

TDK dolgozat

Kriogén pellet gyorsításának vizsgálata

Kovács Ákos

Energetikai mérnök Bsc. I. évfolyam



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2



Energiatudományi
Kutatóközpont

Témavezető:

Dr. Zoletnik Sándor

Energiatudományi Kutatóközpont Atomenergia-kutató Intézet

Fúziós Plazmafizika Laboratórium

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2021

Absztrakt

A téma az Energiatudományi Kutatóközpont (EK) Fúziós Plazmafizika Laboratóriumában (FPL) folyó ITER tört pellet belövő (Shattered Pellet Injector, SPI) technológia fejlesztéséhez kapcsolódik. Az eszköz és technológia megtervezését az ITER (Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor) rendelte meg, mely a világ legnagyobb tokamak típusú fúziós reaktor kutatás-fejlesztési projektje. A jelenleg is épülő létesítménynek biztonsági szempontból van szüksége a berendezésre. Az ITER-ben létrehozott magas hőmérsékletű plazma esetleges instabil állapotba kerülésekor rövid idő alatt le kell állítani a reakciót a tokamak sérülésének elkerülése végett. A plazma bomlása esetén ugyanis kis pontra hatalmas hőterhelés összpontosulhat, mely a divertorban és más plazmával érintkező eszközökben is kárt tehet. Korábbi tokamakokon (JET, DIII-D) már kipróbált módszerként alkalmaznak nagymennyiségű Neon/Argon/Deutérium gáz beeresztését (Massive Gas Injection), aminek köszönhetően az energiatöbblet jelentős hányadát képesek lesugározni, és eloszlatni a berendezés belsejében. Az ITER megnövekedett méretei miatt azonban az MGI nem bír kellő hatékonysággal. Jelenleg a plazma gyors lehűtését alacsony hőmérsékletű kriogén pelletek töredékeinek belövésével SPI berendezés segítségével tervezik.

Az EK-FPL laboratóriumában egy SPI prototípus elemeinek, valamint a törési folyamatnak a tesztelése zajlik. A fagyasztani tervezett 19, illetve 28.5mm átmérőjű hidrogén, neon és keverék pelleteket nagy nyomású gázimpulzussal fogják felgyorsítani. A gyorsítást követően egy fém lappal ütköztetik, és meghatározott irányba térítik a tört darabokat.

Dolgozatomban a pellet gyorsítási folyamatát, valamint a laboratóriumban fejlesztett speciális nagy nyomású gázszelep működését vizsgálom. Kiindulásként rendelkezésre állt egy egyszerű Python nyelven írt nulldimenziós modell, amely kiszámítja a gáznyomás, gázszelep nyitási sebesség, a geometria és más paraméterek függvényében a pellet gyorsítását. A munkám során az Oak Ridge National Laboratory mérései alapján a modellt kiegészítettem a pellet nyírószilárdságának hőmérséklet függésével, valamint a FPL munkatársának az OpenFoam programban végzett gázáramlási számításaival is. Részt vettem a speciális szelep tesztelésében és a kapott nyitási karakterisztikát is beépítettem a programba.

Mivel az EK FPL laboratóriumban mérések csak 2021 végén várhatók, ezért a modell eredményeit a garchingi ASDEX Upgrade tokamaknál működő SPI berendezés méréseivel hasonlítottam össze. Bár itt sokkal kisebb, 4 mm átmérőjű, pelleteket készítenek, azonban nagyszámú szisztematikus mérési adat áll rendelkezésre, így lehetőség nyílik különböző paraméteres változások összevetésére.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Zoletnik Sándornak az odaadó munkáját. A munkafolyamat teljes időtartama alatt egyengette utamat. Jókedvvel és önzetlenül járult hozzá céljaim eléréséhez. Nélküle ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.

Köszönet illeti Vécsei Miklóst és Réfy Dánielt, akik lehetővé tették az OpenFoam és gyorszelep karakterisztika számítások beépítését a modellbe. Köszönöm Papp Gergelynek a segítségét, aki első kézből tudott szolgálni információval az ASDEX Upgrade mérési eredményeiről.

Továbbá szeretném külön megköszönni Szepesi Tamásnak és a Fúziós Plazmafizika Laboratórium munkatársainak segítségét, akik számos probléma megoldásában tudtak nekem javaslatot, észrevételt megfogalmazni, motivációt adni.

Nem utolsó sorban szeretném megköszönni a családomnak, barátaimnak a támogatást, igazán hálás vagyok érte.

Tartalomjegyzék

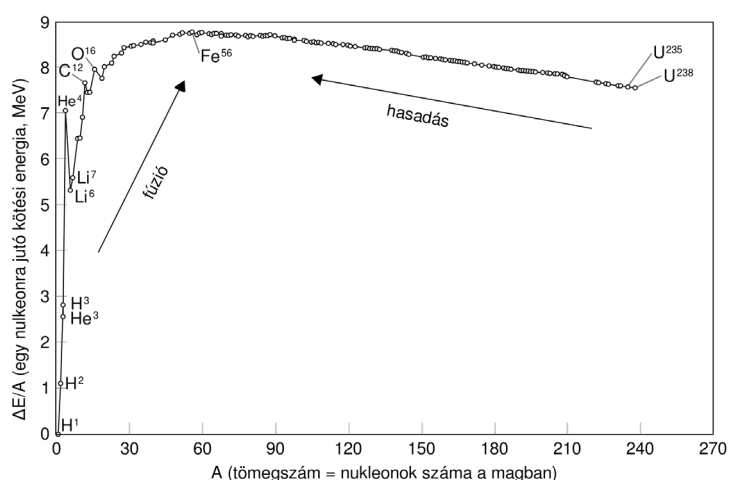
1. A fúziós energiatermelés	5
1.1. Bevezetés.....	5.
1.2. A fúzió.....	6.
1.3. Fúziós erőmű koncepciója.....	7.
1.4. Alapvető fogalmak	8.
1.5. A reaktorok típusai.....	10.
2. ITER	11
2.1. Története.....	11.
2.2. Szerkezeti felépítése.....	13.
3. Plazma diszrupció	16
3.1. Elfutó elektronok.....	16.
3.2. Disruption Mitigation	18.
3.3. Shattered Pellet Injector.....	18.
3.4. Pellet mérések a Oak Ridge National Laboratory-ban	21.
3.5. OpenFoam számítások	22.
3.6. ASDEX Upgrade SPI kísérletek.....	22.
4. Gyorsításmodell-számítások	23
5. Kutatási eredmények	25
5.1. Nyíró szilárdság hőmérséklet függése	25.
5.2. OpenFoam eredmények	29.
5.3. Gyors szelep karakterisztika	31.
5.4. ASDEX Upgrade mérések modellezése	33.
Összegzés, kitekintés	34

1. A fúziós energiatermelés

1.1. Bevezetés

Korunk egyik legégetőbb kérdései közé tartozik a növekvő energiaigényünk ellensúlyozása hosszú távon, fenntartható módszerek alkalmazásával. A 19. és 20. század ipari forradalmi soha nem látott léptékű gazdasági, technikai, és társadalmi fejlődést produkáltak. A jelek szerint ez a növekvő tendencia a jövőben is fennmarad, ugyanakkor fosszilis energiahordozók felélése, illetve azok környezetszennyezése mellett a megújulók korlátai is jelentős gátat szabhatnak. A villamos energia termelésének négy alapvető kritériumnak kell megfelelnie. Bőségesen rendelkezésre álljon, illetve azt egyenletesen elosztva tudja biztosítani. Tiszta energiatermelési forma legyen, tehát hosszú távon se legyen negatív hatással a környezetünkre. Általánosságban véve biztonságos, és katasztrófamentes legyen. Valamint szabályozottan pontosan annyi elektromos teljesítményt adjon le, mint amennyire szükség van. Fosszilis forrásokat használva a kémiai kötésben (E_k) rejlő energiát aknázzuk ki, átlagosan elektronvolt ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) nagyságrendben atomonként. Egy ember éves energiaszükségletének ($E_e = 50000 \text{ kWh} = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ J}$) fedezéséhez tehát $N_r = E_e/E_k = 10^{30}$ darab atomot kell reakcióba hozni. Az anyagmennyiséggel megszorozva 10000 kg éves energiahordozó szükségletet kapunk eredményül. Ugyanez az érték nukleáris átalakulásokat használva gramm nagyságrendű, hiszen az egy atomra eső kötési energia 10^6 - 10^7 -szerese a kémiai kötésének. A számítások természetesen csak durva becslések, azonban az egyértelmű, hogy a jövőben fontos szerepe lesz a nukleáris energiatermelésnek.

Az atommagot a protonok és a neutronok építik fel, annak stabilitását, összetartását a kötési energia biztosítja. Ezen energia felszabadítása sokféleképpen megtörténhet, de alapvetően két esetet különböztetünk meg: nagy méretű atommagok hasadását (fisszió), illetve kis méretű atommagok egyesülését (fúzió). A közepes atomtömegű anyagoknál a legnagyobb az egy nukleonra eső energia emiatt ezek a legkötöttebbek [1].



1. ábra: Az egy nukleonra eső kötési energia a tömegszám függvényében. A magasabb kötési energia stabilabb szerkezetet jelent. A legstabilabb szerkezete a vasnak van, minden egyéb elem ezt a szerkezetet igyekszik elérni [1].

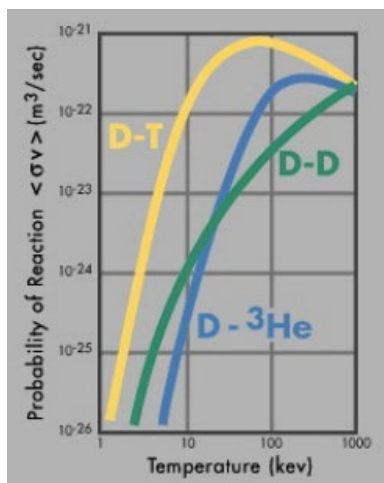
Napjaink nukleáris atomerőműveiben fissziót alkalmazva alakítják az atommag kötési energiáit számunkra felhasználható állapotba. A fisszió, vagyis maghasadás során ^{235}U Uránizotópot hasítanak lelassított neutron ütköztetésével. A kölcsönhatás során a hasadvány anyagok mellett neutron is keletkezik, melynek segítségével láncreakció indul. A láncreakciót kordában tartva a felszabaduló kötési energiát hosszú távon képesek vagyunk hasznosítani. A termelődő hő mellett számos sugárzó, köztük mérgező anyag is keletkezik, melynek mennyisége egy főre vetítve minimális, ugyanakkor akár 100000 éves biztonságos tárolást igényel. Az említett komoly hátránya miatt jogosan merül fel ellenérzés, emiatt a megítélése igen megosztó.

1.1. A fúzió

Fúzió során nem keletkezik radioaktív hulladék és az energiasűrűség is nagyobb. A csillagok példája jól mutatja a folyamat hatékonyságát. A legegyszerűbb formája két proton egyesülése. Ilyenkor az egyik proton béta bomlásnak köszönhetően neutronná alakul, és egyesülve a másik protonnal deutérium jön létre. Mivel a proton béta bomlásának valószínűsége igen csekély, emiatt a Nap kevesebb mint 1 W/m^3 teljesítménysűrűséget produkál. Sajnos ez a Földi energiatermelésre túlságosan lassú, nem alkalmas.

Az első részecskegyorsítóknak köszönhetően nagy mennyiségű szisztematikus tesztet hajtottak végre. Bebizonyosodott, hogy a deutérium, mely egy proton és egy neutron kapcsolatából áll, relatíve lazán kötött és béta bomlás nélkül is nagy valószínűséggel képes fuzionálni, mely alkalmassá teszi a Földi hasznosításra is. A legnagyobb energia felszabadulás a deutérium-trícium illetve deutérium-hélium 3-as izotópjá esetében történhet meg. Fisszióval ellentétben nem alakul ki láncreakció, folyamatos energia betáplálást igényel (valamilyen probléma esetén a reakció leáll). Az atommagokat az elektrosztatikus kötés taszítja, ezt a Coulomb gátat legyőzve történhet meg a reakció. A valóságban azonban az alagúteffektusnak köszönhetően kisebb energiaszint esetén is létrejöhet az egyesülés, ha elég közel kerülnek egymáshoz a magok.

A fúziós reakció küszöbenergiája 10-100 keV körüli. Erre az értékre gyorsítva részecskéket és ütköztetve céltárgyal létre jöhet ilyen reakció. Részecskegyorsítóval történő energiatermelő reaktor koncepciója azonban nem reális, a nyereség csupán 1-2% körüli, ugyanis az ütközés csak az esetek nagyon kis százalékában valósulhat meg a Coulomb taszítás miatt. A gyorsított részecske elveszíti energiáját, és többet már nem képes reakciót kiváltani. Fúziós energiát csak termikus közegben lehetséges létrehozni, ahol a részecskék között a Coulomb taszítás nem von el energiát, hanem eloszlatja azt a részecskék között. Az egy részecskére jutó energia kiszámítható $\frac{3}{2}kT$ módon (k – Boltzmann állandó, T – hőmérséklet). Ahhoz, hogy a küszöbenergiát megugorhassuk azonban a hőmérsékletet kell emelnünk, esetünkben 100 millió Kelvin nagyságrendűre.



2. ábra: Néhány fúziós folyamat reakció rátája (a termikus eloszlásra átlagolt hatáskeresztmetszet-sebesség szorzat) a hőmérséklet függvényében [1].

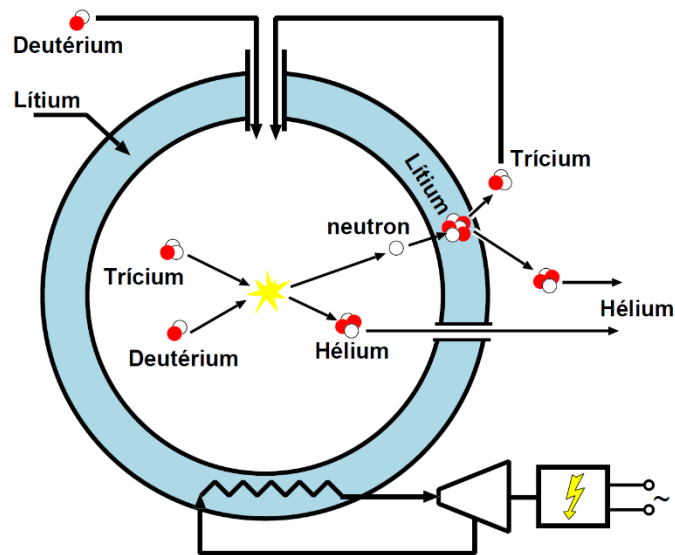
Az ábrán is egyértelműen látszik, hogy a deutérium és trícium egyesítése a legalkalmasabb energiatermelésre, hiszen hatáskeresztmetszete a legnagyobb, illetve alacsonyabb küszöbenergia mellett is beindul a reakció. Ugyanakkor érdemes megjegyezni, hogy amíg deutériumból emberi léptékben nézve korlátlan mennyiség áll rendelkezésre (minden 6000-edik hidrogén molekula deutérium, természetes vizekből nagy mennyiségben kivonható), addig a trícium rövid bomlási ideje (12 év) miatt csak rendkívül kis mennyiségben fordul elő a környezetünkben [1].

1.2. Fúziós erőművek koncepciója

A fúziós reakció energiataralma hatalmas, 1 GW teljesítmény fenntartásához naponta mindössze 1 kg üzemanyagra van szüksége. A korábbiakban már beláttuk, hogy üzemanyagként trícium és deutérium szolgálhat. Míg a deutérium nehésvízből nagy mennyiségben nyerhető ki, addig a trícium a kis bomlási ideje miatt rendkívül csekély mennyiségben fordul elő a természetben. Az anyagot tehát mesterségesen kell előállítani. Fissziós CANDU típusú erőművek is alkalmasak erre a célra, de ipari méretben ezek sem megfelelőek a szükséges mennyiség biztosítására. Tríciumot a D-T reakció során keletkező neutronból és lítiumból lenne célravezető tenyészteni:



Tehát a lítium segítségével a fúzióhoz szükséges trícium is előteremthető, ezt szemléltetendő a 3. ábra egy fúziós erőmű elméleti vázlatát ábrázolja. A kiinduló anyagok deutérium és lítium, míg a termék hélium. A lítium köpeny alkotja a berendezés falát, mely így részt vesz a trícium fejlesztésében. Sugárvédelmi szempontból sincs megoldhatatlan probléma a csak kis mennyiségben keletkező radioaktív trícium miatt. A keletkező hőt a köpeny vízhűtése formájában lehetne kivonni a rendszerből, amit a hagyományos módon (gőzfejlesztés, gőzturbina) hasznosíthatunk.



3. ábra: A fúziós erőmű elméleti vázlata [1].

A fúziós berendezésekben nagy mennyiségű neutron nyelődik el a köpenyben, körülbelül hatszor több, mint a fissziós erőművekben, és ezek közül azok, amelyek nem vesznek részt a trícium termelésben roncsolhatják, megváltoztathatják a szekezeti jellemzőket, illetve bizonyos magreakciók kiváltása során radioaktív anyagokat is fejleszhetnek. Az elmúlt évtizedek tapasztalatai alapján a köpeny nem lesz képes kibírni a reaktor teljes életciklusát, így azt meghatározott időközönként cserélni szükséges majd.

1.3. Alapvető fogalmak

Ahhoz, hogy az erőmű alapvető koncepcióját, ennek az extrém közegnek ellenálló teret részletesen le tudjuk írni, be kell vezetnünk néhány alapfogalmat, mely a reaktorban létrehozni kívánt fúziós reakcót jellemzi.

Az energia sokszorozását a Q tényezővel szokás jellemezni, mely a felszabaduló fúziós teljesítmény és a fűtési teljesítmény hányadosaként áll elő:

$$Q = \frac{P_{ext}}{P_f} \quad (3)$$

(P_{ext} – fűtési teljesítmény, P_f – fúziós teljesítmény)

A felszabaduló energia mintegy 20%-a alfa részecske formájában jelenik meg, azonban ha a töltött részecskéket egyben tudjuk tartani, akkor az alfa részecskék fűtése meghaladhatja a veszteségeket. Ettől kezdve a plazma önfenntartóvá válik, nincs szükség külső fűtésre. Ezt a pontot begyújtásnak (ignition) nevezik, és ekkor $Q = \infty$. Ha a megfelelő összetartás, és gázösszetétel fennmarad, a plazma stabil állapotban marad, csupán a friss üzemanyagot szükséges betáplálni, illetve a leadott He magokat kiszívni. Ebben az állapotban fúziós égésről beszélünk.

A felszabaduló P_f fúziós teljesítményt a következő képpen írhatjuk fel a termikus sebességeloszlásra kiátlagolt reakcióráta segítségével:

$$P_f = V \left(\frac{n}{2}\right)^2 \cdot C(T) \quad (4)$$

(V – térfogat, n – sűrűség, $C(T)$ – reakcióráta)

A közeg energiavesztését az energiaösszetartási idővel jellemezzük, mely a megmutatja, hogy a közeg milyen ütemben veszíti el az energiáját:

$$\tau_E = \frac{W_{tot}}{P_v} \quad (5)$$

(P_v – veszteségi teljesítmény, W_{tot} – teljes belső energia)

Vizsgáljuk meg, hogy a fúziós teljesítmény mikor lesz R -szerese a veszteségi teljesítménynek:

$$R P_v = R \frac{W_{tot}}{\tau_E} = R \frac{V \frac{3}{2} n k T}{\tau_E} < P_f = V \left(\frac{n}{2}\right)^2 C(T) \quad (6)$$

$$n \tau_E > R \frac{6 k T}{C(T)} \quad (7)$$

A hőmérséklet növelésével a jobb oldal csökken, majd egy minimum pontot követően nőni kezd. A minimum értékre vett, $R = 1$ esetén a kifejezést Lawson-kritériumnak hívják, vagyis a bal oldali szorzatnak egy adott értéknél nagyobbobbnak kell lennie („breakeven” pont). Ilyenkor a közeg fúziós teljesítménye meghaladja a veszteségi teljesítményt, azonban az önfentartóságot még nem érte el, ugyanis a fúziós teljesítmény csupán 20%-a fordítódik alfa fűtésre, a maradék 80%-ot neutron sugárzásával leadja.

Tegyük fel, hogy: $P_v = \frac{P_f}{5} + P_{ext}$ (P_{ext} – kívülről alkalmazott fűtés)

$$n \tau_E > \frac{Q}{1 + \frac{Q}{5}} \frac{6 k T}{C(T)} \quad (8)$$

Ebben az esetben is Lawson-kritériumot kapunk, azonban a küszöbszám fúziós égés esetén ötször magasabban van. A Lawson-kritérium tehát megadja a reaktor működésének feltételét. Az optimális hőmérséklet közelében a jobb oldal $1/T$ -vel közelíthető, ezért az $n \tau_E T$ hármasszorzatot a berendezések teljesítményének összehasonlítására szokás felhasználni.

De mit is jelent pontosan az anyag ilyen extrém hőmérsékletű állapota? Ahogy, már korábban említettem, a gáz részecskéinek kinetikai energiája 10 keV nagyságrendű. Egy elektronvolt azt az energiát jelenti, amivel egy elektron rendelkezik, mialatt egy Volt potenciálon halad át ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Az említett 10 keV lényegesen nagyobb az adott elemekben lévő elektronok kötési energiájánál (hidrogén esetében 13.6 eV-nál). Emiatt a közegben az atommagokról leválnak az elektronok, és egymástól független ionok és elektronok keveréke jön létre. A anyagnak ezen állapotát nevezzük plazmának, amely az anyag negyedik halmazállapota is egyben.

Hőmérséklet szempontjából 1 eV körülbelül 10000 K-nek felel meg. Ennek megfelelően 10 keV 100 millió Kelvin nagyságrendbe tartozik. Ilyen hőmérsékletet kell fenntartani a fúziós reakcióhoz.

A plazma bizonyos tekintetben hasonlít a gáz halmazállapothoz, hiszen szabad részecskék egyvelege. A töltés-szétválasztódás, és az egyes részecskék koncentráció különbsége miatt erős elektrosztatikus tér alakulhat ki a rendszeren belül. A gázoktól eltérően a keltett mágneses és elektromos terek a plazma mozgását is megváltozathatják. Elég ritka gáz esetén az elektronok hosszú úton képesek gyorsulni ütközés nélkül, így amikor másik gázzal találkoznak elegendő energiával rendelkeznek további elektronok leválasztásához, és ez a lavina tovább tud terjedni a teljes rendszeren. Ezt a jelenséget kisülésnek, angolul breakdownnak nevezzük, mely fontos szerepet játszik a plazma létrehozásában [1].

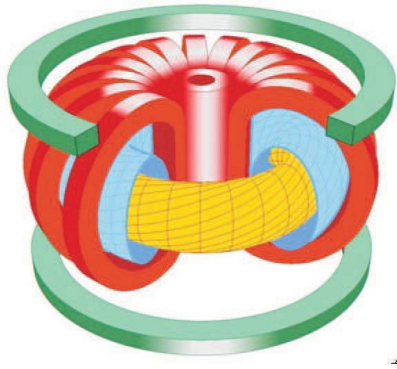
1.4. A reaktorok típusai

A plazma összetartását mágneses terekkel tudjuk biztosítani. A tér jelenlétében a töltött részecskék helikális (úgynevezett Larmor) mozgást végeznek, míg az erővonal mentén szabadon mozognak. Megfelelően erős mágneses tér esetén a Larmor pálya átmérője annyira lecsökken, hogy a részecskék nagy része a mozgás során nem érintkezik a berendezés falával. Ha ezt a mágneses térrel átjárt csövet kör mentén meghajlítjuk, tóruszt kapunk, így az anyag a rendszerből a mozgás során nem távozik.

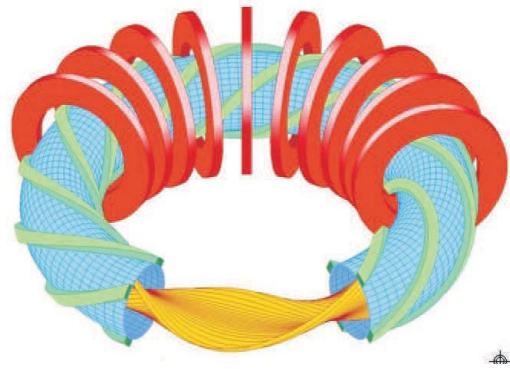
A hajlítás miatt azonban a mágneses tér inhomogén lesz, ami töltés szétválasztódást, illetve függőleges elektromos teret idéz elő. Ennek következtében a plazma anyaga a berendezés falába csapódik. Ezt a jelenséget ki tudjuk küszöbölni, ha az erővonalakat is megcsavarjuk úgy, hogy azok a tóruszt egy toroidális körbefordulás alatt poloidálisan is bejárják, így a plazma alsó és felső része között a töltésszétválasztódást rövidre zárja az erővonalak menti mozgás. Az ilyen módon megcsavart erőteret kétféleképpen tudjuk előidézni.

A tokamakoknál (Toroidalnaja Kamera sz Magnyítnümi Katuskami – toroidális kamra mágnes tekercsekkel rövidítése oroszul, *4. ábra*) a csavarodást toroidális plazmaárammal biztosítják tipikusan transzformátor indukciója segítségével, ezért ez a berendezés eredendően impulzus üzemű. Hátrányaként jelenik meg a plazmaáram okozta instabilitások, például a diszrupció.

Ugyanez a szellarátoroknál (*5. ábra*) külső tekercsekkel történik, azonban ezen szerkezet gyakorlati megvalósítása rendkívül bonyolult, hatalmas számítási kapacitást igényel, melyet csak az utóbbi évtizedekben sikerült az informatika fejlődésével biztosítani. Ugyanakkor érdemes megemlíteni, hogy a sztellarátor folyamatos üzemű, nincs hajtott plazmaáram és diszrupciók sem jelentkeznek, szemben a tokamakokkal [1].



4. ábra: A tokamak szerkezeti felépítése.



5. ábra: A sztellarátor szerkezeti felépítése.

2. ITER

2.1. Története

A gyakorlatban is működő fúziós reaktor nemzetközi szinten való megvalósításának gondolata először 1985-ben merült fel. A novemberben megrendezett amerikai-szovjet genfi csúcstalálkozón a szovjet főtitkár, Gorbachev vetette fel a fúziós energia békés célokra való hasznosításának lehetőségét az amerikai elnöknek, Ronald Reagannek. Egy évvel később megegyezés született a Szovjetunió, az Egyesült Államok, az Európai Unió, és Japán között egy közösen megvalósítandó kísérleti berendezésről. A projekt az ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) nevet kapta.

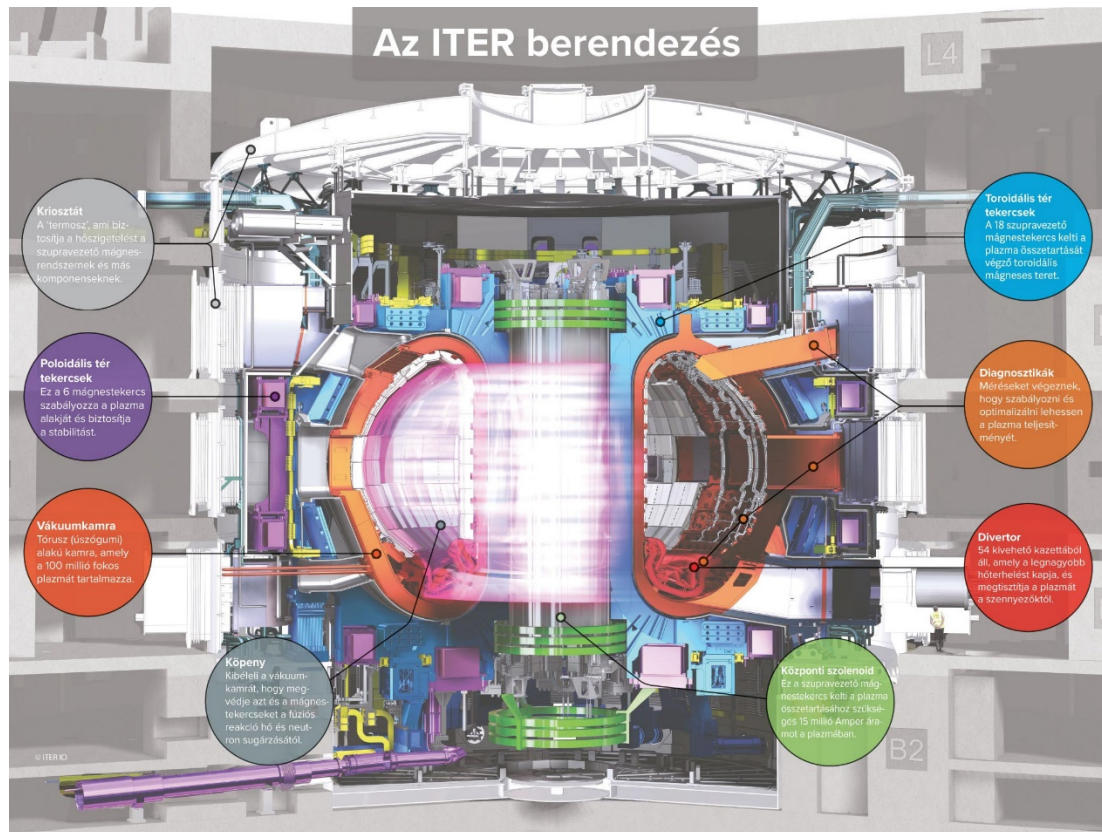
1988-ban megkezdődött a berendezés koncepciójának kidolgozása, de a végső kirészletezett tervek csak 2001 márciusára lettek elfogadva a tagok által. A projekthez 2003-ban Kína és a Koreai Köztársaság, majd 2005-ben India is csatlakozott.

A reaktor megépítésének helyet adó területről hosszas tárgyalások után végül 2005-ben döntöttek a Dél-Franciaországi Aix-en-Provence mellett. Az ekkoriban elsőnek a helyszínrre érkező csoportoktól, a 2010-ben kezdődő építésig a projektet alkotók száma 500 főre nőtt. 2021-re azonban már több ezer ember működik közre szerte a világban nem csak az építési területen, de az egyes tagországokban is az eddigi legnagyobb, és legfejlettebb kísérleti fúziós reaktor megvalósításában [2].



6. ábra: Az ITER építési területe a franciaországi Cadarache közelében [4].

Az ITER lesz az első olyan fúziós berendezés, mely képes lesz nettó energiát termelni, vagyis a reakció során felszabaduló energia meghaladja majd a befektetett energia mértékét. Nem fog viszont elektromos energiát termelni kereskedelmi hálózatra, célja csak a reaktorban kialakuló körülmények vizsgálata. Úgy tervezték, hogy elődeitől eltérően hosszabb ideig is képes legyen fenntartani a fúziós reakciót, valamint integrált technológiákat, anyagokat, és fizikai elméleteket teszteljenek rajta, melyek elengedhetetlenek a jövőben megépíteni kívánt erőművekben lejátszódó folyamatok szimulálására. Annak érdekében, hogy a megfelelő mennyiségű energiát elő lehessen állítani, a korábbiaknál jóval nagyobb eszközre van szükség. A megnövekedett méretek az alábbi képen (7. ábra) is szembetűnőek.



7. ábra: Az elődeitől jóval nagyobb tokamak berendezés, az ITER szerkezetének keresztmetszete látható. A jobb alsó sarokban található figura szemlélteti a berendezés méreteit [3].

Az ITER kísérlet elsődleges céljai:

- 50 MW befektetett teljesítmény és $Q = 10$ -es energia sokszorozási tényező mellett 500 MW hasznos fúziós teljesítmény felszabadítás
- integrált technológiai elemek tesztelése, például: fűtő, és vezérlő berendezések, diagnosztikák, egyéb biztonsági eszközök.
- fúziós égés állapotának demonstrálása D-T reakció során
- trícium tenyésztés technológia teszt a reaktor egyes köpeny elemeiben
- demonstrálni a fúziós erőmű biztonságosságát, főként a jelenlegi fission erőművekkel szemben [3]

2.2. Szerkezeti felépítése

Az ITER egy tokamak típusú kísérleti reaktor. A több, mint 23000 tonna tömegű szerkezetben 840 m^3 térfogatú tórusz alakú plazma foglal helyet 6,2 méteres nagysugárral. A 100-200 millió Kelvin hőmérsékletű közeg összetartását körülbelül 5 T indukciójú mágneses tér biztosítja a környezettől elszigetelten az acél vákuum kamra belsejében. A vákuumkamra a hőterhelése még a belső vákuum tér ellenére is hatalmas mértékű. Emiatt az 5200 tonnás acélszerkezetet folyamatos vízhűtéssel védik, ez által a felfogott hő kivonása a rendszerből is lehetségessé válik. Amellett, hogy ez képezi a vákuum határt, illetve az elsődleges védőfalat a

tríciummal szemben, a különböző közvetlenül plazmára néző berendezéseknek (köpeny, diagnosztikák, stb.) is illesztési pontot biztosít.

A vákuum kamra belső felületén található a köpeny. A 440 modulból álló védelmi rendszer megóvjja a nagy energiájú neutronoktól az acélszerkezetet, lassításuk következtében kinetikus energiájukat hővé alakítja, mely aztán a vízhűtéssel elszállíthatóvá válik. A felszíne berillium, még az alsóbb rétegei réz és rozsdamentes acélból épülnek fel. Egyes köpeny modulokban fogják a trícium tenyésztését is tesztelni.

Az üzemanyag összetartásáról, illetve annak a reaktor belső felületitől való elszigeteléséről szupravezető mágnesek gondoskodnak, melyeknek össztömege eléri az 500 tonnát. Ezen mágneses tér képes akár 51 GJ energiát is tárolni. A nióbium-ón és nióbium-titániumból készült elemek szupravezető képességüket kriogén, 4 Kelvin körüli hőmérsékleten érik el.

A mágneses tér fenntartásához szükséges teret több mágnes rendszer együttesen biztosítja. A legnagyobb tömeget a toroidális mezőért felelős rendszer képezi. A 18 darab D alakú mágnes a vákuum kamra körül helyezkedik el. A poloidális mezőt 6 darab poloidális tekercs gyűri hozzá létre, közvetlenül a toroidális tekercsek mögött a szerkezetre ráilleszkedve. Ezen tekercsek legnagyobbika a 24 méteres átmérőt is eléri.

A reaktor tórusz alakjának belsejében helyezkedik el a központi szolenoid, mely tulajdonképpen az ITER mágneses rendszerének gerincét jelenti, és felelős a 15 MA plazmaáram keltéséért is. A 6 különálló tekercs össztömege 974 tonna, magassága 18 méter. Az egész szerkezet külső felületét további korrekciós tekercsek is bővítik. Ezek a mágneses tér kisebb eltéréseit, zavarait hivatottak módosítani, javítani.



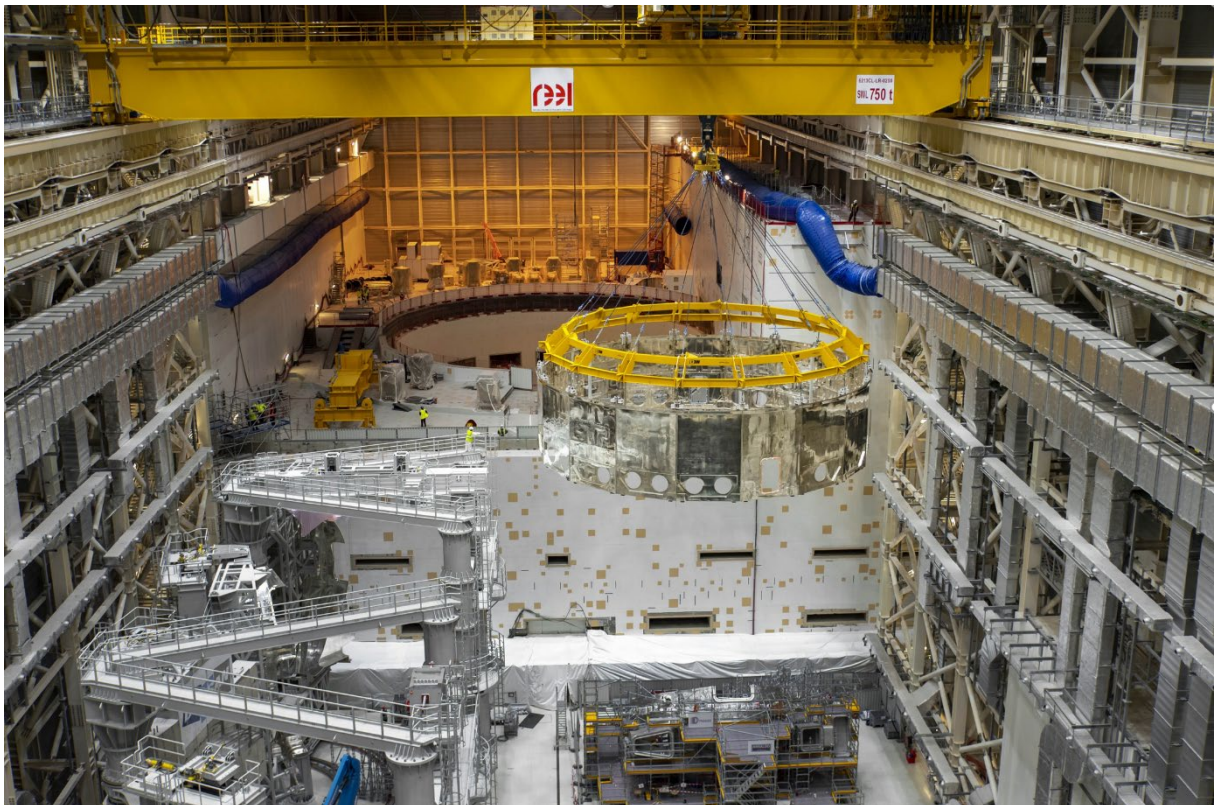
8. ábra: Az ITER egyik toroidális tekercsének acél burkolata, 2018 május [4].

Érdemes megemlíteni, hogy a szupravezető rendszer működéséhez, irányításához nagy mennyiségű elektromos energiát, és egyéb üzemanyagot, például az abszolúthoz közeli hőmérsékletre hűtéshez kriogén folyadékokat kell betáplálni. Ezen szükségletek pótlására egy speciális, az extrém körülményeknek is ellenálló adagoló rendszert terveztek.

A szupravezető mágnes rendszert egy a vákuum kamrán belüli nem szupravezető tekercs rendszer is kiegészíti. Feladata további plazma szabályozása bizonyos plazma instabilitások legyőzése érdekében.

Az ITER tokamakjában a divertor kapja a legnagyobb hőterhelést, körülbelül 10-szer nagyobbat, mint amit az űrsikló visszatéréskor elvisel, emiatt a köpenytől eltérően volfrámból készülnek. Ilyen kazettából a vákuum kamra aljában 54 darab található, egyenként 10 tonnás tömeggel. A divertor feladata a hőszugárzás felfogása mellett, a keletkező hélium és az esetleges szennyeződések elvonása a reakció térből.

A szupravezető tekercsek hőszigeteléséhez vákuum szükséges. Ezt a környezetet a kriosztát acélszerkezete biztosítja számukra, mely lényegében az egész reaktor külső vázát képezi 30 méteres átmérőjével és 29 méteres magasságával.



9. ábra: A kriosztát egyik alsó elemének bemelése zajlik az ITER összeszerelő csarnokában 2021 januárjában [4].

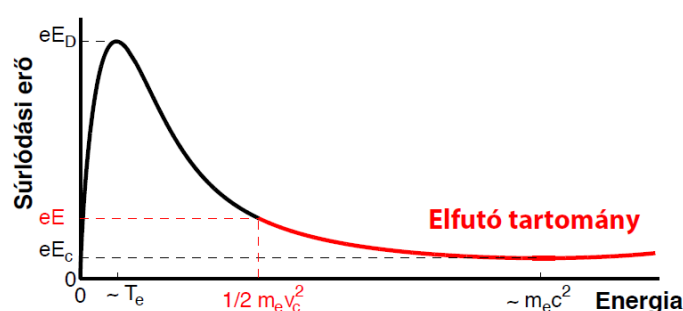
Az építkezés hatalmas nehézségét jelenti, hogy az eddig nem látott méretek miatt minden egyes szerkezeti elemet teljes mértékben egyedileg kell megtervezni, nem csak a kriosztáton belüli rendszereket, melyek technológiailag is úttörőnek számítanak, de a kriosztáton kívüli támogató rendszereket, vezérlést, diagnosztikákat is, valamint a megaprojektért felelős nemzetközi infrastruktúrát is alapjaitól kezdve kellett kiépíteni. A nemzetközi összefogásban

résztevő tagállamok különböző egységelemek elkészítését vállalták, így azok gyártásának összehangolása is jelentős szervezői munkát igényel [3].

3. Plazma diszrupciók

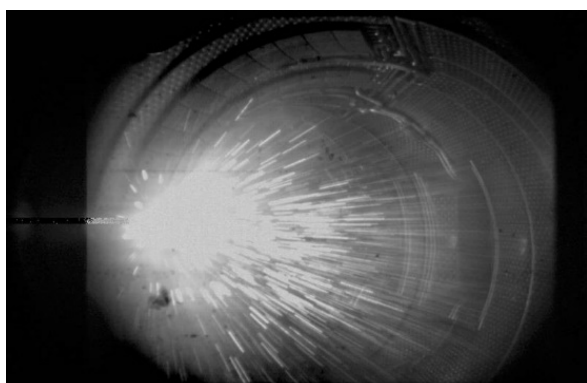
3.1. Elfutó elektronok

A plazmában egy v sebességű elektronra ható súrlódási erőt az ionokkal való ütközés okozza. Jól látható az 10. ábra diagramján, hogy a sebesség és a súrlódási erő között nem monoton függvény-kapcsolat alakul ki. Ennek következtében egy bizonyos határsebesség felett a súrlódási erő csökkeni kezd. Relativisztikus hatások miatt ez az erő nem éri el a zérus értéket, minimum értékét a nyugalmi energia nagyságrendjében veszi fel.



10. ábra: A súrlódási erő az elektron kinetikus energiája függvényében [1].

Egy E elektromos térben v_c kritikus sebességgel haladó elektron nagyobb gyorsító erőt tapasztal, mint a rá ható súrlódási erő. Az ütközési frekvencia a sebesség növekedésével csökken, így az ütközések között egyre több idő van energiát nyerni. Az ilyen módon közel relativisztikus sebességre felgyorsuló elektronokat elfutó (runaway) elektronoknak nevezzük [1].



11. ábra: Elfutó elektronok okozta károsodás a Tore Supra tokamakon (Copyright EURATOM-CEA.) [1].



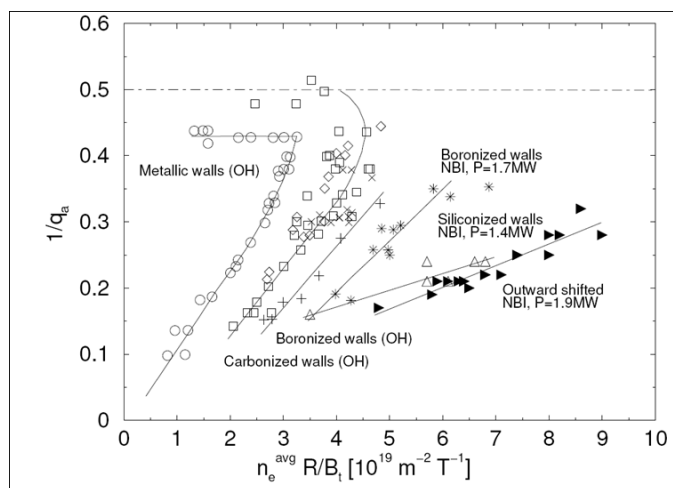
12. ábra: Elfutó elektron által megolvastott berendezés elemek a JET tokamakon [5].

Ezek a nagy sebességű részecskék végül nagy energiával becsapódhatnak a szerkezet belső felületeire, ahol kinetikus energiájukat hő formájában leadva lelassulnak. A

megnövekedett hőterhelésnek köszönhetően a burkolati elemek megolvadhatnak, komoly károsodást szenvedhetnek (11. ábra, 12. ábra).

Az elfutó elektronok keletkezéséhez (relativisztikus hatásokat figyelembe véve) az elektromos tér gyorsító erejének nagyobbak kell lennie, mint a közel fénysebességgel haladó elektronokra eső súrlódási erő. Termikus Maxwell eloszlású elektronok többségére ez nem teljesül, így a normál tokamak működése során elfutó részecskék is csak kis számban képződnek. Azonban, ha valamilyen okból a plazmaösszetartás rövid idő alatt leromlik, akkor lehűlő plazma vezetőképessége is hirtelen lecsökken. Az önindukció miatt hasonlóan kis időtartam alatt a plazmaáram nem képes lecsökkeni, erős elektromos tér keletkezik, mely meghaladhatja a kritikus tér értékét, és ezáltal nagy mennyiségű elfutó elektron keletkezhet. Mai berendezéseken végzett mérések szerint a plazmaáram akár 60%-a is elfutó elektron áramba konvertálódhat, ami az ITER esetén 10 MA áramot jelent. Ilyen erős elfutó elektron nyaláb jelentős károkat tud okozni a berendezésben.

A plazma teljes összeomlásához, más néven diszrupcióhoz különféle folyamatok vezethetnek, de alapvetően a plazmában folyó árameloszlás kerül instabil állapotba, és a perturbációk kritikusan elrontják az összetartó mágneses teret. Mivel az árameloszlást a plazmában zajló bonyolult hő- és részecsketranszport folyamatok határozzák meg, ezért az instabil tartomány meghatározása elméletileg még nem lehetséges. Mérési adatok alapján empirikus határokat állítottak fel, melyet például az alább (13. ábra) látható Hugill diagram mutat. A függőleges tengelyen jelzett normált elektronsűrűség érték felett következik be diszrupciós instabilitás, azonban valamilyen vezérlési hiba, kis szennyező anyag bejutása is rövid idő alatt diszrupciót okozhat. Ez a jelenség jelentősen korlátozza a fúziós berendezések működési tartományát [1].



13. ábra: A TEXTOR tokamak Hugill diagramja [1].

Egy olyan nagy tokamagnál, mint amilyen az ITER is lesz, sokkal több energia tárolódik, mint a mai berendezésekben, így egy esetleges plazma diszrupció alkalmával kiszabaduló nagy energiájú részecskék és elfutó elektronok jelentős veszélyt jelentenek számos plazmára néző komponensre nézve (Plasma Facing Components – PFC). A magas hőterhelés, és erős elektromágneses hatások megolvaszthatják divertort, köpenyt, illetve tönkre tehetik a

diagnosztikákat is. Ennek köszönhetően a tervezőknek egy megbízható, és hatékony stratégiát kell kidolgozni, azért hogy előrejelezzék és megelőzzék a veszélyt, végső esetben csökkentse a diszrupció által okozott terhelést (Disruption Mitigation – DM) [6].

3.2. Disruption Mitigation

A múltban már sikeresen alkalmaztak DM technológiákat, melyek eredményesen sugározták el a plazma energiáját valamilyen anyag betáplálásával. A legelterjedtebb eljárás során nagy mennyiségű gázt, deutériumot, neont, vagy argont eresztettek a vákuum kamrába (Massive Gas Injection – MGI). Ilyen eljárásra alkalmas berendezések lettek beépítve számos korábbi tokamakba is, mint például a DIII-D [7], JET [8], AUG [9], CMD[10] és a KSTAR[11].

Azonban az ITER esetén MGI rendszereket nem lehet elég közel telepíteni a kamrához a megnövekedett sugárzási és elektromágneses terhelés miatt amellet, hogy a plazma körüli portokban a helye is korlátos. Így a gáz beeresztés hatékonyság, és sebesség szempontjából sem megfelelő, még azelőtt lezajlik a diszrupció, mielőtt elég mennyiségű gáz bejutna a vákuum kamrába. További probléma, hogy a diszrupció elején a még forró plazmába a gáz nem hatol be elég mélyen, mivel a gázmolekulák ionizálódnak a plazma szélén.

A DM rendszerek egy továbbfejlesztett változata fagyasztva, szilárd állapotban juttat anyagot a plazma belsejébe, ráadásul rövidebb időtartamon belül. Ezek a tört pellet belövő (Shattered Pellet Injector – SPI) berendezések már bizonyították más tokamakokon (DIII-D [12], [13]), hogy hatásosabban képesek csökkenteni a diszrupció káros hatásait. Így a tapasztalatok alapján az ITER projektben is ezt a DM rendszert választották ki beépítésre. Az eszköz részleteiről a következő fejezetekben bővebben is értekeznek.

3.3. Shattered Pellet Injector

Az SPI rendszerek a gázt nagyon alacsony, abszolút 0-hoz közeli hőmérsékleten, szilárd halmazállapotban juttatják be a kamrába. A fagyasztás egy fém csőben alacsony nyomáson történik, majd mikor megfelelő mennyiségű gáz kondenzálódott a cső felszínén, kialakul a fagyasztott lövedék, a pellet. A cső ezáltal teljesen le van zárva. A pellet kilövése erős nyomásimpulzussal történik, amely egy bizonyos ponton áttöri a befagyott anyagot a cső fala mentén. A törést követően a felhalmozódott magas nyomás elkezd gyorsítani a lövedéket, amely így ezred másodpercek alatt megteszi cső teljes hosszát. A gyorsítási szakasz után a hajtógáz egy nagyobb vákuumtartályban kitágul, a pellet pedig belép egy másik csőbe, így minimalizálva a gáz bekerülését a plazmába. A második csőben a pellet állandó sebességgel közel vákuumban repül. A cső végén egy előre meghatározott fém lapba ütközik a pellet, aminek köszönhetően apró darabokra törik szét, és a darabok nagy térszög tartományban kerülnek be a plazmába [14].

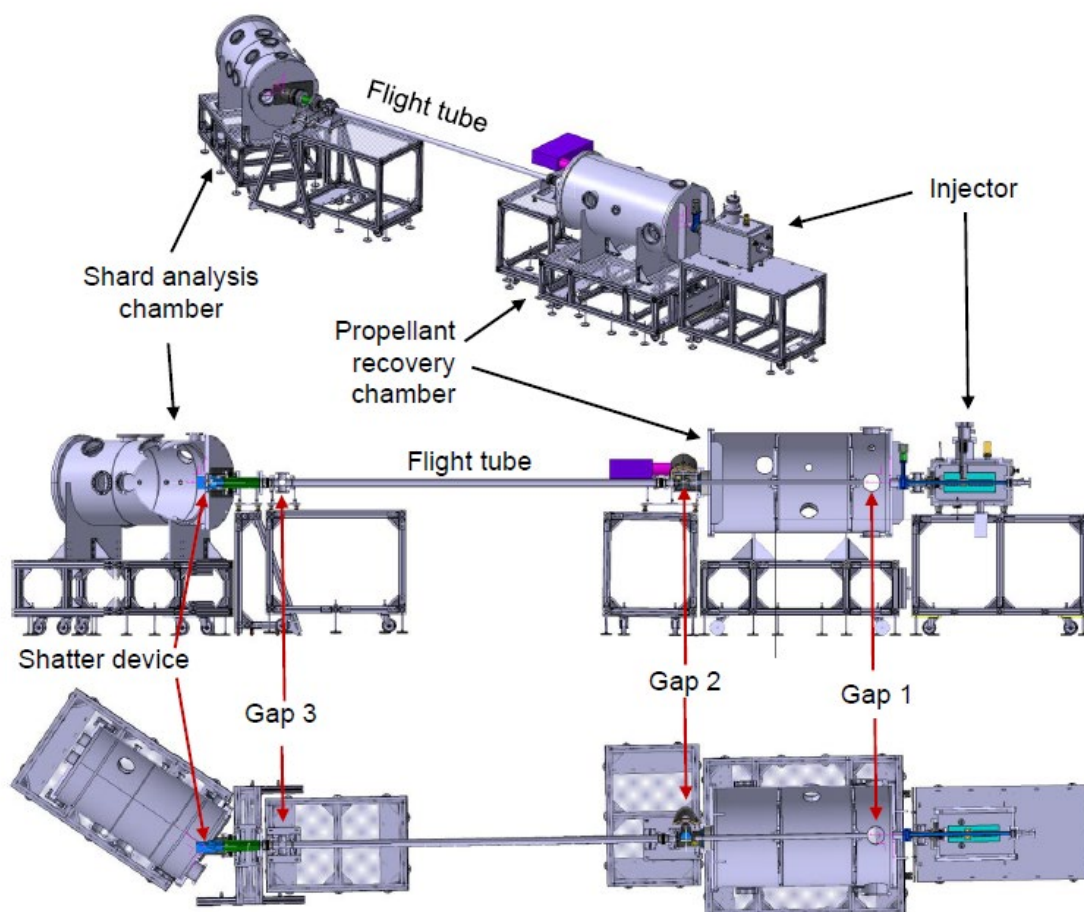
A pelleteket előrefagyasztva lehet tárolni hosszú távon, csupán a vákuum fentartásáért felelős szivattyúkat és a pellet felületi hőmérsékletének megfelelő telítési gáznyomást kell folyamatosan biztosítani. A diszrupciót érzékelő rendszerek a veszélyt érzékelve gyors beavatkozás szükségességét jelzik az SPI berendezésnek, amely belövi a pelletet. A koncentrált

alacsony hőmérsékletű lövedékek hatékonyan, és gyorsan képesek megvédeni a nagyobb hőterheléstől a kamra belső szerkezetét. A művelet a másodperc tört része alatt végrehajtható.

Az ITER, látván az ígéretes eredményeket a különböző szilárd pellet belövő rendszereknél, pályázatot hirdetett egy a saját tokamak reaktorához illeszkedő méretű SPI prototípus megtervezéséhez, és megépítéséhez, valamint az azt követő aktív tesztelési ciklus végrehajtásához. A tendert a magyarországi Energiatudományi Kutatóközpont (EK) Fúziós Plazmafizika Laboratóriuma (FPL) nyerte el 2020 őszén. Nem sokkal később elkezdődtek a munkálatok.

A rendszer műszaki szempontból 5 blokkra osztható:

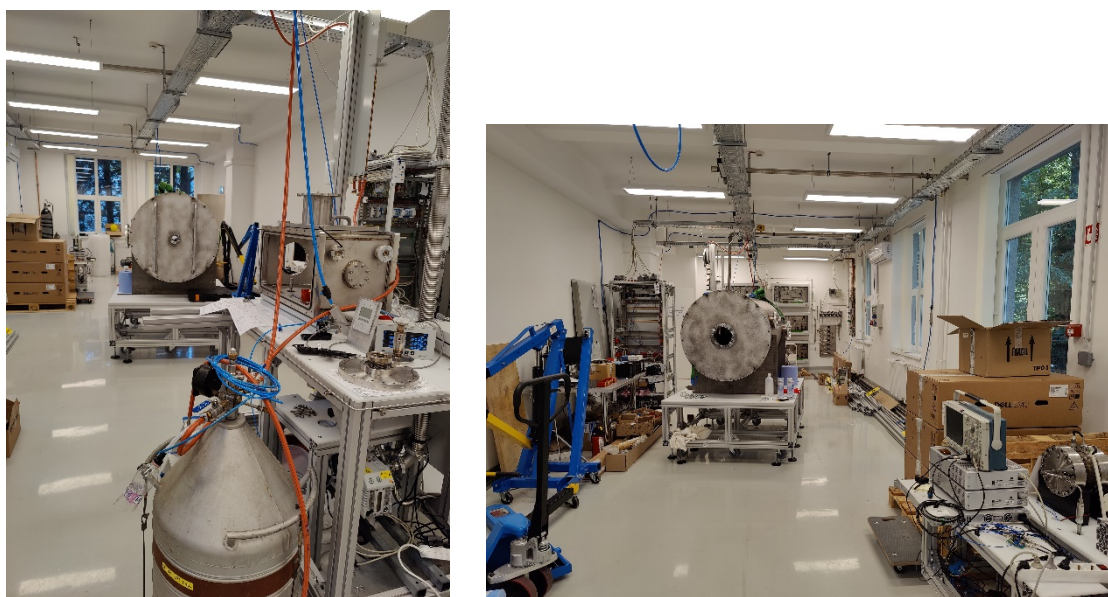
- injektor (gyorsító cső, kriosztát, cold head, gyors szelep)
- hajtógáz kivonó tartály (gap 1, diagnosztikák)
- repülési cső (gap 2, diagnosztikák)
- ütköztető berendezés (gap 3, diagnosztikák)
- szórást analizáló kamra (szórást vizsgáló diagnosztikák)



14. ábra: Az Energiatudományi Kutatóközpont Fúziós Plazmafizika Laboratórium jelenleg is épülő SPI berendezésének felépítése látható [16]. A képen a szelep illetve buffertartály nem szerepel, a valóságban az

injektor jobb oldalán látható csőre van rá erősítve. Az injektortól balra a hajtógáz elvonó kamra, illetve a repülési cső látható, melyet végül az ütköztető berendezés és a szórást analizáló kamra követ. A szerkezet számos pontjára helyeztek el diagnosztikai berendezéseket a fagyasztott pellet kilövés sajátosságainak vizsgálatára.

A pelletek alapanyagaként négy fajta anyag jöhet szóba, hidrogén, deutérium, neon és argon, de a közelmúlt mérései alapján (JET [17]) a gyakorlatban valószínűleg csak hidrogén és neon fagyasztás fog történni azok effektívebb energia disszipációja miatt. A pelletek lehűtése a Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI) egy másik intézetében előállított folyékony héliummal fog történni, melyet a hélium adagoló csövön (LHe Transfer Line) juttatnak az Injektor belsejébe. Az Injektor alapvetően egy vákuumkamra, így minimalizált hőcserét biztosít a környezettel. A kamra közepén lévő gyorsítási cső (barrel) szolgál a fagyasztás helyszínéül. A barrelt a cold head veszi körül egy rövid szakaszon, mely az érintkezési felületen a hélium segítségével kívülről hűti le azt. A cold head mellett lévő gáz adagolókon keresztül érkezik a pellet anyag gáz formájában, majd a lehűtött cső felületén kondenzálódik. Azért, hogy meghatározott hosszúságú pelleteket tudjunk létrehozni a barrel hevítésével két oldalról szabályozhatjuk a kondenzáció helyét és mértékét. A cső 19 mm-es átmérőjét nem lehet változtatni, de van lehetőség magát a csövet 28,5 mm-esre cserélni. Mindkét esetben az általános pellet hossz az átmérő kétszerese. A teljes fagyasztási műveletet figyelemmel lehet kísérni egy kamerával, amely a gáz kivonó tartályba szerelt kihúzható tükrön és egy ablakbetéttel rendelkező szelepen keresztül lát rá a fagyasztó csőre.

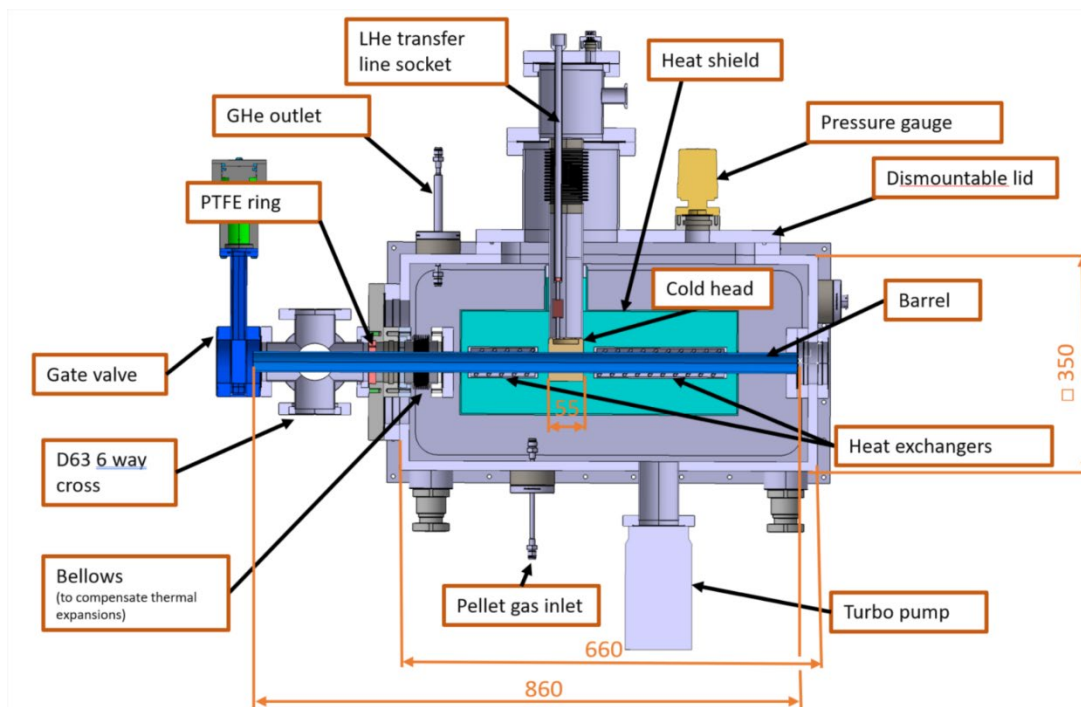


15. ábra: Készülőben az FPL SPI berendezése. Előbbi képen az injektor, a hűtésért felelős folyékony hélium tartálya, valamint a gáz elvonó kamra, míg utóbbi képen a gáz elvonó kamra túloldala látható.

Ha a pellet megfelelő méretűre nőtt megkezdődhet a gyors szelep nyitása. A szelepet az FPL munkatársai tervezték, az ITER projektől teljesen függetlenül. A szelep akár 150 bar nyomáson is képes szigetelni, majd néhány ezredmásodperc alatt nyitni, illetve zárni a 20 mm-es szelep nyílást. A nyitás axiális irányban történik elektromos impulzus segítségével. 2021 augusztusában már számos teszt zajlott le a gyors szelep vizsgálatával kapcsolatban. Mivel a szelep oldalában is be van építve egy nyílás a diagnosztikai vizsgálatok számára, így nagy sebességű kamerákkal videóra lehetett venni a szelep mozgásának karakterisztikáját. A

szisztematikusan végrehajtott tesztorozatban különböző nyomásviszonyok mellett, különböző elektromos impulzusokat használva lettek feljegyezve a szelep mozgási adatai.

A szelep nyitását követően a hajtógáz a buffertartályból beáramlik a vákuum alatt lévő csőbe, melyben a kritikus nyomást elérve áttöri a pelletet. A törés során a henger alakú pellet palástjának közelében fog elválni az anyag, így kisebb mennyiségű kondenzált szennyeződés még maradhat a csövön, melyet valószínűleg a fellépő nagy sebességű gáz áramok végül lefújnak a barrel oldaláról. Az injektort a 16. ábra részletesen is bemutatja.



16. ábra: Az injektor keresztmetszeti rajza látható (FPL adatbázisából). Középen látható a gyorsítási cső, barrel sötétkék színnel. Világosbarna színnel a barrel közepénél található a cold head, mely a pellet hűtéséért felel. A barrel jobb oldali végénél csatlakozik a gyors szelep, illetve a buffer tartály, melyeket ez a kép nem ábrázol. A cső hevítését, mellyel a pellet hosszát tudjuk szabályozni, a hőcserélők (Heat exchangers) biztosítják. A pellet a barrel bal oldala felé távozik a nyomás impulzus hatására.

A pellet az injektort elhagyva a több, mint 3 méter hosszú repülési csőbe jut. Az injektor és a repülési cső között hosszú rész található, amelyen keresztül a hajtógáz kijut a gáz visszanyerő kamrába. A csőben számos diagnosztikai berendezés előtt halad el, mielőtt becsapódna az ütköző berendezésbe akár 700-800 m/s sebességgel. A cső tengelyéhez képest 20 fokban elforgatott ütköző felületen előreláthatólag 35 fokos irányváltást szenvednek a szétesett lövedék részei, ehhez a szöghöz van igazítva az analízáló kamra is, de a modul más ütköző szöveget használva alkalmas akár a 60 fokos elforgatás beállítására is [15].

3.4. Pellet mérések az Oak Ridge National Laboratory-ban

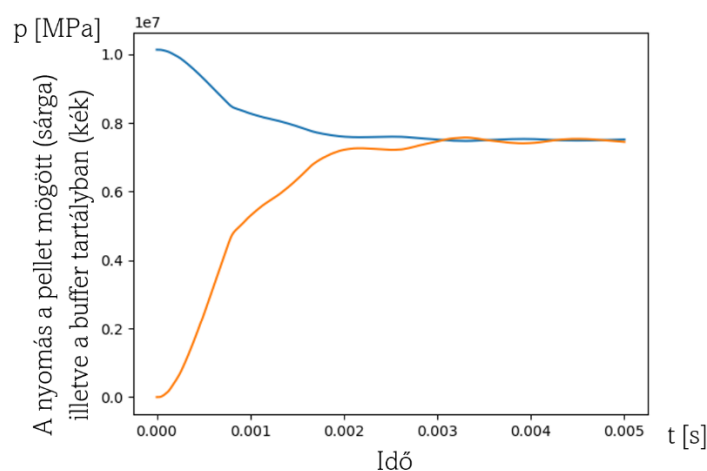
2021 márciusában az Egyesült Államok egyik kutató intézetében, az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban kriogén pelletek tulajdonságait vizsgálták. A céljuk az volt, hogy meghatározzák az SPI rendszerekben is alkalmazott anyagok alacsony hőmérsékleten

tanúsított szilárdsági tulajdonságait. A méréseket egyszerű erőmérő berendezésekkel végezték: a befagyasztott pelletet egy dugattyú segítségével áttörték. Ezt a műveletet számos anyagon (hidrogén, deutérium, neon, argon, kompozit), hőmérsékleten is elvégezték.

Az eredményekből arra lehet következtetni, hogy az anyagok nyíró igénybevételre vett ellenállását nagyban befolyásolja a hőmérsékletük. Erről a kapcsolatról a számításokat követően egy lineáris közelítést is le tudtak jegyezni, így ennek köszönhetően a különböző anyagoknál meg lehet állapítani a várható szilárdsági értékeiket a hőmérséklet függvényében [16].

3.5. OpenFoam számítások

Annak érdekében, hogy a gyors szelep nyitását követően fellépő gáz áramlási folyamatokat pontosabban le lehessen írni a geometriai sajátosságokat is figyelembe véve, az FPL az OpenFoam (Open-source Field Operation And Manipulation) programot vette igénybe. A több héten keresztül futó program számításainak köszönhetően megállapítható volt, hogy a beáramlás nem lineárisan változik a nyomáskülönbség függvényében, hanem egyfajta hullámmozgás tapasztalható. Továbbá a számítások arra is rámutattak, hogy a kezdetben vákuumba beáramló nagy nyomású hajtógáz sebessége akár a szuperszonikus tartományba is felugorhat rövid időre. A hirtelen betóduló nagy mennyiségű anyag a pellet falánál feltorlódik, a nyomás az egyensúlyi beáramlásnál jóval nagyobb (17. ábra). Az OpenFoam modellezéssel kapott gázáramlási eredményeket közelítőleg beépítettem a gyorsítási modellbe, hogy a nyomásváltozásról realisabb képet kapjak.



17. ábra: Az OpenFoam számítások egyik szemléletes diagramja. A sárga görbe a pellet mögötti nyomást, míg a kék görbe a buffer tartály nyomását hivatott ábrázolni. Egyértelmű, hogy az áramlás a két közeg között nem állandó, bizonyos hullámok figyelhetők meg, a

3.6. ASDEX Upgrade SPI kísérletek

Az ASDEX Upgrade egy Garching-ban található tokamak berendezés, mellyel az FPL munkatársai szoros szakmai kapcsolatban vannak. Ebben az intézetben is végeznek tesztek már elkészült SPI rendszerrel, azonban annak mérete jóval elmarad a EK-ban épülő mellett. A szerkezet kilövő berendezésében is van eltérés, ugyanis a pellet áttörését egy úgynevezett

hollow punch is segíti, mely tulajdonképpen egy bizonyos nyomás érték fölött aktiválódó cső, amely a gyorsítócső fala mentén elvágja a pellet anyagát. Ezzel csökkenti a pellet kilövéséhez szükséges nyomást. Az ASDEX Upgrade SPI belövővel sok száz mérést végeztek széles paramétertartományban. Ezeket az eredményeket össze tervezzük hasonlítani a dolgozat tárgyát képező modellel.

Utóbbi három fejezetben említett vizsgálatok során nyert eredményeket a kutatásom során nagy mértékben felhasználtam.

4. Gyorsításimodell-számítások

A pellet gyorsítása a korábban leírtak alapján csak az injektor csövében történik, itt szerzi meg az összes kinetikus energiáját. A pelletgyorsítási folyamatoknak közelítő vizsgálatára, a paraméteres függések tanulmányozására egy egyszerű 0 dimenziós modell készült az FPL-ben. A Python többcélú programozási nyelvben írt számítások során figyelembe vesszünk különböző paramétereket: pellet és hajtógáz anyagi jellemzők, barrel méretei, szelep mérete, nyitási karakterisztikája, buffertartály mérete, nyomása, hőmérséklete.

A fizikai modell a következő elemekből áll. A pellet addig nem mozdul meg, amíg egy bizonyos nyomás nem alakul ki az egyik oldalán (sticking pressure). Ezt a nyomás érték meghatározható az alábbi képlettel:

$$P_{stick} = 4\tau(T) \frac{L_p}{d_p} \quad (9)$$

Ahol P_{stick} a sticking pressure, L_p a pellet hossz, d_p a pellet átmérő, és τ az anyagra jellemző nyírószilárdság, mely a gyakorlatban hőmérséklet függő. A három adatot megadva megkapjuk, hogy mekkora nyomást kell elérnie a pellet mögött beáramlott hajtógáznak annak érdekében, hogy a pellet áttörjön.

A gyorsítás az áttörést követően elindul. A pellet gyorsulása, tehát sebességének megváltozása minden pillanatban:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{p \cdot A}{m} \quad (10)$$

(a – pellet gyorsulása, v – pellet sebessége, p – pellet mögött kialakuló nyomás, A – pellet felülete, m – pellet tömege, t – idő)

A fenti egyenletet felhasználva pontosan meghatározható adott nyomás mellett a pellet sebessége és pozíciója is minden időpillanatban. A pellet mögött kialakuló nyomás meghatározása azonban nem ennyire egyszerű.

A beáramló gáz részecskékről feltételezzük, hogy hangsebességgel haladnak.

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot kT}{m \cdot 1.6 \cdot 10^{-27}}} \quad (11)$$

(c – hangsebesség a közegben, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ a Boltzmann állandó, T – hőmérséklet Kelvinben, m – molekula tömeg)

Az előbb leírt adatok alapján kiszámítható a szelep keresztmetszetén átáramló anyag részecske fluxusa. Ez a fluxus függ a szelep aktuális nyitási állapotától is. Zárt állapotban zérus, nyitott állapotban a teljes nyitási keresztmetszete, a közbenső értékek a szelep pozíció szerint változnak. A szelep ebben a modellben lineárisan nyit zárt állapotból. A fluxus ismeretében azt is tudjuk, hogy adott időpillanatban mennyi részecske van a buffertartályban és mennyi a csőben:

$$dN = \varphi \cdot \Delta p \cdot dt \quad (12)$$

(dN – átáramló részecske szám, φ – fluxus, az egységnyi nyomáskülönbségnél az adott szelep nyitási állapotban, Δp – buffer tartály és barrel nyomása közötti különbség)

Az átáramló részecskeszám a buffertartályban található részecske számot csökkenti, míg a barrelben található növeli egészen addig, amíg a két közeg közötti nyomás ki nem egyenlítődik.

A gáz belső energiáját a bufferből érkező gáz növeli, míg a pellet gyorsítása az áttörést követően csökkenti (a kezdeti energia szint a barrelben 0-nak tekinthető a vákuumban, mely a gázzészecskek beáramlásával folyamatosan nő). Ez alapján a barrelben lévő gáz energiájának megváltozása:

$$dE = \gamma \cdot k \cdot T_{buffer} \cdot dN - dV \cdot p_{barrel} \quad (13)$$

(γ – gáz szabadsági foka, k – Boltzmann-állandó, T_{buffer} – buffertartály hőmérséklete, dV – barrel térfogatának változása a pellet mozgása következtében, p_{barrel} – nyomás a barrelben)

Az energia változásának ismeretében tehát meghatározható adott pillanatban a gáz hőmérséklete is:

$$T_{barrel} = \frac{E}{\gamma \cdot k \cdot N_{barrel}} \quad (14)$$

(T_{barrel} – gáz hőmérséklete a barrelben, N_{barrel} – barrelben lévő részecskek száma)

A hőmérséklet és a részecske szám ismeretében a barrelben és a buffertartályban is meghatározható a nyomás értéke:

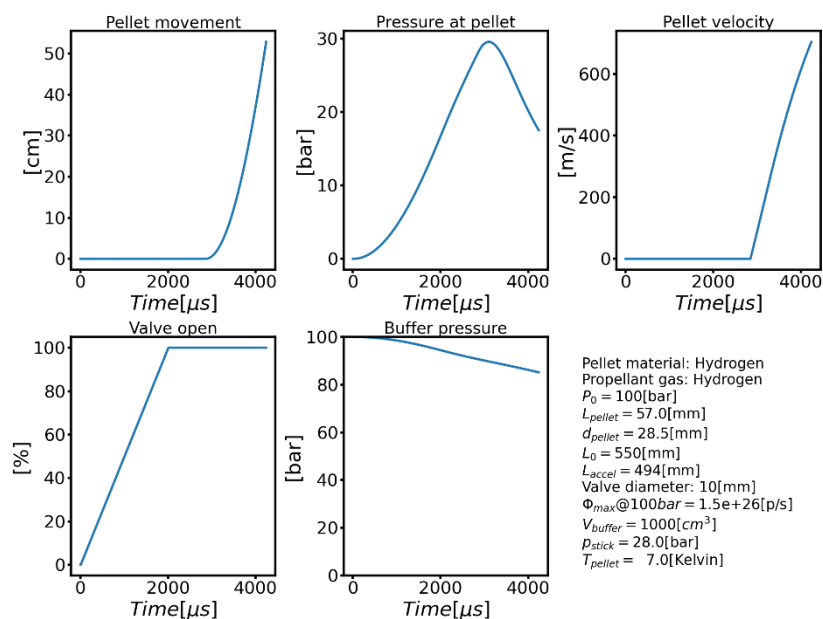
$$p_{barrel} = \frac{N_{barrel} \cdot k \cdot T_{barrel}}{V_{barrel}} \quad (15)$$

$$p_{buffer} = \frac{N_{buffer} \cdot k \cdot T_{buffer}}{V_{buffer}} \quad (16)$$

(V_{barrel} – a barrel térfogata, függ a pellet aktuális pozíciójától, V_{buffer} – buffertartály térfogata, N_{buffer} – bufferben lévő részecskek száma)

A program a kezdeti pillanattól kezdve időegységenként haladva előre, véges differencia módszerrel folyamatosan oldja meg a többismeretlenes egyenletrendszer és gyűjti ki a

felsorolt idő szerinti változókat egy-egy tömbbe, melyekről a későbbiek folyamán diagrammokat lehet rajzolni. A modell befejezi a számolást amint a pellet a cső végére ér, vagy az előre meghatározott számolási idő lejár [15].



18. ábra: Egyszerű pellet gyorsítási számítás a modell segítségével (a pellet pozíciója a csőben, a mögötte lévő nyomás, a sebessége, a szelep nyitási szintje illetve a buffer tartály nyomása az idő függvényében). Jól látható, hogy a bizonyos sticking pressure (2800 μs) elérése után elindul a pellet, a cső végére érve a program futása leáll. A jobb alsó sarokban olvashatók a modellben beállított paraméterek.

5. Kutatási Eredmények

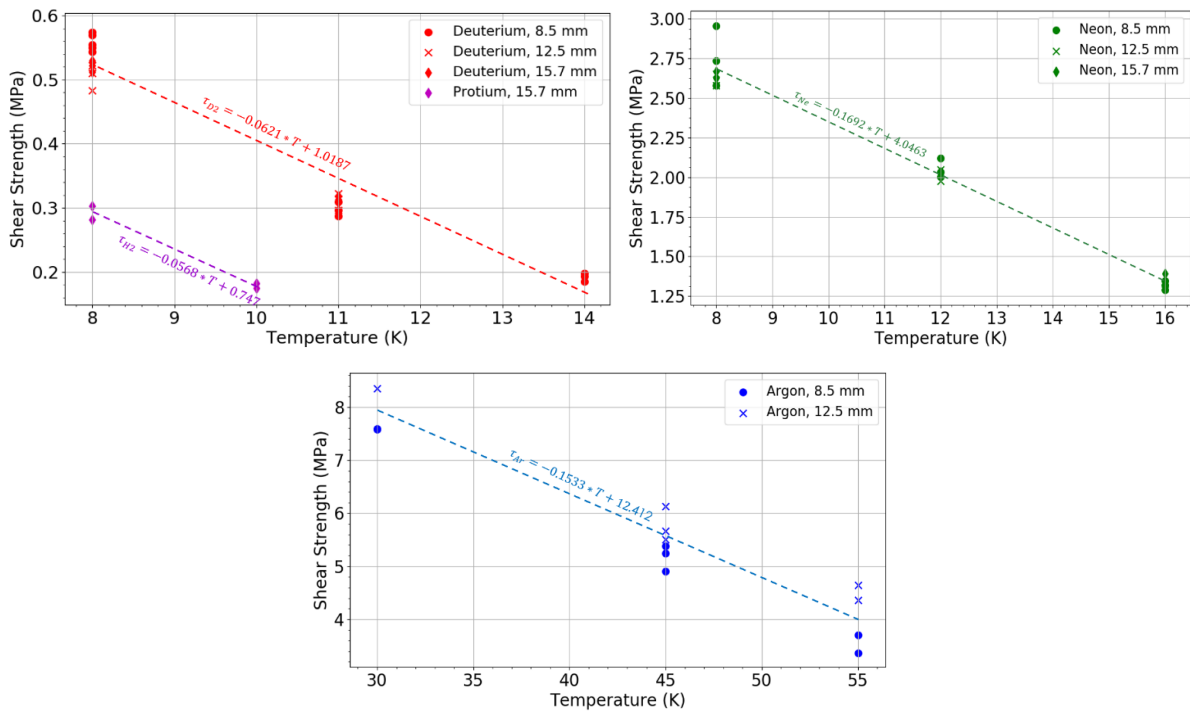
Korábban a paraméterek változtatásával csak kis mértékben lehetett változtatni a pellet gyorsítási cső végen elért sebességét. Ez az érték a modellezés alapján az SPI paramétereivel 800-1000 m/s-os nagyságrendben mozgott. Ebben a tartományban a pellet anyagának jelentős része az ütközéskor elpárolog, és nem jut be a plazma belső rétegeibe. Tehát az elsődleges célja a modellezésemnek ezen torkolati sebesség csökkentése volt.

5.1. Nyíró szilárdság hőmérséklet függése

A Pythonban megírt modell megismerése után, a már említett Oak Ridge National Laboratory tanulmányában meghatározott szilárdsági értékek beintegrálását végeztem el. A tanulmány szerint a τ nyíró feszültséggel szembeni szilárdság értéke függ az anyagi tulajdonságok mellett a hőmérséklettől is, alacsonyabb hőmérséklethez nagyobb nyíró szilárdsági tartozik.

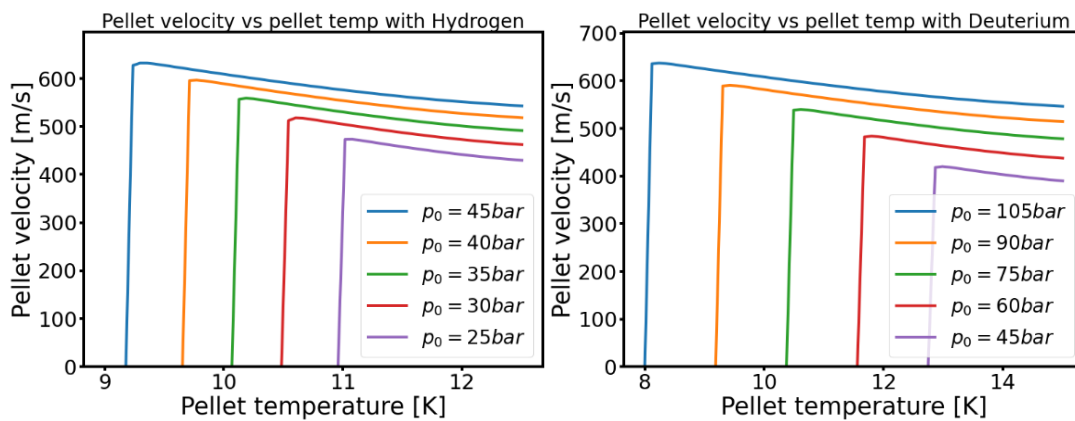
A hidrogén esetében 8 és 10 Kelvin közötti skálán végeztek vizsgálatokat, így megbízhatóan csak ezen tartományban rendelkezünk adatokkal. A maximális nyíró feszültség 0.15 MPa és 0.35 MPa között változott lineárisan. Deutérium esetében a mérési tartomány 8 és 14 K közé esett. A felvett szilárdsági értékek 0.15 MPa és 0.6 MPa között változtak, többnyire lineárisan. A neonnal és az argonnal azonban a maximális nyíró feszültség jóval

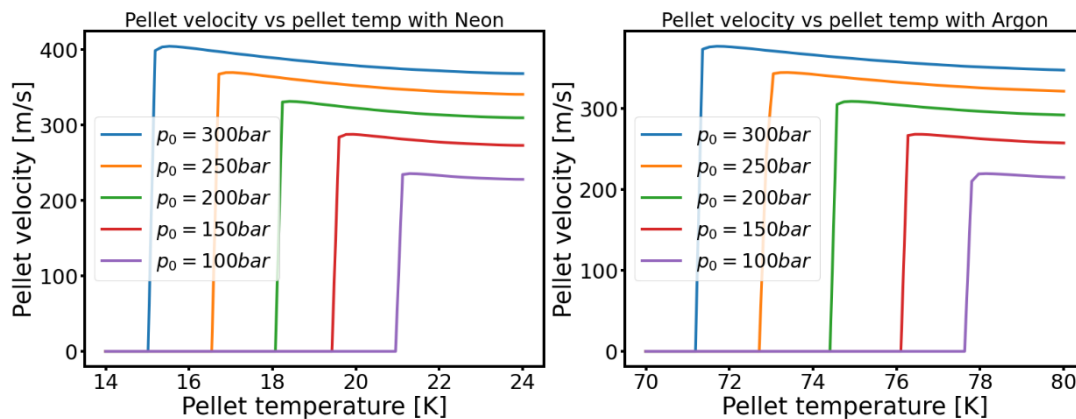
magasabbnak ígérkezett. A neonnál 8 és 16 K között 1.25 MPa és 3 MPa közötti értékeket mértek, míg az argonnál 30 és 55 K közötti tartományban 3 MPa és 8 MPa értékeket kaptak (lásd: 19. ábra).



19. ábra: Hidrogén, deutérium, neon és argon szilágysági tulajdonságai a hőmérséklet függvényében. A neon és argon esetében jelentősen nagyobb nyíró szilárdságot mértek a magasabb hőmérséklet ellenére is.

Ezeket az összefüggéseket felhasználva azonos paraméterek mellett ábrázoltam a különböző anyagokra az elért torkolati sebességet a pellet hőmérséklet függvényében (20. ábra).

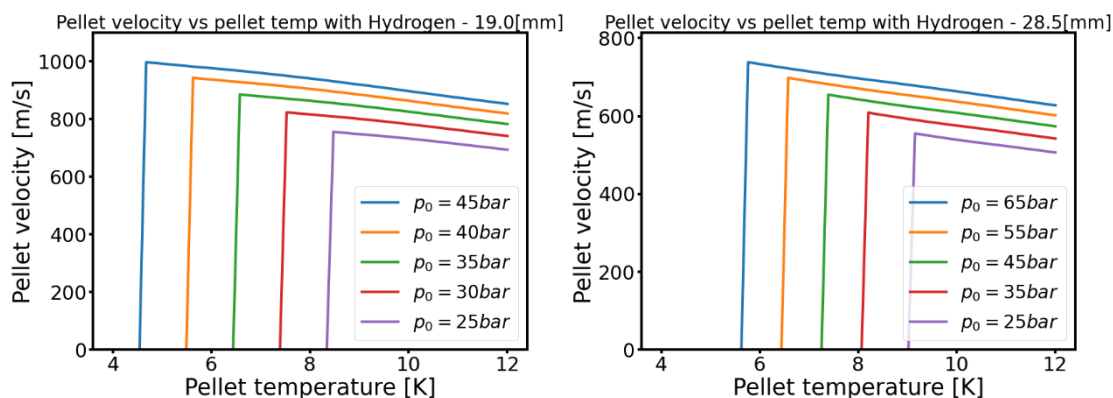


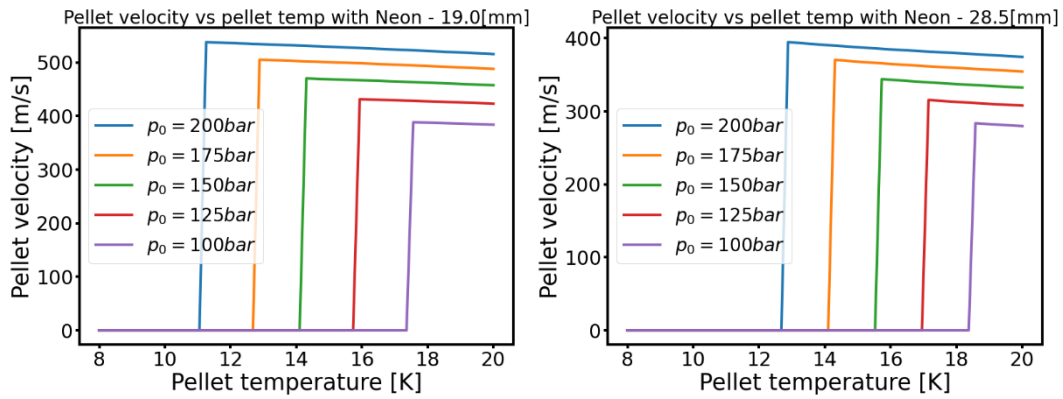


20. ábra: Azonos paraméterek mellett hidrogén, deutérium, neon, és argon anyagú pellet kilövése során tapasztalható torkolati sebesség a pellet hőmérséklet függvényében, különböző buffer nyomásokat használva. ($V_{\text{buffer}} = 0,2 \text{ dm}^3$, $d_{\text{pellet}} = 19 \text{ mm}$, $L_{\text{barrel}} = 400\text{mm}$)

Az ábrák alapján jól látható, hogy amíg a hidrogén és deutérium sebessége a 350-650 m/s-os tartományban maradt, addig az argon és a neon a nagyobb tömegük miatt 200-400 m/s-os sebességgel távoztak a rendszerből. Azonban utóbbi kettő esetében a nagyobb szilárdság miatt a buffer nyomását is jóval nagyobbra kellett választani, a 150 bar nyomást messze elhagyva. Az alacsonyabb hőmérsékleteken a pelletnél számítható sticking pressure egyre magasabb, így a kilövéshez szükséges p_0 küszöb nyomás is egyre nagyobb. Az ábrák x tengelyén a pozitív irányba nem ajánlatos tovább haladni, hiszen a gázok elérik a hármaspontjukat, ahol nem lehetséges szilárd állapotú gáz pelletet előállítani. További fontos megfigyelés, hogy a pellet végsebessége csökken, tehát a pellet felfűtésével valóban lehetséges a torkolati sebesség csökkentése.

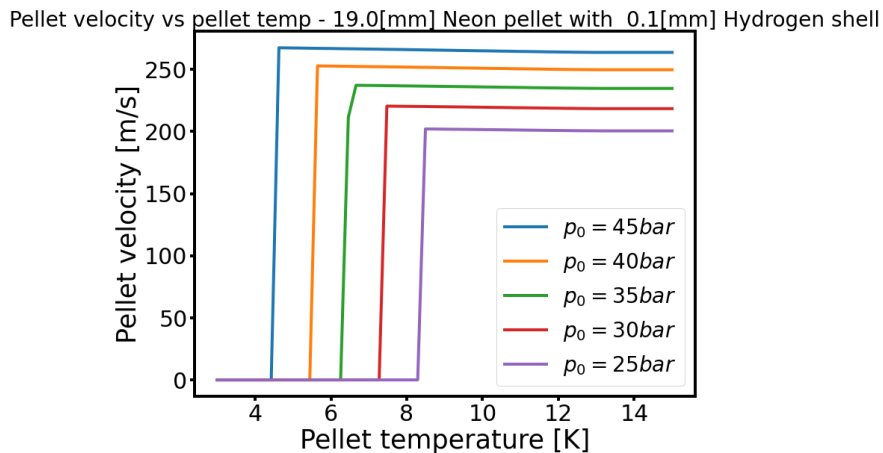
A gyors szemléltető összevetés után a paramétereket az ITER SPI méreteihez igazítottam. A laboratóriumban csak hidrogén és neon pelletek fagyasztása fog történni, a hajtó gáz pedig hidrogén lesz, így ezekre állítottam át modellt. A továbbiakban a hidrogén és neon 19 illetve 28.5 milliméteres átmérőjű pelleteket vizsgáltam (21. ábra).



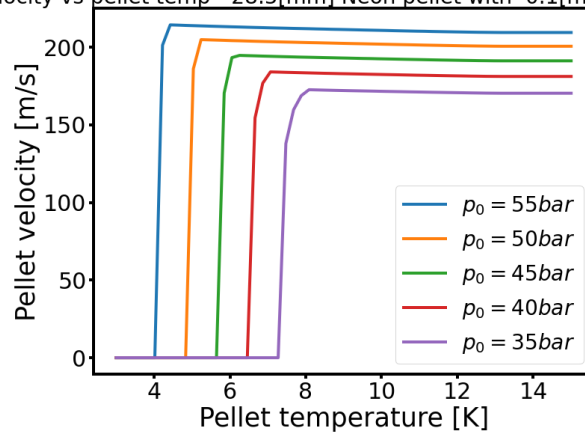


21. ábra: Az SPI laboratóriumhoz igazított adatok 19 és 28.5 mm átmérőjű pelletekre. A növekvő átmérő kétszeres hossz mellett a tömeget köbös, míg a palást méretét négyzetes arányban növeli, ennek következtében a nagyobb pellet a növekvő buffer nyomás ellenére is alacsonyabb sebességet ér el.

Újra megfigyelhető a hidrogénnél tapasztalható magasabb torkolati sebesség a kisebb buffer nyomás ellenére. A pellet sebességének csökkentése érdekében szóba jöhet más megoldás is: keverni kell az anyagokat. Az Oak Ridge tanulmányban szerepeltek kísérletek különböző anyagú bevonatok alkalmazásával is. Az eredmények szerint a bevonat vastagsága nem befolyásolja számottevően a pellet áttöréséhez szükséges nyíró erő értékét, csak a bevonat anyagi minőségétől függ. A modellt alkalmazható különböző anyagú bevonatok figyelembe vételére is. A felületen tapasztalható sticking pressuret csak a bevonat anyaga, míg a pellet tömegét értelemszerűen a pellet és bevonat együttesen határozza meg. Különböző méreteket és nyomás értékeket használva a torkolati sebességeket a hőmérséklet függvényében ábrázoltam a 22. ábrán. A gyorsítási cső fala mentén egy elhanyagolható vékony hidrogén réteget tételeztem fel, míg a pellet nagy része neon.



Pellet velocity vs pellet temp - 28.5[mm] Neon pellet with 0.1[mm] Hydrogen shell



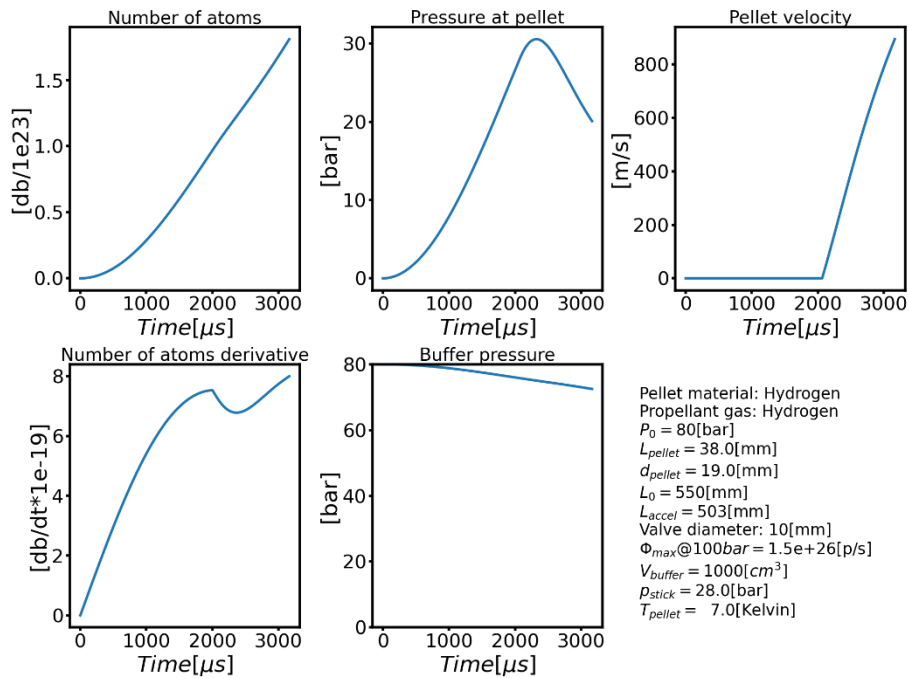
22. ábra: A torkolati sebességek ábrázolása a hőmérséklet függvényében 19 és 28.5 mm átmérőjű hidrogén bevonatú neon pelletekre. A vékony hidrogén bevonatnak köszönhetően a neon pellet kilövéshez szükséges sticking pressure lényegében az azonos méretű hidrogén pelletével egyezik meg, azonban a megnövekedett tömegnek köszönhetően lényegesen kisebb torkolati sebességeket kapunk. Ígéretes eredmények, 160 és 280 m/s sebesség mellett.

Utóbbi technikát alkalmazva a keverék pelletek az alacsonyabb nyomásokon is kilőhetők, de megnövekedett tömeg miatt a gyorsulás kisebb, így a torkolati sebesség is alacsonyabb. Mivel a pellet anyaga gáz formájában érkezik a csőbe és csak utána kondenzálódik a falon rétegenként haladva a cső tengelye felé, így nem jelent problémát a vékony bevonat létrehozása után másik gázzal folytatni a kondenzációt.

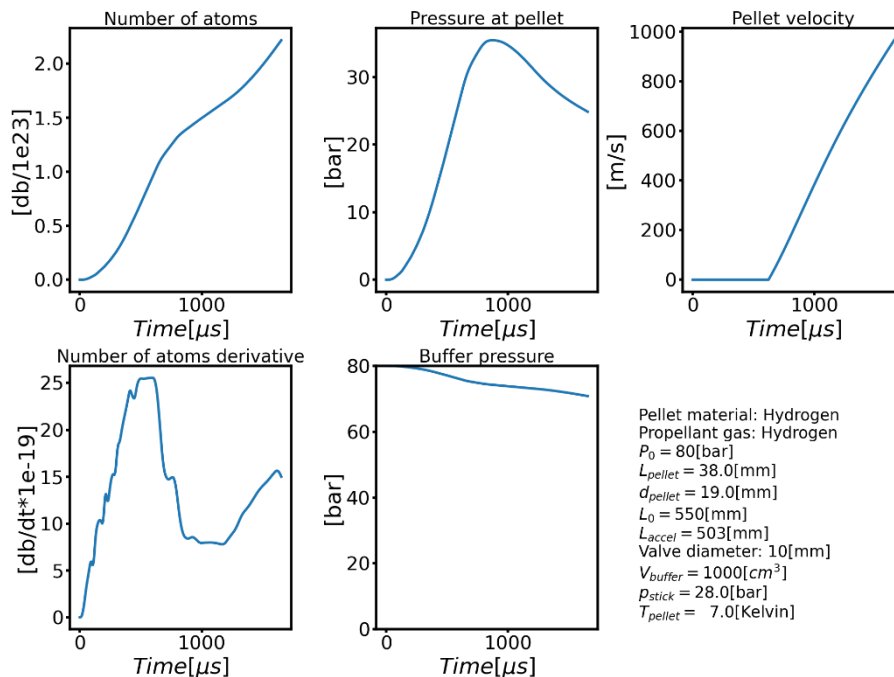
A pellet külső felszínének hevítése is szóba jöhet. Ebben az esetben is csökken a kilövéshez szükséges nyomás, azonban a megvalósítása további technikai változtatásokat is igényelne (réz réteg a cold head felületén, hevítése elektromos áram bevezetésével). Itt időfüggően meg kellene oldani a hőterjedést a pellet és a gyorsítócső anyagában, amely túlmutatott a jelenlegi dolgozat keretein.

5.2. OpenFoam eredmények

A továbbiakban gyorszelepen beáramló gázok áramlását vizsgáltam. Mivel a modell egyszerű fizikai képleteket alkalmaz, így érdemes összevetni a számításait komolyabb szoftverek által számolt áramlási függvényekkel. Az FPL által végzett OpenFoam számításokkal kinyert adatokat a Python modellbe importáltam. Ezen számítások statikus szelep állásnál lettek elvégezve. Ezekből állítottak össze egy közelítő gázáramlási eredményt mozgó szelep esetére. A modell tehát kiegészült egy második verzióval, amely az első verzióval ellentétben már az utóbbi, OpenFoam számításait is tartalmazza. A 23. ábrán az első verzió szerinti, míg a 24. ábrán a második verzió szerinti mozgási karakterisztika látható az idő függvényében:



23. ábra: Az egyes verziójú modellben tapasztalható barrel/buffertartály nyomás, pellet sebesség és barrelben lévő részecskék és azok idő szerinti változása. A pellet áttörésénél (kb 2100 μs) az addig növekvő nyomás a pellet mögött a táguló tér miatt lecsökken. A pellet körülbelül 850 m/s-os sebességet ér el.

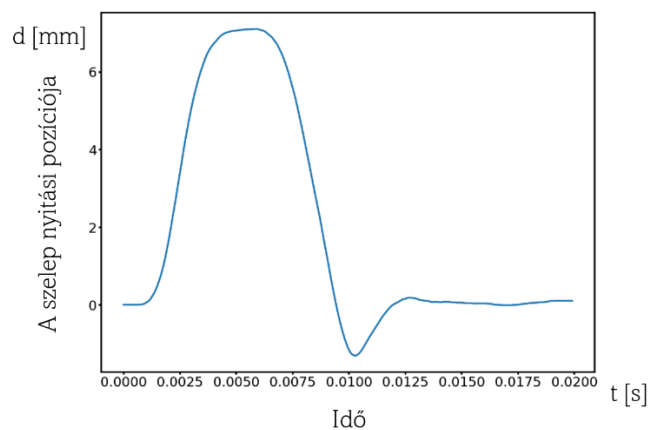


24. ábra: A kettes verziójú modellben tapasztalható barrel/buffertartály nyomás, pellet sebesség és barrelben lévő részecskék és azok idő szerinti változása. A pellet hamarabb, már 650 μs -nál elindul, és az intenzívebb nyomás emelkedés miatt a sebessége is valamivel megnövekszik, közel 1000 m/s-ra.

A szelep nyitáskor a beáramló gáz sebessége rövid időre átlépi a hangsebességet, így jóval több részecske halad át a szelep keresztmetszetén. Általánosan megfigyelhető, hogy a pellet hamarabb áttörik a hirtelen felszökő nyomás miatt, illetve a torkolati sebessége is körülbelül 15-20%-al nagyobb ennek következtében. Ez a különbség az előzőekhez képest nem számít radikális változásnak, de tovább pontosítja a számításokat.

5.3. Gyorszelep karakterisztika

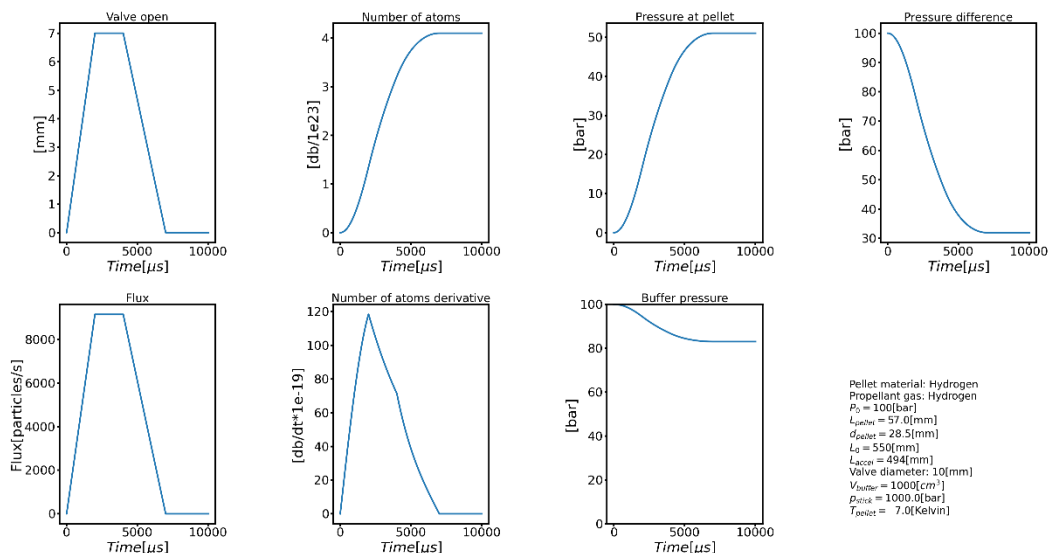
A Python modellezéssel párhuzamosan a szelep nyitásának és zárásának tesztjei is zajlottak. Ezeken a teszteken részt vettem. A nyitás mozgásának karakterisztikáját egy adatbázisban gyűjtötték össze az FPL munkatársai, ezeket az adatokat importáltam a gyorsítási modellbe.



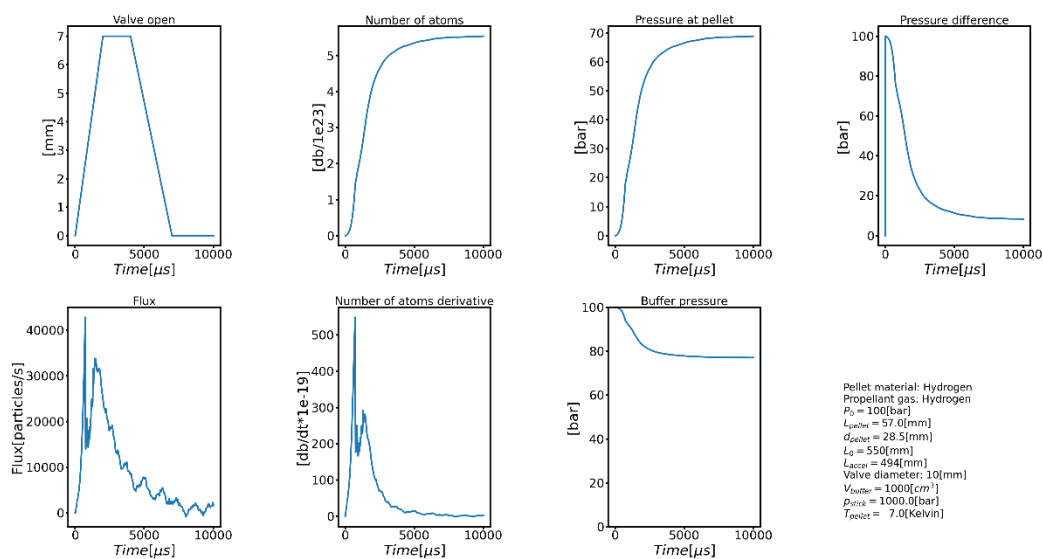
25. ábra: A vízszintes x tengelyen az idő, míg a függőleges y tengelyen a szelep nyugalmi zárt állapotához mért pozícióját mutatja. A rugalmas záródás miatt a görbe negatív értéket is felvesz, de a számításoknál csak a nyitott, tehát pozitív értékeket vettem fel.

Az 25. ábrán jól látható, hogy az elektromos impulzusnak köszönhetően egy fordított U alakot vesz fel a szelep mozgásának görbéje. A hirtelen nyitást követően rövid ideig nyitva tart, majd valamivel lassabb vissza zár. Az OpenFoam mellett a nyitási karakterisztikát is tartalmazó modell lett a hármasszámú változat.

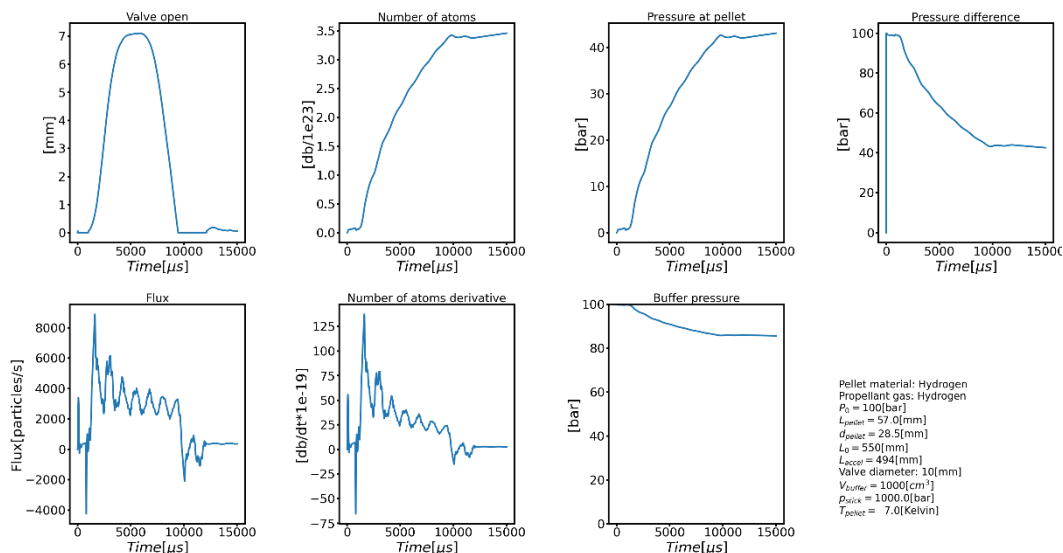
Ahhoz, hogy a három verzióban kialakuló gázáramlásokat vizsgálni tudjuk, statikus teszteket futtattam le, vagyis a pellet mozgását konstans nullának vettem. Az így kialakult nyomásviszonyokat elemeztem a továbbiakban: az egyes verzió (26. ábra), a kettes verzió (27. ábra), mely tartalmazza az OpenFoam számításait, és a hármasszámú verzió (28. ábra), mely az OpenFoam mellett a nyitási karakterisztikát is tartalmazza.



26. ábra: A modell egyes verziója. Lineáris nyitást követően a szelep nyitva tart, majd zár. A nyitási idő alatt 0-ról 50 barra megy fel a nyomás a barrelben. A folyamatos nyomáskiegyenlítés következtében a barrelben lévő részecskék mennyiségének növekedése egyre kisebb mértékű, azonban a szelep bezárása miatt nincs teljes nyomáskiegyenlítés a barrel és a buffertartály között (felső sor, 4. diagram)



27. ábra: A modell kettes verziója. A lineáris nyitást követően a szelep nyitva tart, majd zár. A nyomáskiegyenlítés a nagyobb fluxus miatt jelentősebb, a nyomáskülönbség a számítás végén sokkal kisebb. Szembetűnő a nyitás eleji kiugró fluxus, és barrelbeli részecskéváltozás. Ezek az értékek rövidebb időre sokkal nagyobbak, mint az egyes verzióban.



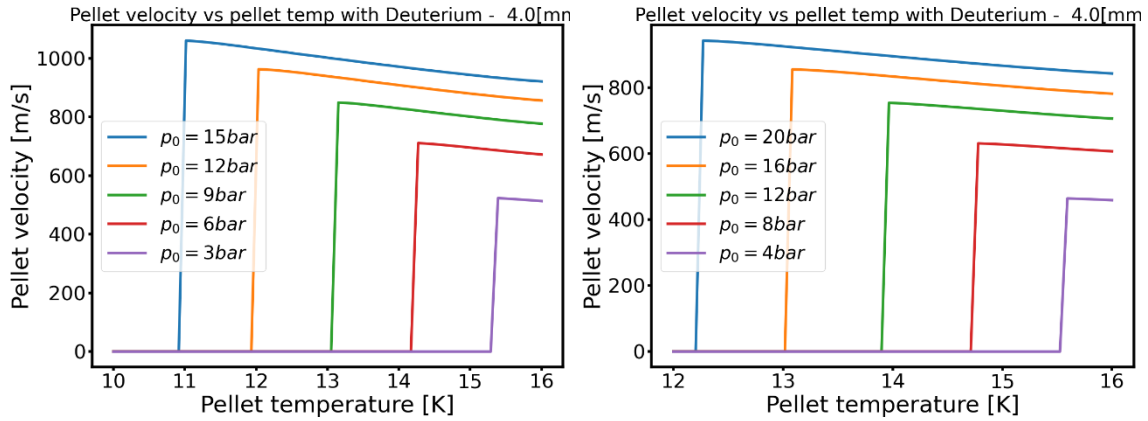
28. ábra: A modell harmas verziójában a szelep a karakterisztikának megfelelően nyit, majd zár. A nyitás következtében felszökő nyomás kisebb mértékű, mert nem lineáris karakterisztika jellemzi a szelepnnyitást, így az OpenFoam hullám jellege (melyet lineáris szelepnnyitáshnál vizsgáltak) nem produkál kiugró értékeket.

A szelep tesztek alapján leírt szelep mozgási függvény és az OpenFoam-ban végzett modellezéseket kissé nehézkes egybefűzni, hiszen alapvetően az utóbbi modellezésnél lineáris nyitással számoltak. Az attól eltérő mozgás máshogyan befolyásolhatja az áramlási feltételeket.

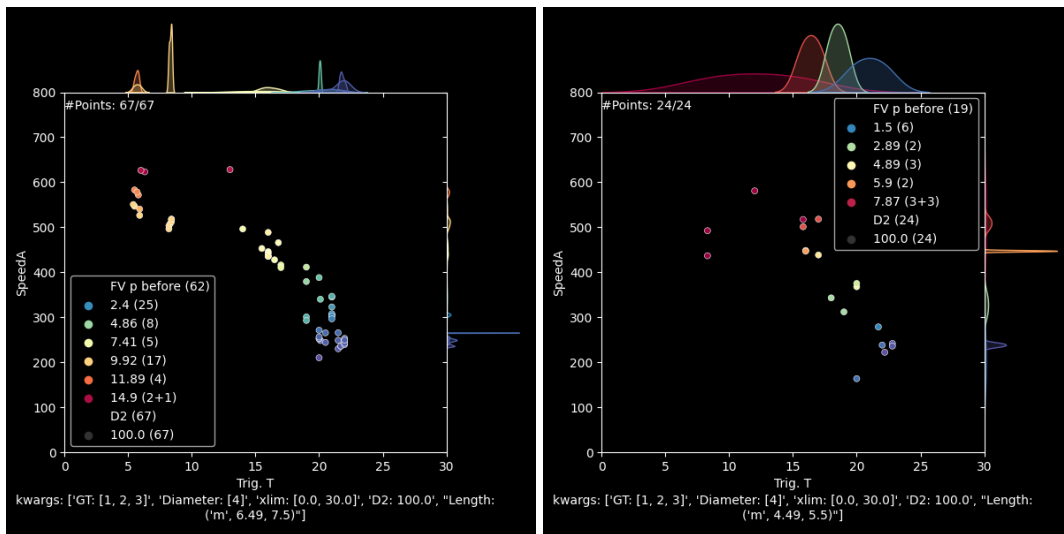
5.4. ASDEX Upgrade mérések modellezése

A modell validitásának tesztelésére adtak lehetőséget az ASDEX Upgrade (AUG) tokamaknál végzett SPI kísérletek, ugyanis nagy mennyiségű információt sikerült gyűjteni a berendezésben kilőtt pelletekkel kapcsolatban. A Python-ban beállított paramétereket a garchingi rendszerhez igazítottam, azonban a modellek közül csak az egyes verziót használhattam, ugyanis a geometriai tényezők ott máshogyan befolyásolják a gáz áramlását. E mellett további probléma a belövőben működő „hollow punch” mechanizmus, amely a gyorsítási modellünkben nem szerepel és nem is ismert milyen nyomásnál mozdul meg. Ezért első lépésként csak a kis nyomáson végzett méréseket modelleztem, amelyekben ez a kiütő mechanizmus még vélhetőleg nem mozdult meg.

Az AUG belövő 4mm átmérővel és 4,49-7,5mm hosszal rendelkező deutérium pelleteket készít, melyeket deutérium hajtó gázzal lőtt ki. Az ezen paraméterekkel beállított modell (29. ábra), valamint az AUG valódi mérései (30. ábra) a következő eredményeket adta:



29. ábra: 4mm pellet átmérő 3 illetve 7 mm hosszal behelyettesítve a modellbe (torkolati sebességek a hőmérséklet függvényében különböző buffer nyomás értékekre). A kisebb tömegű pellet már 20 bar nyomáson is viszonylag magas torkolati sebességeket ért el, azonban az alacsonyabb nyomás, valamint magasabb hőmérsékletű tartományokban lecsökken 500-600 m/s körüli értékekre is.



30. ábra: Az AUG-ból küldött diagramok valódi tesztek alapján, 4mm pelletátmérő mellett 6.49-7.5 illetve 4.49-5.5 mm pellethossz alkalmazva (alsó sorban a pellet és a cső méretei, a téglalapban a buffer nyomások, vízszintes tengelyen a hőmérséklet, függőleges tengelyen a torkolati sebességek vannak jelölve). Bal oldalon 62 tesztölés statisztikája, míg jobb oldalt 19 tesztölés statisztikája látható. 2,4-15,9 bar nyomás, 5-23 K hőmérséklet tartományon a pelletek a bal oldali képen 200 és 640 m/s torkolati sebességeket értek el. A jobb oldali esetben 1,5-7,87 bar és 7-23 K mellett 150-600 m/s-ra gyorsultak a cső végén.

Megfigyelhető, hogy a gyorsítási modell által előrejelzett torkolati sebességek körülbelül 20%-al nagyobbak. Például 7 mm pellet hossz, 14 K hőmérséklet és 15 bar buffernyomás mellett körülbelül 800 m/s-os torkolati sebességet számol, míg a valóságban hasonló paraméterek mellett az elért sebesség 630 m/s körül alakult. Ezek csak az első eredmények.

Összegzés, kitekintés

Az SPI laboratórium a 2021 végére elkészülhet, az első teljes körű pellet fagyasztási és kilövési tesztek a következő év elejére várhatók. Az általánosságban változtatható paraméterek torkolati sebességre gyakorolt hatását hivatott modellezni a Pythonban megírt gyorsítási program, és nem egzakt adatokat próbál előre jelezni.

A nyíró szilárdság hőmérséklet függését figyelembe véve tehát számos új lehetőség nyílt csökkenteni az alapvetően magas torkolati sebességet. Egyszerűen megvalósíthatónak ígérkezik a keverék pelletek gyártása, melynek köszönhetően változatos tulajdonságú pelleteket lehet majd kilőni a berendezéssel. Ilyen keverék pellet lehet például egy 28.5 mm átmérőjű 1 mm vastag hidrogén bevonatú neon lövedék, mely esetében akár a 150-200 m/s torkolati sebesség is megközelíthető. Ez már az ITER-ben használatos DM műveletekhez is ideális lehet. További lehetőség a pellet gyors felmelegítése. Az ITER SPI pellet paraméterekre az FPL-ben végzett első számítások szerint lehetséges a pellet néhány 100 mikronos külső rétegének a felmelegítése néhány ezredmásodperc alatt és ezzel egy hideg pelletet lehetne kisebb nyomással kilőni.

Az OpenFoam számításai alapján a beáramló gáz a pellet mögött hirtelen torlódik fel. Emiatt a nyomás hamarabb emelkedik meg. A modellezés során ez rövidebb idő alatt törte át a pelletet, ami végül megnövekedett sebességet is jelentett a gyorsítócső végén. A gyakorlatban ez egy erős lökés hullám formájában mutatkozhat meg, mely alacsonyabb végső nyomásértékek mellett is áttörheti a pelletet. A jövőben akár a lökeshullámhoz optimalizált gyorsítócső és szelep szerkezeteket is fejleszthetnek, melyek lassabb torkolati sebességű pelleteket is képesek lesznek kilőni.

A gyorsítási modellt az ASDEX Upgrade tokamakokon végzett valódi tesztekkel vettem össze. A valóságos sebesség eredmények elmaradtak körülbelül 15-20%-al a program által előrejelzett értékektől. Tekintve a berendezés paramétereinek bizonytalan értékét ez nem számít rossz eredménynek. A továbbiakban nagyobb és részletesebb adatbázisokkal való összevetés után felállíthatnánk olyan paraméteres görbéket, amelyek alkalmasak a belövési sebesség meghatározására olyan paramétertartományban, amelyekre nem készültek tesztmérések.

Hivatkozások

- [1] Papp Gergely, Horváth László, Pokol Gergő, Zoletnik Sándor. Bevezetés a fúziós plazmafizikába, Egyetemi Jegyzet. 2014.
- [2] Tokamak. ITER. (n.d.). Retrieved October 27, 2021, from <https://www.iter.org/mach/tokamak>.
- [3] *A Jövő Mágneses fúziós kísérletei. A jövő mágneses fúziós kísérletei | Minden a magfúziós kutatásokról.* (n.d.). Retrieved October 27, 2021, from <https://magfuzio.hu/tanulmanyok/a-jovo-magneses-fuzios-kiserletei/>.
- [4] Képek Richard A. Pitts szemináriumi előadásából. 2021.08.11. KFKI.
- [5] Matthews, G. F., Bazylev, B., Baron-Wiechec, A., Coenen, J., Heinola, K., Kiptily, V., Maier, H., Reux, C., Riccardo, V., Rimini, F., Sergienko, G., Thompson, V., & Widdowson, A. Melt damage to the Jet Iter-like wall and Divertor. *Physica Scripta*, **T167** 014070 (2016) <https://doi.org/10.1088/0031-8949/t167/1/014070>
- [6] Gebhart, T. E., Baylor, L. R., & Meitner, S. J. Experimental pellet shatter thresholds and analysis of shatter tube ejecta for disruption mitigation cryogenic pellets. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **48** 1598 (2020) <https://doi.org/10.1109/tps.2019.2957968>
- [7] Jernigan, T., Baylor, L., Combs, S., Humphreys, D., Parks, P., & Wesley, J. Massive gas injection systems for disruption mitigation on the DIII-D tokamak. *21st IEEE/NPS Symposium on Fusion Engineering SOFE* 05. (2005) <https://doi.org/10.1109/fusion.2005.252977>
- [8] Lehnen, M., Alonso, A., Arnoux, G., Baumgarten, N., Bozhenkov, S. A., Brezinsek, S., Brix, M., Eich, T., Gerasimov, S. N., Huber, A., Jachmich, S., Kruezi, U., Morgan, P. D., Plyusnin, V. V., Reux, C., Riccardo, V., Sergienko, G., & Stamp, M. F. Disruption mitigation by massive gas injection in jet. *Nuclear Fusion*, **51**(12) 123010 (2011) <https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/12/123010>
- [9] Pautasso, G., Coster, D., Eich, T., Fuchs, J. C., Gruber, O., Gude, A., Herrmann, A., Igochine, V., Konz, C., Kurzan, B., Lackner, K., Lunt, T., Marascheck, M., Mlynek, A., Reiter, B., Rohde, V., Zhang, Y., Bonnin, X., Beck, M., & Prausner, G. Disruption studies in ASDEX upgrade in view of Iter. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **51**(12) 124056 (2009) <https://doi.org/10.1088/0741-3335/51/12/124056>
- [10] Bakhtiari, M., Olynyk, G., Granetz, R., Whyte, D. G., Reinke, M. L., Zhurovich, K., & Izzo, V. Using mixed gases for massive gas injection disruption mitigation on Alcator C-Mod. *Nuclear Fusion*, **51**(6) 063007 (2011) <https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/6/063007>
- [11] Yu, Y., Kim, Y.-O., Kim, H.-K., Kim, H.-T., Kim, W.-C., Kim, K.-P., Son, S.-H., Bang, E.-N., Zhuang, H., Chen, Z., Hong, S.-H., & Yoon, S.-W. First results on disruption mitigation

- by massive gas injection in Korea Superconducting Tokamak Advanced Research. *Review of Scientific Instruments*, **83**(12) 123509 (2012) <https://doi.org/10.1063/1.4772573>
- [12] Commaux, N., Baylor, L. R., Jernigan, T. C., Hollmann, E. M., Parks, P. B., Humphreys, D. A., Wesley, J. C., & Yu, J. H. Demonstration of rapid shutdown using large shattered deuterium pellet injection in DIII-D. *Nuclear Fusion*, **50**(11) 112001 (2010) <https://doi.org/10.1088/0029-5515/50/11/112001>
- [13] Commaux, N., Shiraki, D., Baylor, L. R., Hollmann, E. M., Eidietis, N. W., Lasnier, C. J., Moyer, R. A., Jernigan, T. C., Meitner, S. J., Combs, S. K., & Foust, C. R. First demonstration of rapid shutdown using neon shattered pellet injection for thermal quench mitigation on DIII-D. *Nuclear Fusion*, **56**(4) 046007 (2016) <https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/4/046007>
- [14] Baylor, L. R., Meitner, S. J., Gebhart, T. E., Caughman, J. B. O., Herfindal, J. L., Shiraki, D., & Youchison, D. L. Shattered pellet injection technology design and characterization for disruption mitigation experiments. *Nuclear Fusion*, **59**(6) 066008 (2019) <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab136c>
- [15] S. Zoletnik, G. Anda, I. Katona, T. Szabolics, T. Szepesi, D. Oravecz, E. Walcz, D. Nagy Deliverable 1 - Design of the test bench and data acquisition system. (2021) Contract number – IO/20/CT/6000000319.
- [16] Gebhart III G., Baylor L., Meitner S., Casella F., Drummond M., Freudenburg K., Rasmussen D. Report for Shear Strength of Cryogenic Solids from the Barrel of a Shattered Pellet Injector for Disruption Mitigation – Export Control. (2021) IDM UID: 424W76.