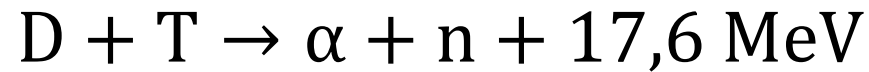


Hogyan kellett megoldani
Szimuláció

Magfúziós erőmű szimulációja

D-T fúziós reakció:

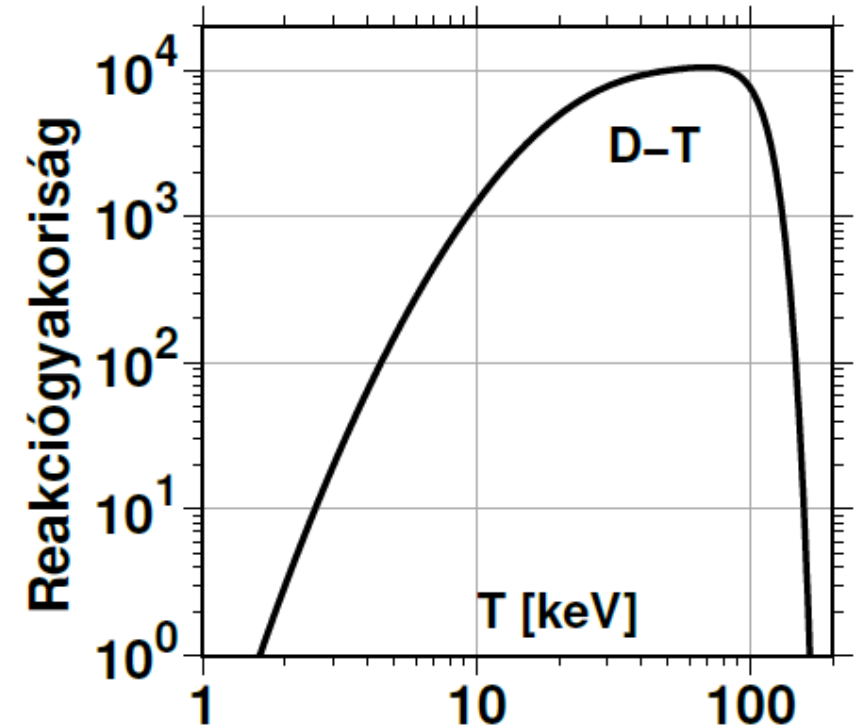


Teljes fúziós teljesítmény:

$$P_F \propto n^2 \cdot R(T)$$

ahol n a térfogati sűrűség:

$$n = \frac{N}{V}$$



A szimulációs program

TOKAMAK szimulációja

Súgó

BEMENETI PARAMÉTEREK

Sűrűség [$10^{20} / \text{m}^3$]:

Külső fűtés [MW]:

Mágneses tér [T]:

STOP

A szimuláció fut

EREDMÉNY PARAMÉTEREK

PLAZMA JELLEMZŐK

Hőmérséklet [keV]:	19.49
Összetartási idő [s]:	8.78
Nyomás / max. nyomás [%]:	93.59
Plazmaáram [MA]:	19.00
Q (fúzió / külső fűtés):	40.86

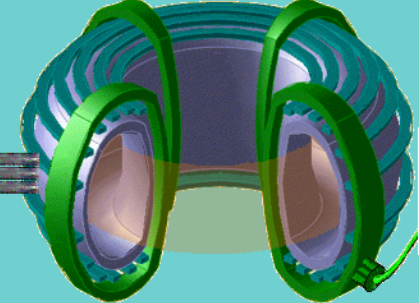
TELJESÍTMÉNY MÉRLEG

Alfa-fűtés [MW]:	408.61
Transzport veszteség [MW]:	140.50
Sugárzási veszteség [MW]:	304.94
Villamos teljesítmény [MW]:	511.98

Külső fűtés [MW]
50

Mágneses tér [T]
5.5

Sűrűség [$10^{20} / \text{m}^3$]
0.55



Feladatok

1. feladat: (0 pont)

Gondosan olvassuk végig a teljes mérésleírást!

2. feladat: (3 pont)

2,07 ± 0,94

Gondoljuk át, és írjuk le, hogy a mérésleírásban szereplő információk alapján milyen előnyei és hátrányai lehetnek a mágneses tér, sűrűség, és külső fűtés növelésének!

Feladatok

1. feladat: (0 pont)

Gondosan olvassuk végig a teljes mérésleírást!

2. feladat: (3 pont)

2,07 ± 0,94

Gondoljuk át, és írjuk le, hogy a mérésleírásban szereplő információk alapján milyen előnyei és hátrányai lehetnek a mágneses tér, sűrűség, és külső fűtés növelésének!

2. feladat

A **mágneses tér** növelése

- + növeli az összetartási időt, javítja a reaktor hatásfokát
- + kitolja az áramhatárt
- + kitolja a nyomáshatárt
- növeli a veszteségeket

A **sűrűség** növelése

- + növeli az összetartási időt
- + négyzetesen növeli a fúziós teljesítményt
- növeli a veszteségeket is

A **külső fűtés** növelése

- + növeli a hőmérsékletet
- + növelheti a termelt villamos teljesítményt
- csökkenti az összetartási időt

Feladatok

3. feladat: (2 pont)

1,03 ± 0,32

Mire számítunk, a sűrűséghatárhoz illetve a nyomáshatárhoz közel, vagy attól távol lesz-e a legjobb a villamos teljesítmény? Miért?

4. feladat: (1 pont)

0,33 ± 0,48

Ismerkedjünk meg a program kezelésével! Nézzük meg hogyan működnek a bemenetet állító kezelőszervek, és hogy milyen adatokat ír ki a kezelőfelület. Írjuk le, hogy ezekből melyikre lesz mindenképpen szükség a feladatok végrehajtásához!

3. feladat

- Mivel a hőmérsékletet nem érdemes minden határon túl növelni, ezért a fúziós teljesítményt a sűrűség növelésével tudjuk növelni, feltéve, hogy a hőmérséklet a leírásban szereplő 10-20 keV nagyságrendet eléri.
- A legjobb villamos teljesítmény ezért várhatóan minél nagyobb sűrűségnél, a sűrűséghatár miatt annak közelében lesz.
- A nyomáshatár mindig mágneses térnél adott, ezért adott B mellett jobb a sűrűséghatár mellett lenni, mint a nyomáshatár mellett, ha jó a hőmérséklet.

Feladatok

3. feladat: (2 pont)

1,03 ± 0,32

Mire számítunk, a sűrűséghatárhoz illetve a nyomáshatárhoz közel, vagy attól távol lesz-e a legjobb a villamos teljesítmény? Miért?

4. feladat: (1 pont)

0,33 ± 0,48

Ismerkedjünk meg a program kezelésével! Nézzük meg hogyan működnek a bemenetet állító kezelőszervek, és hogy milyen adatokat ír ki a kezelőfelület. Írjuk le, hogy ezekből melyikre lesz mindenképpen szükség a feladatok végrehajtásához!

4. feladat

TOKAMAK szimulációja

BEMENETI PARAMÉTEREK

Sűrűség [$10^{20} / \text{m}^3$]:

Külső fűtés [MW]:

Mágneses tér [T]:

STOP

A szimuláció fut

EREDMÉNY PARAMÉTEREK

PLAZMA JELLEMZŐK

Hőmérséklet [keV]:	19.49
Összetartási idő [s]:	8.78
Nyomás / max. nyomás [%]:	93.59
Plazmaáram [MA]:	19.00
Q (fúzió / külső fűtés):	40.86

TELJESÍTMÉNY MÉRLEG

Alfa-fűtés [MW]:	408.61
Transzport veszteség [MW]:	140.50
Sugárzási veszteség [MW]:	304.94
Villamos teljesítmény [MW]:	511.98

Külső fűtés [MW]: 50

Mágneses tér [T]: 5.5

Sűrűség [$10^{20} / \text{m}^3$]: 0.55

Feladatok

5. feladat: (6 pont)

4,13 ± 1,25

Legalább 2 különböző fűtési teljesítmény és 3 mágneses tér mellett határozzuk meg a sűrűséghatárt és a plazmaáramot. Ábrázoljuk mindkettőt (külön-külön) a mágneses tér függvényében! Ha a sűrűséghatár helyett a nyomáshatárba sikerül belefutni, úgy próbálkozhatunk pl. másik $(B, n_{\max})$ kombinációval, vagy a fűtési teljesítmény csökkentésével. Milyen más kimeneti értéke(ke)t lehet érdemes már most rögzíteni?

6. feladat: (4 pont)

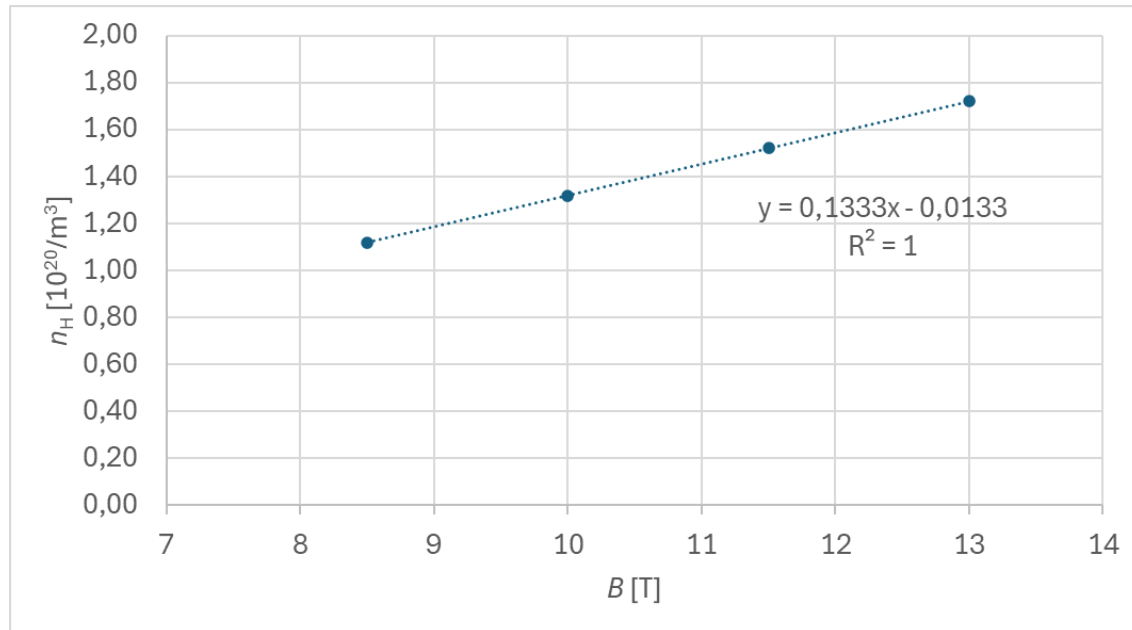
1,67 ± 1,15

Hogyan függ a sűrűséghatár és a plazmaáram a külső fűtéstől és a mágneses tértől? Írjuk le mit tapasztalunk, és hogy hogyan segíthetnek a kapott eredmények az optimalizációban!

5. feladat

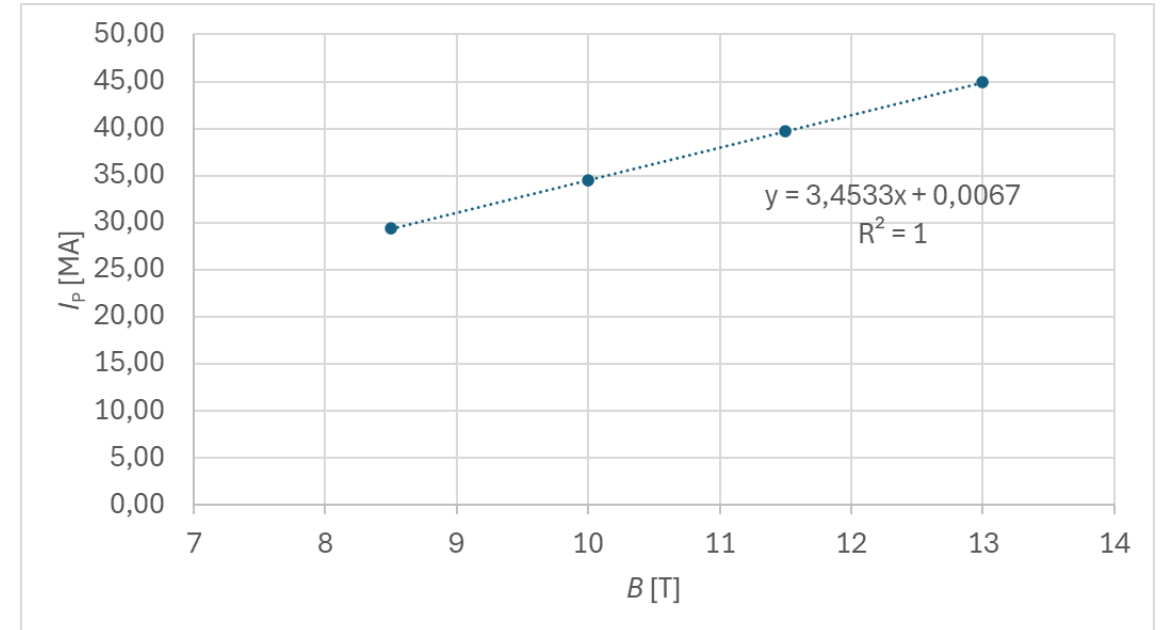
$$P_K = 30 \text{ MW}$$

B [T]	$n_H [10^{20}/\text{m}^3]$	I_p [MA]	P_E [MW]
8,5	1,12	29,36	3159,37
10	1,32	34,54	3678,46
11,5	1,52	39,72	-219,43
13	1,72	44,9	-245,59



$$P_K = 60 \text{ MW}$$

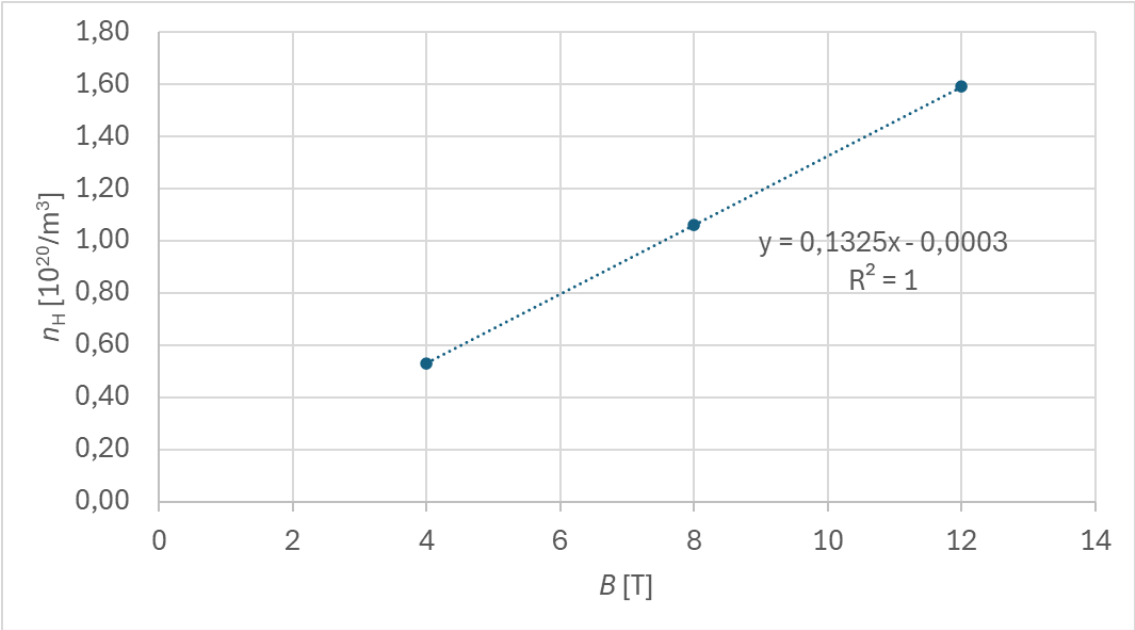
B [T]	$n_H [10^{20}/\text{m}^3]$	I_p [MA]	P_E [MW]
8,5	1,12	29,36	3153,05
10	1,32	34,54	3720,77
11,5	1,52	39,72	3359,88
13	1,72	44,9	-312,44



5. feladat

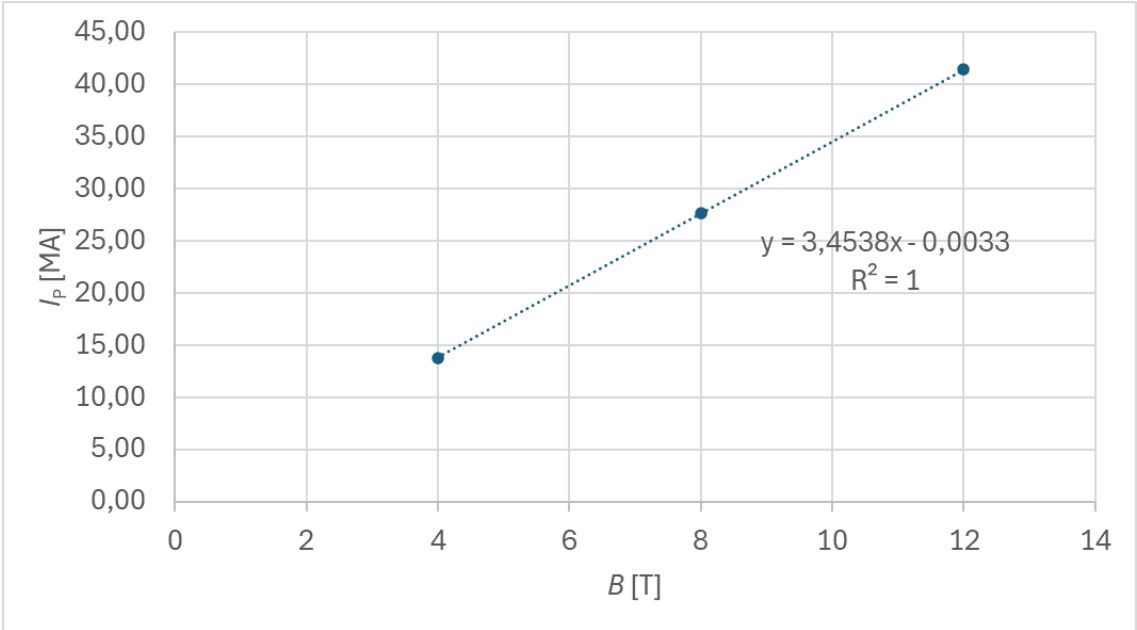
$P_K = 30 \text{ MW}$

$B \text{ [T]}$	$n_H [10^{20}/\text{m}^3]$	$I_p \text{ [MA]}$	$P_E \text{ [MW]}$
4	0,530	13,81	0
8	1,06	27,63	0
12	1,59	41,44	-272,35



$P_K = 50 \text{ MW}$

$B \text{ [T]}$	$n_H [10^{20}/\text{m}^3]$	$I_p \text{ [MA]}$	$P_E \text{ [MW]}$
4	0,530	13,81	0
8	1,06	27,63	2981,45
12	1,59	41,44	-227,88



Feladatok

5. feladat: (6 pont)

4,13 ± 1,25

Legalább 2 különböző fűtési teljesítmény és 3 mágneses tér mellett határozzuk meg a sűrűséghatárt és a plazmaáramot. Ábrázoljuk mindkettőt (külön-külön) a mágneses tér függvényében! Ha a sűrűséghatár helyett a nyomáshatárba sikerül belefutni, úgy próbálkozhatunk pl. másik $(B, n_{\max})$ kombinációval, vagy a fűtési teljesítmény csökkentésével. Milyen más kimeneti értéke(ke)t lehet érdemes már most rögzíteni?

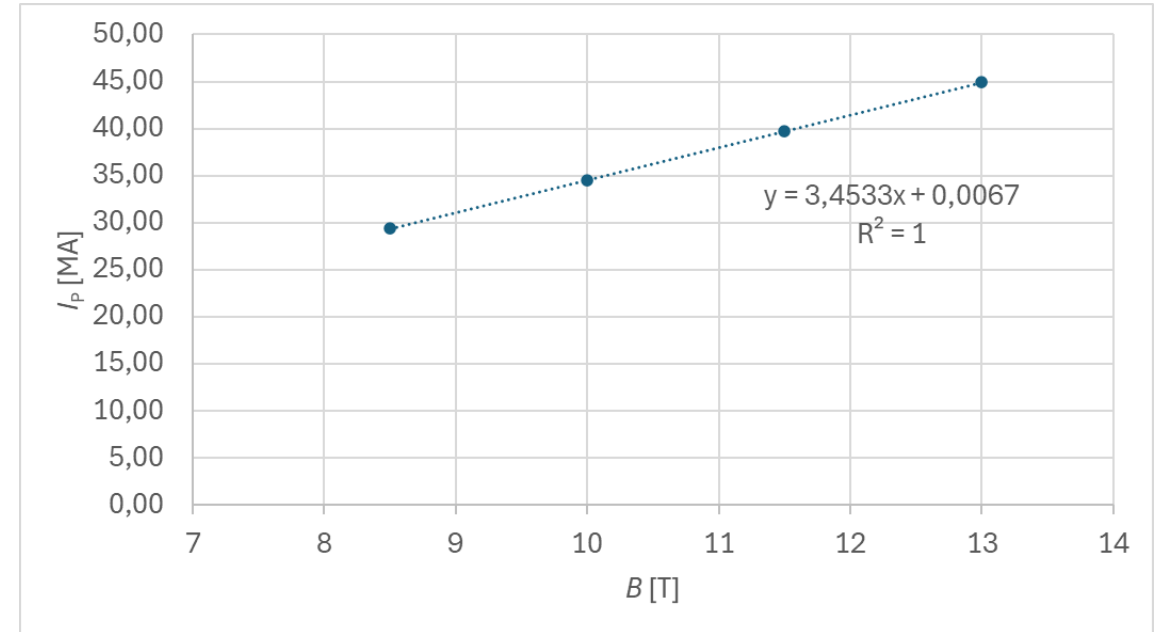
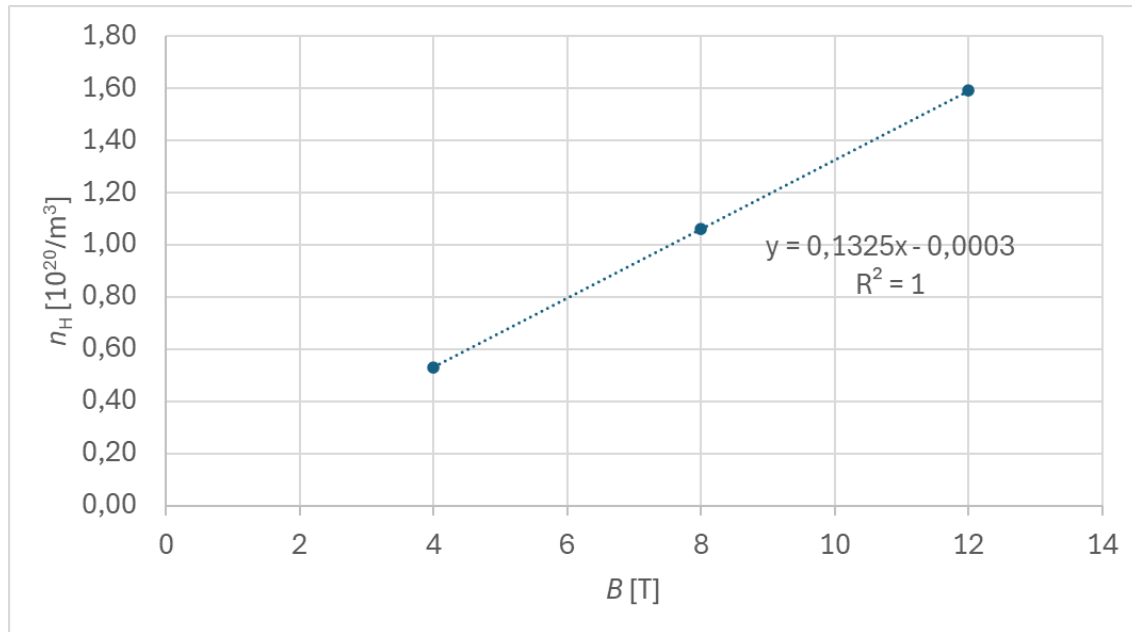
6. feladat: (4 pont)

1,67 ± 1,15

Hogyan függ a sűrűséghatár és a plazmaáram a külső fűtéstől és a mágneses tértől? Írjuk le mit tapasztalunk, és hogy hogyan segíthetnek a kapott eredmények az optimalizációban!

6. feladat

- Mind a határsűrűség, mind a plazmaáram lineárisan függ a mágneses tér nagyságától (a plazmaáram esetében az I_p/B hányadost a szimuláció a legnagyobb teljesítményű, még éppen stabil konfiguráción tartja)
- Sem a határsűrűség, sem a plazmaáram nem függ ezen a tartományon a külső fűtés teljesítményétől
- Optimalizáció során első körben elegendő a mágneses tér nagyságát beállítani, alacsony mágneses tér esetén hamarabb futunk bele a nyomáshatárba



Feladatok

7. feladat: (6 pont)

3,50 ± 1,96

A korábbi tapasztalatainkat is felhasználva próbáljuk megkeresni, melyik kombinációban érhető el a legjobb villamos teljesítmény. Jegyezzük le a tapasztalatokat, a gondolatmenetet. A munka mögötti logika és annak dokumentációja több pontot ér, mint maga a maximum megtalálása!

8. feladat: (3 pont)

2,37 ± 0,72

Készítsünk jegyzőkönyvet a tapasztalatainkról! Pontok járnak a jegyzőkönyv általános érthetőségére, követhetőségére.

7. feladat

Gondolatmenet az optimalizációhoz:

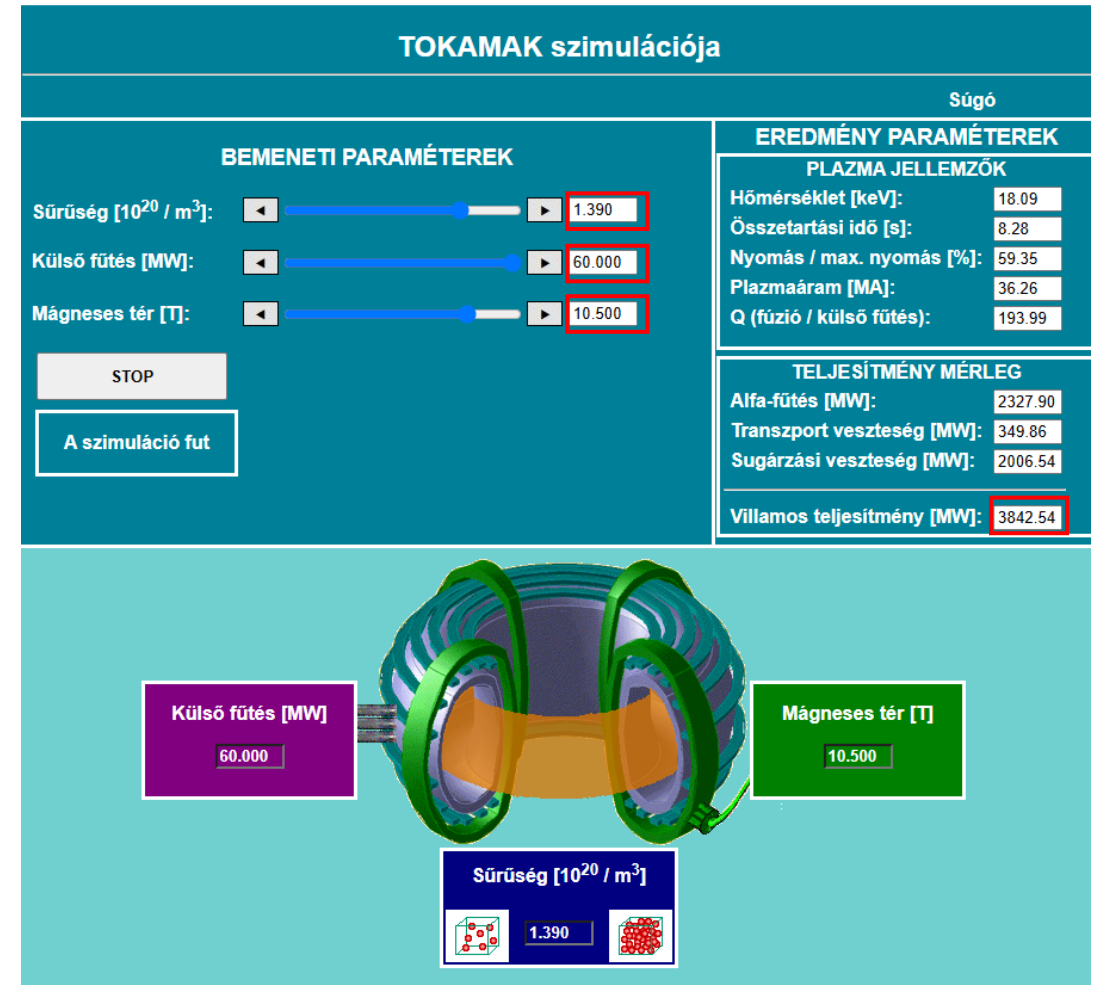
- Nagy fúziós teljesítmény eléréséhez nagy sűrűsége van szükségünk, amihez nagy mágneses tér szükséges (mindig az adott mágneses tér melletti sűrűséghatárt fogjuk beállítani)
- A külső fűtés a sűrűséget és a plazmaáramot közvetlenül nem befolyásolja, viszont elegendően nagy mágneses tereknél az elektromos teljesítményt kis mértékben növeli
- Hőmérséklet messze van 70 keV levágási határtól
- 11 T feletti mágneses tér esetében a sugárzási veszteségek miatt elkezd csökkenni az elektromos teljesítmény, aztán megszűnik a magas egyensúlyi hőmérséklet
- Érdekes megkeresni azt a mágneses tér tartományt, ahol magas az elektromos teljesítmény, és ott finomhangolást végezni

7. feladat

„Csúszkák” segítségével elérhető max.: 3842,54 MW

Kézzel beírt számokkal:

- Senior max.: 3859,53 MW
- Junior max.: 3859,98 MW
- Bizottság max.: 3868,24 MW



Összehasonlítva egy “valódi” fúziós erőművel

- A sűrűséghatárt a plazma $I / (r^2\pi)$ áramsűrűsége határozza meg (most $I \sim B$)
- Az egyszerűbb szimuláció érdekében elhanyagoltuk a plazma-fal kölcsönhatást, és a reaktorfal-hűtés maximális teljesítményét. Ezeket figyelembe véve az elérhető elméleti maximum, ebben a geometriában, kb 1500 MW körül lenne.
- Az ehhez szükséges >10 T mágneses tér viszont nem praktikus, mert túl vastag tekercsek kellene hozzá (hogyan bírják a rájuk ható elektromágneses erőket)
- A diszrupciók negatív hatásai (hőterhelés, EM erőhatások) a plazmaárammal nemlineárisan nőnek, ezért a túl nagy áram mérnöki szempontból nem kívánatos.
- Ezek miatt az EU DEMO erőművet (aminek geometriájára a szimuláció épül) ezért épp ahhoz hasonló paraméterekkel tervezik, ami a szimuláció alapbeállítása:
 $B_0 = 4.9 - 5.5$ T, $P_V = 500$ MW.



gergely.papp@ipp.mpg.de