

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Automatizálási és Energiarendszerek Intézet (AEI)
Elektrofizika Intézet (EFI)



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Nukleáris biztonság:

Összehasonlító elemzés és üzemviteli stratégiák az RBMK, a VVER-1200 és a VHTR reaktorok esetén

Szerző(k): **Lovász Balázs (AEI)**
villamosmérnök BSc. szak, I. évf.

Konzulens: **Szén István (EFI)**
Tanársegéd

Budapest, 2023.

Nukleáris biztonság: Összehasonlító elemzés és üzemviteli stratégiák az RBMK,
a VVER-1200 és a VHTR reaktorok esetén

Nuclear Safety: Comparative analysis and Operational strategies for RBMK,
VVER-1200 and VHTR reactors

Budapest, 2024.05.25.

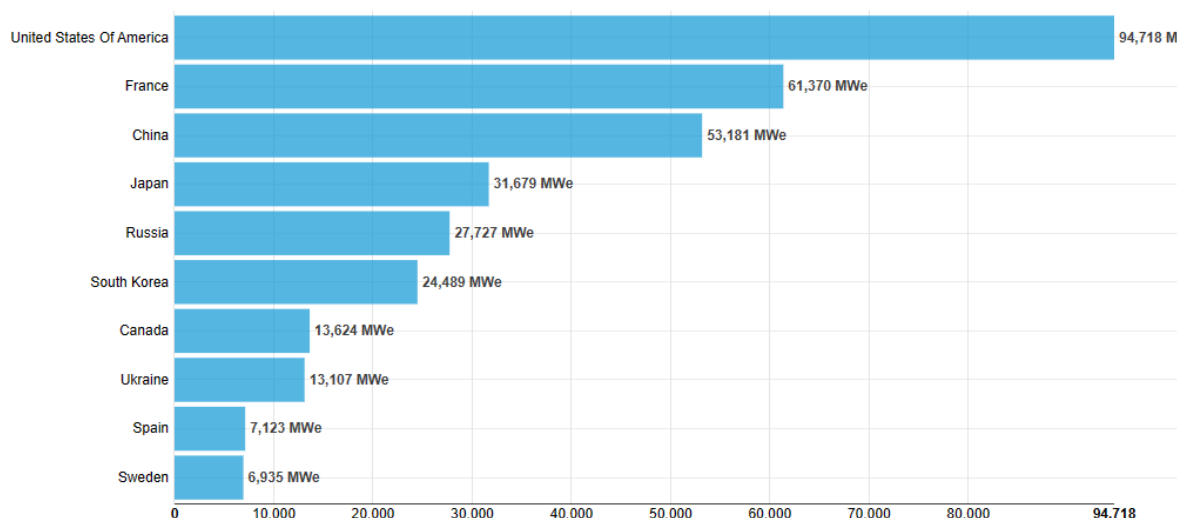
Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. Az első gondolatok, kísérletek és megvalósítás.....	2
3. Típusok moderátoruk szerint.....	2
3.1. Folyadékmoderátoros reaktorok.....	2
3.2. Szilárdmoderátoros reaktorok.....	2
4. Főbb reaktortípusok leírása	3
4.1. PWR.....	3
4.1.1. VVER-1200.....	3
4.2. BWR.....	4
4.3. CANDU.....	5
4.4. RBMK.....	6
4.5. VHTR.....	6
5. Összehasonlítási szempontok.....	7
5.1. Hőteljesítmény.....	7
5.2. Minden, ami üzemanyag.....	8
5.3. Hatásfok és műszaki specifikációk.....	8
5.4. Biztonság és költségek.....	9
6. Biztonság az atomerőműben.....	9
7. Atomerőművek társadalmi elfogadottsága.....	12
7.1. Társadalom véleménye az atomenergiáról nemzetközi szinten.....	13
7.2. Nem reprezentatív, saját véleménykutatás az Óbudai Egyetem hallgatói között.....	14
8. Reaktorok tulajdonságait összehasonlító és szemléltető mátrix.....	18
9. Összegzés.....	20
10. Függelék a saját eredményekről.....	22
Hivatkozások.....	23

1. Bevezetés

A modern világ energiaigénye napról napra növekszik, melyre gyors választ kell találnia az emberiségnek. Az egyik ilyen lehetséges mód az atomenergia használata. Termelés szempontjából egy karbonsemleges, és rendkívül hatékony erőműről beszélhetünk, amely igen nagy mértékben szerepet is játszik az emberiség energiaigényeinek kielégítésében. Jelenleg a világ energiatermelésének 11%-át teszi ki a nukleáris terület, mintegy 438 reaktorával (1. ábra). [1] Ehhez a számhoz mi magyarok is hozzájárulunk a magunk 4 reaktorával, amely Pakson üzemel 2000 MW-os összteljesítménnyel (a hazai kisméretű kutató-oktatóreaktorok, pl.: BME és KFKI jelen dolgozatotnak nem témája). Ez elegendő az ország energiaszükségletének egyharmadához, amely így egy kulcsfontosságú tényezőt jelent a hazai villamosenergia-termelésben. Az új Paks II-es beruházás hatalmas előrelépést jelentene országunk számára, mivel a tervezett kettő VVER-1200-as reaktorok, a már meglévő 4 blokk teljesítményét is túlszárnyalnák. [2] Ezáltal akár az is elérhetővé válna belátható időn belül, hogy országunk energiabiztonsága jelentős mértékben javuljon.

Több mint 100 év telt el azóta, hogy Rutherford megvalósította az atommag mesterséges átalakítását, és ezzel letette az alapköveit ennek a változatos, viszont annál érdekesebb energiaterületnek. Dolgozatomban erre is kitérek, illetve arra is, hogy milyen innovatív fejlesztések vezethetnek arra, hogy környezetünk CO₂-terhelését hatékonyan csökkentsük, úgy, hogy közben az iparnak a fejlődése nem kerül hátrányba. Az RBMK, a VVER-1200, és a VHTR reaktort fogom összehasonlítani működés, felhasználás, illetve üzemi biztonság tükrében. Paks II. közeledtével megvizsgáljuk az üzemeltetési stratégiákat a két modern reaktor mellé ellenpéldaként az elhíresült RBMK reaktort választottam görbe tükörnek.



1. ábra: Összes működőképes reaktor eloszlása (MWe, Top 10 ország) [1]

2. Az első gondolatok, kísérletek és megvalósítás

Az atommag mesterséges átalakítását Ernest Rutherford valósította meg 1919-ben ezzel megalapozva a jövő tudósainak és feltalálójának a hipotéziseit. Wigner Jenő, Szilárd Leó és Enrico Fermi kitartó munkája kellett ahhoz, hogy elindulhassunk ténylegesen azon az úton, amely a ma ismert atomreaktorokig vezet. Az Egyesült Államokban, azon belül is Chicago-ban, 1942-ben valósította meg az előbb említett 3 tudós az első „atommáglyát”. Az ezt követő 10 évben próbálták megalkotni a működőképes reaktor tervét, amelyet 1952-ben, Arco városában meg is valósítottak. Ez még csak kísérleti jellegű volt, amelyet az oroszok két évvel később „tökéletesítettek” és Obnyinszk városában már a lakosság számára termeltek áramot a reaktorokkal. A hosszú út során elérkeztünk az első generációs reaktoroktól a III+ generációs blokkokig. Az első generációs blokkokat a mai napra szinte teljesen leépítették biztonságtechnikai okok miatt, de érdemes megjegyezni, hogy a mai napig üzemelnek még olyan reaktorok, melyeket az elsők között építettek. Ezek mostanra már főképp a mai Oroszországi Föderáció területén találhatók meg.

A reaktorokat csoportosíthatjuk felhasználási jellegük és típusuk szerint is. Felhasználásuk szerint lehetnek kísérleti-, kutató-, oktatóreaktorok, energiatermelő reaktorok, kritikus rendszerek vagy zéró teljesítményű reaktorok, illetve hasadóanyag-termelő reaktorok.[3] A dolgozatomban főként az energiatermelő típusokra fogom helyezni a hangsúlyt.

3. Típusok, moderátoruk szerint

3.1. Folyadékmoderátoros reaktorok

A folyadékmoderátoros reaktorok lehetnek könnyű, illetve nehézvizes reaktorok is. A kettő között a legfőbb különbség, hogy amíg az könnyű vizes reaktorban normál (sótlan) víz a moderátor, addig a nehézvizesben a hűtőközeg és a moderátor is nehézvíz. Ez a hidrogén, deutérium izotópját is tartalmazó víz. A könnyűvizes típusba tartozik a PWR (Pressurized Water Reactor), azaz nyomottvizes, illetve a BWR, (Boiling Water Reactor) azaz forralóvizes reaktor is. [3] A nehézvizes kategóriába tartozik a CANDU (kanadai deutérium-uránium).

3.2. Szilárdmoderátoros reaktorok

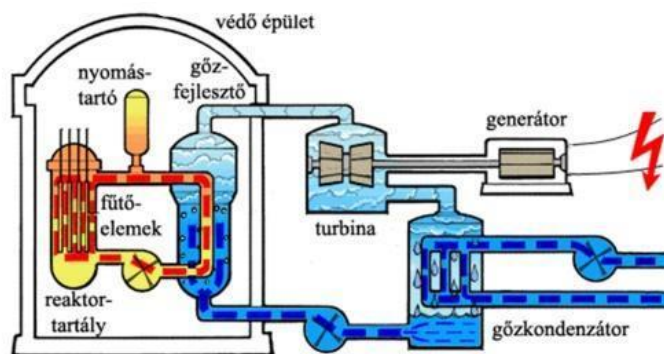
A jelenleg használt reaktorok 90%-ban vizet használnak moderátorként. A legfontosabb szempont a moderátor kiválasztásánál, hogy legyen minél kevésbé neutronelnyelő. [4] Ezt a nehézvizes reaktorok valósítják meg főként. Esetünkben viszont szilárd anyagokról beszélünk, ahol a legkézenfekvőbb a grafitmoderátoros reaktorok. Ennek egy másik típusa a könnyűvizes

elgőzölögtető grafitmoderátoros azaz RBMK reaktor. Ezt a típust használták a Csernobili balesetnél is, ezért azóta Csernobil típusú reaktoroknak is hívják őket.

4. Főbb reaktortípusok leírása

4.1. PWR (Pressurized Water Reactor)

Az egyik legelterjedtebb reaktortípus a PWR. Főképp az első generációs változatok továbbfejlesztései, mint termelés, mint pedig biztonsági szempontból Ennél a fajta reaktornál a hűtőközeg, illetve a moderátor is víz. A fűtőanyag szempontjából vizsgálva e típus alacsony dúsítású urániumot használ (U^{235}). Az uránium két kisebb rendszámú atommagra hasad, illetve 2-3 neutron is keletkezik közben. [5] Két körről beszélünk jelen esetben, amelyek a primer és szekunder körre bonthatóak. A reaktorban felszabaduló hő a primer kör adja át a szekunder körnek egy hőcserélőn keresztül, amelyek fizikailag el vannak különítve egymástól (2. ábra).



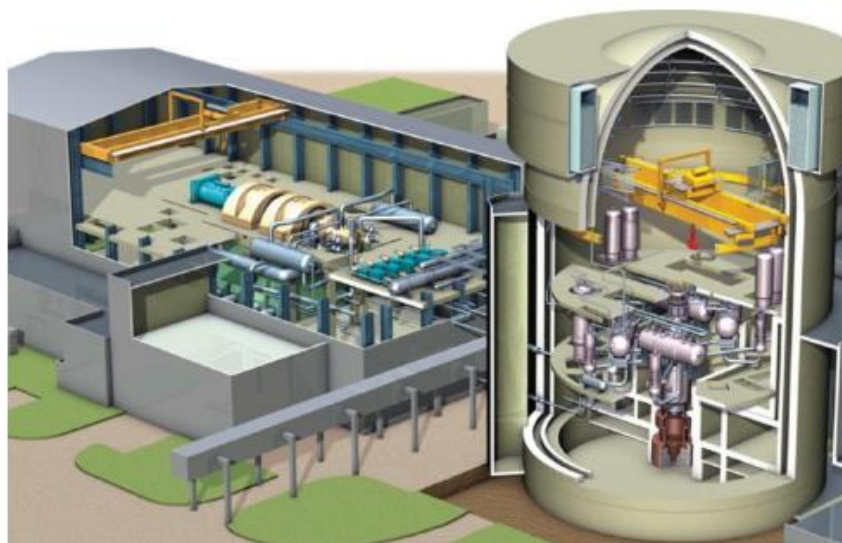
2. ábra: PWR reaktor elvi felépítése [5]

A primer körben a nyomást rendkívül magasan tartják, körülbelül 12,3 MPa-on, ennek köszönhetően még 300°C-on sem forr fel a primer körű víz. [5] A hőt átadva a szekunder körnek, amely jóval alacsonyabb, mintegy 4,3 MPa nyomás alatt van, a víz felforr majd a turbinát meghajtva a kondenzátorba kerül, ahol lehűtik, Pakson erre a Duna vizét használják. A primer kör, szintúgy a szekunder kör is zárt, így radioaktív, vagy szennyező anyag nem tud a környezetbe kerülni.

4.1.1. VVER-1200

Ha már a nyomottvízes reaktorokról tartunk, érdemes megemlíteni a cikk egyik érintett reaktortípusát is. E típust fogják kivitelezni a jelenleg is konstrukció alatt álló Paks II.-es blokkokban. Összesen kettő ilyen reaktort terveznek építeni melyeknek összteljesítménye eléri a 2400 MW-ot is. Mind aktív, mind pedig passzív védelemmel is ellátott reaktortípusról

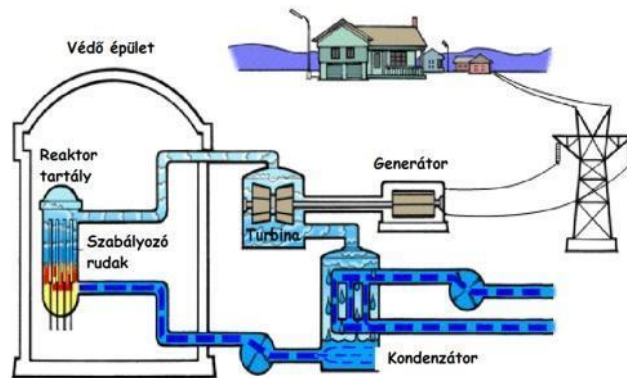
beszélhetünk mely már a 3+ generációs típusok csoportját erősíti. Külső burkolata 80 cm vastag, mely egy utasszállító becsapódásának és akár egy földrengésnek is ellenállni tud. Esetleges zónaolvadás ellen is védelmet nyújt a reaktor alatt elhelyezett zónaolvadék csapda mely a láncreakció leállítására szolgáló speciális anyaggal van töltve. A biztonsági rendszer egy primerkörü csőtörés után is képes akár 72 órán át a reaktor hűtésére. A mintegy 163 kazettából álló, egyenként 312 fűtőelem pálcá mellett 121 szabályozó rúddal ellátott reaktor egy esetleges hidrogénrobbanást is képes lenne megelőzni kialakításának köszönhetően (3. ábra). [6]



3.ábra: VVER-1200-as blokk vázlata [6]

4.2. BWR (Boiling Water Reactor)

Ezek a reaktortípusok szintén könnyűvizesek, akárcsak a PWR reaktorok, annyi különbséggel, hogy itt már csak egy körről beszélhetünk (4. ábra). A vizet a reaktorban felforralva egyből a turbinákhoz vezetik. Ennek egyik nagy hátránya, hogy azáltal a turbinák is enyhén radioaktívvá válhatnak.

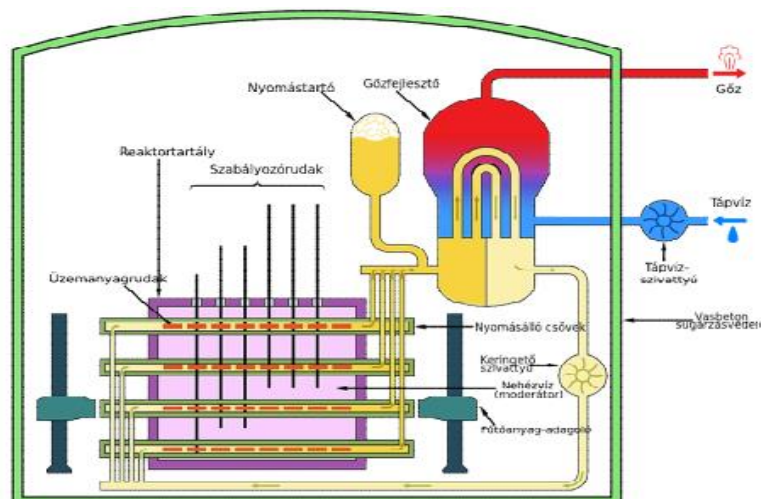


4. ábra: BWR reaktor elvi felépítés [5]

További érdekessége, hogy a szabályozórudak alulról kerülnek feltolással a reaktorba, nem pedig felülről ejtéssel. Ilyen típusokat használnak főként az USA-ban vagy Németországban és Japánban is.

4.3. CANDU (Canadian deuterium-uranium)

A nehézvizes kategóriában az egyik legmeghatározóbb típus a CANDU. Ezek a nyomottcsöves típusok 600-900 MW teljesítményre képesek. A kalandriának nevezett, nagy nyomást álló csövekbe helyezkedik el a fűtőanyag, melyek egyesével nyithatóak (5. ábra).

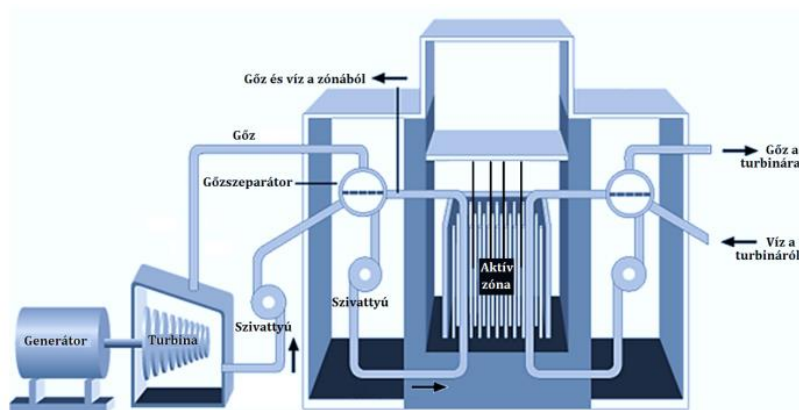


5. ábra: CANDU elvi felépítése [5]

Nagyon nagy előnyük, hogy a fűtőanyagok a reaktor leállítása nélkül lehet cserélni, így évi 3-4 heti termelés kimaradás kerülhető el. [7] Mivel akár természetes urániummal is működtethetőek, egy rendkívül gazdaságos, de hatékony energiaforrásról beszélhetünk. Hűtőközege könnyűvíz, míg moderátora nehézvíz.

4.4. RBMK (1986 óta, Csernobil típusú reaktor)

Az egyik legismertebb, vagy inkább „leg hírhedtebb” típus a Reaktor Bolsoj Mozsoszty Kipjascij - (nagyteljesítményű forralóvizes reaktor). Rövidítve az RBMK egy orosz fejlesztésű, második generációs reaktor mely a Csernobili katasztrófa után híresült el. Ez a típus a grafitmoderátoros reaktorok orosz megfelelője. A forralóvizes típusokhoz hasonlítanak ugyanis a hűtőközegük szintén könnyűvíz. A kazetták 1700 grafitoszlopban helyezkednek el melynek a tömege eléri a 2500 tonnát is. Ehhez jön a 180 tonna urán-dioxid mely a reaktor üzemanyagaként szolgál. A hűtés a grafitoszlopokban elvezetett víznek köszönhető, amely 6,5 MPa nyomás alatt van és ennek köszönhetően $\sim 280^\circ\text{C}$ -on forr. [8] A gőz egy dobban elválk a folyadéktól mely a turbinákhoz kerül, ott meghajtva azokat (6. ábra).



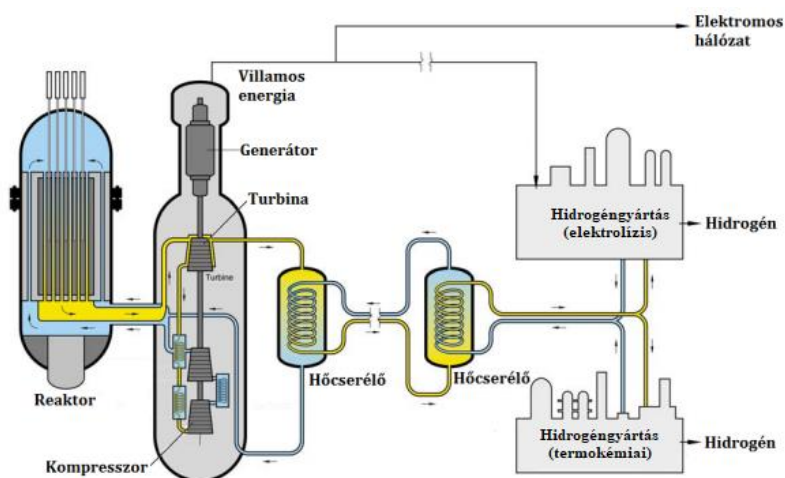
6. ábra: RBMK elvi felépítése [5]

Egy reaktor 1000 MW-ot tud így termelni. Mára már csak Oroszországban, Litvániában és Ukrajnában működnek ezek a típusok. Mivel, ha a reaktor túlmelegedik, a hűtővíz elforrhat, így csak a grafitmoderátort maga után hagyva könnyen folytathatja a láncreakciót. Nincs meg az önleállító képessége ennek a reaktornak, így nem biztonságosak egy esetleges hiba, vagy emberi mulasztás következtében.

4.5. VHTR (Very High Temperature Reactor)

Ez a negyedik generációs reaktor méltán kapta ezt a (Nagyon magas hőmérsékletű reaktor) nevet. Normális üzem szerint a reaktor $850\text{--}1000^\circ\text{C}$ -on működik, amelyet grafit moderátor szabályoz és hélium gáz hűt. Hagyományos kazettákkal, használt üzemanyaggal vagy TRISO gömbökkel is üzemeltethető a típus, viszont kialakítása rendkívül költséges és bonyolult. [9] A rendkívül magas hőmérséklet miatt üzemeltetése is körülményes, emellett nagy nyomású rendszerrel működik (7-15 MPa). Több fokozatú hűtőköri rendszerrel rendelkeznek, melyet a reaktor hőmérséklete befolyásol. Az első körbe tartozik a reaktormag, melynek hőmérsékletét

közvetlenül hasznosítjuk. Az áramellátásra szolgáló hűtőkör egy hőcserélővel, közvetett módon juttatja el a hőt a gőzturbinákhoz (7. ábra). [10] [11]



7.ábra: VHTR elvi felépítése [5]

A hátrányoktól eltekintve egy hatékony és biztonságos reaktorról beszélhetünk, melyet nem csak elektromosság, de hidrogén termelésre is használhatunk. Fontos viszont megjegyezni, hogy az átlagos teljesítménye 250-300 MW, amivel nem tartozik az élmezőnybe termelés szempontjából, ellenben nem szabad megfedkezni a hidrogéntermelő képességéről.

5. Összehasonlítási szempontok

A reaktorokat több szempont alapján is megvizsgálva hasonlítottam össze, melyek között szerepel a teljesítmény, üzemanyag, üzemanyag mennyisége, hatásfok és a lent részletesen bemutatott és kifejtett műszaki, műszaki-gazdasági szempontok.

5.1. Hőteljesítmény

Az első szempont, ami alapján elkezdtem rendszerezni az a hőteljesítmény. Három nagyon különböző reaktorról van szó így értelemszerűen a teljesítményükben is van különbség. Míg az RBMK reaktor a maga 3200, a fent említett VVER, 3212, addig a VHTR reaktor csupán 600 MW-os hőteljesítményre képes. Fontos megjegyezni, hogy nem a termelést, hanem a hőteljesítményt vizsgáljuk így kaphatunk ekkora értékeket. [13][14][15]

5.2. Minden, ami üzemanyag

Üzemanyag szintjén mind a három reaktor urán-dioxiddal működik, viszont a VHTR üzemeltethető „TRISO gömbökkel” is (TRISO: vagyis három-szerkezetű izotóp (tristructural isotope) golyók, melyek közepén található az urán-trioxid fűtőanyag, amelyet egy kerámia és grafit védőrétegek vonnak be). Ezek körülbelül 1 mm átmérőjű gömbök melyek kapszulákba vannak töltve majd így a reaktorba. Ezt elsősorban Kína használja a saját kísérleti reaktoraikhoz.

Különböző mennyiségű fűtőanyag szükséges a reaktorokhoz, például amíg az RBMK-1000-es reaktor ~1800 tonna urániumot használ fel, addig a VVER-1200-as körülbelül a tizedét, 160 tonnát.[12] A VHTR nem sok, csupán 4,5 tonna fűtőanyaggal működik, ezzel a képzeletbeli lista élére ugrik.

Ha a fogyasztást vizsgáljuk, MWd/kg-ban (MWnap/kg) akkor a fűtőanyag mennyiséghez képest igen meglepő adatot kapunk. Az RBMK reaktor 12, a VVER-1200-as 60 MWd/kg-os fogyasztással rendelkezik. A VHTR reaktornál egy mértékegységet kell ugranunk, ugyanis 150 GWd/t-ás fogyasztással rendelkezik ezzel egy igen kimagasló értékkel rendelkezik a felsorolt reaktorok között. [15] Hulladék termelés szempontjából egyik reaktor sem haladja meg az 5 m³/évet és a tárolást is könnyedén megoldják. A két orosz reaktor mindegyike száraz tárolóban, vagy vizes tárolómedencében oldja meg a kiegészített fűtőanyag ideiglenes tárolását. A VHTR-nél csak a száraz tároló van alkalmazásban. [14][16]

5.3. Hatásfok és műszaki specifikációk

Hatásfok szempontjából vizsgálva a reaktorokat és most nem csak a felsorolt hármat, észrevehetjük, hogy 50%-os hatásfok felett igencsak jónak számít egy-egy típus. Sajnos a dolgozat tárgyát képező három reaktor esetén az 50% hatásfok ugyan nem teljesül, de így is az erős középmezőnybe tartoznak. Ezt a „háziversenyt” viszont a VHTR típus nyerné meg a maga 45,5%-os hatásfokával, majd követi, a VVER a saját 34,5% hatásfokával. Őket követi az RBMK a 30%-os hatásfokkal. Jól látszik, hogy a két III+ -os generációjú reaktor lehaladja az RBMK-t viszont fontos megjegyeznünk, biztonsági szempontból nem is, de termelési oldalról tekintve megelőzte a korát a „csernobili típus”.

A két újgenerációs típus 60 éves élettartammal lett tervezve, bár fontos hangsúlyozni a VHTR típus csupán kísérleti, fejlesztési állapotban létezik ma. A régebbi típus pedig 40 évével egy lassan teljesen eltűnő típusná válik. [14][15]

Nyomás szempontjából jóval színesebb a paletta. A primerkörben a VVER kicsivel több mint 16 MPa-os nyomással üzemel, míg a VHTR 6, a kettő között pedig az RBMK ~10 MPa-al helyezkedik el. Ez a turbinába érkezéskor lecsökken és a két orosz típus 7-re, a VHTR pedig 5,5 MPa-ra csökken le. A primerkörnél maradv a víz hőmérséklete a körbe jutáskor igen eltérő és persze nem csak az miatt mert a hátréből kettő hűt csak vízzel. A VVER ~300 °C-os belépő hőmérséklettel rendelkezik, az RBMK reaktorról pedig nem érhetőek már el az adatok. A VHTR kissé különleges ebből a szempontból, ugyanis a primerkörben hélium felelős a hűtésért, amely elérheti az 1000 °C-os hőmérsékletet is. [16][17]

5.4. Biztonság és költségek

Biztonság szerint megkönnyíti a dolgunkat az RBMK reaktor. Az egyetlen példánk Fukushima mellett, amelyet az INES skálán a 7-es fokozathoz tudunk kötni. Nem szükséges ezt a típust boncolgatni, ugyanis nincs ember, aki ne hallott volna az 1986-os balesetről, amit egy ilyen típus okozott. A VVER típusnak a szabályozástechnikai szempontok miatt a leg súlyosabb baleset, amely történhet az az üzemzavar. Bármilyen szintű balesetnek az esélye kevesebb mint $5,94 \times 10^{-9}$ /év mely igen kedvező adat. Sajnos a VHTR reaktorról az adatok korlátozottak a fejlesztés miatt, de jelenleg nem tudni komolyabb baj vagy hiba felől a jelenleg 7 fejlesztés alatt álló reaktorok egyikéről sem. [14][15][16]

Az elavult és már régóta nem gyártott RBMK típusról nem tudni mennyibe kerülne a létesítése, a VHTR pedig fejlesztése miatt nem forgalmazott típus így csak a VVER-ről tudni pontos költségeket. Egy blokk költsége 6 Mrd € amely igen kedvező ár. Vegyünk csak egy egyszerű matematikai példát:

Paks II. összesen 2400 MW-os teljesítménnyel fog rendelkezni, amelyet kettő VVER-1200-as blokk fog termelni, ez összesen 12 Mrd €. Kaposváron az új naptelep 100 MW-os és 100 millió euróba kerül. Paks évente 19 TWh-s termelésre lenne képes, a naptelep pedig 0,14-re. Ez körülbelül 135-ször kevesebb. Ha pedig azonos termelést szeretnénk megnézni akkor megkapjuk, hogy míg Paks II. 19 TWh-t termel 12 milliárd eurós telepítési költségért, addig a napelempark ugyan ennyit 13,5 milliárdért lenne képes. [18]

6. Biztonság az atomerőművekben

A már megtörtént események alapján manapság az erőművek biztonsága jóval magasabb, mint a régebbi generációs blokkok esetén. Egy esetleges baleset következtében, nemcsak az épület

biztonsága fontos, hanem a környezetbe kerülő veszélyes anyagok kijutási esélye is, ami egy ideálisan megtervezett és kivitelezett atomerőmű esetén, konvergál a nullához. Az erőműveket ma már úgy tervezik, hogy bármilyen külső vagy belső behatás hatására is a környezetszennyezés és a sugárterhelés, a lehető legkisebb legyen.

Azt, hogy minden a megfelelően működhessen minden országnak kell rendelkeznie egy saját szervezettel, amely ellenőrzi a nukleáris területeket. Csakhogy magyar példát is említsek, a megfelelő működés érdekében az Országos Atomenergia Hivatal rendszeresen felülvizsgálja a Paksi Atomerőművet, de a Paksi blokkokon kívül az egyéb kísérleti, vagy kutatóreaktorokat is, sőt a kórházakban működő sugárterápiás berendezéseket is. [19]

Mivel a balesetek, ha igen kicsi eséllyel is, de sajnos jelen vannak, szükség van egy skálára, amely alapján tájékozódhatunk, mekkora a probléma, amivel szembe találjuk magunkat.

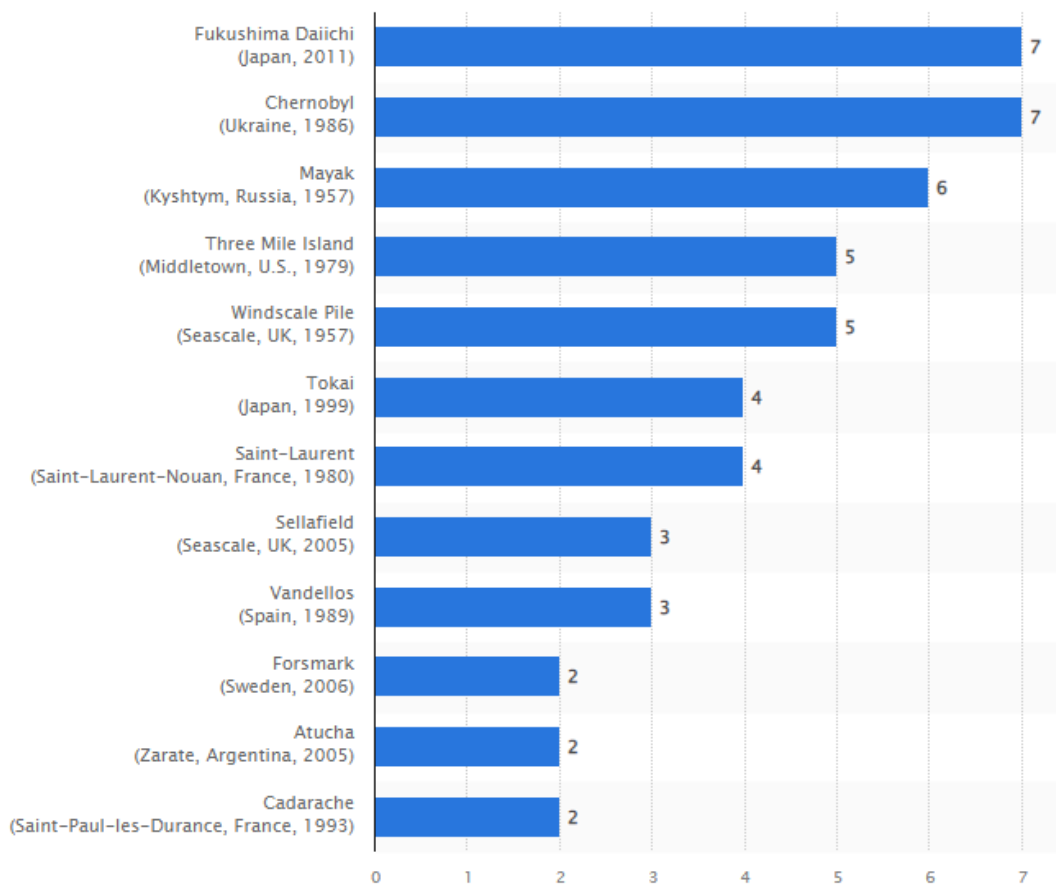
A már megtörtént katasztrófák miatt a skálának a vége felé egyre nagyobb a veszély. Csak hogy mi is ez a skála?

Az INES skála szerint 7 különböző szintet különböztetünk meg a sugárzási dózis növekedésével arányosan. A szintek pedig a következők:

Szintek	Jellemző	Példa
Rendellenesség	Eljárásrendi hiányosság vagy emberi tévedés, nem okoznak gondot, de biztonsági intézkedés hiányosságait jelzik.	-
Üzemzavar	Üzemzavar vagy rendellenesség, amely nem jelent közvetlen kockázatot, de egy figyelemfelkeltő jelenség.	-
Súlyos üzemzavar	Környezeti radioaktivitás megnő (néhány tized mSv), zónakárosodás, dolgozóknak a szokottnál nagyobb sugárterhelés (50 mSv). Telephelyen kívüli intézkedés nem szükséges.	Vandellos, 1989.
Elsősorban létesítményen belüli hatású baleset	Környezeti radioaktivitás megnő (néhány mSv), dolgozók akut egészségkárosodása sugárterhelés miatt (~1 Sv).	Tokai Mura, 1999.
Telephelyen kívüli kockázattal járó baleset	Zóna nagy mértékű károsodása, mechanikai behatás vagy megolvadás miatt.	Three Mile Island, 1979.
Súlyos baleset	Hasadási termékek kerülnek a környezetbe, sürgős közbenjárás szükséges a helyi hatóságtól a környezet egészsége érdekében.	-
Nagyon súlyos baleset	A zóna tartalmának nagy mértékű környezetbe való jutása és hosszú távú környezeti következmény.	Csernobil, 1986.

1.táblázat: INES skála [20]

Szemléletesebben pedig mindez a következő ábrán (8. ábra) látszik:



8. ábra: INES skála szerinti balesetek [21]

7. Atomerőművek társadalmi elfogadottsága

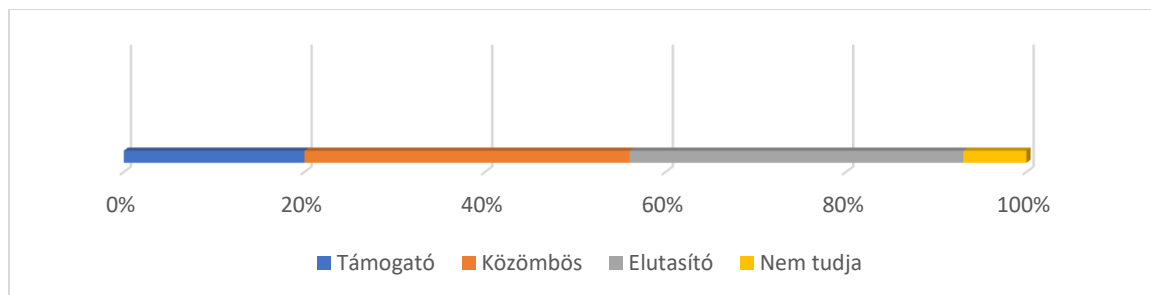
Kritikus fontosságú és nem megkerülhető az atomerőművek társadalmi elfogadottsága. Sokan a mai napig félnek „Csernobil” vagy „Fukushima” miatt az atomerőművektől, s sajnálatos tény, hogy a szomszédban dúló háború egyik nagy figyelmet kiváltó színtere lett a Zaporizzsjai Atomerőmű. Az emberek egy jelentős csoportja gondolja, hogy a súlyos balesetek vagy a terrorcselekmények helyszíne lehet egy-egy atomerőmű. A mérnöki gondolkodásnak és a biztonságra való törekvésnek hatására a fenti félelmek jelentős mértékben eliminálhatók, ugyanis, az új típusokhoz gyakorlatilag nem szükséges emberi beavatkozás a működéshez és a szabályozástechnikai rendszerek miatt nincs lehetőség emberi mulasztással komolyabb problémát okozni.

Miért is fontos az atomerőmű? Rendkívül tisztán tud nagy mennyiségű energiát termelni, ezzel a fosszilis energiával működő hőerőművek elé kerül. Nézzük meg a Németországban végbement energiaproblémát. Április 15.-én hivatalosan is leállították az ország utolsó három atomreaktorát az Emsland-t, Isar 2-t és a Neckarwestheim 2-t. [22]

Bár így az ország nukleáris energiaforrásra már nem támaszkodik, a kiesést mégis pótolni kell. Ezt szénérőművekkel és importtal tudják kompenzálni mely nem csak környezetszennyezőbb, de költségesebb is a németek számára. Ha már a környezetszennyezésnél tartunk, 2021-hez képest 2022-ben Németország 33 millió tonnával több széndioxidot bocsájtott ki, és ekkor még 3 reaktora működött. [23] Ezt a példát megragadva szeretném kihangsúlyozni mennyire is fontos számunkra az atomenergia. Egy szinte teljesen tisztán termelő erőműről beszélhetünk, mely a mai világban egy igen meghatározó szerepet tölthet be. Ezért is fontos, hogy társadalmi elfogadottsága/támogatottsága is teret kaphasson.

7.1. Társadalom véleménye az atomenergiáról nemzetközi szinten

Az Európai Unió megbízásából indult még 2006-ban egy felmérés melyben 1002 ember véleményével készítettek reprezentatív felmérést az atomenergia elfogadottságával kapcsolatban. Ekkor 20% támogatta, 36% közömbös volt a maradék 44% pedig vagy elutasította vagy nem tudott választ adni (1. diagram). [24] Ez az eloszlás mára már változott, de számunkra ez az adat nem elérhető még. Bár az adatok szinte biztos változtak, így sem kapunk rossz képet az elfogadottságról.

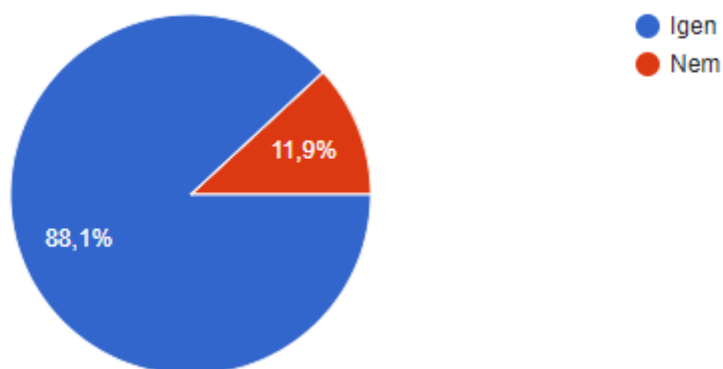


1. diagram: Atomenergia elfogadottsága [25]

7.2. Nem reprezentatív, saját véleménykutatás az Óbudai Egyetem hallgatói között

A kutatás eredménye láttán egy saját, nem reprezentatív véleménykutatást készítettem szak-, kollégista társaim között. Mindannyian az Óbudai Egyetem hallgatói és a kérdőívben anonimitással válaszoltak hat kérdésre. Mind az atomenergiával kapcsolatos kérdés egy képet mutat, hogy a Y és Z-generáció milyen hozzáállással van a fissziós energiához és annak Magyarországon történő alkalmazásához. A feltett kérdések után a kérdésekre adott válaszok láthatók diagramok formájában.

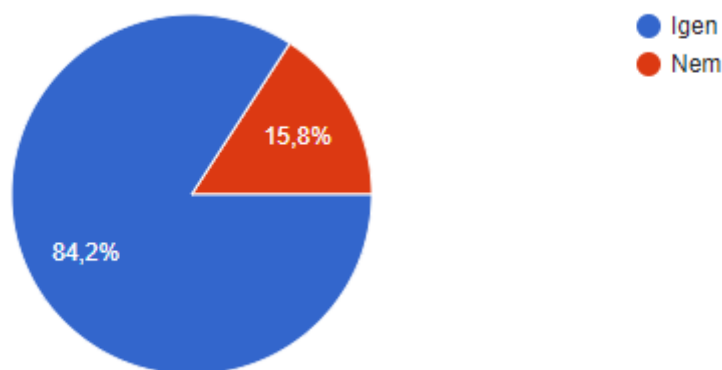
I. Szükségesnek tartja-e az atomerőműveket a XXI. században?



2. diagram [26]

Jól látható a 101 megkérdezettből 88,1% fontosnak tartja az atomenergiát. Ha csak a fenti nemzetközi példát vesszük alapul, akkor is láthatjuk, hogy hatalmas ugrás van az elfogadottság szintjén (igaz a nemzetközi felmérésben az életkor és a képzettség nem mutat ilyen szintű homogenitást, mint az általam végzett felmérésben: Z-generációs, műszaki érdeklődésű emberek). Emellett megemlíthető, hogy a válaszadók felsőoktatásban tanuló fiatalok, így kissé egyszerűsítve a jövő műszaki értelmiségének a véleményeként is tekinthetünk az adatokra.

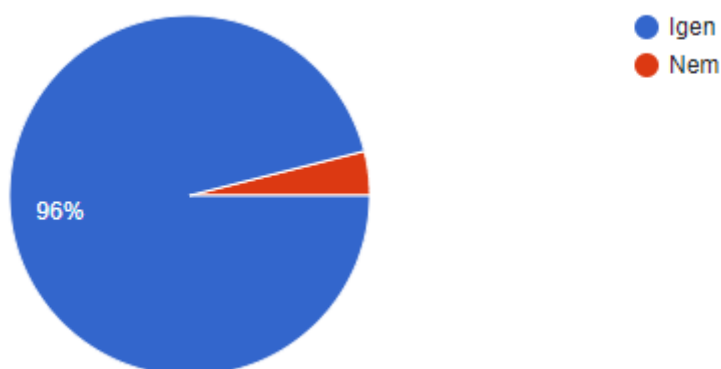
II. Ön szerint biztonságosak az atomerőművek?



3. diagram [26]

Mivel erre a kérdésre mindenki tudott válaszolni így, aki támogatja az atomenergia felhasználását az ugyan úgy érezheti, hogy nem elég biztonságos a rendszer, mint aki nem támogatja az atomenergiát. Az adatok elemzése után mégis kimondható, hogy kevesebb ember szerint biztonságos a fissionális energia, mint ahány megkérdezett szerint szükséges a felhasználása.

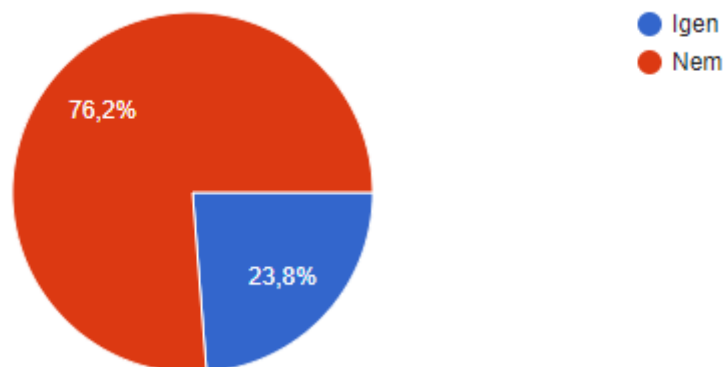
III. Tudja-e mi okozta a csernobili katasztrófát?



4. diagram [26]

Mivel az RBMK reaktort is dolgozatomban alaposan átvizsgálja, így megkérdeztem a hallgatóktól, tudják-e mi okozta bolygónk leghírhedtebb atomkatasztrófáját. A 101 megkérdezettből mindössze 4-en nem tudják pontosan, hogyan is történt. Sajnos nem összemeshető az előbb feltett kérdéssel, így is biztató, hogy a korosztályom körülbelül képben van az aktuális és múltbeli atomenergia helyzettel.

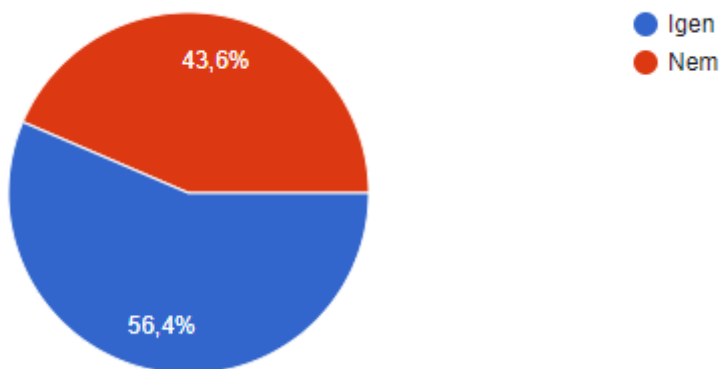
IV. Ismeri-e a IV. generációs reaktorok előnyeit?



5. diagram [26]

Mint az előbb, így is a dolgozatban említett reaktorról kérdeztem társaimat indirekt módon. Mivel a VVER-1200 és a VHTR is negyedik generációs reaktor, így kíváncsi voltam hányan tudnak róluk bármit. A megkérdezettek kicsivel több mint háromnegyed része nem tudja milyen előnyökkel rendelkeznek az új típusok, ebbe beleértve bármilyen IV. generációs blokkot.

V. Tisztában van-e a magyar villamosenergia rendszer előtt álló jövőbeli kihívásokkal?

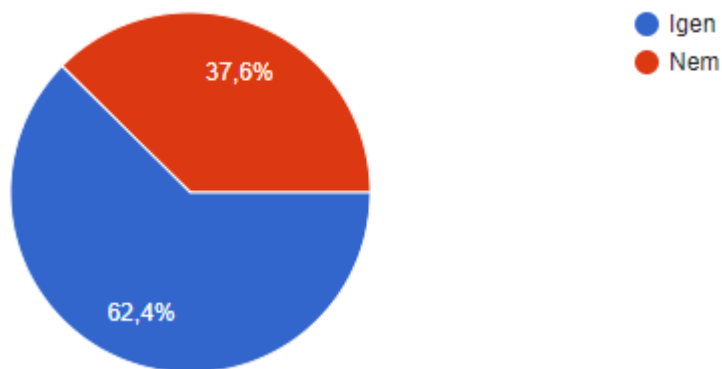


6. diagram [26]

Mivel már most beléptünk a magyarországi építkezések azon szakaszába, ahol az energiaiintenzív iparterületek növekednek vagy éppen az extrém nagyfogyasztók települnek hazánkba így fontos a hálózat vizsgálata is. Egyik ilyen kihívás a hálózathibák, mely egy elkerülhetetlen folyamat. A megkérdezettek több mint fele tisztában van a növekedéssel, bár ki kell hangsúlyozni, hogy műszaki felsőoktatásban tanulókról van szó. Ezt levetítve az

átlagemberre véleményem szerint igen nagy eltérést tapasztalnánk a mérleg nyelvén a rossz irányba.

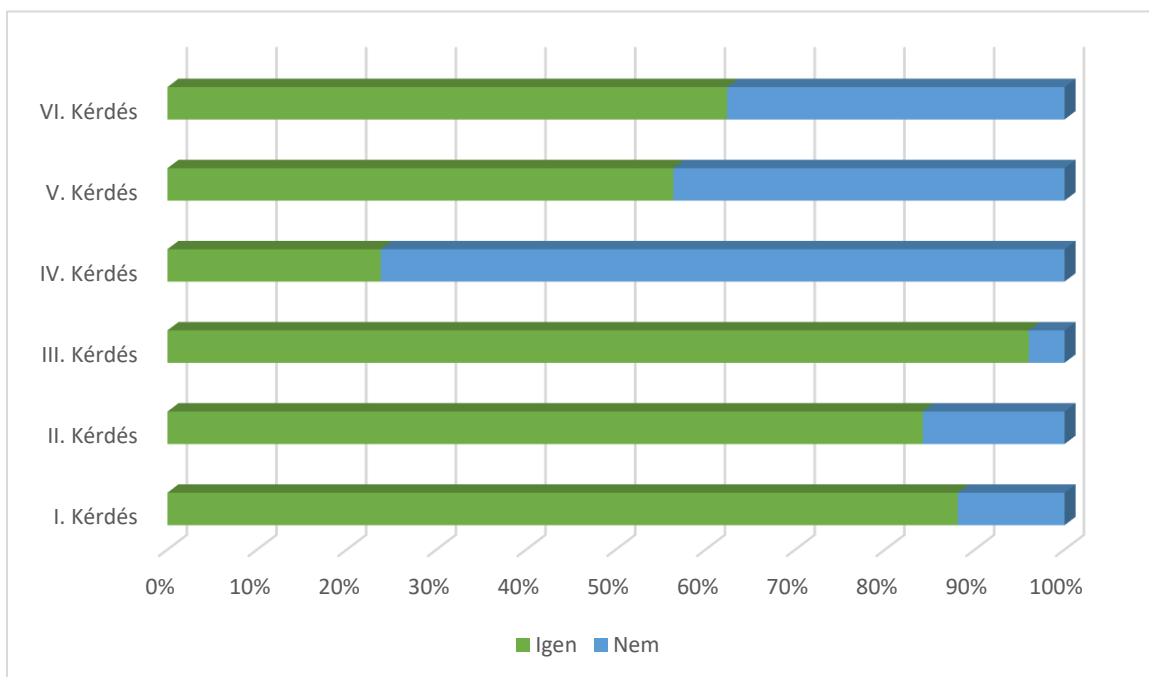
VI. Szükségesnek tartja-e a hazai energiamixbe az atomenergia részarányának növelését?



7. diagram [26]

Az utolsó kérdés politikailag korrekten utal arra, mi a véleménye a hallgatónak a hazai atomenergia bővítésről. Majdnem kétharmaduk azt válaszolta szükségesnek tartja, a 2400 MW-os bővítést. Szükségesnek tartja a diáktársadalom egy kiválasztott része az atomenergia felhasználását Magyarországon mely igen biztató mutató az országunk leendő mérnökeitől.

Diagramba összefoglalva a kapott eredményeket:



8. diagram [27]

8. Reaktorok tulajdonságait összehasonlító és szemléltető mátrix

A fentebb leírt specifikációk alapján elmondható, hogy az új reaktorok biztonság tudományi szempontból kimagaslóak az RBMK-hoz képest, termelési szempontból közel azonosak. Jól látható, hogy bár a második generációs típus nem biztonságosan üzemeltethető, ennek ellenére közel annyit termel, mint a VVER, sőt a VHTR-t túl is termeli. Fogyasztása is elfogadhatónak tekinthető, viszont rengeteg UO_2 szükséges a reaktorba. Több mint tízszer annyi üzemanyag kell ebbe a típusba, mint a VVER-be sőt, kevesebbet is termel. Itt ütközik ki az első nagy hátránya. Hatásfoka még kedvezőnek mondható, viszont élettartama 20 évvel kevesebb mint az új típusok. Biztonsági szempontból az utolsó utáni helyre sorolható, a világ leghírhedtebb katasztrófája miatt mely a típus egyik legnagyobb hibája a túlfutás miatt következett be.

A VHTR reaktor a jövő egyik meghatározó reaktora lehet. Kevesebbet termel, mint az előbb említett típusok, viszont nagy előnye a hidrogéngyártás. Mivel sodródunk a megújuló energiaforrások felé ezért ez a típus igencsak ígéretesnek mondható. Telepíthetők lennének akár acélgyárak, finomítók, egyéb olyan üzemek mellé, amelyek fosszilis energiahordozókat használnak hőfejlesztéshez. A hidrogénenergia a jövő egyik még kiaknázatlan energiaterülete, és ehhez, nagy ugrást jelenthet az alábbi típus.

Egy elemző táblázatba rendezve (2. táblázat) az adatokat könnyebben értelmezhetjük az eddig kapott információkat. Különböző színek jelölik az adatok típusát: zölddel a kiemelkedően jó, pirossal a kevésbé effektív adatot jelöltem. Sárgával azt a cellát jelöltem melyre nem lehet adatot kapni, lilával pedig azt, amiről van adat, de számunkra ez nem elérhető fejlesztés vagy üzleti titok miatt.

Tényező	VVER-1200	VHTR	RBMK
A reaktor hőteljesítménye [MW]	3212	600	3200
Üzemanyag	UO ₂	TRISO, UO ₂	99,3% U ₂₃₈ 0,7% U ₂₃₅
Üzemanyag tömege a reaktorban [t]	160	4,5	1800
Átlagos üzemanyag fogyasztás (MW-nap/kg)	60	150 GWnap/t	12
Hulladék mennyisége	3-4 m ³ /év	5 m ³ /év	-
Hulladék tárolása	Tároló vagy vizes tárolómedence	Tároló	Tároló vagy vizes tárolómedence
Hatásfok	34,5%	45,5%	30%
Tervezett élettartam	60	60	40
Primer körí nyomás (MPa)	16,2	6	9,8
Gőznyomás a turbinába lépéskor	7	5,5	7
Primerkörí vízhőmérséklet	298,2°C	900-1000°C (He)	-
A meghibásodások gyakorisága	<5,94*10 ⁻⁹	Fejlesztés alatt	-
Beruházási költségek	6 milliárd €	Fejlesztés alatt	-
Karbantartási költségek	-	Fejlesztés alatt	-
Üzemanyagköltségek	-	Fejlesztés alatt	-
Lebontási költségek	-	Fejlesztés alatt	-

2. táblázat: Reaktor elemző táblázat [28]

A táblázatból egyértelműen látható, hogy országunkba is telepítendő VVER-1200-as reaktor igen kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkezik. Sajnos üzleti adatokat nem közöl a gyártó a költségekkel kapcsolatosan, így csak a beruházási költségekkel tudunk elszámolni. Tekintsük meg a másik két reaktortípust is. Bár a képzeletbeli versenyünket a VVER nagy fölényrel nyerte jól látható, hogy bár az RBMK reaktor kevesebb negatívummal rendelkezik, mégis a dobogónk alsó fokára kell, hogy kerüljön. Teljesítményben, üzemanyagban, fogyasztásban és másban is hátrébb előrébb van, mint a VHTR, az legfontosabb szempontokban a VHTR előrébb

tart. A IV. generációs reaktor hatásokban és biztonságban (táblázatból nem derül ki) is fejlettebb. Mivel a VHTR egy fejlesztés alatt álló reaktor ezért a költségeit nem tudjuk, a csernobili típus pedig nem elérhető más tényezők miatt ezért nem tudjuk ezeket elemezni.

9. Összegzés

Fontos belátnunk a XXI. században egy meghatározó energiaszektorrá vált az atomenergia, ennek hatására jelentek meg a jobbnál jobb és biztonságosabb reaktortípusok. A különböző típusok bemutatása után rátértem a kiválasztott reaktorok részletes elemzésére, mely hazai- és nemzetközi szakirodalom-kutatás által gyűjtött adatok segítségével került bemutatásra, műszaki szempontok szerint. A szakirodalom-kutatás eredménye egy önállóan megalkotott összehasonlító mátrix, mely alkalmassá teheti a reaktorok komplex összehasonlítását. Mivel az atomreaktorok a társadalomban a mai napig nagy kételyeket keltenek, ezért nemzetközi szint után egy, ugyan nem reprezentatív közvéleménykutatást végeztem az Óbudai Egyetemen hallgatótársaim körében. Az eredmények elemzése után kaptunk egy képet a mai felsőoktatásban tanulók véleményéről melyet össze tudunk vetni a nemzetközi szinttel. Bár látszik, hogy az elfogadottsága a reaktoroknak nő, még így is szükséges foglalkozni a tájékoztatással és a társadalmi elfogadás problémakörrel.

Összegezve, a Tudományos Diákköri Konferenciára készített pályamunkámmal azt a célt tűztem ki, hogy alaposan megismerem az energiatermelő reaktorokat, s eddigi érdeklődésem és tudásom a tudományos módszerek megismerésével folytatom. A három reaktor relációjában az elemző összehasonlítást a VVER-1200-as reaktor „nyerte” melyet a VHTR követ. Megtapasztaltuk, hogy a IV. generációs reaktorok biztonságban, termelésben és más területen is megelőzik II. generációs társukat. Itt fontosnak érzem kitérni, hogy bár katasztrófát okozott az egyik elemzett típus, de a katasztrófán túl számos ismeretet és megvalósított óvintézkedést is köszönhetünk az RBMK reaktoroknak. Nem szabad elfelejtenünk, hogy a mai napig működnek ilyen reaktorok (4 darab összesen) jelentősebb hiba nélkül. Az emberi tényező az, amely veszélyezteti a megítélést, éppen ezért nagy előnyük az új reaktoroknak a szabályozástechnika mely minimalizálja az emberi hibákból származó súlyos balesetek, katasztrófák valószínűségét.

Véleményem szerint, nyitottnak kell lennünk a jövő felé és bízni a technikai fejlődésben, mely elég biztonságos reaktorokat biztosít számunkra. Mérnökhallgatóként a jövőben a reaktorok biztonságával és az atomerőművek működésével szeretnék foglalkozni. Kétségtelen, hogy

Magyarországon, az energiamix, atomenergia hányadának növelése igen fontos szerepet játszik a jövő formálásában, s többek között ez is inspirált a dolgozatom megírásában mert szükségesnek érzem az embereket meghallgatni és ésszerű érvekkel elmagyarázni, bemutatni a már meglévő műszaki megoldásokat, fontosnak tartom az üzemeltetésen túl a fejlesztési és innovációs lehetőségek megismerését és lehetőségeimhez mérten a fejlesztésbe való bekapcsolódást is tervezem. Nemzetközi szinten tapasztalhatjuk, mekkora szerepet játszik nálunk nagyobb országokban az atomenergia és annak hiánya. Az importra támaszkodni nem csak veszteséges, de destabilizáló az ország gazdasága számára. Eddigi tapasztalatom alapján, az atomenergia a jövő energiaforrása lehet, melyet fontos elfogadni és támogatni.

A dolgozatomban elért tudományos eredmények további fejlesztésén már most gondolkodok, s az eddigi kutatásaim a jövőben is folytatni kívánom!

A dolgozatot 2023. május 2-án lezártnak tekintem, az abban foglaltak, az adatok és elemzések, valamint jelenlegi tudásom és tapasztalatom ezen dátumig érvényes.

10. Függelék a saját eredményekről

A tudományos diákköri konferenciára készített dolgozatom célja egy olyan átfogó elemzés mely nem csak a dolgozatban érintett reaktorok műszaki specifikációinak ismertetése, kutatása, de egy közvéleménykutatás készítése hallgató társaim körében. Általam elvégzett munkák a dolgozatban:

- Reaktorok ismertetése specifikációk szerint és ezeknek az elemzése műszaki szempontból. Gyártótól online elérhető adatok kutatása, kiértékelése és elemzése.
- Közvéleménykutatás az Óbudai Egyetem hallgatói között és a kapott eredmények elemzése és kiértékelése. Konklúzió levonása, emberek ismeretterjesztésének megkezdése, nyilvános adatok és információk átadása, hogy egy nagyobb összképet kaphassanak a jövő mérnökei a fission energiáról.
- Önálló összehasonlítás az általam meghatározott szempontok alapján és ezáltal rangsorolás három kiválasztott reaktorról. Ezeknek az adatoknak pontos kutatása és meghatározása, esetleges számolása. Lásd egy reaktor rúd urán tartalmának elemzése és ennek felszorzása a teljes reaktorra tekintve.
- INES skála elemzése és pontos meghatározása a köznapi ember számára, akiket érdekel a nukleáris biztonság és esetleges balesetek veszélyességi szintje.
- Adott típusú reaktor telepítési költségének kiszámítása és összehasonlítása egy hazai napelempark telepítési költségével, majd termelési összehasonlítás elvégzése.

Hivatkozások

- [1] World Nuclear Association - Nuclear Power in the World Today (2023.03.20.)
- [2] Energia Gazdálkodás, 57. évfolyam 2016. 1-2. szám
- [3] Hadmérnök, 17. évfolyam 2. szám 99-112., Barina Balázs – Atomerőművek fejlődése a generációváltások a tükrében
- [4] Pór Gábor, Atomenergetikai alapismeretek, 2012. január 31.
- [5] Radnóti Katalin, Király Márton, Az atomenergiáról egyszerűen: az atomerőművek működése, típusaik és jövőjük, Nukleon 8. évfolyam 177, 2015. április
- [6] Hadmérnök, 13. évfolyam 3. szám – 2018. szeptember, Antal Zoltán, Kátai-Urbán Lajos, Vass Gyula – Atomerőmű Generációk Fejlődésének Vonzatai
- [7] Dr. Csom Gyula, 4. Atomerőművek, 2004. június
- [8] N.M. Sorokin, B. A. Gabaraev, Yu. M. Cherkashov – Safe operation and life extension of RBMK plants
- [9] MPR Associates, Inc., Doug Chapin, Scott Kiffer, Jim Nestell - The Very High Temperature Reactor: A Technical Summary, June 2004
- [10] World Nuclear Association – Nuclear Power Reactors (2023.03.22.)
- [11] Mohamed S. El-Genk, Jean-Michel P. Tournier – Reliable and safe thermal coupling of generation-IV VHTR to a hydrogen fuel production complex
- [12] World Nuclear Association – Generation IV Nuclear Reactors (2023.04.10.)
- [13] World Nuclear Association – Country Profiles - Russia: Nuclear Power
- [14] International Atomic Energy Agency – Advances in High Temperature Gas Cooled Reactor Fuel Technology
- [15] International Atomic Energy Agency- Technical Specifications of the RBMK-1000 reactor
- [16] Rosatom – The VVER today
- [17] Mikael Nosa – RBMK Simulator, 2013 spring

- [18] G7 – Ujhelyi Géza: Az atomerőmű valójában olcsóbb, mint a megújulók
- [19] atomeromu.mvm.hu – Atomerőművek Biztonsága
- [20] Saját táblázat az atomeromu.mvm.hu – Atomerőművek Biztonsága 8.-9. oldala alapján
- [21] statista.com – Nuclear accidents worldwide rated by the INES scale 1957-2011
- [22] World Nuclear Association – Country Profile – Germany (2023.04.25.)
- [23] Hárfás Zsolt – Atombiztos – Továbbra is az atomenergia az európai klímabajnok 2022.02.22.
- [24] Kovács Antal: Kommunikáció a társadalommal, mint atomenergia-fogyasztóval
- [25] Saját diagram Kovács Antal: Kommunikáció a társadalommal, mint atomenergia-fogyasztóval – Doktori Értekezése alapján
- [26] Saját diagram: Nem reprezentatív, anonim, saját közvéleménykutatás az Óbudai Egyetem hallgatói között Google Forms segítségével (2023.04.27.)
- [27] Saját diagram a [26] -os adatok összegzéséről
- [28] Saját táblázat a 11-17-es források használatával