kombinációja is elképzelhető megoldás.

2.2. A kapcsolt energiatermelésben rejlő lehetőségek

Manapság az egyre szigorodó környezetvédelmi normák és a kialakult piaci versenyhelyzet megköveteli az egyre nagyobb egységteljesítményű és hatásfokú konstrukciók alkalmazását. A hatásfok növelésének egyik opcionális lehetősége a kapcsolt energiatermelés, amely során a villamos- és hőenergia előállítása szimultán módon történik [4]. Az eddig elterjedt gyakorlatban főként a gőz és gáz körfolyamatok kombi ciklusában rejlő lehetőségek kiaknázása került a figyelem középpontjába a fosszilis alapokon működő erőművek esetében. Itt a nyitott, gáz körfolyamatú gázturbinás egység által szolgáltatott magas hőmérsékletű kilépő füstgáz biztosítja a megfelelő hőmennyiséget a gőz körfolyamat működéséhez. Atomerőművek esetében, eddig csak alacsony hőmérsékletű hőkiadásról beszélhettünk a távhőszolgáltató rendszerek számára. Az utóbbi időben egyre nagyobb távolságokra igyekeztek kibővíteni a távhő rendszerek hatáskörét, illetve nagyobb városok teljes körű fűtési igényének kielégítését célozták meg a tanulmányok. Erre kiváló példát szolgáltat a Loviisa 3 projekt, melynek keretein belül olyan távhőellátó rendszerrel felszerelt blokkok vizsgálatát célozták meg, amely nagy távolságban képes közbeiktatott nyomásszabályozókkal biztosítani a felmerülő fűtési- és használati melegvíz igényeket a finn fővárosban, Helsinkiben [5].

A Fortum cégcsoport számításai szerint a nukleáris alapú távfűtés megvalósítása 4 millió tonna CO₂ kibocsátás csökkenést eredményezne évente, ami összességében 6%-kal lenne képes csökkenteni az ország éves CO₂ emisszióját [5].

Továbbá, erős támogatottság figyelhető meg a skandináv országokban a nukleáris alapú energiatermelés tekintetében. Ennek ellenére a tervezet jelenleg még nem

valósult meg főként gazdasági okok következtében [6]. Érdekes vizsgálatok végezhetőek ezzel kapcsolatosan az olyan területeken, ahol a fűtési időszak hossza már meghaladja a hét hónapos intervallumot. Az oroszországi helyzetet figyelembe véve, megállapítható, hogy a lefedettség főként a nyugati régió esetében kielégítő, míg a keleti rész esetében csak egy atomerőmű üzemel, így ha ezen a területen akarnak nagytávolságú távhőszolgáltató rendszert kiépíteni, akkor további blokkok építését is igényli a tervezet megvalósítása [7].

A kapcsolt energiatermelés jelentőségét tovább fokozza, hogy az energia nagy része hulladékhő formájában elvész a villamos energia termelés folyamatában. Egy tipikus, könnyűvízes reaktort figyelembe véve, a Rankine-ciklus által definiált hatásfok miatt csak kb. 1/3-a jelentkezik hasznos villamos energia formájában, míg a maradék 2/3-a kárba vész. Ez azt eredményezi, hogy a nagy mennyiségű hasznosítatlanul környezetbe kerülő hőmennyiség akár ipari alkalmazások hőigényeinek kiszolgálására is alkalmas lehet. A jelenleg üzemelő fosszilis és nukleáris alapokon működő erőművek esetében is már megoldott a megcsapolásos tápvíz előmelegítő rendszerek üzemeltetésének kooperációja a távhőrendszerek kiszolgálásával. Ennek ellenére, ez csak csekély hőmennyiség hasznosítást eredményez a körfolyamat egészét vizsgálva, így még ezek figyelembevételével is nagy potenciál rejlik a szóban forgó hőmennyiség optimális hasznosításában. A jelentkező hőmennyiség tipikusan atomerőművek esetén akkora, hogy képes az egyes ipari folyamatok hőigényeit is ellátni, így folyamathő szolgáltatással kapcsolt energiatermelés valósítható meg a nukleáris létesítmény és az ipari végfelhasználó között. A szolgáltatni kívánt folyamathő akár képes lehet folyamatos jellegű tengervíz sótalánításra, ammóniagyártásra és akár hidrogéntermelésre is.

Az IAEA számításait figyelembe véve, az erőmű 10 %-os villamos energia termelés csökkenése egy 1000 MWth-os nyomottvízes reaktor esetében lehetővé tenné 130 000 m³/nap sótan víz előállítását, illetve egy 900 MWth-os reaktorblokk megfelelő működésével előállított villamos energia termelését, ami 7 %-kal növelné összességében a bevételeket [6]. Ehhez viszont olyan ipari telephelyek kiválasztása válik szükségessé, ahol folyamatosan fennálló, nagymennyiségű hőigény szükséglet keletkezik és a nukleáris létesítmény közelében helyezkedik el. Az Európa projekt elemzése alapján egy kínálkozó lehetőséget biztosít Chemelot Site ipari telephelye. Ez a vegyipari komplexum Hollandiában található, közel 800 hektáron terül el és körülbelül 50 különböző kémiai feldolgozóegységet tartalmaz [8]. Számos cég érdekeltségei találhatóak itt, többek közt a DSM, DEXplasomers és SABIC. Jelenleg a fűtőgőz és villamos energia együttes igényét földgáz alapú kapcsolt energiatermelés által szolgálják ki, viszont a fosszilis energiahordozók rohamos kimerülési folyamata és az ezzel járó költségnövekmény indokoltá teszi más koncepciók hatástanulmányát is a fenntartható energiagazdálkodás érdekében.

2.3. Kitekintés, potenciális felhasználási lehetőségek

Európában és Észak-Amerikában az elsődleges cél az ipar irányába történő folyamathő kiadás lehetőségének vizsgálata, ám a világ számos más pontjain, más igények is a figyelem középpontjába kerültek. Kelet-Ázsiában – főleg Japánban – például a tengervíz sótalánításnak lehet fontos szerepe a jövő energiafelhasználásában [9].

Az egyik legígéretesebbnek tekinthető keleti - dél-koreai - kutatásfejlesztési konstrukció a SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor). A koncepció alapelve az, hogy egy kisméretű és kisteljesítményű blokkot építünk, amely segítségével egy közepes méretű várost – kb. 200 ezer fő – villamos árammal, tengervíz sótalánítás során előállított ivóvízzel, és távhővel látunk el. Az üzemanyag kiegészése során keletkező hőt gőzfejlesztésre használjuk, amelyet elsőként a turbinára vezetjük rá. A turbinában végbemenő gőz expanziója során közvetett módon, a mozgási energia átalakításból fakadóan villamos energia keletkezik. A turbina megcsapolások segítségével a gőzt továbbvezetjük hőcserélők segítségével további felhasználásra. Biztonsági megfontolások miatt emeltük ki külön a hőcserélők alkalmazását, mivel ezzel az aktív zóna hűtőközegét két fizikai gát választja el a lakossággal érintkező közeg felületétől. A turbináról érkező hőhordozóval párhuzamosan látjuk el a sótalánító berendezést, illetve a távhő rendszert. Szélsőséges körülmények esetén a rendszer természetesen rendelkezik fosszilis alapú ráségítő berendezésekkel, amelyek 100%-ban helyettesíteni képesek funkcióját ellátásában a SMART reaktorok [10].

A fentebb említett célokon túl, egy további alternatíva, – magasabb primerköri kilépő hőmérséklet esetén – az ipari léptékű hidrogéntermelés. Ebben az esetben egy VHTR blokk segítségével előállított gőz és villamos áram felhasználásával állítanak elő a végterméket. Ennek az elképzelésnek az időléptéke nagyobb, mint más célokénak, legjobb esetben is a kifejlesztését 2035 környékére várják [10]. Ez egyrészt annak köszönhető, hogy, a hélium hőmérsékletét igen magasra kell emelni, amihez a technológia (pl. a funkcióját ezen a magas hőmérsékleten is ellátni képes szerkezeti anyag) még nem teljesen kiforrott, másrészt a hidrogén előállítás technikai háttere is számos problémásabb kérdést rejt magában. A megújuló energiáknak, mint korábban említettük, vezető szerepe van napjaink karbonmentes energiatermelésében. Fontos feladat e termelők percről percre ingadozó termelését összhangban működtetni az atomerőművek nehezebben változtatható teljesítményével. Ennek a problémának az áthidalására terveznek egy úgynevezett „Hybrid Energy System”-et létrehozni, amely részeként egy HTGR blokkal támogatott kapcsolt energiatermelés és egy megújuló energiaforrás – például szélerőmű park, és/vagy napelemek sora – segítségével lenne megoldva az energiabetáplálás. A reaktorban keletkező hőt fel lehetne használni villamos energiatermelésre és egyéb folyamatokhoz is, amelyekben „zöld energiát” állítunk elő. Azt, hogy a fejlődő hőt éppen mire fordítjuk, egy intelligens rendszer döntené el a végfelhasználás számos lehetősége közül. Ilyen opciók lehetnek a biomassa előállítás – ez alacsonyabb hőmérsékleten történik – vagy hidrogéntermelés, esetleg szintetikus tüzelőanyag előállítás. Az integrált rendszer egyik fő kérdése a nukleáris létesítmény méretének meghatározása, ugyanis amennyiben ez túl szélsőséges méretű az alternatív felhasználókhoz képest, a rendszer rugalmassága csökken [10].

Természetesen a fentebb bemutatott kapcsolások hazai megvalósítását is vizsgáltuk, ám ezek sajnálatos módon nem nyújtottak kecsegtető eredményt. Elsőként olyan nagy hőigényű fogyasztókat próbáltunk keresni, akik esetében hosszútávon is igény mutatkozik ilyen mennyiségű és minőségű gőzre. Ilyen telephelynek bizonyult a kazincbarcikai BorsodChem, az egykori Tiszai Vegyi Kombinált (TVK), a győri régió, illetve a százhalmabattai olajfinomító.

Elsőként a BorsodChem megfelelőségét vizsgáltuk. A telephelyről annyit érdemes elmondani, hogy a borsodi, illetve a Sajó menti régióban jelenlévő vegyipari cégek egyesülésével alakult a 20. század közepén. Napjainkban Európa egyik legméretesebb PVC gyártója, továbbá az ott jelentkező folyamathó igények megfelelő méretűek. Az üzem koncentrált elhelyezése is megfelelő. A megvalósíthatósági probléma atomerőművi oldalról jelentkezne, mert nem áll rendelkezésre a környéken olyan bővizű folyó (mint a Tisza vagy a Duna), amely segítségével a blokkok hűtése megvalósítható lenne [11].

A százhalombattai telep kőolajat, illetve egyéb cseppfolyósított gázokat dolgoz fel. Mivel ezen energiahordozókból az energiaellátás már megoldott, és ezeket nagy mennyiségben vásárolja a feldolgozó, így nem célszerű lecserélni az energiaforrást. Továbbá, a nagy mennyiségben folyamatosan jelenlévő szénhidrogének miatt biztonsági megfontolásból nem a legideálisabb egy ilyen jellegű feldolgozóüzem közelébe atomerőművet építeni [12].

A győri ipari régió mind energiafelhasználás, mind vízügyileg ideálisnak tekinthető. A Duna kellően távoli pontja található meg a paksi atomerőműhöz képest, az iparosodottság mértéke, illetve az energiafogyasztás meghaladja a korábban említett eseteket. Az ok, amiért nem ideális a környezet a projekt számára az az, hogy fogyasztók egymástól távol, elszórtan helyezkednek el, nincs jelen az a koncentráltság, mint a kazincbarcikai esetben, továbbá a tulajdonosi összetétel is lényegesen komplikáltabb, mint a fentebb említettekénél. Ez a nagy távolság a kiépítés költségét, illetve a szállítás során keletkező veszteségeket is oly nagymértékben megnövelné, hogy elvetettük ezen telephely részletes vizsgálatát is [13].

2.4. Biztonsági megfontolások

Az atomerőművi biztonságtechnika már a napjainkban üzemelő atomerőművek esetében is önmagában erősen összetett témakör. A negyedik generációs VHTR-ek a jelenlegitől teljesen eltérő konstrukciós kialakításúak, más fizikai paraméterekkel rendelkező anyagokat használnak, így ez esetben a belső, inherens biztonság feltételeit más alapokra kell helyezni. Inherens biztonság alatt azt értjük, hogyha a reaktor teljesítménye elkezd növekedni, akkor a természetes fizikai folyamatok csökkenő irányba tolják a teljesítményt. Ilyen tényező többek közt a víz moderátorként való viselkedésében figyelhető meg. Amikor nő a teljesítmény, a víz melegszik, aminek hatására a sűrűsége csökken, így a neutronokat lassító közeg ritkábban lesz jelen a zónában, ami a teljesítmény csökkenésének irányába tolja a folyamatot. Az üzemanyag esetében is megfigyelhető ilyen jelenség, ami azt jelenti, hogy növekvő hőmérséklet hatására az urán veszít az „erejéből”.

A reaktor alapvető működését vizsgálva szembevetőd, hogy a napjainkban használt könnyű, illetve nehézvíz helyett a moderátor grafit. A fentebb említett anyagokkal ellentétben ez egy gyúlékony közeg, amely külön odafigyelést igényel biztonsági szempontból. Ennek az anyagnak az elégését gátolja, hogy a primer körben nem található meg az égéshez szükséges közeg, az oxigén. Ezen alapvető gondolatokon túl fontos megjegyezni, hogy a primer kör biztonságtechnikáját egészen eltérő alapokra kell helyezni a napjainkban üzemelő erőművekhez képest, és ezen elvek lefektetése még finomítás alatt áll kutatásfejlesztési szempontból [3].

A fentebb említett erőművi belső működésen túl, figyelembe kell venni egy új, eddig nem vizsgált szempontot is. Mégpedig azt, hogy a vizsgált kapcsolás esetén az erőmű nemcsak, hogy egy ipari létesítmény közelében helyezkedik el, – önmagában is külön biztonsági kérdéskör – hanem azzal szoros együttműködésben áll, és kölcsönösen hatnak egymás működésére, tevékenységeire. Ennek következtében a biztonsági megfontolásokat is két csoportra lehet osztani. Egyrészt, hogy az ipartelep miként hat az atomerőműre, illetve fordítva. A nukleáris biztonságot elsőként szem előtt tartva, először a végfelhasználó többletkockázatát vizsgáljuk az erőműre. Ez esetben elsődlegesen azt kell figyelembe venni, hogy ez a hatás hogyan és miként jelent veszélyt a VHTR-re. Mint minden mérnöki tervezés eredményére, az atomerőművekre, és így az általunk vizsgált blokk típusra is érvényes az, hogy meghatározásra kerülnek bizonyos külső események, amelyekkel szemben a létesítménynek ellenállónak kell lennie. Nukleáris létesítmények esetén az ellenállóság azt jelenti, hogy semmilyen többlet kibocsájtás nem következhet be ezen események alatt. Az összes számításba vehető (külső és belső eredetű) esemény bekerül az úgynevezett tervezési alapba, ahol kivizsgálásra kerülnek, hogy milyen gyakorisággal, illetve milyen amplitúdával következhet be a vizsgált esemény. A külső eseményeknél veszik számba a külső természeti, illetve az emberi cselekvés kiváltotta veszélyhelyzeteket. Az első csoportba tartoznak a földrengések, áradások, szökőár, hőmérsékleti szélsőségek és számos további szempont [14]. A második kategória részét képezik többek közt a külső támadások, repülőgép, illetve egyéb (főként mesterséges) tárgyak becsapódása, tűzvész, és e csoportot szükséges kiegészíteni az ipartelep kapcsolatából adódó esetleges problémákkal.

A veszély forrása elsődlegesen a vegyi komplexum felépítésétől, illetve a gyártott és ahhoz felhasznált termékektől függ. Annyit megállapíthatunk, hogy általánosságban valamilyen anyag tárolásának ideiglenes vagy hosszú távú megszűnésére vezethető vissza a lehetséges probléma forrása. Ezen kiszabaduló vegyi anyagok tűz kialakulásához is vezethetnek, de egy esetleges robbanás során külön-külön figyelembe kell venni a hőhatást, a rövid időre fellépő nyomáscsúcsot, illetve a törmelékek szétszóródásának és az erőműbe történő becsapódásának a lehetőségét is. A miként kapcsán szükséges megkülönböztetni direkt és indirekt hatásokat. Közvetlen hatásnak tekinthetők azok az események, amelyek a főbb berendezéseket, illetve a hőelvezetési rendszert érintik. Közvetett hatások többek közt az olyan üzemi események, amelyek a közbenső hőcserélőben vagy a gőzfejlesztőben okoznak valamilyen tranzienszt. Illetve, az olyan események, amelyek esetén egy kiegészítő rendszer sérül. Továbbá az olyan események is ebbe a kategóriába tartoznak, amikor az ipartelepben bekövetkező esemény hatására valamely atomerőműi biztonságvédelmi rendszer nem tudja ellátni a feladatát, nem hozzáférhető vagy nem üzemképes. Ilyen veszély például, amikor a kikerülő toxikus anyagok hatására az erőművet üzemeltető személyzet nem tudja ellátni a munkáját, vagy megközelíthetetlenül válik a munkavégzésük helye.

Az ipari telephely biztonságosságát, folyamatos üzemvitelét, illetve a késztermékek minőségét nem szabad, hogy befolyásolja az a tény, hogy az energia forrása egy atomerőműből származik. A tervezési üzemállapotban, illetve a méretezési balesetek esetén is az eseményt és annak hatásait a nukleáris erőmű területén kell tartani. A nukleáris üzem alapvető biztonságosságán túl, egy ilyen kapcsolt rendszer esetén az energiaszolgáltatónak több új paraméternek kell megfelelnie, melyek a

végfelhasználói folyamat mikéntjétől nagymértékben függenek. A végfelhasználó sajátosságai határozzák meg azon veszélyeknek a körét, hogy egy energiatermelési vészleállítás miként hat rá, illetve az energiaszolgáltatás megszűnését követően az anyagi károkon – munkavégzés alatt álló anyag, esetleg berendezés károsodásának, tönkremenetelének a költsége – túl milyen problémák léphetnek fel az ipartelegen. Itt keletkezhetnek olyan problémák is, amelyek visszahatnak az erőműre, mint például tűz, robbanás, esetleg mérgező anyagok kikerülése [3].

3. A hőséma modellezés

A következőekben bemutatásra kerül az az univerzális szoftver, amely segítségével elkészíthetővé váltak az egyes vizsgálati modellek. Ezáltal, a kutatás során megalkotott modell felhasználásával lehetőségünk nyílt az általános hősémaszámításra használt programból kapott eredmények alapján következtetéseket levonni a műszaki aspektusok tekintetében.

3.1. A Cycle-Tempo (CT) program bemutatása

Elsődleges feladatunk közé tartozott a Cycle-Tempo hőséma készítő és erőművek működését modellező program részletes megismerése, így ezért ezt a fejezetet a program rövid bemutatásával kezdjük. Alapvetően induljunk ki a modell definíciójának tisztázásából, miszerint a modell a rendszerről alkotott olyan konstrukció, amin kísérletet lehet végezni annak érdekében, hogy a rendszerre vonatkozó kérdéseinkre választ kapjunk [15].

Neumann János szerint: „Modellen olyan matematikai konstrukciót értünk, amely leírja a megfigyelt jelenséget” [15]. Ehhez kapcsolódóan fontos, hogy ismerjük a modell határait, peremfeltételeit és kellő elméleti háttértudással rendelkezünk a modellalkotás megkezdése előtt. A Cycle-Tempo szoftverkörnyezet lehetővé tette számunkra, hogy az elképzeléseket egy modell formájában is képesek legyünk prezentálni. Így, a program által végzett számítások alapján alátámaszthatóvá vált a nukleáris alapú folyamathő szolgáltatás létjogosultsága. A program globális jellege lehetőséget biztosít a termodinamikai alapokra épülő energetikai rendszerek tervezésére, elemzésére, optimalizálására és monitorozására.

A modellalkotáson túlmutat a modell szimulációja, ami a rendszermodellen végzett kísérlet a rendszer viselkedésének és tulajdonságainak megismerése céljából [15]. A szoftver lehetőséget nyújt design és off-design futtatási lehetőségre is, annak függvényében, hogy névleges terhelési állapotban szeretnénk üzemeltetni a rendszerünket, vagy egy esetlegesen előre meghatározott részterheléses állapotban [16]. A modellünket design állapotra terveztük, mivel azt feltételezzük, hogy a generátor által hálózatra adott és a rendszeren belül elhelyezkedő egyéb segédberendezésekre fennálló villamos energia igénye, illetve az egyes ipari hőfelhasználók igényei az idő előre haladásával továbbra is állandósult értékeket tartanak. Továbbá, az üzemelő atomerőműveket az eddig bevált gyakorlatok alapján nem részterheléses állapotokra tervezik, amit az is jól prezentál, hogy a szabályozási rendszerük kialakítása fojtással valósítható meg, ami az egyik legrosszabb lehetőséget biztosítja termodinamikai szempontból.

A folyamatosan fennálló hatásfok maximalizálás érdekei, amik kiegészülnek a gazdasági profit maximalizálással, jogosan indokolják a névleges üzemállapotban történő üzemeltetést, mivel egyes részterhelésen vizsgált rendszerek hatásfoka jóval alacsonyabb is lehet, ami jelentősebb mértékben nyilvánul meg az előbb említett fojtásos szabályozás esetében. Ennek ellenére, figyelembe kellett vennünk olyan előre tervezett, illetve nem várt eseményeket is, amik megkövetelik a részterheléses üzemállapot biztosítását, így a modell képes a gőz tömegáram általi szabályozásra közbeiktatott szelepek segítségével, viszont a design módban való tervezés miatt, ez

nem dinamikus paraméterként jelenik meg a modellben. Képesek voltunk ezek mellett a héliumhűtéssel üzemelő primer körök modellezésére is, amiket a felhasználó által definiált közeggel biztosítottunk a rendszer számára, így kivitelezhetővé vált a két zárt primer hurok hőforrásként való kapcsolódása a teljes rendszer egészéhez.

A paraméterek megfelelő beállításával a T-s diagramon végigkövethetjük a demonstrációs célból kivitelezett erőművi egységünk üzemeltetési határait, esetleges javításokat végezhetünk rajta ennek függvényében, és optimalizálhatjuk a körfolyamatunkat [17]. Fontos megemlíteni, hogy a modellalkotásnál több veszteségformula alkalmazására is lehetőségünk lett volna, de ezekkel az egyszerűség és a bemutató jelleg miatt nem éltünk. A valósághoz így is közel álló konstrukció került kialakításra, mivel a veszteségeket koncentrált paraméterként a turbina hatásfokában értelmeztük.

Az egyes hőkiadási körök kialakítása lehetőséget biztosít az egyes részfeladatokhoz szükséges hőmennyiség biztosítására, mind ipari, mind erőművi oldalon. Ezáltal a modellalkotás során ezt is figyelembe véve, három opcionális, a szekunder körhöz csatlakozó hőnyelő segítségével szimbolizáltuk a keletkező hulladék hőmennyiségének felhasználását. Ez a kialakítás eltér a 3.2. alfejezetben bemutatott kiindulási kapcsolásunk sémájától, mivel ebben az esetben csak két különböző igényszinttel rendelkező felhasználó csoport kerül kiszolgálásra. A modell bővítésének érdekében és az igényszintek nagymértékű eltéréséből fakadóan célszerűnek láttunk egy köztes igényszinttel rendelkező felhasználó csoportot is definiálni, mivel az elsődlegesen vizsgálat alá kerülő Chemelot Site telephelyéhez kapcsolódó ipari komplexumok igazán változatos gőzigénnyel rendelkeznek.

3.2. A modell bemutatása részegységenként

Az általános modell megalkotásánál figyelembe vettük az Europairs projekt keretein belül végzett vizsgálatok összességét. Azonban a projektben szereplő vizionált rendszer nem volt teljesen egzakt, így szükségessé vált az eddigi tervezési tapasztalatokat is figyelembe venni annak érdekében, hogy kibővített teljes körű rendszermodellt legyünk képesek alkotni. A kialakított modell alapjául szolgált a későbbi opcionális telephelyek vizsgálatánál is, mivel globális jelleggel épült. Ezáltal, az alapmodell lehetőséget biztosít más paraméterekkel való felruházásra is, így a kialakítás azonos marad minden vizsgált esetben. Ez biztosítja számunkra, hogy azonos peremfeltételek mellett voltunk képesek összehasonlítani az opcionális telephelyeket, ez által a CT programból származtatott eredmények alapján kritikailag értékelhetővé váltak a telephelyek több paraméter tekintetében is. Ahogy az a 2.2. alfejezetben is bemutatásra került, az egyik kínálkozó lehetőséget Chemelot Site telephelye biztosítja [6].

A tervezett körfolyamatot két 500 MW_{th}-os HTR blokk segítségével üzemeltetnék, így ennek függvényében a 1. ábrán a nukleáris létesítmény és telephely kombinációjának általunk tisztázott sematikus tervezete látható, ami a kibővített modellünk kiindulási kapcsolásának tekinthető.

hogy a kikerülő víz/gőz minősége folyamatosan megfelelő és ellenőrzött legyen, amit a folyamatvíz állandó jellegű előkészítési eljárásainak összességével biztosítanak.

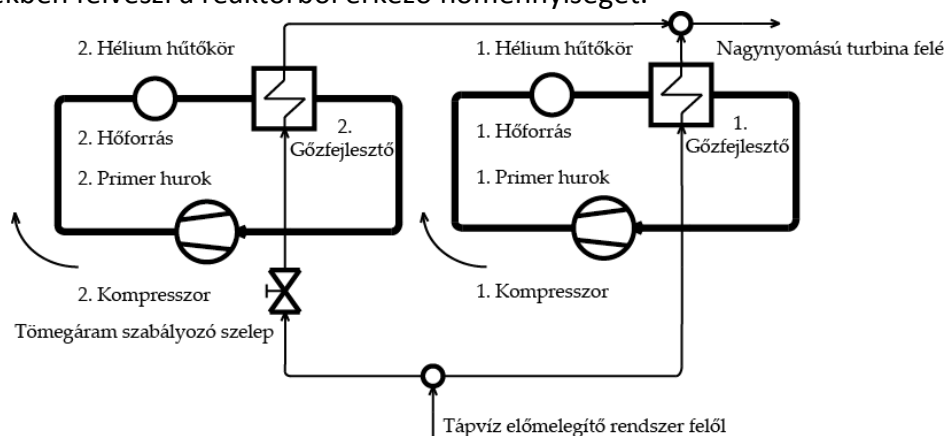
Biztonsági szempontból fontos megjegyezni, hogy a közbenső és a primer kör közt lévő közel 100 bar nyomáskülönbség elősegíti, hogy a gőzfejlesztőben véletlenszerűen történő baleset esetén a primer körű hűtőközeg ne a szekunder kör felé távozzon. Az épület kialakítása során a reaktor- és héliumtartály a föld alá kerül elhelyezésre és ezekhez szorosan kapcsolódik a közbenső gőzfejlesztő hőcserélő berendezés is. A biztonsági hűtőberendezések úgy kerülnek kialakításra, hogy a primer körök minimális reaktorteljesítménye mellett is képesek elszállítani a keletkezett hőmennyiséget.

A modell egyes részegységei és származtatott eredményei a Chemelot Site ipari telephelyének vizsgálatán keresztül kerülnek bemutatásra. A későbbiekben elemzés alá kerülő telephelyek esetében már csak a releváns információk kerültek összegyűjtésre az összehasonlíthatóság érdekében, mivel a kiépített modell globális jellege lehetőséget adott számunkra más ipari telephelyek analizésére is.

3.2.1. Primer kör

Az alapvető elképzelések szerint a primer oldal kialakítása a 2. ábrán ismertetett struktúra szerint került megvalósításra a modellben.

A friss gőz osztott ágon érkezik az első nagy nyomású turbinához az első gőzfejlesztőből. A terhelés eloszlásának lehetőségét is biztosítottuk a kialakításunkban annak érdekében, hogy egyes névleges üzemiállapotoktól eltérő igények kiszolgálására is rugalmasan viselkedjen a rendszer. A tömegáram szabályozó rendszer tehát főként biztonsági megfontolásokról került beépítésre a modellbe, mivel figyelembe kell vennünk egy minimális tömegáramot, ami kellő mértékben felveszi a reaktorból érkező hőmennyiséget.



2. ábra A duplikált primer hurkos kialakítás sematikus rajza

A névleges üzemiállapothoz tartozó gőz tömegárama 480 kg/s a főágban, ami egyenletesen kettéoszlik a két zárt hurokra, és közösen termelnek gőzt a nagy nyomású turbinára. A reaktor által szolgáltatott hőmennyiség nagymértékben befolyásolja a keletkező gőz termodinamikai paramétereit. Egy zárt hurokra 500 MWth állandó jelleggel fennálló hőtelteljesítmény értendő, amelyet az általunk alkotott konstrukcióban két különálló hőforrással modelleztünk. Továbbá érdekes megállapításokat tehetünk a hélium közzel kapcsolatban, mivel nemesgáz mivolta révén könnyen megszökhet a rendszerből, így további biztonsági és

redundanciabeli előírások és szabályozások válhatnak szükségessé az alkalmazásával kapcsolatosan. Ennek ellenére, a megnövekedett hőmérsékleti körülmények miatt, használata szükségessé válik, mivel a primer kör hűtésére alkalmas közegek közül a hélium forráspontja a legalacsonyabb, így biztosítottá válik a tökéletes hűtőközegként való alkalmazása. Néhány kísérleti atomreaktorban már héliumot használtak hűtőközegként, aminek fő alkalmazási oka a hélium viszonylag nagy hőkapacitása és kémiai közömbössége.

A modellalkotás során a gőzfejlesztőket egyszerű hőcserélőkkel modelleztük, aminek legfőbb oka a szoftverkörnyezet általánosított jellege. A dupla hurok alkalmazását többek között a biztonsági előírások és a redundancia biztosítása indokolja. Továbbá az a tény, hogy a turbinára üzemi körülmények között minden esetben frissgőzt kell juttatnunk a kielégítő és üzembiztonságot feltételező működéshez. Így ezáltal, egy hurok esetleges kiesése esetén is biztosítottá válik a turbina frissgőzzel való ellátása. A gőzfejlesztőből a turbina felé 170 bar és 570°C-os frissgőz érkezik (lásd a 2. ábrán).

3.2.2. Turbinarendszer

A nukleáris létesítményben üzemelő turbinák kiválasztása létfontosságú szerepet tölt be a körfolyamat működésében. Ez abból fakad, hogy ezeknek az expanziós gépeknek kell fogadniuk a magas termodinamikai paraméterekkel rendelkező friss gőzt, ezáltal olyan anyagszerkezetbeli kialakításra van szükség, ami képes a megnövekedett hőmérsékleti határok mellett is biztosítani a turbinák biztonságos üzemvitelét. Manapság ilyen magas paraméterekkel rendelkező közegek fogadására kiváló anyagminőségűből készült króm-nikkel bázisú lapátokat alkalmaznak. Ennek ellenére, a megnövekedett hőmérsékletek indokoltá tehetik a nikkel bázisú szuperötvözetek, esetleg titán, ötvöző anyagként való felhasználását. Folyamatos jellegű diagnosztikai monitorozásra van szükség annak érdekében, hogy ne keletkezzen üzemviteli probléma a szekunder oldalon sem, hiszen ez közvetett hatással van a primer kör működésére is.

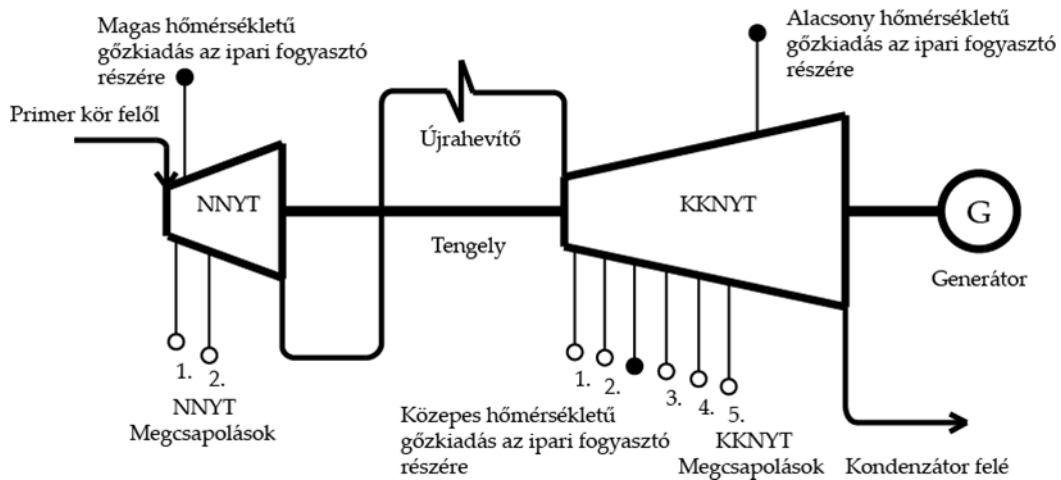
A turbina kiválasztásának szempontjából mégis a pénzügyi megtérülés adja a legdominánsabb szerepet, hiszen egy adott konstrukció annál több hasznot termel, minél hosszabb ideig vagyunk képesek azt üzemeltetni viszonylag kevés karbantartási munkával, illetve folyamatosan névleges üzemállapot mellett. Ezzel az elérni kívánt célunk középpontjába a költségoptimalizálás és profitmaximalizálás kerül.

A modell teljességének érdekében a felmerülő igények miatt szükségessé vált egy valós turbinát választani katalógusadatok alapján. Ehhez segítségünkre volt a Siemens által felkínált ipari gőzturbinákat tartalmazó katalógus, ami a 3. ábrán látható [18]. A katalógus alapján egyértelmű volt, hogy az újrahevítéssel rendelkező és termodinamika paramétereknek is eleget tevő turbinatípus számunkra az SST-900.

A modellünkben megvalósuló struktúra a választott SST-900 turbina konstrukciót figyelembe véve, a 4. ábrán látható.

Type	Steam parameters up to:	Output (MW)																			
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	250										
SST-100	65bar, 480°C																				
SST-150	103bar, 505°C																				
SST-200	110bar, 520°C																				
SST-300	120bar, 520°C																				
SST-400	140bar, 540°C																				
SST-500	30bar, 400°C																				
SST-600	165bar, 565°C																				
SST-700	165bar, 585°C																				
SST-800	165bar, 565°C																				
SST-900	165bar, 585°C																				

3. ábra Siemens ipari gőzturbina katalógus kínálata [18]



4. ábra: Turbina strukturális megvalósítása a modellben

A modellben megvalósuló turbina konstrukcióra érvényes termodinamikai állapotjelzőket és paramétereket a 1. táblázat tartalmazza:

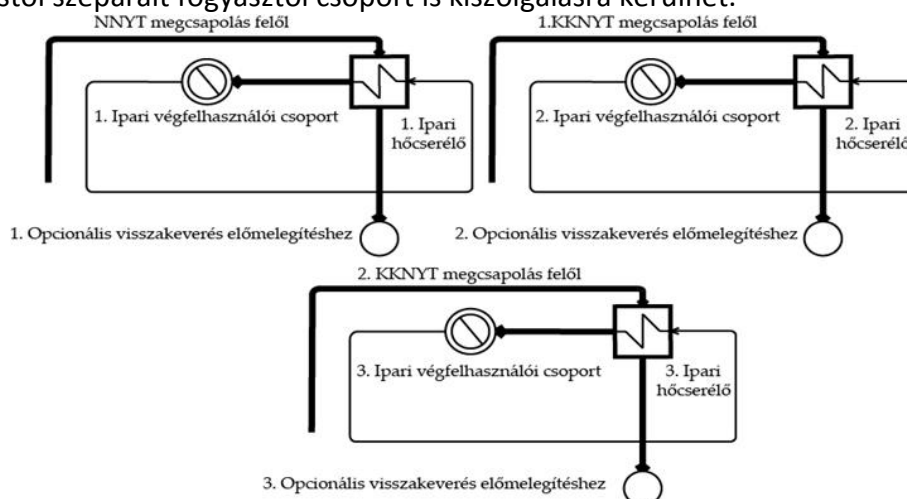
1. táblázat A modellben megvalósuló turbina konstrukció paraméterei

Jelölés	Megnevezés	Érték [Mértékegység]
P_{ki}	Kiadott villamos-energia	227,4 [MW]
n	Fordulatszám	3000 [f/perc]
T_1	Az első turbinára érkező frissgőz hőmérséklete	570 [°C]
T_{UH}	Újrahevítési hőmérséklet	555 [°C]
k_1	Megcsapolások a nagynyomású turbinán (NNYT)	3 [-]
k_2	Megcsapolások a közép-kisnyomású turbinán (KKNYT)	8 [-]
p_{UH}	Újrahevítés állandó nyomása	70 [bar]
p_{kond}	Kondenzátorban uralkodó nyomás	0.04 [bar]

A turbina kétházas kivitelű, amik között újrahevítés biztosítja a másodlagos turbinán végzett munka optimális kihasználását. A rendszer egészét vizsgálva megkülönböztetjük a generátor oldalról szolgáltatott villamos energia mennyiségét, amit a hálózatra küldés érdekében akarunk maximalizálni, annak függvényében, hogy az egyes turbinamegcsapolások kellő mértékben el tudják látni fűtőgőzzel az előmelegítő sorok lépcsőzetes és fokozatos előmelegítését és az ipari végfelhasználók hőigényeit.

3.2.3. Szeparált hőkiadási körök kialakítása az ipar számára

A modellalkotás során megoldhatóvá tettük az egyes ipari létesítmények vizionált hőkiadási köreinek megvalósítását. A kialakított körök rendszerhez való illesztése meghatározó szerepet játszik a kiadott villamos energia mennyiségében, hiszen el kell döntenünk, hogy melyik fokozatokról akarunk megcsapolást kivitelezni az ipari fogyasztók hőigényeinek kiszolgálására. A standard kialakítás szerint két kört alakítanak ki, amelyek megoszlanak magas és alacsony termodinamikai paraméterekkel jellemezhető gőzkiadási körökre. A kialakítás szempontjából adódóan a magas hőmérsékletű igényeket a nagynyomású turbina (NNYT) biztosítja az ipari fogyasztók számára, míg az alacsonyabbakat a közép- kisnyomású turbina (KKNYT) szolgálja ki. Mivel úgy gondoltuk, hogy a két különböző paraméterekkel rendelkező kör, két olyan igényekkel rendelkező fogyasztói csoport kiszolgálására alkalmas, melyek igényei nagymértékben eltérnek egymástól, ezért a modellalkotás során kialakítottunk egy harmadik kört is, amely köztes igényeket képes kiszolgálni. Ezzel csökkenthetőek a hőcsere folyamat során fellépő veszteségek, illetve több egymástól szeparált fogyasztói csoport is kiszolgálásra kerülhet.



5. ábra A hőkiadási körök megvalósításának sematikus rajza

Érdekessége a modell konstrukciós kialakításának, hogy a visszatérő ág képes lehet az egyes előmelegítési feladatok kielégítésére mind erőművi oldalon, mind ipari oldalon. Azonban ügyelni kell arra, hogy a rendszer tömegáram állandóságának elvéből fakadóan a kivezetett mennyiséget szükségszerűen pótolni kell a folyamatosság biztosításának érdekében.

A bizonytalanságokból fakadóan ezért ezt az ágot „rövidre zártuk”, azaz egy hőnyelővel modelleztük, a későbbi alkalmazásának rugalmas közbeiktatása érdekében. A hőkiadási körök megvalósítása a modellben az 5. ábrán látható.

A kialakított hőkiadási körök jellemző paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Hőkiadási körökre jellemző termodinamikai paraméterek

Jelölés	Megnevezés	Érték [Mértékegység]
p_{magas}	Nagynyomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző nyomásérték.	12 [bar]
T_{magas}	Nagynyomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző hőmérsékletérték	540 [°C]
$p_{\text{köztes}}$	Középnomású turbinaszekcióból megcsapolt hőkiadási körre jellemző nyomásérték	3.5 [bar]
$T_{\text{köztes}}$	Középnomású turbinaszekcióból megcsapolt hőkiadási körre jellemző hőmérsékletérték	460 [°C]
p_{alacsony}	Kisnyomású turbinaszekcióból megcsapolt hőkiadási körre jellemző nyomásérték	1.8 [bar]
T_{alacsony}	Kisnyomású turbinaszekcióból megcsapolt hőkiadási körre jellemző hőmérsékletérték	340 [°C]

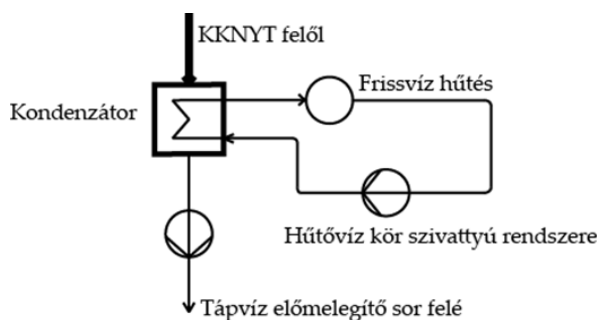
3.2.4. A kondenzátor hűtővíz köre

A kondenzátor hűtővízkörének kialakításához feltételezzük, hogy a rendszerünket folyópart vagy tenger mellé létesítjük, így az ebből kinyert vízhozam ésszerű határok között történő felhasználása biztosítja a munkát végzett gőz kondenzációját. Számunkra ez a különösen megfelelő kialakítás, mivel az egyes ipari folyamatok hűtési igényeit is ki tudjuk szolgálni az optimálisan kialakított hűtőkörök alkalmazásával. Ezeknek a hűtőköröknek az összehangolása elősegítheti a költségminimalizálást is, így elkerülhetjük a problémás hűtőkörök kialakítását. Mivel a kondenzátor hűtővízköre nem volt szerves része a struktúra kivitelezésének, ezért egy egyszerű zárt hurokkal modelleztük, ahogyan azt több üzemelő atomerőműben is szokás, így ezt a részt korábbi tapasztalatokra hagyatkozva építettük be a rendszerbe a teljesség érdekében. A kialakított kondenzátor hűtővízkör strukturális felépítéséhez tartozó termodinamikai állapotjelzőket és paramétereket a 3. táblázat tartalmazza.

Ehhez kapcsolódóan a saját modellünkben megvalósuló struktúra az alkalmazott kondenzátor hűtővízkör megvalósítására a 6. ábrán látható.

3. táblázat: Kondenzátor hűtővíz-körére jellemző paraméterek összefoglalása

Jelölés	Megnevezés	Érték [Mértékegység]
$T_{\text{hűtő}}$	Hűtőközeg hőmérséklete	15 [°C]
p_{kond}	Kondenzátorban uralkodó nyomás	0.04 [bar]
$\eta_{\text{sziv,b}}$	Szivattyú belső hatásfoka	0.77 [-]
$\eta_{\text{sziv,m}}$	Szivattyú mechanikai hatásfoka	0.98 [-]



6. ábra: Kondenzátor hűtővízkörének sematikus rajza

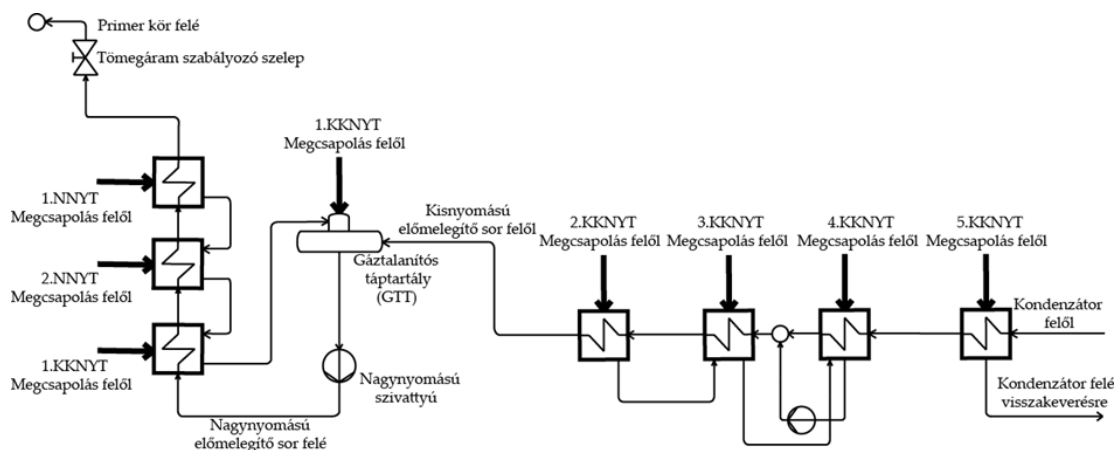
3.2.5. Tápvíz előmelegítő sorok kialakítása

A modellünkben szereplő tápvíz előmelegítő sorok kialakításához korábbi, már üzemelő atomerőművek tapasztalataiból kiindulva, szokványos módon valósítottuk meg a kisnyomású előmelegítő sor, a közbeiktatott gáztalanítós táptartály (GTT) és a nagynyomású előmelegítő sor kialakítását. A tápvíz előmelegítő sorok kialakítása és optimális összehangolása nem tartozott a vizsgálni kívánt rendszerek közé, viszont a rendszer teljességének érdekében szükségszerűvé vált a konstrukció kialakítása és modellezése. Az egyes előmelegítő sorok demonstrációs jellege nem feltétlen tükrözi a valóságot, mivel egyes üzemelő erőművekben a jól kialakított előmelegítő sorok működését sokkal több hőcserélő együttes munkája biztosítja.

4. táblázat: Tápvíz előmelegítési sorokhoz tartozó nyomásértékek

Jelölés	Megnevezés	Érték [Mértékegység]
$p_{\text{kisny},1}$	1. Kisnyomású előmelegítőtől kilépő nyomás	0.37 [bar]
$p_{\text{kisny},2}$	2. Kisnyomású előmelegítőtől kilépő nyomás	1 [bar]
$p_{\text{kisny},3}$	3. Kisnyomású előmelegítőtől kilépő nyomás	2.3 [bar]
$p_{\text{kisny},4}$	4. Kisnyomású előmelegítőtől kilépő nyomás	5.8 [bar]
GTT	GTT-ben uralkodó nyomásérték	7 [bar]
$p_{\text{nagyny},1}$	1. Nagynyomású előmelegítőtől kilépő nyomás	18 [bar]
$p_{\text{nagyny},2}$	2. Nagynyomású előmelegítőtől kilépő nyomás	90 [bar]
$p_{\text{nagyny},3}$	3. Nagynyomású előmelegítőtől kilépő nyomás	100 [bar]

Továbbá, a valóságban együttműködő hőcserélők között kisebb nyomásnövekedés figyelhető meg a modellünkben szereplő lépcsős kialakításához képest. Ennek ellenére, a modellben élhetünk azzal a feltételezéssel, hogy az általunk modellezett hőcserélő szimbolizálhat a valóságban több hőcserélőt is, kisebb lépésközökkel. Az előzőekben leírtak alapján az egyes előmelegítési paraméterek a következőképpen adódtak a modellben, amit a 4. táblázat foglal össze. Továbbá, a tápvíz előmelegítő sorok konstrukciós kialakítása a modell alapján a 7. ábrán látható.



7. ábra: A tápvíz előmelegítő rendszer kialakításának sematikus rajza

3.2.6. A releváns paraméterek összefoglalása

A korábban ismertetett modell definíciójából kiindulva az általunk kialakított rendszer paraméterei nagyrészt ideális esetre értendők, és több veszteségformulát is elhanyagoltunk. Így fontos megjegyezni, hogy a modell nem a valóság, ennek függvényében a saját számításaink alapján kapott főbb paraméterek Chemelot Site telephelyére vonatkozóan az 5. táblázatban találhatóak, az alapesetre vonatkozóan.

5. táblázat: Fő paramétereket összefoglaló táblázat

Jelölés	Megnevezés	Érték [Mértékegység]
p_1	Frissgőznyomás	169 [bar]
T_1	Frissgőz hőmérséklet	570 [°C]
p_{UH}	Újrahevítési nyomás	70 [bar]
T_2	Újrahevített gőz hőmérséklete	555 [°C]
p_{kond}	Kondenzátor nyomása	0.04 [bar]
P	Kiadott villamos-energia mennyisége	227,4 [MW]
Q_1	Kiadott hő-teljesítmény az első körben	150 [MW]
Q_2	Kiadott hő-teljesítmény a második körben	100 [MW]
Q_3	Kiadott hő-teljesítmény a harmadik körben	50 [MW]

A fő paraméterek jellegzetes összefoglalására a körfolyamat T-s diagramja adja a legjobb lehetőséget, amely a termodinamikai állapotjelzők változásának prezentálására szolgál. Ennek bemutatását csak az alapesetünkre végeztük el, mivel nem szolgáltat számunkra olyan extra információt, amely elősegítené a műszaki és gazdasági szempontokból vizsgált kritikai értékeléseinket. A 8. ábrán tehát Chemelot Site telephelyéhez kapcsolódó rendszermodellből származtatott eredmények összefoglaló T-s diagramja látható.

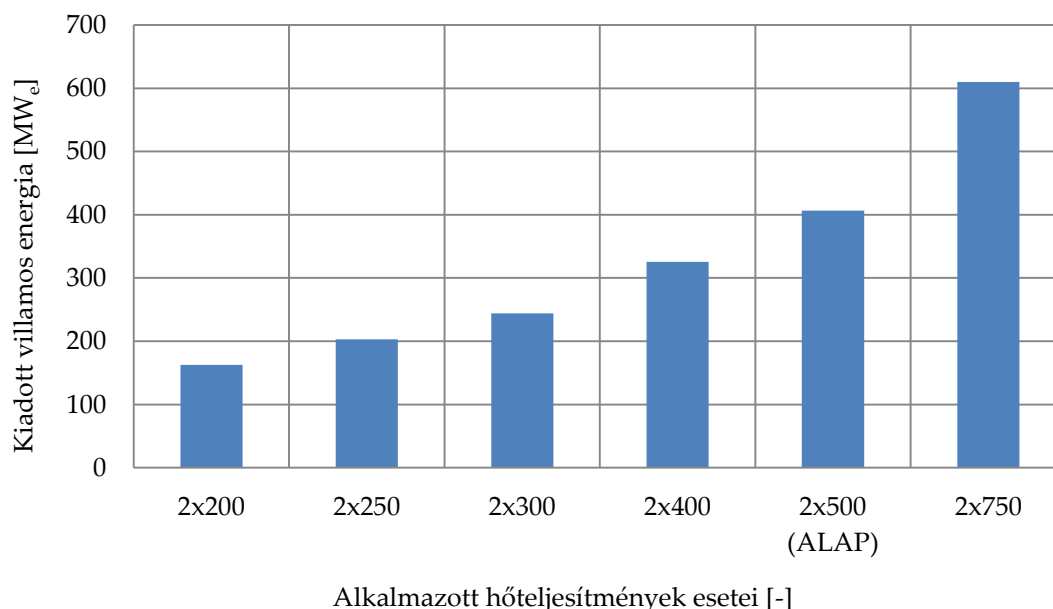
szempont szerint a hőteljesítmény változtatásával a villamos energia mennyisége is változhatott, míg a másik esetben egy fix villamos energia igényt definiáltunk, amellyel nagyobb reaktorteljesítmények esetében jóval nagyobb hőmennyiség kerülhetett kiadásra az ipari végfelhasználók számára, aminek fogadására jelenleg nem áll készen egy ipari komplexum sem. Ennek értelmében a későbbi opcionális telephelyek analízisekor csak az első nézőpont szerinti vizsgálatot végeztük el. A két nézőponttal kapcsolatos vizsgálati eredményeket a 7. és 8. táblázat tartalmazza.

Azonban, mindenekelőtt egy olyan kitekintést tettünk a kiépített rendszermodellünkben, ahol meghatároztuk a hőkiadási körök nélkül maximálisan kiadható villamos energia mennyiségét. Ez a vizsgálat azért került elvégzésre, mivel feltételezhetjük, hogy az ipari végfelhasználók igényei időszakosan jelentkeznek, így szükséges a kapcsolt rendszerünk nukleáris alapú energiatermelési lehetőségeinek maximumát kihasználni a profit maximalizálásának érdekében. A maximálisan kiadott villamos energia mennyiségei hat különböző esetre kerültek kiszámításra, melyeket a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat: A maximálisan kiadható villamos energia az egyes esetekben

Általános eset		Hőteljesítmény (MW_{th})					
Paraméterek	Konfiguráció	2x200	2x250	2x300	2x400	2x500	2x750
Max. kiadott villamos energia (MW_e)		162,6 5	203,3 2	243,9 8	325,3	406,6 3	609,9 5

A szemléletesség érdekében a 6. táblázatban található maximális kiadott villamos energia mennyiségeket összefoglaló táblázatot a 9. ábrán szemléltettük oszlopdiagram segítségével. A diagramon jól látható, hogy a reaktorteljesítmény fokozatos növelésével közel exponenciális jelleggel nő a kiadható villamos energia mennyisége, amely jelentős mértékben hatással van a gazdasági aspektusokra is.



9. ábra: A maximálisan kiadható villamos energia az egyes esetekben (MW_e)

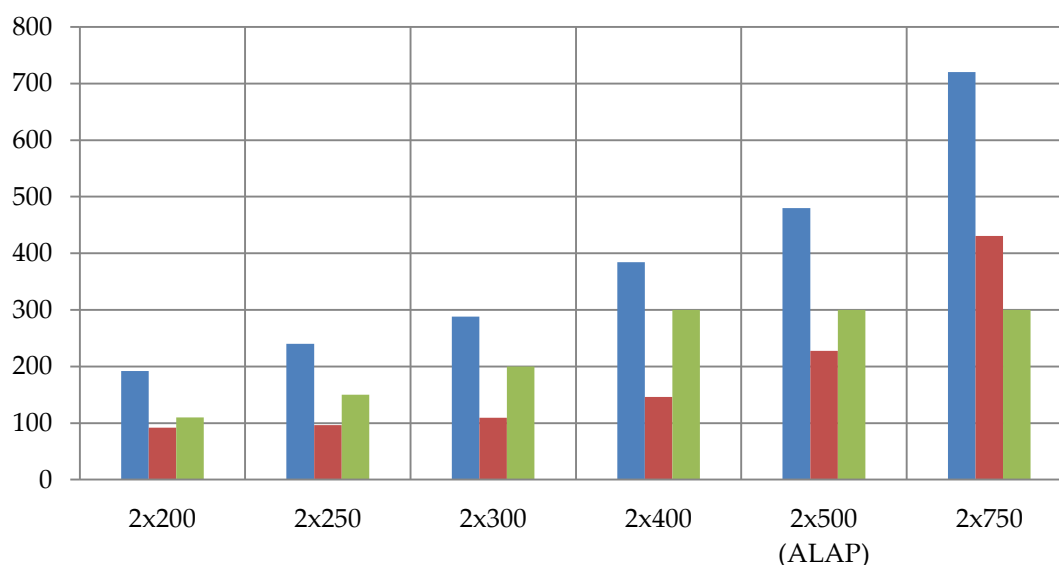
7. táblázat: Változó villamos energia melletti nézőpont az egyes esetekben

Chemelot Site 1. eset		Hőteljesítmény (MW _{th})					
Paraméterek	Konfiguráció	2x200	2x250	2x300	2x400	2x500	2x750
Tömegáram (kg/s)		192	240	288	384	480	720
Kiadott villamos energia (MW _e)		91,63	96,4	109,5	146,1	227,4	430,8
Hőteljesítmény az 1. körben (MW _{th})		30	50	100	150	150	150
Hőteljesítmény a 2 körben (MW _{th})		50	50	50	100	100	100
Hőteljesítmény a 3. körben (MW _{th})		30	50	50	50	50	50
Összes kiadott hőteljesítmény (MW _{th})		110	150	200	300	300	300

8. táblázat: Fix villamos energia melletti nézőpont az egyes esetekben

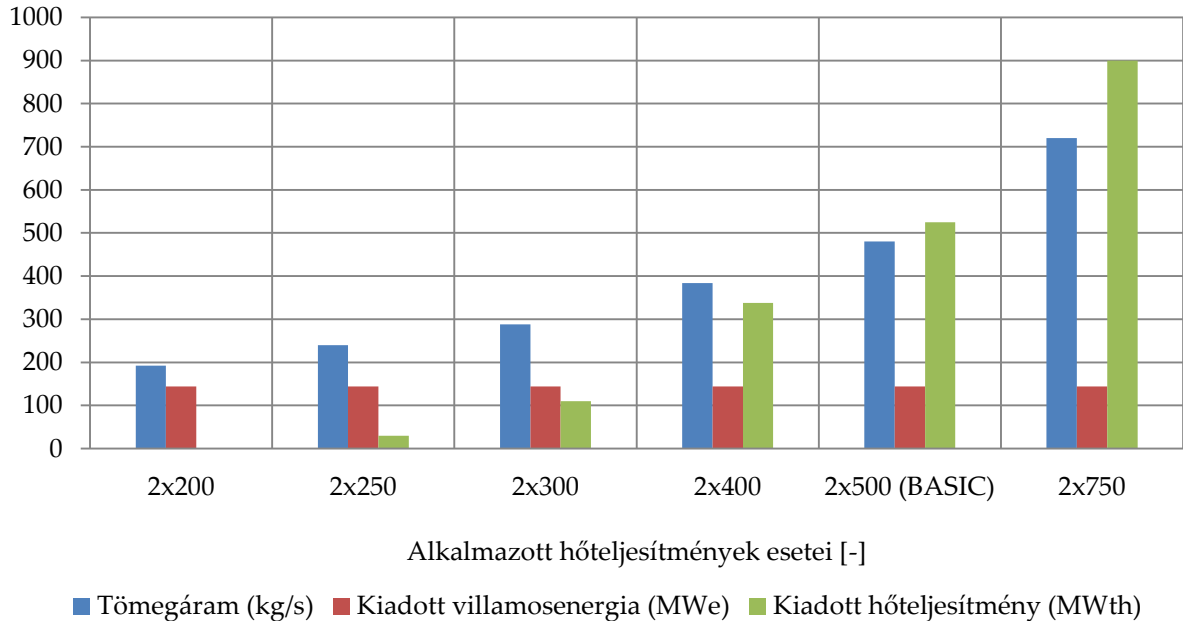
Chemelot Site 2. eset		Hőteljesítmény (MW _{th})					
Paraméterek	Konfiguráció	2x200	2x250	2x300	2x400	2x500	2x750
Tömegáram (kg/s)		192	240	288	384	480	720
Kiadott villamos energia (MWe)		144	144	144	144	144	144
Hőteljesítmény az 1. körben (MW _{th})		0	30	30	187,5	375	750
Hőteljesítmény a 2 körben (MW _{th})		0	0	50	100	100	100
Hőteljesítmény a 3. körben (MW _{th})		0	0	30	50	50	50
Összes kiadott hőteljesítmény (MW _{th})		0	30	110	337,5	525	900

Ahogy azt a fejezet elején említettük, az alap rendszermodellünket Chemelot Site telephelyére építettük és a paraméteranalízis két nézőpont szerinti vizsgálata is ezen telephelyen keresztül került bemutatásra. Az első eset összefoglaló eredményeit a 7. táblázat tartalmazza, míg a második esetét a 8. táblázat, ahol mindkét esetben hat különböző reaktorteljesítményt definiáltunk az optimumkeresés érdekében.



Alkalmazott hőteljesítmények esetei [-]
 ■ Tömegáram (kg/s) ■ Kiadott villamosenergia (MWe)

10. ábra: Az első nézőpont szerinti eredmények összefoglalása



11. ábra: A második nézőpont szerinti eredmények összefoglalása

A szemléletesség érdekében az előzőekben ismertetett eredményeket oszlopdiagramban is ábrázoltuk, amelyeket az első esetre vonatkozóan a 10. ábra, míg a második esetet a 11. ábra mutatja.

Az első nézőpont szerinti paraméteranalízisünknel azt feltételeztük, hogy a változó reaktorteljesítmény mellett a villamos energia dinamikus növekvő jeleget mutat. Ennek eredményeképp diagnosztizálható a 9. ábrán látható maximális villamos energia kiadásnál tapasztalható exponenciális jelleg a reaktorteljesítmény fokozatos növelésével. Ennek fő magyarázata, hogy egy adott reaktorteljesítmény után (ez a 2x400 MW-os kialakítás a 10. ábrán), elérünk egy olyan határt, amely felett nem létezik jelenleg olyan ipari komplexum, amely képes fogadni ilyen nagy hőmennyiséget az ipari folyamatok hőigényeinek kiszolgálására.

A második nézőpont szerinti vizsgálatok eredményeiből látható, hogy a kiadott villamos energia mennyiségét állandó értéken tartottuk, amelyből az következett, hogy a viszonylag nagy reaktorteljesítmények mellett a kiadható hőmennyiség radikális növekedést mutat, amelyet már végképp nem tud befogadni egy jelenleg létező ipari telephely sem. Továbbá, műszaki szempontból sem optimális a fix értéken tartott villamos energia mennyisége, hiszen előfordulhatnak olyan szituációk, amikor a nukleáris létesítmény részegységeinek és az ipari komplexumnak együttesen jelentkezik nagymennyiségű villamos energia igénye. Ebben az esetben jelentős mértékben csökkenne a hálózatra adott villamos energia mennyisége, amely jelentős hatással bírna a gazdaságosság kérdéskörére. További vizsgálatok kerültek elvégzésre a fix értékű kiadott hőmennyiségre vonatkozóan, viszont a műszaki megfontolásokból fakadóan az első nézőpont szerinti kiértékelésben lekorlátozott hőmennyiség lényegében magába foglalja ezen nézőpont szerinti vizsgálatok összességét is.

Ebből fakadóan megállapítható a kiértékelések és tapasztalatok alapján, hogy a valósághoz legközelebb álló vizsgálati nézőpont az első eset lesz, így a további vizsgálatok és összehasonlítások is az első nézőpont elvének felhasználásával készültek.

A rendszermodellünkből eddig kinyert eredmények alapján lehetőségünk volt optimum vizsgálatot végezni a reaktorblokk hőteljesítményére vonatkozóan. Ezt az egyes vizsgálati esetekben adódó kiadott hőmennyiség és villamos energia arányából (T/E) fakadóan került meghatározásra. Az optimumkeresésnél figyelembe vettük az ipar befogadóképességét is, így mindkét esetben korlátoztuk a kiadott hőmennyiséget. Az általunk definiált T/E arány, amellyel a nukleáris alapú kapcsolt energiatermelésünk hatékonyságát tudjuk jellemezni az 1. egyenlet alapján került kiszámításra.

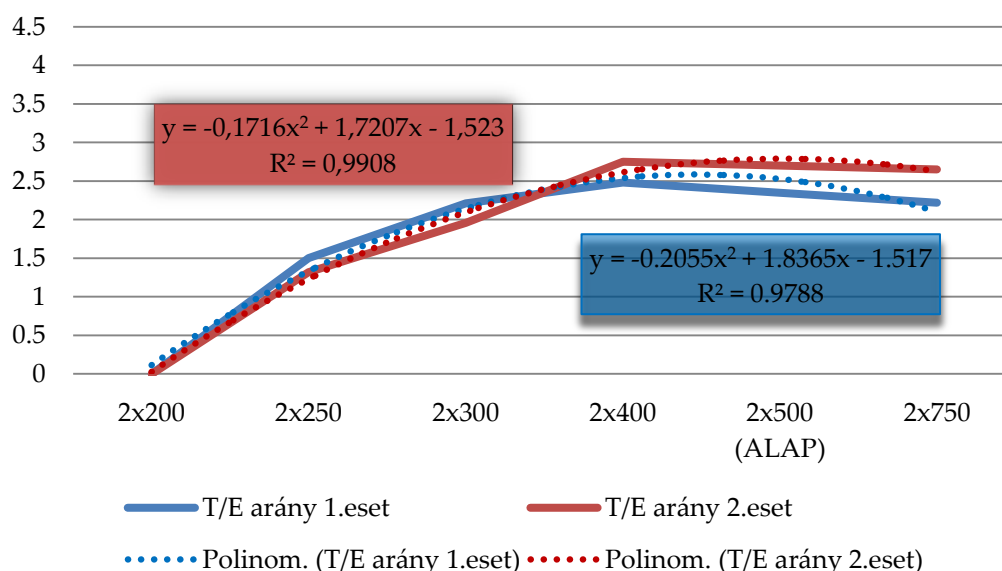
$$T/E = \frac{Q_{kiadott}}{P_{max} - P_{kiadott}} \quad 1.$$

Az egyenlet alapján megállapítható, hogy a definiált hatékonysági tényezőt a kiadott hőmennyiség és a kiadott villamos energia különbözetének hányadosa adja. Ezzel könnyedén jellemezhetővé válik, hogy mekkora mennyiségű villamos energiát áldoztunk fel az ipari végfelhasználók hőigényeinek kiszolgálására. A szóban forgó arányokat a 9. táblázat tartalmazza.

9. táblázat: A hatékonysági mutatók összefoglalása a vizsgálati esetekben

Összehasonlítás		Kiadott hőmennyiség és villamos energia aránya					
Eset	Konfiguráció	2x200	2x250	2x300	2x400	2x500	2x750
1. eset		0	1,5	2,21	2,48	2,35	2,22
2. eset		0	1,32	1,96	2,75	2,7	2,65

Annak érdekében, hogy egyértelműen meghatározásra kerülhessen az optimális reaktorteljesítmény a fennálló igények függvényében diagram formájában ábrázoltuk a 9. táblázat eredményeit, amely a 12. ábrán látható.



12. ábra: A hatékonysági mutatók által definiált optimum tartomány bemutatása

Az optimumkeresésből fakadó eredmények alapján belátható polinom illesztés segítségével, hogy az optimális reaktorteljesítmény a 2x400 és 2x500-as blokkok között helyezkedik el műszaki szempontból. A két reaktorteljesítmény között túl szűk a határ, hogy egyértelmű megállapítást tegyünk az optimális kialakításról. Továbbá a polinom illesztési bizonytalanságából fakadóan sem tehetünk egyértelmű kijelentést, viszont a műszakilag legkedvezőbb tartomány egyértelműen kiadódik. A kritikai értékelések során viszont eldönthetővé válik az általunk favorizált konstrukció a kialakított szempontrendszer szerint.

Az opcionális telephelyek vizsgálatánál további két lengyelországi eset elemzését tűztük ki célul. Az ország ásványkincs vagyona jelentősnek mondható, mégis a kohászat hanyatlása figyelhető meg. Ennek ellenére meghatározó szerepet tölt be jelenleg is a gazdaságukban. Az ipar legfontosabb ágazata a gépgyártás, viszont a legfőbb probléma a mi szempontunkból, hogy bár sokoldalú ipari végfelhasználó található, mégis elszórtan helyezkednek el az országban.

A nehézszerkezetgyártás a kohászati központokban, a műszer-, elektronikai és járműipar Varsóban koncentrálódik. A vegyipar hazai nyersanyaga a kőszén, a kősó és a kén. A textilipar viszont nagy hagyományokkal rendelkező könnyűipari ágazat, amely szinte az ország minden részén megtalálható. A projekt keretein belül Gdansk és Trzebinia területén elhelyezkedő telephelyek vizsgálatát végeztük el, amelyek közül csak az előbbi bemutatását végezzük el a tanulmány keretein belül a teljesség igénye nélkül. Gdansk vizionált telephelyének jellegzetes paraméterei összefoglalásra kerültek, amelyeket a 11. táblázat foglal magába. A Gdansk esetében a kisebb hőteljesítmények vizsgálatát céloztuk meg, mivel a jelenlévő alacsony hőigény nem teszi szükségessé a magasabb reaktorteljesítmények alkalmazását.

A 11. táblázatban szereplő paraméterekkel könnyedén felparaméterezhettük a globális jelleggel készített modellünket, így vizsgálatokat és paraméteranalízist készíthettünk Gdansk telephelyével kapcsolatosan is.

Az ipari végfelhasználók hőigényeit figyelembe véve Gdansk telephelyének elemzésekor már csak az általunk legjobbnak vélt két reaktorteljesítmény mellett mutatjuk be a vizsgálatok eredményeit, amelyet a 10. táblázat tartalmaz.

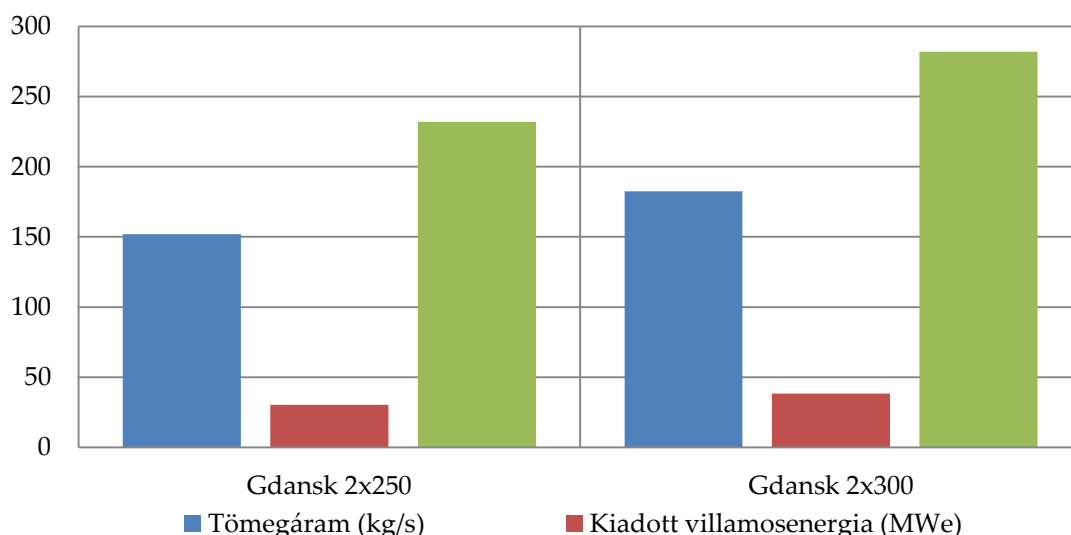
10. táblázat: Gdansk paraméteranalízise két vizsgálati esetben az első nézőpont szerint

Gdansk 1. eset		Hőteljesítmény [MW _{th}]	
		2x250	2x300
Paraméterek	Konfiguráció		
Tömegáram (kg/s)		152	182,4
Kiadott villamos energia (MW _e)		30,38	38,21
Hőteljesítmény az 1. körben (MW _{th})		103	147
Hőteljesítmény a 2 körben (MW _{th})		55	68
Hőteljesítmény a 3. körben (MW _{th})		74	67
Összes kiadott hőteljesítmény (MW _{th})		232	282

**11. táblázat: Gdansk telephelyéhez tartozó rendszermodellre jellemző
paraméterek összefoglalása**

Gdansk 1. eset		Hőteljesítmény [MW _{th}]	
		2x250	2x300
Paraméter	Konfiguráció		
Frissgőz nyomása (bar)		79	79
Frissgőz hőmérséklet (°C)		510	510
Újrahevítési hőmérséklet (°C)		426,8	426,8
Újrahevítés nyomása (bar)		70	70
Kondenzátor nyomása (bar)		0,04	0,04
Első kisnyomású előmelegítő nyomásszint (bar)		0,37	0,37
Második kisnyomású előmelegítő nyomásszint (bar)		1	1
Harmadik kisnyomású előmelegítő nyomásszint (bar)		2,3	2,3
Negyedik kisnyomású előmelegítő nyomásszint (bar)		5,8	5,8
GTT nyomásérték (bar)		7	7
Első nagynyomású előmelegítő nyomásszint (bar)		18	18
Második nagynyomású előmelegítő nyomásszint (bar)		90	90
Harmadik nagynyomású előmelegítő nyomásszint (bar)		100	100
Nagynyomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző nyomásérték (bar)		19	19
Nagynyomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző hőmérséklet (°C)		340	340
Középnomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző nyomásérték (bar)		19	19
Középnomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző hőmérséklet (°C)		250	250
Kisnyomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző nyomásérték (bar)		14,5	14,5
Kisnyomású turbináról megcsapolt hőkiadási körre jellemző hőmérséklet (°C)		200	200

A szemléletesség érdekében Gdansk esetében is oszlopdiagramban is ábrázolásra kerültek a különböző reaktorteljesítmények mellett végzett elemzések eredményei. Ahogyan azt már korábban említettük, az ésszerűséget és tapasztalatokat figyelembe véve már csak az első nézőpont szerinti vizsgálatok kerültek elvégzésre, így ennek függvényében az eredményeket a 13. ábra tartalmazza.



13. ábra. Paraméteranalízis eredményeinek összefoglalása Gdansk esetében

3.4. A telephelyek kritikai értékelése és összehasonlítása

A 3.3. fejezetben elvégzett paraméteranalízis alapján lehetőségünk nyílik a vizsgálat alá kerülő telephelyek kritikai értékelésére a műszaki megvalósíthatóság és hatékonyság figyelembevételével. Ahogy azt már korábban is említettük, több telephely is vizsgálat alá került, viszont a relatíve alacsonynak mondható végfelhasználó hőigények miatt értékelésüktől eltekintettünk a paraméteranalízis során. Ennek függvényében a kritikai értékelést csak a bemutatott elemzésekre alapozva végeztük el, azok közül is az általunk legjobbnak vélt négy konstrukció került bírálat alá.

12. táblázat: A kritikai értékelések összefoglalása

Szempont	Chemelot Site 2x400	Chemelot Site 2x500	Gdansk 2x250	Gdansk 2x300
Folyó közelsége	1,5 km	1,5 km	2,5 km	2,5 km
Szolgáltatott folyamathő	300 MW _{th}	300 MW _{th}	232 MW _{th}	282 MW _{th}
Szolgáltatott villamos energia	146,1 MW _e	227,4 MW _e	30,38 MW _e	38,21 MW _e
T/E arány	2,48	2,35	2,13	2,03
A rendszer összhatásfoka	55,76 %	52,74 %	52,47 %	53,36 %
Országban üzemelő atomerőművek	1	1	0	0
Ipari telephelyek jellege	Koncentrált	Koncentrált	Szeparált	Szeparált
Megvalósíthatóság	Könnyedén	Könnyedén	Megvalósítható	Megvalósítható

A kritikai értékelést különböző általunk fontosnak vélt szempontrendszer szerint végeztük el, amelynek részletes összefoglalása a 12. táblázatban található.

A kritikai értékelésünk első szempontja a frissvíz hűtés megvalósíthatóságának kérdéskörére irányult. A rendszermodellünk megalkotásánál feltételeztük, hogy nukleáris létesítményünk hűtése hagyományos úton valósul meg, így elsődleges szempontja a telephely kiválasztásának olyan geológiai adottságokkal rendelkező terület keresése, amely megfelel ezen elvárásainknak. Szerencsére, mind Chemelot Site, mind Gdansk közelében is található olyan folyó, amely képes lehet kiszolgálni a nukleáris létesítmény hűtési igényeit.

A második és harmadik szempontunkat a szolgáltatott folyamathő és kiadott villamos energia mennyisége adta, amely már korábban is bemutatásra került, viszont nem került összevetésre Gdansk esetével. Az eredmények alapján látható, hogy amíg a hőmennyiségek tekintetében majdnem hasonló eredményeket képes produkálni, mint a holland telephely vizionált modellje, addig az emellett kiadható villamos energia mennyisége nagyon csekélyre adódik. Ez főként abból fakad, hogy a rendszerre jellemző összes termodinamikai paraméter jóval kisebb értékeket mutat, mint a holland esetben, ezáltal az ipari igények kiszolgálása szinte felemészti az összes hasznosuló energiamentységet.

A T/E arány, azaz a kiadott hőmennyiség és a villamos energia különbözetének hányadosa és a rendszerre jellemző összehatásfok hasonlóságot mutat mind a négy vizsgálati esetben, mivel ezek a bemutatott elemzések már az optimalizált eredmények összefoglalásaként kerültek bemutatásra a dolgozatba. Ennek ellenére, ebben a szempontban is minimálisan előnyösebb tulajdonságokkal bír a hollandi telephely esete a rendszermodellen végzett vizsgálatok alapján.

Nagyon fontos vizsgálati szempontnak tartottuk az országban üzemelő atomerőművek számát, mivel ezzel következtethetünk arra, hogy milyen előzetes nukleáris alapú energiatermelési tapasztalatokkal rendelkezik az adott ország. Jelen állás szerint Hollandia 1 üzemelő atomerőművel rendelkezik, míg Lengyelország egyel sem. Ennek ellenére, ez pozitív hatású is lehet a beruházások szempontjából, mivel nagyon sok ország esetében elkötelezettségeket vélünk felfedezni más energiatermelési koncepciók iránt. Másrészt, más vizsgált országok esetében, ahol több atomerőmű is üzemel és nem megoldható a kibővítés lehetősége az tapasztalható, hogy nem szívesen válnának meg jól működő konstrukcióiktól.

Az ipari telephelyek jellegére vonatkozó megállapítások már korábban elvégzésre kerültek, ahol azt tapasztaltuk, hogy a holland esetben az ipari végfelhasználók koncentráltan helyezkednek el, míg a lengyel esetben ugyanez nem mondható el. Ez tovább nehezíti a műszaki megoldhatóság kérdéskörét, viszont nem lehetetleníti el.

Összességében megállapítható, hogy szinte az összes vizsgált szempont alapján a holland eset adódik a legjobb megoldásnak a nukleáris alapú kapcsolt folyamathő rendszerek kivitelezésére. Továbbá, ezen túlmutat az is, hogy ha ugyancsak minimálisan is, de az összes vizsgálati paramétert és feltételt figyelembe véve a 2x400-as konstrukció tűnik műszaki szempontból optimális választásnak.

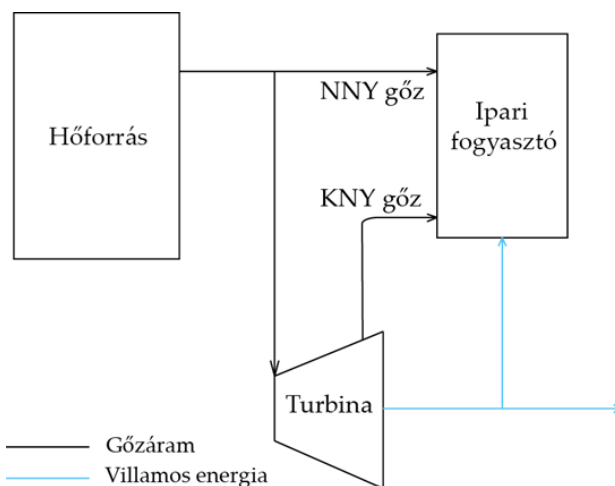
4. A gazdasági modellezés

A 4. fejezetben bemutatásra kerül a fentebb részletezett műszaki számításokra épülő gazdasági kockázatelemzés. A Microsoft Excel program segítségével felépített modell lehetőséget nyújt számunkra a hősema számításban kapott eredményeket a gazdasági életben elhelyezni. Az elkészített szcenárióanalízis illetve érzékenységvizsgálat segítségével egy ilyen hosszú időtávú projekt esetén is könnyen szemléltethetővé válik, hogy melyek a számítás legérzékenyebb pontjai, illetve melyek lehetnek azok a tényezők, amelyek megváltozásával egy gazdaságilag sikeresnek tűnő projekt végül mégsem válik azzá.

4.1. A gazdasági modell bemutatása

A folyamathő és a gőz pontos árának meghatározása kapcsolt energiatermelés esetén régóta foglalkoztatja a mérnököket, közgazdászokat, és erre a kérdésre nagyon nehéz megtalálni a helyes választ. A probléma egyik forrása, hogy nagyon sok, szinte végtelen minőségben – nyomás, hőmérséklet – állítható elő, és e paramétereket általában a végfelhasználó igényeihez igazítják, így csak személyre szabott termékeket készítenek. A következő felmerülő probléma a végtermék lokalizációja. A gőzt csak korlátozott mennyiségben, illetve jelentős költségek árán lehet tárolni, nagy távolságban szállítani. Ezen fenti problémákból következik, hogy a termék piaci beárazódásának lehetősége erősen korlátozott, így ez nagymértékben torzíthatja az árának a kialakulását. A dolgozatunkban törekedtünk egy minél általánosabb elemzés elkészítéséhez, így e termék árazásához egy hasonló témakörben elkészített E-ON tanulmányban használt értéket vettünk alapul [19].

A villamos energia árának a kiinduló értékének a meghatározása valamelyest könnyebb feladat, hiszen ez esetben egy széleskörű, kialakult piacról beszélhetünk. A nagyfogyasztók esetében a villamos energia vásárlása aukciókon keresztül történik, ahol a vevő egy előre becsült, tervezett mennyiséget tud lekötni a rendszerirányítónál. A mi modellünkben azt vettük alapul, mintha a rendszerirányító nem lenne a rendszerben, és az ipartelep közvetlenül a termelőtől vásárolná meg az energiát a szemléltethetőség és könnyebb átláthatóság érdekében. A termelés blokksémájának sematikus rajza a 14. ábrán látható.



14. ábra: Kapcsolt hő- és villamos energiatermelés sematikus ábrája

Mivel a folyamathó igényeket nehezebb egyéb forrásból pótolni, így ahhoz igazodik a termelés. A villamos energia többletet, illetve az esetlegesen jelentkező hiányt a piacról lehet pótolni a modellünkben. Természetesen termelésbiztonsági megoldásként a hőenergia pótlására is lenne egy kiépített rendszer, ami fosszilis energiaforrás segítségével állítana elő gőzt, de ezt a kiegészítést a többi egységhez képest elhanyagolhatóan kis jelentősége, illetve az esetleges előzetes kiépítettsége miatt a modellünk során nem vettük figyelembe.

A két végtermék pillanatnyi árának meghatározásán túl, a jövőbeli kitekintés talán még fontosabb szempont is. A modell egy 60-70 éven át tartó befektetéshez készül, amely legalább 10 év múlva kezdhet el üzemelni, így az értékesítendő végtermékek árát ilyen időtávon kell vizsgálni. Ezen adatok előre-jelvezhetőségének nehézsége hordozza magában a végeredmény egyik legnagyobb kockázatát. A világ szakemberei közt sincs egyetértés azzal kapcsolatban, hogy pontosan milyen értékeket fog felvenni e termékeknek az ára, illetve hogy a növekedés milyen ütemben fog történni. Az árak alakulását megszámlálhatatlanul sok külső tényező befolyásolhatja, toihatja el akár pozitív, akár negatív irányba. Ennek köszönhető, hogy a legoptimistább és legpesszimistább becslések között óriási az eltérés. Ezen értékek becsléséhez is a korábban említett E-ON tanulmány értékeit [19], illetve egy saját becslést vettünk alapul. A számításunk él egy olyan egyszerűsítéssel, hogy az előre nem látható külső tényezők – például a 2008-as világválság következtében bekövetkezett ipari és fogyasztási visszaesés – miatti kiugró értékekkel nem számol, egy évről évre bekövetkező infláció feletti növekedést prognosztizál mind a villamos áram mind a folyamathó árában.

A projekt megtérülésének a vizsgálatához nettó jelen érték számítását használtunk. A befektetést piaci beruházásként vizsgáltuk, tehát a régió illetve a nemzet gazdaságára gyakorolt hatást nem vettük figyelembe. Mivel a piacon a tőke szabad áramlását feltételezzük, a tőke bevonásának milyenségével nem foglalkoztunk. Az NPV számításához a 2. egyenletet használtuk fel, továbbá a jelölések magyarázata a 13. táblázatban olvasható [20].

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{E(F_n)}{(1 + r_{alt,nom})^n} \quad 2.$$

13. táblázat: Az NPV kiszámításához használt jelölések magyarázata

Jelölés	Jelentése
NPV	A projekt nettó jelen értéke (Net Present Value) [Euró]
n	Az adott évet jelöli
N	A számítások végét, azaz a leszerelés befejezését jelöli
$E(F_n)$	Adott évben ki és befolyó pénzáramok előjeles összege [Euró]
$r_{alt,nom}$	A tőkeköltség [%]

Az infláció növekedésének ütemét statikusnak vettük, évi 2%-nak becsültük. Ilyen nagy időtávban ez egy általános, reálisan elérhető inflációs cél. A tőke alternatíva költségét 6%-nak vettük fel, ez reálisnak tekinthető egy energetikai területen történő beruházás esetén [19].

Az évről évre történő pénzáramlás becslését természetesen a bevételek és kiadások különbségeként állítottuk elő. Mindössze két tétel képez számunkra bevételt, az értékesített hő, illetve a villamos áram. Ennek értéke úgy áll elő, hogy a pillanatnyi teljesítményt összeszorozzuk az adott évben érvényes árral, és az éves kihasználási óraszámmal. Az éves kihasználási óraszámot 7446 órának vettük alapesetben, ami egy 85%-os rendelkezésre állást jelent. Mivel az atomerőműveket 12 vagy 18 havonta le kell állítani üzemanyag átrakás, illetve karbantartás miatt közel 30 napra, ez az érték tűnt a legmegfelelőbbnek az alapesethez. A bevételünk értéke évről-évre nő, hiszen a termékek egységára növekszik, míg az előállított mennyiség konstans. A kiadási oldal ettől lényegesen összetettebb, itt vesszük számba a beruházási költséget, az üzemeltetési és karbantartási költséget, az üzemanyagköltséget, illetve a végső leszerelés költségét is. A beruházási költséget az első 15 évben írná le a projekt. Az adó mértékét koncentráltan 20%-nak feltételeztük, amelyet minden évben a bevétel, illetve kiadás különbségéből vontunk le. Az így kapott adózás utáni eredményeket összegeztük, a projekt nettó jelen értékének kiszámításához.

A végtermékek árának növekedési ütemét évi 4 százaléknak vettük, ez ilyen hosszú távon képes kiegyenlíteni a rövidebb ingadozásokat, illetve a reálértelemben vett 2% növekmény megfelel az energiaszektorban korábban tapasztalható tendenciáknak és várakozásoknak is [19].

A gazdasági modell bemeneti paramétereinek nagymértékű bizonytalansága szükségessé tette, hogy a vizsgálataink során ne kizárólag adott peremfeltételű, a korábban bemutatott hőkörfolyamati modellekhez kapcsolódó diszkrét értékeket számoljunk, hanem egy széleskörű paramétervizsgálatot is elkészítsünk. Ezen érzékenységvizsgálat segítségével könnyen szemléltethetővé válik, hogy mely bemeneti paraméter változása miként befolyásolja a végeredményt. Chemelot Site, illetve Gdansk telephelyeihez készültek el ezek a vizsgálatok, a 3.3. fejezetben bemutatásra kerülő reaktorteljesítmények mellett. Chemelot Site telephelyének vizsgálatánál külön készítettünk olyan elemzést is, amikor különböző villamos energia árakon futott a gazdasági modell az összes vizsgált reaktorteljesítmény esetén, amelyeket a 10. ábrán mutattunk be. Az egyes telephelyekhez és esetekhez elkészített diagramok segíteni tudnak egy esetleges jövőbeni befektetőnek eligazodni a számok tengerében, továbbá megtalálni az ő várakozásaihoz legközelebbi előrejelzéseket, kockázatokat, és az ahhoz tartozó várható profitot.

Az érzékenységvizsgálaton túl, egy olyan eshetőséggel is számoltunk, ahol a rendszer egy földgáz rásegítéses kazánnal üzemel együtt. A kapcsolás megvalósíthatóságának gazdasági szempontú alapja az, hogy a kazán teljesítménye együtt mozog a villamos energia napon belüli áringadozásával. Így amikor az ár magas, a reaktorok csak áramot állítanak elő a rendelkezésükre álló gőzből, a folyamathő igényeket pedig ez a kazán biztosítja. Amikor a villamos energia ára alacsonyabb, akkor a kazán leáll, és visszatérünk a kezdeti állapothoz. Egy napon belül 3 időszakot különítettünk el, a reggeli, illetve esti csúcsokat, a napközbeni völgyet, illetve az esti mélyvölgy időszakokat. Az eredmények gazdasági szempontból nagyon kis mértékben javultak a modellben, de számos olyan műszaki paramétert és körülményt elhanyagoltunk ezekkel, amik mégsem tennék profitábilissá a beruházást.

Ez elsődlegesen a kazánok napi leállása következtében keletkező többlet veszteségekkel magyarázható. Ezen veszteségeken túl üzemviteli szempontból sem

optimális ilyen nagymértékű folyamatos teljesítményváltozás, továbbá a turbina és tápvízrendszerre is jelentős hatással lenne. A fentebb említett műszaki megfontolásoknak köszönhetően nem végeztünk mélyreható vizsgálatokat, ez eset gazdasági szempontú vizsgálatát nem folytattuk.

4.2. A HTR beruházásának költségei, gazdasági alapadatok

A IV. generációs atomerőműveknél a beruházási és üzemeltetési költségek terén komoly bizonytalanságot jelent a megépült és üzemelő erőművek nagy számának hiánya. Bármilyen erőműépítést veszünk példaként, nem lehet standard, katalógus árral számolni, hiszen a kész építmények minden esetben telephely specifikusan készülnek el, így a helyi adottságokhoz mérten jelentős eltérések is adódhatnak. Munkánk során célunk egy standard modell elkészítése volt, így ez esetben a lehetséges eltéréseket próbáltuk az érzékenység vizsgálatban feltüntetni. Az erőműépítés költségeinek a becslését nem mi végeztük, hanem az AREVA által készített tanulmányt vettük alapul [21]. E dokumentum egy 250 MWth hőteljesítményű ikerblokkos HTR reaktor technológia felépítésével, illetve a megépítés és üzemeltetés gazdasági háttérével foglalkozik. A számítások frissvízhűtésű kialakítású modellhez készültek, és kitérnek az atomerőmű egyéb költségelemeire is, melyek az üzemelés közben lépnek fel.

A tervezet szerint 4 év alatt menne végbe a beruházás. Ez idő alatt a beruházási költség egyenletesen oszlana el, amely évenkénti 25%-ot jelent. Az üzemelési és karbantartási (O&M) költségekkel illetve az üzemanyag árával is csak az első üzemévtől számolunk. Több eltérő reaktorteljesítményhez is készítettünk elemzést, amelyekre természetesen nem lehet használni a 2x250 MWth-hoz tartozó árat. Ilyen teljesítményekhez nem álltak rendelkezésünkre mélybemenő számítások, így mi úgy vettük, hogy a 2x300 MWth-os esetben az alapérték 115%-val 2x400 MWth-os esetben 145%-val, a 2x500 MWth-os esetben pedig 175%-val számolunk mind a beruházási, mind az egyéb költségek terén. Ezen értékek valószínűleg felülbecslések, hiszen a költségek jelentős részét kitevő reaktortartály illetve biztonságvédelmi berendezések száma, mérete nem változik egyenes arányban a reaktor teljesítményével, de megállapítható, hogy nagyobb teljesítmények magasabb árakat eredményeznek.

Az O&M költségek, illetve az üzemanyagköltségek árának időbeli drágulását úgy feltételeztük, mintha azok az inflációval megegyező mértékben növekednének. Azért éltünk ezzel a feltételezéssel, mivel az első komponens esetében – bérek, illetve általános cserélendő alkatrészek – nem indokolja semmi az árszínvonal emelkedési ütemén felüli drágulást. Az üzemanyag költségét elsősorban nem az alapanyag, – az uránérc – hanem az előállítás technológiájának a milyensége határozza meg, így e költségelem növekedési üteme a számításaink során megegyezik az üzemeltetésével. A leszerelési költség, az üzemidő után jelentkező költségelem, a felaktiválódott berendezések elhelyezésének díját jelenti. Napjainkban is, minden atomerőmű kötelezően, évenként elkülönít erre valamekkora összeget, így a végső leállítás időpontjában kellő mennyiségű összeg fog rendelkezésre állni a végső leszerelés, és a szükséges elemek radioaktív hulladékartolóba szállításának költségeinek fedezésére. A mi számításaink során is ezt a módszert követjük, évenként egy inflációval növekedő összeget különítünk el ilyen célra.

14. táblázat: Az NPV számítás költségelemei és azok érzékenységvizsgálat során felvett értékei

Tétel	Referencia eset	Negatív irányú eltérés [%]	Pozitív irányú eltérés [%]	Legkisebb érték	Legnagyobb érték
HTR Beruházási Költség [M€] 2x250 MW eset	930.8	- 40	+ 50	558.48	1396.2
Üzemeltetési és karbantartási költség a 0. Évben [M€/év]	23.4	- 40%	+ 140	14.04	56.16
Leszerelési költség a 0. Évben [M€]	115	- 25	+ 200	86.25	345
Üzemanyag költség a 0. Évben [M€/év]	27.1	- 40	+ 140	16.26	65.04
Üzemidő [év]	40 év	- 40	+ 50	24	60
Villamos energia ára a 0. évben [€/kW _e] (Növekedési ütem) [%/év]	0,1 (4)	- 40 (-50)	+ 140 (+40)	60 (2)	240 (5.6)
Folyamathó ára a 0. Évben [€/kW _{th}] (Növekedési ütem) [%/év]	0,08 (4)	- 40 (-50)	+ 140 (+50)	0.048 (2)	0.192 (5.6)
HTR éves rendelkezésre állása [%]	85	- 30	+ 15	59.5	97.75
Építési idő [év]	4	- 50	+ 100	2	8
Adó mértéke [%]	20	- 10	+ 40	18	28
Tőkeköltség [%] (Inflációs ráta) [%] (Tőke alternatíva költsége reálértelemben) [%]	8 (2) (6)	-60	+ 120	3.2 (0.8) (2.4)	17.6 (4.4) (13.2)

Az üzemidőt referenciaesetben 40 évnek becsülték, amely első ránézésre kevésnek tűnhet a napjainkban épülő erőművek 60 éves élettartama mellett, azonban itt fontos megjegyezni, hogy nagyságrendekkel kevesebb üzemév tapasztalata áll a hatóság rendelkezésére egy ilyen döntés meghozatalához, mint más típusok esetében, így törekednek a biztonságosabb irányba terelni a dolgokat. Természetesen, amennyiben a reaktor öregedése úgy alakul, továbbá az üzemeltetőben is megvan a szándék az üzemidő hosszasításra, ez még a későbbiekben megnövelhető.

Az érzékenység vizsgálatban használt értékeket a 14. táblázat mutatja. Azok a tételek esetén, amelyek teljesítményfüggőek, a már korábban említett 115, 145, illetve

175%-át vesszük az értéknek, míg az adott arányú pozitív illetve negatív eltérést nem változtattuk. Természetesen minden egyes felmerülő változó apró ingadozását nem tudtunk figyelembe venni, de próbáltunk minden olyan üzemi és gazdasági paramétert számításba venni, amelyek számottevően kihathatnak a projekt gazdasági végkimenetelére. Általánosságban $\pm 50\%$ -os eltérésekkel számoltunk, de bizonyos paramétereknél a pozitív irányú eltérést nagyobbak is feltételeztük. A nagyobb pozitív irányú eltéréseket az indokolja, az üzemeltetési, leszerelési és üzemanyag költségtételek esetében, hogy ilyen téren a szakma még semmilyen tapasztalattal nem rendelkezik, így szükségesnek éreztük megvizsgálni egy jelentősebb referenciabeli alulbecslés vizsgálatának esetét is

A villamos energia illetve folyamathő ára esetén nem csak a kiindulási érték változását vettük figyelembe, hanem a prognosztizált növekedési ütem megváltozását is. A valóságban természetesen közel lehetetlen, hogy évről évre azonos mértékben nőjenek ezek az értékek, ám számításaink során felvett valamely érték, könnyedén tudja reprezentálni a tényleges értékek átlagát.

A rendelkezésre állás esetén egyrészt azért vizsgáltunk ilyen szűk eltérési tartományt, mert az érték 100% fölötti értéket nem vehet fel, másrésztől 60%-nál kisebb érték esetén már jelentősebb üzemviteli problémákkal szembesülne az erőmű, amely nem a gazdasági hatástanulmány kérdésköre. Az építési időt referenciaesetben 4 évnél feltételeztük [21]. Ez elsőre optimista előrejelzésnek tűnhet, ám az érzékenység vizsgálatok során láthatjuk, hogy ez a tényező jelentős mértékben befolyásolja az NPV értékét. A 8%-os kezdeti kamatláb eltérését önmagában nem vizsgáltuk, külön kezeltük a reálkamatláb változását, illetve az inflációt. Ezen értékeket vizsgáltuk a legszélesebb skálán, -60%-tól egészen +120%-os eltérésig. Ennél negatívabb elmozdulást azért nem vettünk figyelembe, mert akkor azok már irreálisan alacsony értékek lettek volna, melyek bekövetkezési valószínűsége szinte zérus.

4.3. A telephelyekhez tartozó gazdasági kockázatelemzés

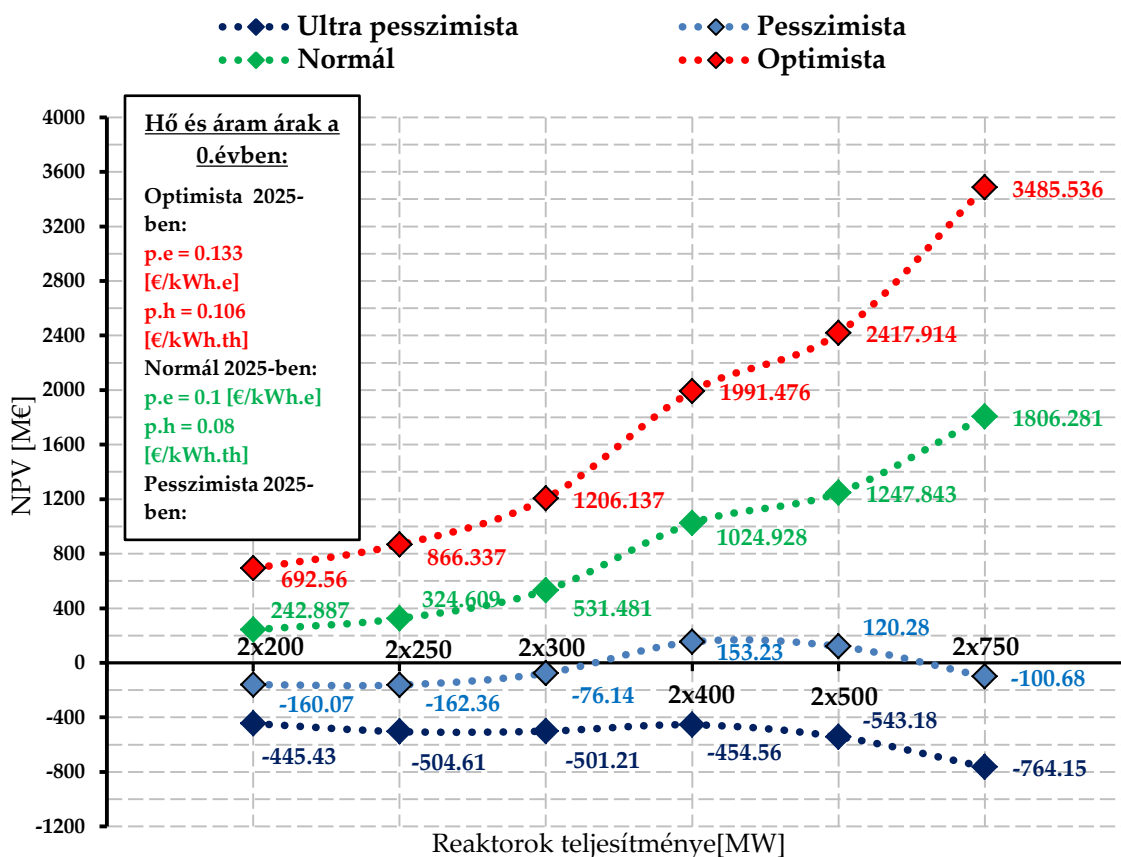
A beruházás kockázatait érintő vizsgálatok közül elsőként a szceárióanalízist mutatjuk be, ahol a 10. ábrán megjelenített műszaki paraméterekhez illesztettünk négy különböző értékű villamos energia, illetve folyamathő árat. Azért ezt az esetet választottuk e változások bemutatásához, mert a változó villamos teljesítményű esetben a termelési többletet egyszerűen lehet értékesíteni a hálózaton, míg folyamathő felesleg értékesítésére egy újabb helyi fogyasztót kellene találni, ami jelentősen megnehezíti a kivitelezhetőséget.

Az összes vizsgált előrejelzés esetén az áram és hő ára ugyanúgy aránylik egymáshoz. Ez annak köszönhető, hogy egymást részben helyettesítő termékek, így az egyik termék ára erősen kihat a másikéra is. Az előző fejezetben bemutatott HTR gazdasági adatokat ki kell egészíteni a 2x750 illetve a 2x200 MWth hőteljesítményű esetekkel. Ezen két teljesítmény esetén is hasonlóan jártunk el, mint a korábban említettekben. A 750 MWth-os blokkok esetén a költségeket a 250 MWth-os 250%-nak feltételeztük, míg a 200 MWth esetén 85%-ára csökkentettük a 250 MWth egység teljesítményű ikerblokkok költségeleleit. A különböző energiaárakat a 15. táblázat tartalmazza.

15. táblázat: Energiaárak alakulása különböző scenáriók esetén

	Optimista	Normál	Pesszimista	Ultra pesszimista
Villamos energia ára 2025-ben [€/kWh]	0.133	0.1	0.0714	0.05
Folyamathő ára 2025-ben [€/kWh]	0.106	0.08	0.056	0.04

A különböző peremfeltételek mellett elvégzett számítások nettó jelenértékei a reaktorteljesítmény függvényében a 15. ábrán láthatóak. Az itt elsőként szembetűnő eredmény teljesen megfelel az elvárásainknak, miszerint magasabb értékesítési árakhoz, magasabb NPV tartozik. Azon eredmények is jól tükrözik a várakozásainkat, hogy magasabb egységteljesítmény esetén az értékek közt lényegesen nagyobb eltérések tapasztalhatóak. Megállapítható, hogy a befektetés kockázata és az eredmények szórása folyamatosan nő a 2x750 MW_{th}-os eset irányába. Továbbá, hogy a befektetők számára a legideálisabb teljesítmény a 400 és 500 MW_{th}-os eset. Ezt a kijelentést arra alapozzuk, hogy itt kapunk a legszélesebb energiaár tartományban pozitív NPV-t illetve, itt tapasztalható a legideálisabb NPV- kockázat kombináció.



15. ábra: Az NPV változása különböző teljesítmények és energiaárak esetén

A 15. ábrán elsőként szembetűnő eredmény teljesen megfelel az elvárásainknak, miszerint magasabb értékesítési árakhoz, magasabb NPV tartozik. Azon eredmények is jól tükrözik a várakozásainkat, hogy magasabb egységteljesítmény esetén az értékek közt lényegesen nagyobb eltérések tapasztalhatóak. Megállapítható, hogy a befektetés kockázata és az eredmények szórása folyamatosan nő a $2 \times 750 \text{ MW}_{\text{th}}$ -os eset irányába. Továbbá, hogy a befektetők számára a legideálisabb teljesítmény a 400 és $500 \text{ MW}_{\text{th}}$ -os eset. Ezt a kijelentést arra alapozzuk, hogy itt kapunk a legszélesebb energiaár tartományban pozitív NPV-t illetve, itt tapasztalható a legideálisabb NPV- kockázat kombináció.

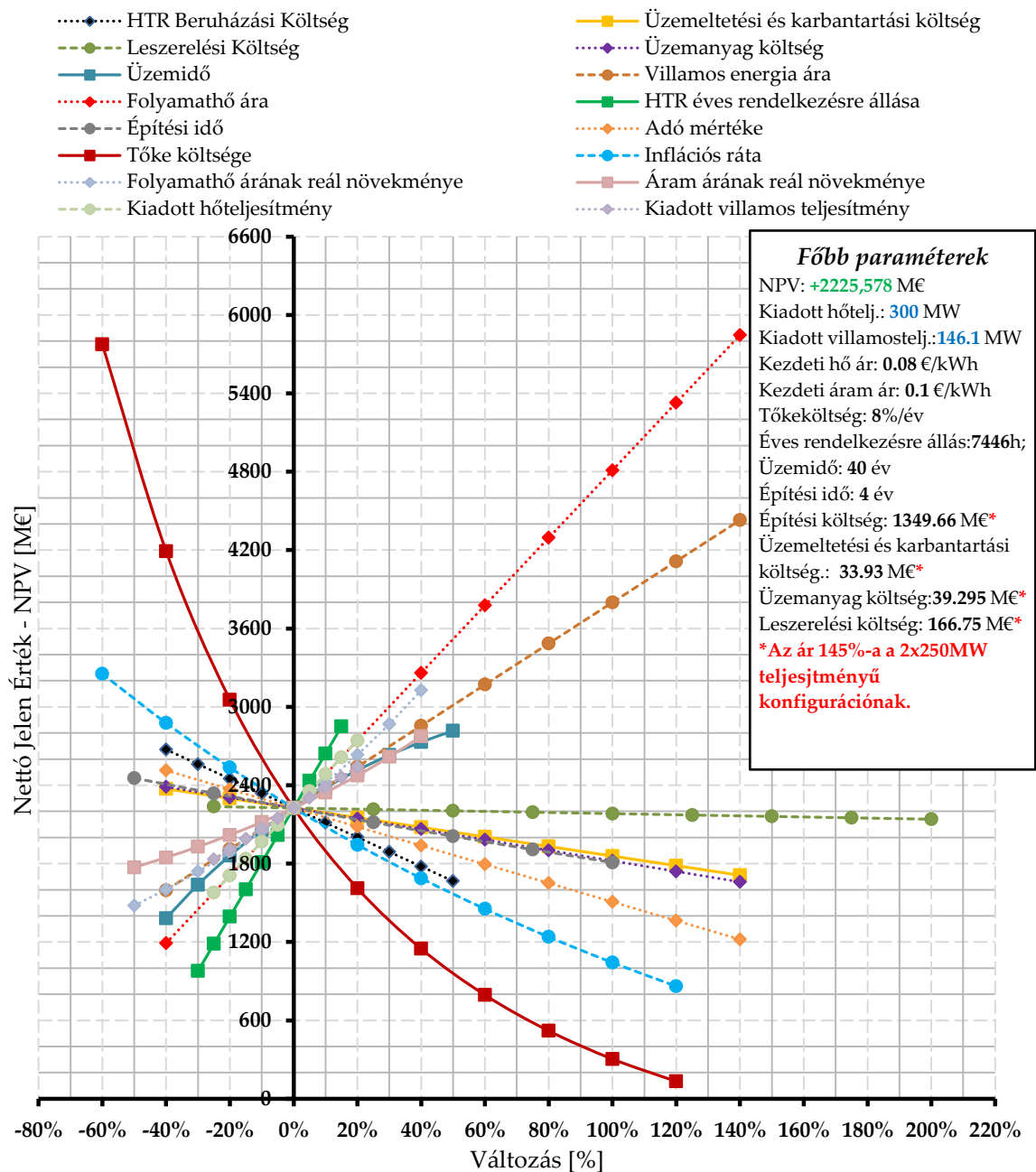
A pesszimistább előrejelzések esetén megfigyelhető az a tény, hogy a reaktorteljesítmények növelésével egy ideig nő a nettó jelenérték, majd egy adott szint felett elkezdi csökkenni. Ez annak köszönhető, hogy a nagyobb blokkok esetén jelentkező többlet beruházási, illetve üzemviteli költségeket az értékesíthető teljesítmény növekménye nem képes fedezni.

Normál, illetve optimista előrejelzések esetén az NPV várható értéke folyamatosan nő, a növekedés mértéke közel egyenes arányban van a kiadott villamos energia mennyiségének növekményével.

A következő érzékenység vizsgálatokban a 12. táblázatban kiemelt telephelyteljesítmény kombinációk kerülnek bemutatásra. A vizsgálatok lényege az, hogy a modell elkészülte, illetve az alapadatok becslése után megvizsgáljuk, hogy a különböző források, elemzések során eredményül kapott paraméterek százalékos változása miként befolyásolja a projekt egészének értékteremtő képességét. A 14. táblázatban szereplő fő paraméterek esetén egyenként megvizsgáljuk, hogy ezek mennyiben módosítják az NPV-t. Továbbá, melyek azok a tényezők, amelyek döntően befolyásolják a projekt kockázatosságát. Ezen paraméterek megismerése azért is hasznos számunkra, mivel a megvalósítás során ismerni fogjuk, hogy mely tényezők jelentenek nagyobb veszélyt a végkimenetelre, így ezekre fokozottabban ügyelhetünk. Továbbá, ezek előrejelzését részletesebb hatástanulmányokkal is alátámaszthatjuk a jövőre nézve [20].

Az elemzés során a 15. ábrából a normál energiaárakat vettük alapul, illetve a 14. táblázatban feltüntetett értékek változásának hatásait vizsgáltuk a nettó jelen értékre. Természetesen ezek a korábban felsorolt tényezők valamilyen szinten mind hatással vannak egymásra, így lehetetlen, hogy egyszerre csak egy tényező változzon. A legszorosabb egymásra hatást minden bizonnyal az infláció, a tőke költség illetve az energiaárak növekedési üteme közt tapasztalhatjuk. Ez egyrészt annak köszönhető, hogy több tényezőnek része az inflációs ráta, másrészt ezek az általános gazdasági fejlődéssel, növekedéssel szorosan összefüggő mutatók,

így minden bizonnyal a jövőben ezek magas korrelációs tényezővel jellemezhetőek, így értékük együtt mozog.



16. ábra: Érzékenységvizsgálat 2x400 MW_{th}-os HTR-rel megvalósított Chemelot Site telephelyéhez

A 16. ábrán látható a Chemelot site-i telephely 2x400MW teljesítményű reaktorokkal megvalósított esetének az érzékenység vizsgálata. A 14. táblázatban található gazdasági paramétereken túl figyelembe vettünk műszaki paraméterek terén tapasztalható eltéréseket, azaz a Cycle-Tempo modellben számított kiadható hő, illetve villamos energia teljesítmény változását. Ezt azért volt szükséges figyelembe venni, mert nem csak a gazdasági előrejelzésekben fedezhető fel bizonytalanság,

hanem az erőmű körfolyamati elemzése is csak egy modell, – ami lényegesen pontosabb, mint az energiaárak előrejelzése – de hibát természetesen ez is hordoz magában.

A kapott eredményről elmondható, hogy alapvetően a bevételi oldal valamely elemének csökkenése, illetve az árak drágulásának lassulása negatív irányba mozdítja el az NPV-t. A legerősebb csökkenési ütemet az éves rendelkezésre állás okozza. A gazdasági hatásokon túl, fontos megjegyezni, hogy egy ilyen nagymértékű csökkenés, az értékesíthető mennyiségre gyakorolt negatív hatáson túl egy olyan műszaki problémának lehet köszönhető, amely megoldása rövidtávon szükséges, továbbá várhatóan jelentős forrást emészt fel.

A soron következő legérzékenyebb – pozitív meredekségű – tényezők a folyamathő kezdeti ára, kiadott teljesítménye illetve a villamos energiára vonatkozó ugyanezen tényezők. Ezeknek azért van pontosan ugyanakkora hatásuk a végeredményre, mert a párosítások szorzata képzí a bevételt, így akár a teljesítmény, akár az ár adott százalékos változására ugyanúgy reagál az NPV. Az energiaárak növekedési ütemének változása kisebb eltérést generál, mint a kezdeti értékeknek változtatása, bár ezzel kapcsolatosan fontos megemlíteni, hogy a növekmény változása minden bizonnyal a kezdeti értékekre is kihatna. Az elvárásainknak megfelelően, hasonlóan a kezdeti energiaár változásokhoz, jelen esetben is kevésbé erős hatást gyakorol a villamos energia ár növekedési ütemének a változása, mint a folyamathő esetében. A legkisebb befolyással bíró tényező az üzemidő. Ennek változása nem lineáris jellegű görbét mutat a korábbiakkal ellentétben. Ez annak köszönhető, hogy évről évre eltérő a pénzáromok összege, továbbá a nettó jelen értékük csökkenő tendenciát mutat.

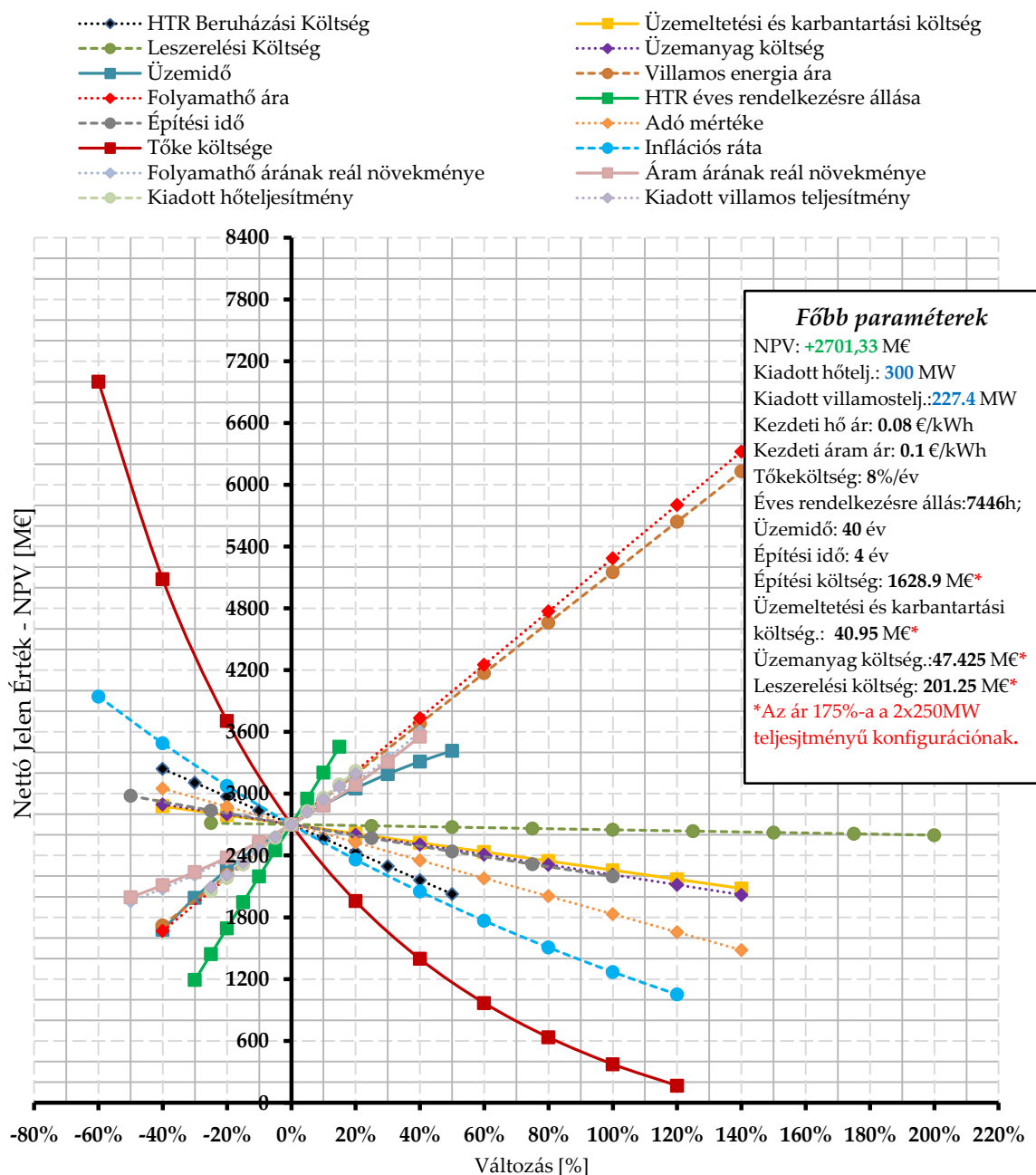
Azon tényezők közül, – a kiadási oldalhoz tartozó tételek, illetve az építési idő és a nominális tőkeköltséget meghatározó mutatók – amelyek növekedése negatív irányba mozdítja az NPV-t, a leggyengébb hatást a leszerelési költség változása okozza. Az üzemeltetési és karbantartási költség, az üzemanyagköltség, illetve a beruházási idő növekménye körülbelül azonos mértékben mozdítja el a projekt végkimenetelét. Az adóterhek növelése már erősebben befolyásolná a végértéket, de ezeknek túl nagymértékű változása a valóságban nem várható.

Az építési költség a legszámottevőbb kiadás a projekt során, továbbá időben ez a tétel jelentkezik a leghamarabb. Ezekből következik, hogy a negatív pénzáromok közül ennek a változtatásának van a legerősebb hatása az NPV-re. Az inflációs ráta, illetve a reálértelmű tőke költség változása befolyásolja leginkább a projekt jelenértékét. Az inflációnak a megváltoztatása magában hordozza több egyéb paraméter nominális vagy reálértelmű változását is. Például az energiaárak növekedési ütemét, továbbá ennek a paraméternek tettük a függővényévé az O&M költségek illetve az üzemanyag árának a növekedési ütemét is. Mivel a tőkeköltség reálértékét nem módosítjuk az elemzés alatt, így a nominál kamatláb folyamatosan változik a modellünkben.

Az inflációs ráta változtatásánál csak a tőkeköltség értékének a változása hat erősebben az NPV-re. Mivel ennek a számszerű változtatása lényegesen nagyobb, mint az infláció esetén, így összességében elmondható hogy ez a tényező befolyásolja leginkább a végeredményünket. Ezen két paraméter változtatása exponenciális jellegű görbét mutat. Ez annak köszönhető, hogy e tényezők az NPV

számítás során egyre magasabb hatványon szerepelnek, így a változtatásuk nem lineárisan befolyásolja a végeredményt.

A 16. ábrán egyik görbe sem metszi a vízszintes tengelyt, tehát az általunk vizsgált tartományban nem található fedezeti pont. Mivel a tőkeköltség görbéje áll a legközelebb a zérus jelenértékhez, így annak extrapolálásával megkaphatjuk, hogy a fedezeti pont körülbelül 130%-os eltérés esetén lenne.



17. ábra: Érzékenységvizsgálat 2x500 MW_{th}-os HTR-rel megvalósított Chemelot Site telephelyéhez

Az előbbieken bemutatott esethez képest annyiban tér el a 17. ábrán látható érzékenység vizsgálat, hogy a kiadott villamos energia mennyisége 146 MW_e-ről 227 MW_e-ra nőtt, illetve a HTR méretével összefüggő költségek arányosan növekedtek. Az előbbieken felsorolt tényezők változása a primer hőteljesítmény 2x500 MW_{th}-ra növelésének köszönhető. A kezdeti referencia esetre kalkulált NPV közel 20%-kal

emelkedett, de a paraméterek változatlanságának köszönhetően kapott görbék között szinte csak annyi eltérés tapasztalható, hogy a villamos energia árával kapcsolatos változások sokkal erőteljesebb változást indukálnak, mint a 16. ábrán bemutatott esetben. Ez a termelés megnövekedett értékével magyarázható.

A villamos energiaárral összefüggésben lévő további paraméterek változása is erőteljesebb hatást gyakorol, mint előző esetben, ami szintén a fenti magyarázatnak köszönhető. A folyamathó kiadással kapcsolatos tényezők változtatása számszerűen pontosan akkora hatást gyakorolnak a projektre, mint a 16. ábrán, ám a megnövekedett jelenérték következtében relatíve kisebb a befolyásoló erejük.

Az 1-es és 2-es számú mellékleteken található ábrákon a gdanski telephelyhez elkészített vizsgálatok láthatóak. A korábban bemutatott gazdasági számításokat ez esetben 2x250, illetve 2x300 MWth-os hőteljesítményű blokkokkal végeztük el. A 15. táblázatban található energiaár előrejelzések közül az ultra pesszimista esettel számoltunk. A modell, illetve a változtatások mértékének azonosságának köszönhetően, a kapott eredmények első ránézésre nagy hasonlóságot mutatnak a 16. ábrán láthatóakkal.

A fentebb említetteken jól megfigyelhetővé válik a tőkeköltség változásának azon tulajdonsága, hogy minél alacsonyabb NPV érték esetén változtatjuk, annál kisebb hatást gyakorol ezen értékre. Az ez esetben kapott referencia esetbeli NPV értékek lényegesen alacsonyabb értéket vesznek fel, mint a korábbiakban, ami a jelentősen kisebb végtermékekkel magyarázható. A végtermékek árának növelésével számszerűleg kevésbé lehet növelni a jelenértéket, ami a kevesebb eladható terméknek köszönhető, ám az alacsony kezdeti érték következtében arányaiban a 1-es számú mellékleten található ábrán nő leginkább az értéke.

Az energiaárak közel egyforma meredekségűek, ami azzal magyarázható, hogy a gdanski telephely vizsgálatokor egyik paramétert sem feltételeztük állandónak, körülbelül a kezdeti árai arányában változtak, így két, jellegre szinte teljesen megegyező görbét kapunk.

Ezen két ábrán már számos paraméter metszi az NPV nulla értékénél található vonalat, így a beruházási költséghez, éves rendelkezésre álláshoz illetve a tőkeköltséghez tartozó fedezeti pont értékek leolvashatóak.

5. Eredmények értékelése, konklúzió

Az alábbi fejezetben a dolgozatunkban tárgyalt lényegi összefüggések konklúzióját szeretnénk levonni. Az ebben a témakörben folyó kutatások jelenleg még csak kezdetlegesek, de ha figyelembe vesszük, hogy az 1942-es chichagoi atommáglya elindítása előtt milyen mennyiségű kutatómunka folyt, belátható hogy a nagy áttörést jelentő újításokhoz megfelelő körülmények kialakítására és időre van szükség.

A IV. generációs atomerőművekkel megvalósított kapcsolt energiatermelés a jövőben kulcsszerepet játszhat a karbonmentes és üvegházhatású gázok kibocsájtását mellőző energiatermelésben, mivel a vizionált kialakítás keretein belül képesek lehetünk nagy ipartelepek folyamatos hő- és villamos energia igényeinek kiszolgálására. A IV. generációs atomerőművek széleskörű alkalmazásának elterjedését jelentős mértékben befolyásolják az egyes iparágakban jelenleg is folyó kutatások. Az ez esetben tapasztalható hőmérsékleti értékek radikális növekedéséből fakadóan olyan, eddig nem alkalmazott anyagtechnológiai és biztonsági megfontolások kerülnek előtérbe, amelyekkel a szakma eddig még nem találkozott.

A műszaki gyakorlatban előszeretettel alkalmazott optimumkeresési eljárások a paraméterek széles skáláján elvégezhetőek azonban, az ebből fakadó eredmények, csupán iránymutatást adnak a későbbi elemzések kivitelezéséhez. A dolgozat keretein belül vizsgálat alá kerülő telephelyekre végzett elemzések során is, csak egy szűk értelemben vett reaktorteljesítmény tartományának definiálására volt lehetőségünk. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a műszaki optimum alapfeltételei közé tartozik a folyamatosan fennálló magas hőigény, illetve a rendszerelemek megfelelő paraméterekkel beállított illeszkedése. A rendszermodellből származtatott eredmények értelmében, a bemutatásra kerülő esetek elemzése már csak az általunk legjobbnak tartott négy esetet tartalmazza. A négy vizsgálati esetre kialakított szempontrendszer alapján nem határozható meg egyértelműen az alkalmazásra szánt konstrukció, azonban a rendelkezésre álló szakmai tapasztalatok alapján javaslatot tehetünk az általunk legjobbnak vélt konstrukció kialakítására. Az optimum tartományának definiálásával viszont jelentős mértékben elősegíthetjük a későbbi elemzések sikerességét és hatékonyságát. A négy vizsgált eset közül a megállapításaink, és a felépített szempontrendszer alapján a legjobbnak tűnő műszaki paramétereket a Chemelot Site telephelyéhez tartozó 2x400 és 2x500 MWth-os tartomány adja. A műszaki tapasztalatainkra hagyatkozva, azonban az általunk javasolt műszaki optimumra a 2x400 MWth-os reaktorblokk alkalmazását definiáltuk. Azonban a műszaki elemzésekhez, mindig társulnia kell olyan gazdasági elemzésnek, amely a pénzügyi kereteket és megtérüléseket is figyelembe véve, képes állást foglalni a konstrukció megvalósíthatóságával kapcsolatosan. Ezáltal megállapítható, hogy a két különböző módszertani elemzés egymás kiegészítőjeként funkcionál és a gyakorlatban akár ezek iteratív módon történő alkalmazása nyújthatja a legjobb megoldást.

A gazdasági vizsgálatok segítségével elsődlegesen arról kapunk információt, hogy egy projektbe megéri-e belevágni vagy sem. Mivel a projekt elindításakor sosem lehetünk teljesen biztosak abban, hogy annak végkifejlete az előzetes terveink

szerint fog alakulni, ez megkívánja az olyan módszerek alkalmazását is, amellyel a kockázatok értékelhetőek. Az általunk elvégzett scenárióanalízisből megtudhattuk, hogy a reaktorok egységteljesítményének növelésével nő a befektetésünk kockázata, illetve hogy a magas energiaárak esetén megéri nagyobb primer teljesítmény alkalmazása, ám az eredmény rávilágított arra is, hogy alacsonyabb áralakulás esetén a teljesítménynövelés jelentősen tudja rontani a projekt végeredményét.

A scenárióanalízis láthatóvá tette, hogy az inflációs várakozások, a tőkeköltség, illetve a beruházási költségek meghatározására érdemes nagyobb hangsúlyt fektetni, mivel ezen értékek növekedése ronthatja legjelentősebben a profitkilátásainkat. Az energiaárak megváltozása a fentebb említett tényezőkkel éppen ellentétes hatást vált ki, tehát csökkenésük rontani tudja a projekt végkimenetelét. Véleményünk szerint, a hő- és villamos energiaárak, illetve a beruházási költség jövőbeli alakulása hordozza magában a legjelentősebb kockázatot a nettó jelen értékre vonatkozóan. Ez annak köszönhető, hogy ezek alakulását számtalan, előre nehezen becsülhető tényező befolyásolhatja, továbbá, hogy a várt értéktől való eltérés mellett jelentős és hosszabb távú kilengések is tapasztalhatóak voltak a korábbiakban.

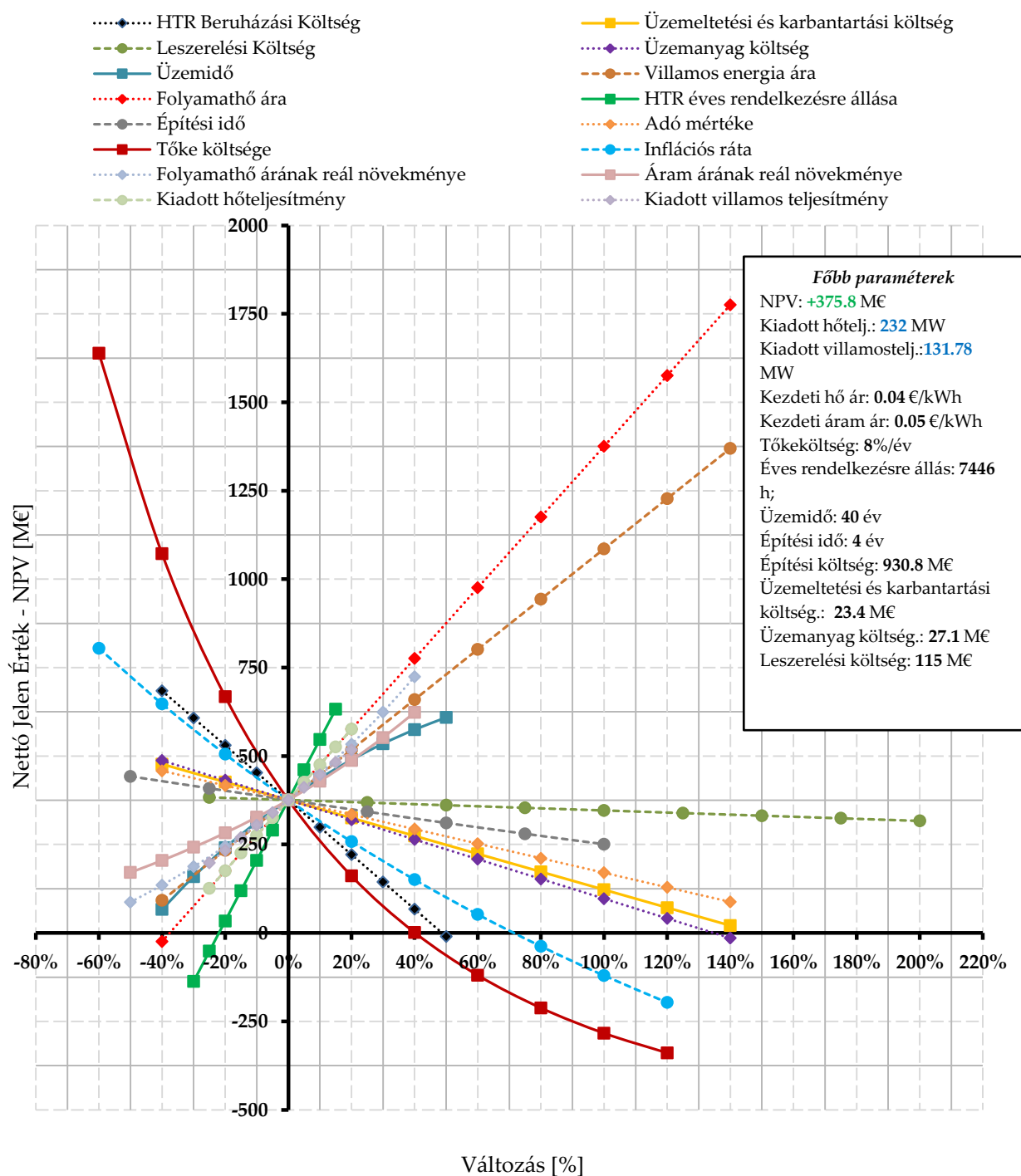
Egy vegyipari feldolgozóüzem és egy atomerőmű szimultán üzemelése és szoros kapcsolata elsősorban biztonsági szempontból kockázatosnak tűnhet. Azonban, ha az atomenergetikával kapcsolatos aggályokon és tévhitelen továbbtekintünk, ezen elgondolásban jelentős potenciált láthatunk a jövő energiapolitikájában és térségek energiamixében. Az általunk elvégzett műszaki és gazdasági eredmények bizakodásra adnak okot, és reméljük, hogy a napjainkban tevékenykedő kutatók munkájára idővel úgy tekintenek vissza, mint az 1942-ben Fermi által vezetett kutatásokra.

6. Irodalomjegyzék

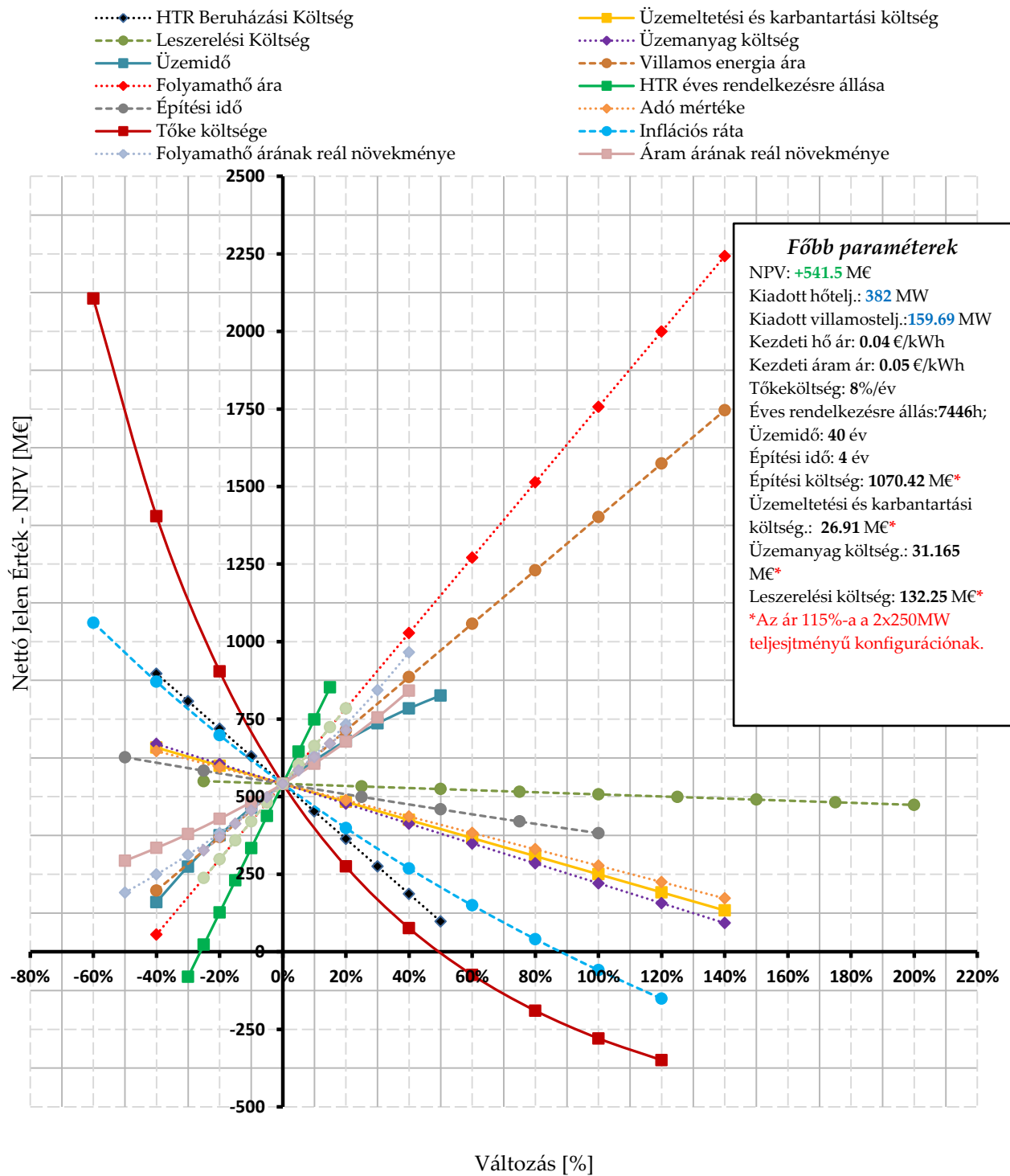
- [1] Dr. Aszódi Attila, "1.,2.,3.,4. generációs atomerőművek," *Nukleáris Technika Intézet*, 2009. [Online]. Available: http://www.reak.bme.hu/fileadmin/user_upload/felhasznalok/aszodi/letoles_eloadasok/Aszodi_ETESenior_Bp_20090212_.pdf.
- [2] WIKIPÉDIA (2015.október 9.), "Víz (adatlap)," 2015. [Online]. Available: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Víz_\(adatlap\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/Víz_(adatlap))%.
- [3] O.Baudrand and V.Noel, "Safety and licensing evaluation of a (V)HTR coupled to industrial process," *Europairs*, 2011.
- [4] Dr. Büki Gergely, "A kapcsolt energiatermelés fogalmáról és jellemzőiről," *Magy. Energ.*, no. 1, 2002.
- [5] H. Tuomisto, "Nuclear District Heating Plans from Loviisa to Helsinki Metropolitan Area," in *Technical and Economic Assessment of Non-Electric Applications of Nuclear Energy (NUCOGEN)*, 2013.
- [6] NEA/NDC, "Final summary record of the joint NEA/IAEA expert workshop," in *Technical and Economic Assessment of Non-Electric Applications of Nuclear Energy (NUCOGEN)*, 2013.
- [7] V. Sozoniuk, "Experience of operating nuclear district heating in Russia," in *Technical and Economic Assessment of Non-Electric Applications of Nuclear Energy (NUCOGEN)*, 2013.
- [8] Urbán András and Velenyák Tamás, "HTR-rel megvalósított kapcsolt energiatermelés gazdasági értékelése," Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2014.
- [9] I. Khamis, "Overview of nuclear desalination technologies & costs," *Tech. Econ. Assess. Non-Electric Appl. Nucl. Energy*, 2013.
- [10] K. K. Kim, "Smart for electricity generation and desalination," *Tech. Econ. Assess. Non-Electric Appl. Nucl. Energy*, 2013.
- [11] Magyar Kémikusok Egyesülete, "Ötven éves a magyar kémikusok egyesülete, Borsod-Abaúj-Zemplén megyei területi szervezete," no. Jubileumi emlékkönyv, 2008.

- [12] Mol Group, "Dunai finomító," 2015. [Online]. Available: <http://molgroup.info/hu/befektetoi-kapcsolatok/uzleteink/downstream/finomitas/dunai-finomito>.
- [13] Ipari Park Győr, "Ipari Park bemutatása," 2015. [Online]. Available: <http://www.ipgyor.hu/iparipark>.
- [14] Dr. Csom Gyula, *Atomerőművek üzemtana I.* Budapest: Műegyetem Kiadó, 1997.
- [15] Czinder Jenő, *Energetikai Folyamatok Dinamikája és Szimulációja.* Budapest: Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2009.
- [16] TU Delft, "Cycle Tempo - Reference guide," 2011.
- [17] TUDelft, "Cycle Tempo: Technical notes," 2004.
- [18] Siemens, "Industrial Gas Turbines: The comprehensive product range from 5 to 50 megawatts." p. 8, 2013.
- [19] P. M. Plet, "Evaluation of the main economic parameters for an HTR project," *NC2I-R*, 2015.
- [20] Dr. Tóth Tamás and Dr. Andor György, "Vállalati pénzügyek I.," *BME*, no. Oktatási segédlet, pp. 9–13, 2010.
- [21] G. Brinkmann, T. Mull, and D. Vanvor, "Cost Assesment HTR-MODULE 250," *Thechnical Rep. Framew. NC2I-R Proj.*, 2014.

7. Melléklet



1. Melléklet: Érzékenységvizsgálat 2x250 MW_{th}-os HTR-rel megvalósított Gdansk telephelyéhez



2. Mellékelet: Érzékenységvizsgálat 2x300 MW_{th}-os HTR-rel megvalósított

Gdansk telephelyéhez