

ELM prekursorok vizsgálata a JET tokamakon

Lampert Máté, Kocsis Gábor

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézet
1121 Budapest Konkoly-Thege Miklós út. 29-33.

Az I-es típusú ELM-ek (Edge Localized Modes - plazmaszéli instabilitások) a fúziós berendezésekben olyan magas energia és részecske fluxussal terhelik a plazmahatároló elemeket, hogy maradandóan károsítják a berendezést. A folyamat szabályozása lehetséges kriogén hidrogén izotóp pelletek belövése, melyekkel mesterségesen kelthetünk ELM-eket. A kísérletek során problémát okoz annak a meghatározása, hogy melyik ELM spontán és melyik pellet által triggerelt. Ez az információ elengedhetetlen a két folyamat kialakulásának vizsgálatához, így egy módszert kell kidolgozni az események szétválogatására. Bizonyos I-es típusú ELM-ek előtt az elektronsűrűségben prekursor oszcilláció figyelhető meg. Amennyiben ez csak spontán kialakuló ELM előtt figyelhető meg, akkor ez lehetőséget ad a szétválogatásra. Ebben a cikkben összefoglaljuk az ezen kérdéskör tisztázására folytatott vizsgálatainkat, melyek során kb. 1000 ELM eseményt (mind természetes módon kialakuló, mind pelletek által keltett) analizáltunk. A kísérletek a JET tokamakon zajlottak. Meghatároztuk az ELM-ek előtt fellépő elektronsűrűség prekursor oszcilláció tipikus frekvenciáját, az előfordulási valószínűségét spontán és pellet triggerelt ELM-ek esetén, illetve meghatároztuk, hogy van-e összefüggés az ELM mérete és a prekursor oszcilláció jelenléte között. A kísérleti adatokat egy adatbázisba foglaltuk, melyet statisztikus módszerekkel vizsgáltunk meg.

Bevezetés

A ma zajló plazmafizikai kutatások fő célja egy olyan plazma összetartás kifejlesztése, aminek az alkalmazásával egy jövőben üzemelő fúziós erőmű gazdaságosan termelhet energiát. A kutatások során megfigyelték, hogy növelve mágnesesen összetartott plazmák fűtését, egy adott fűtési teljesítmény küszöböt átlépve a plazma nyomása – és ezzel együtt a sűrűsége és hőmérséklete – hirtelen többszörösére nő. A nagyobb nyomás hatására a fúziós reakcióráta megnő, ami gazdaságosabb üzemeltetést tesz lehetővé. A magasabb nyomás - vagy úgy is mondhatjuk, hogy a jobb plazma összetartás - a plazma szélén kialakuló transzportgátnak köszönhető, amely lecsökkenti az energia és részecske veszteségeket. Ezt a plazmaállapotot magas összetartású módnak hívjuk (H-mode).

A transzportgát miatt a plazma szélén egy keskeny rétegben nagy nyomás gradiens alakul ki [1], aminek hatására a plazma szélén lokalizált instabilitások, ELM-ek jelennek meg. Az ELM rövid, kvázi periodikus perturbáció a plazma szélén [2], amely jelentős energia- és részecskevesztést okoz. Az ELM-ekkel kapcsolatos plazmaenergia-vesztés általában a teljes tárolt plazmaenergiának csak töredéke, azonban elég nagy a teljesítménye ahhoz, hogy komoly problémát okozzon a jövőben megépülő nagyobb berendezésnél, például az ITER-nél (International Tokamak Experimental Reactor) [3]. Ahhoz, hogy minél jobban megérthessék a jelenség mögött zajló fizikai folyamatokat, az ELM-eket kísérletileg vizsgálják. A közelmúltban több típusú ELM-et is felfedeztek, amiket a mágneses prekursor jelenléte és a fűtési teljesítmény szerint osztályoztak [2]. Azokat az ELM-eket, melyeknek ismétlési gyakorisága növekszik a fűtési teljesítmény növelésével, és nem rendelkeznek mágneses prekuzorral, I-es típusú ELM-eknek hívjuk [4].

Mivel az ITER berendezés tervezésénél választott standard plazma üzemmódban ezek a típusú ELM-ek dominálnak, ezért ebben a cikkben is ezekkel foglalkozunk.

A kísérletek azt mutatták, hogy az ELM-eknek nem csak káros hatásuk van, hanem hozzájárulnak a plazma szennyezőinek eltávolításához is [5]. Ha az ELM-ek nem kellő gyakorisággal vannak jelen, akkor a tipikusan hidrogén izotópokból álló plazmákban a plazmát határoló elemekről beáramló szennyezők koncentrációja megnövekszik. A megnövekedett szennyező koncentráció hatására a plazma sugárzásos energia vesztesége olyan mértékű is lehet, hogy a plazma sugárzásos összeomlást szenved el, amit mindenképpen el kell kerülni. Így valójában az ELM-ek szükségesek ahhoz, hogy hosszú idejű, magas összetartású állapotban működő plazmát lehessen létrehozni, azonban egy reaktornál csak olyan ELM-ek elfogadhatóak, melyeknél az ELM-ek okozta plazmaenergia-vesztés elég alacsony ahhoz, hogy ne tegyen kárt a berendezésben. Ehhez az ELM-eket valamilyen módszerrel szabályozni kell.

Az ELM-ek szabályozására, hatásainak mérséklésére több módszert is kidolgoztak, melyek közül a kriogén hidrogén izotóp pelletek általi ELM keltés (pellet ELM pacemaking) tűnik az egyik legígéretesebbnek [6]. A módszer alapja, hogy egy néhány milliméter nagyságú deutérium-jég pelletet lönek a plazmába, amely úgy perturbálja azt, hogy egy ELM keletkezik. Felfedezték, hogy az ELM ismétlődési gyakorisága fordítottan arányos az egy ELM által kilökött energiával [7]. Ez lehetőséget ad a szabályozásra: minél gyakrabban lövünk be pelleteket a plazmába annál gyakrabban keltünk ELM-eket, miáltal az egy ELM által kilökött energia folyamatosan csökken. Tehát ha kellően nagy frekvenciával injektálunk pelletet a plazmába a berendezés falát érő hőterhelést a kritikus érték alá tudjuk szorítani [6].

A mai napig nyitott kérdés az, hogy milyen fizikai folyamatok váltják ki a spontán kialakuló és a pelletek által triggerelt ELM-eket. Mindenesetre ahhoz, hogy az ELM eseményeket pontosan megvizsgálhassuk, tudnunk kell azt, hogy melyik esemény spontán, és melyik pellet által keltett. Tovább nehezíti a dolgunkat, hogy a pelletek méretét és ezáltal az okozott plazma perturbációt amennyire csak lehet csökkenteni kell, hogy az ELM keltésén kívül más parazitikus hatásuk ne legyen (például a hideg kriogén pelletnek ne hűtsék le a plazmát). Így vannak olyan kísérletek (például a JET tokamakokon mm méretű pelletek), ahol a pellet mérete olyan kicsi, hogy nagyon nehéz a beérkezését detektálni. Ezen problémák megoldására kell találni egy módszert, ami adott bizonyossággal megadja, hogy melyik ELM spontán keletkező és melyik pellet triggerelt.

A kísérletek során megfigyelték, hogy az I-es típusú ELM-ek alatt bizonyos plazmaparaméterek esetén prekurzor oszcilláció figyelhető meg az elektronsűrűségben [8]. Amennyiben ez az oszcilláció csak spontán esetben figyelhető meg, akkor ez lehetőséget ad az események szétválogatására. Ebben a cikkben összefoglaljuk azon kutatásainkat, melyekben ezt a kérdéskört próbáltuk tisztázni a JET tokamakokon végzett kísérletek kiértékelésével. Munkánk során kb. 1000 ELM eseményt (mind természetes mind pellet triggerelt ELM-eket) vizsgáltunk. Meghatároztuk az elektronsűrűség prekurzor oszcilláció tipikus frekvenciáját, az előfordulási valószínűségét spontán és pellet triggerelt ELM-ek esetén, illetve meghatároztuk, hogy van-e összefüggés az ELM mérete és a prekurzor oszcilláció jelenléte között. A kísérleti adatokat egy adatbázisba foglaltuk, melyet statisztikus módszerekkel vizsgáltunk.

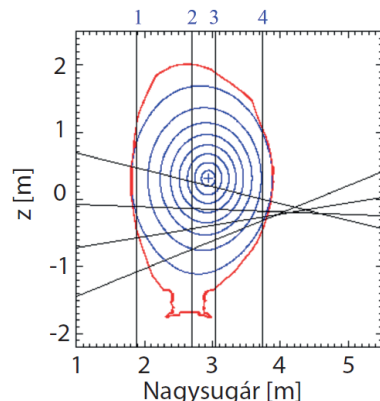
A cikk „Az elektronsűrűség mérése” című fejezetében az elektronsűrűség prekurzor mérési módszerét ismertetjük, „Adatfeldolgozás és kiértékelés” című fejezetében a vizsgálathoz felépített adatbázist, és annak statisztikai vizsgálatához szükséges módszereket mutatjuk be, majd a cikk végén ismertetjük az eredményeket, és összefoglaljuk a leírásokat.

Az elektronsűrűség mérése

Fúziós berendezéseknél sűrűség mérésére hosszabb ideig nem használható közvetlen módszer, mert a mérőeszközt károsítaná a magas hőmérsékletű plazma. Interferométer segítségével közvetlenül mérhető az elektronsűrűség. Működése röviden a következő. Egy lézernyalábot nyalábosztó tükörrel két részre osztanak, melyből az egyiket átvezetik a plazmán, a másik pedig akadálymentesen halad tovább. A referencia nyalábot és a plazmán átmenő mérőnyalábot ezután detektorokra vezetik, ahol mérik a két nyaláb közötti fáziskülönbséget. Ebből számolható a plazma törésmutatójának nyaláb menti vonalintegráltja, amiből pedig a vonalintegrált elektronsűrűség. A részletesebb működési elv megtalálható a [9] irodalomban.

A JET (Joint European Torus) berendezésen Mach-Zehnder típusú interferométer nyolc különböző csatornán méri az elektronsűrűséget [10] (lásd 1. ábra). Az ábrán látható sorszámozás szerinti negyedik csatornát használtuk a prekurzor oszcillációk vizsgálatára, mert ezen a csatornán volt a legjobban megfigyelhető, hiszen ez kizárólag a plazma szélét méri, ahol a plazmaszéli instabilitásokat és a velük járó oszcillációkat már korábban megfigyelték. Az eszköz

mintavételezési frekvenciája 100 kHz, így maximum 50 kHz-es oszcillációkat tudtunk vizsgálni.



1. ábra: A JET-en található interferométer csatornáinak elhelyezkedése

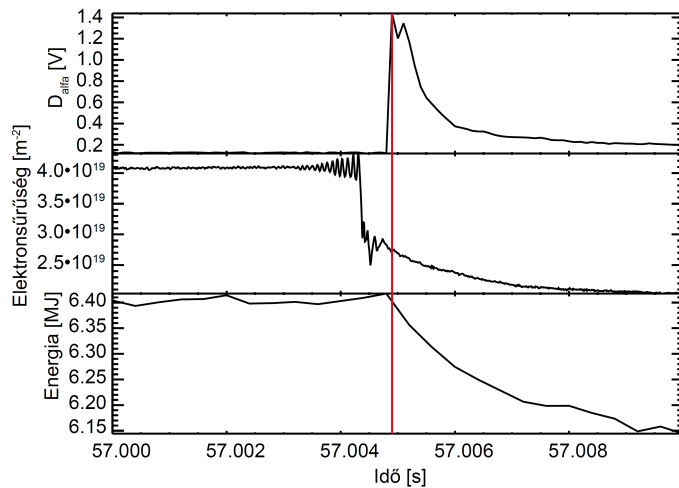
Adatgyűjtés és feldolgozás

A JET-en vizsgált plazmakisülések alatt magas összetartású módban az I-es típusú ELM-ek gyakorisága 5Hz és 60Hz között volt és a plazma körülbelül 5-10s-ig volt ebben az állapotban. Ez azt jelenti, hogy kisülésként átlagosan 25-500 közötti ELM eseményt kellett megvizsgáljunk. A vizsgálatok során 12 kisülés összesen 956 spontán keletkező ELM eseményét vizsgáltuk, melyeket valamilyen módszerrel azonosítani kell. Az ELM alatt a becsapódó semleges részecskék miatt a divertorban hirtelen megnő a D_α sugárzás [3] (2. ábra), ennek az intenzitás maximumának időpontja és a kisülés sorszáma használható az ELM-ek azonosítására. Ez a két adat egyértelműen azonosítja az ELM eseményt. Ezután az ELM-eket a következő adatokkal együtt egy adatbázisba rendeztük:

- Prekurzor jelenléte: prekurzornak neveztük azt az oszcillációt, ami az ELM előtt megfigyelhető hirtelen sűrűségváltozás előtt közvetlenül látható, és legalább 5 teljes periódus jelen volt (lásd 2. ábrán a középső görbét).
- Az ELM által okozott plazmaenergia-esés: az elektronsűrűség letörés időpontja előtti 10ms-os időablakban mért maximális és a letörés utáni 10ms-os időablakban mért minimális plazmaenergia különbsége.
- A prekurzor frekvenciája (Lásd: Eredmények című fejezet, prekurzor frekvenciája című alfejezete).

A vizsgálataink során kíváncsiak voltunk arra, hogy vajon pellet keltette ELM előtt jelentkezik-e prekurzor oszcilláció az elektronsűrűségben. A kérdés megválaszolására az adatbázisba további 93 ELM eseményt rögzítettünk, melyekről biztosan tudtuk, hogy pellet keltett. A JET-en 4mm-es pellet esetén megállapítható, hogy triggerelt-e a pellet ELM-et, 1mm-es pellet esetében már nem. Az általunk vizsgált kisülésekben 4mm-es pelletet használtak. A felépített adatbázisból válasz adható a következő kérdésekre:

- Mi a prekurzor tipikus frekvenciája?
- Előfordul-e pellet által keltett ELM előtt oszcilláció?
- Függ-e a prekurzor jelenléte az ELM által okozott plazmaenergia-eséstől, illetve az ELM előtti maximális plazmaenergiától?
- Ezekre a kérdésekre a következő fejezet alfejezeteiben adunk választ.



2. ábra: A divertor D_{α} sugárzása, a vonalintegrált elektronsűrűség és a plazma energia tartalmának időbeli változása egy természetes ELM körül, #76694-es kisülés (az elektronsűrűség jel időben nem kalibrált).

Eredmények

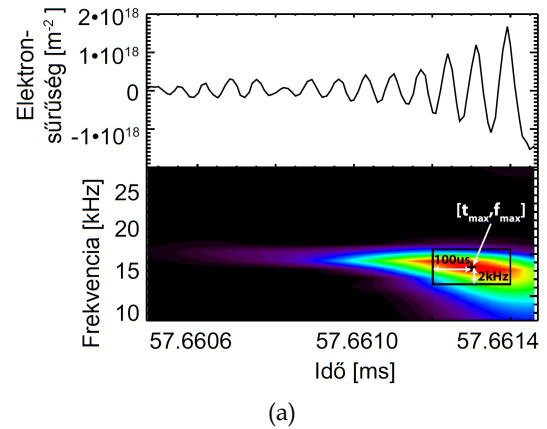
A prekursor tipikus frekvenciájának meghatározása

Az adatbázis felállításához szükség volt egy módszerre, amivel meg lehet határozni egy tetszőleges jel idő-frekvencia transzformáltját. Erre a legegyszerűbb módszer a rövid idejű Fourier-transzformálás [11]. A módszer lényege, hogy a jelet adott szélességű Gauss ablakfüggvénnyel beszorozzuk, majd meghatározzuk a Fourier-transzformáltját. A Gauss görbe maximumának helyét léptetve, majd a kapott transzformáltakat egymás mellé téve kapjuk meg a jel idő-frekvencia transzformáltját, vagy más néven spektrogramját.

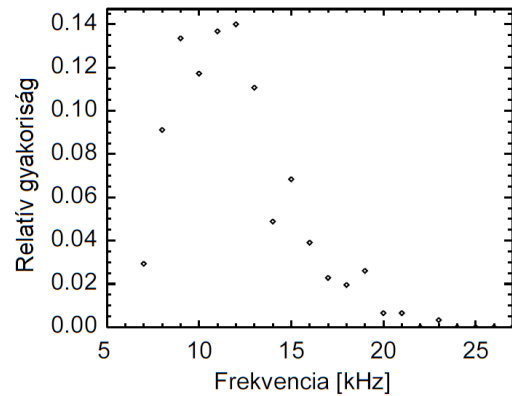
A módszer segítségével (NTI Wavelet Tools¹) meghatároztuk a prekuzorral rendelkező ELM események spektrogramját az elektronsűrűség letörés előtti 1ms-os időablakban. Megbízható automatikus módszer hiányában manuálisan kerestük meg a spektrogram maximumának közelítő helyét, majd egy algoritmus automatikusan megkereste a kijelölt pont körüli $[\pm 100 \mu\text{s}, \pm 2 \text{kHz}]$ ablakban a maximális intenzitáshoz tartozó frekvenciát. Egy prekuzor spektrogramja a 3a ábrán látható.

Az adatbázis feltöltése után a tipikus frekvenciát hisztogram segítségével vizsgáltuk. Megkerestük azon ELM eseményeket, melyek prekuzor frekvenciája a $[f - 50 \text{kHz}, f + 50 \text{kHz}]$ frekvenciaintervallumba esik, ahol a frekvencia a $[7 \text{kHz}, 25 \text{kHz}]$ intervallumban található, és a frekvenciát 1kHz-enként léptettük. Ezután ábrázoltuk a frekvencia relatív gyakoriságát a frekvencia függvényében (3b ábra). Látható, hogy a hisztogram széles csúccsal rendelkezik (3b ábra), a csúcs közepe 11kHz-nél található, félértékszélessége 4kHz. Ezek alapján elmondható, hogy a prekuzor tipikus frekvenciája $f = 11 \text{kHz} \pm 2 \text{kHz}$ az általunk vizsgált ELM események esetén.

¹ A Budapesti Műszaki Egyetem Nukleáris Technika Intézetében kifejlesztett idő-frekvencia transzformáció elvégzésére alkalmas IDL nyelvben írt programcsomag.



(a)



(b)

3. ábra: a) A prekuzor oszcilláció és spektrogramja, #76702-es kisülés

b) A frekvencia – relatív gyakoriság grafikon

A prekuzor jelenlétének vizsgálata az ELM keletkezési módjától függően

Fontos megvizsgálni, hogy előfordul-e prekuzor pellet által keltett ELM előtt is, vagy csak spontán keletkező ELM előtt található meg. A várakozásunk az, hogy kizárólag spontán ELM előtt figyelhető meg. Ezt a sejtést arra a felfedezésre alapoztuk, hogy amint a pellet eléri a plazma szélét, 50 μs -on belül keletkezik egy ELM [12]. A prekuzor tipikus frekvenciája 11kHz, ami fél periódusnak felel meg 50 μs alatt, de prekuzornak a legalább 5 teljes periódussal rendelkező oszcillációt nevezünk.

A fenti sejtést az adatbázis segítségével azonnal igazolni tudjuk, csak meg kell vizsgálni, hogy van-e olyan ELM esemény, ami pellet által keltett, és prekuzorral rendelkezik. Az adatbázisban fellelhető 93 pellet triggerelt esemény közül egyetlen ilyen eseményt találtunk, a 78601-es számú plazmakisülésben 58.863s-nál, amit ezután közelebbről is megvizsgáltunk. Kiderült, hogy ebben az esetben a pellet éppen akkor érkezett a plazmába, és keltett egy ELM-et, amikor a prekuzor oszcilláció már detektálható volt. Figyelembe véve az ELM frekvenciát, a pelletek belövési gyakoriságát és a prekuzor oszcilláció hosszát, egy ilyen esemény bekövetkezése 1.4s-onként várható, így egyáltalán nem meglepő, hogy előfordult az adatbázisban ilyen.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy prekuzor oszcilláció akkor figyelhető meg I-es típusú ELM előtt, ha az ELM spontán keletkezik, kivéve azt a kis valószínűségű eseményt, amikor éppen akkor történik a pellet belövés, mikor a prekuzor oszcilláció már elkezdődött.

A prekursor jelenléte és a plazmaenergia kapcsolata

Miután meghatároztuk, hogy prekuzorral csak a spontán ELM-ek rendelkezhetnek, az adatbázis további vizsgálata során kiderült, hogy a sok spontán ELM esemény közül körülbelül az egyharmada rendelkezik prekuzor oszcillációval. További vizsgálatok során kiderült, hogy érdemes megvizsgálni azt, hogy kimutatható-e valamilyen összefüggés az ELM előtti és utáni plazmaenergia és a prekuzor jelenléte között. Többek között megvizsgáltuk az ELM előtti maximális (E_{\max}) és az ELM utáni minimális energia különbsége (ΔE), és az ELM alatti relatív plazmaenergia-esés ($\Delta E_{rel} = \Delta E / E_{\max}$) és a prekuzor jelenléte közötti összefüggést. Mind a három mennyiségre megvizsgáltuk, hogy milyen kapcsolatban van a prekuzor jelenlétével. Megvizsgáltuk, hogy az adatbázisban található spontán ELM-ek közül hány prekuzorral rendelkező esemény található az (1), (2) és (3) alatt látható intervallumokban, majd a kapott számot leosztva az intervallumban található összes esemény számával, megkaptuk, hogy milyen valószínűséggel jelentkezik prekuzor az adott intervallumban.

$$[\Delta E_{rel,i} - 0.003, \Delta E_{rel,i} + 0.003],$$

$$\text{ahol } 0.006 \leq \Delta E_{rel,i} \leq 0.18 \quad (1)$$

$$[E_{\max,j} - 0.15MJ, E_{\max,j} + 0.15MJ],$$

$$\text{ahol } 0.3MJ \leq E_{\max,j} \leq 9MJ \quad (2)$$

$$[\Delta E_i - 0.012MJ, \Delta E_i + 0.012MJ],$$

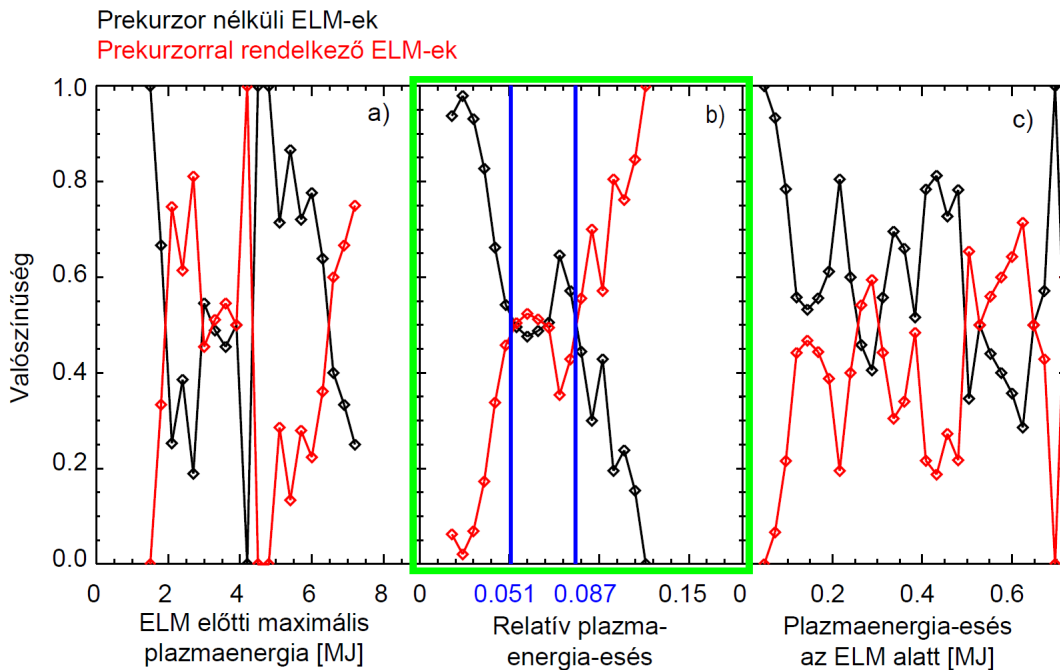
$$\text{ahol } 0.024MJ \leq \Delta E_i \leq 0.72MJ \quad (3)$$

A képletekben található i az intervallumokat indexeli. A kapott hisztogramok a 4. ábrán láthatók.

A 4. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a prekuzor jelenléte és az ELM előtt és után mérhető plazmaenergia között csak a relatív plazmaenergia-esés grafikonján figyelhető meg egyértelmű trend. A prekuzorral rendelkező ELM-ek esetében a prekuzor jelenlétének valószínűsége monoton nő a relatív plazmaenergia-esés növekedésével. Ilyen kapcsolat nem látható a maximális plazmaenergia és az abszolút plazmaenergia-esés esetében.

A kapott grafikon vizsgálatából kiderült, hogy 9%-os relatív plazmaenergia-esés felett gyakoribbak a prekuzorral rendelkező ELM-ek, 5%-os relatív plazmaenergia-esés alatt pedig többségében prekuzor nélküli ELM-eket találunk. A két érték között 50% körül változik a valószínűség. Ennek a megfigyelt trendnek az okát jelenleg nem ismerjük, de magyarázatára elképzelhetőnek tartjuk a következő „spekulatív” gondolatmenetet. A nagyobb relatív plazmaenergia-esést valószínűleg a nagyobb szél plazma nyomás gradiens váltja ki. Minél nagyobb a nyomás gradiens, a plazma annál messzebb kerül stabilitási limittől - még mielőtt az ELM összeomlás bekövetkezne, és ez az erősen instabil állapot az, ami a sűrűség és a nyomás oszcillációját válthatja ki.

Az elektronsűrűség prekuzor vizsgálatok célja egy olyan módszer kifejlesztése volt, amely képes a prekuzor jelenléte alapján nagy biztonsággal megállapítani, hogy az ELM spontán kialakuló, vagy pellet által triggerelt. A vizsgálatok során kiderült, hogy kizárólag a természetes ELM-ek esetében jelentkezik prekuzor, azonban nem minden esetben, nagy valószínűséggel csak a nagy relatív plazmaenergia-esést okozó ELM-ek esetében van jelen. Ezek alapján sajnos nem lehet a vonalintegrált sűrűsége megfigyelhető prekuzor oszcilláció jelenléte alapján teljes biztonsággal szétválogatni egy plazmakisülésben a spontán és triggerelt ELM-eket, hanem egyéb diagnosztikai eljárást is segítségül kell hívni (pl. videó diagnosztika).



4. ábra - A három vizsgált mennyiség hisztogramja a prekuzorral rendelkező és nem rendelkező ELM-ekre

Összefoglalás

Vizsgálataink során az I-es típusú ELM-ek elektronsűrűség prekursor oszcillációit vizsgáltuk. Az oszcilláció természetének pontosabb megértésével közelebb juthatunk a spontán keletkező ELM-eket okozó fizikai folyamatok megismeréséhez is, de célunk az volt, hogy megállapítsuk, vajon a prekursor oszcillációk segítségével szétválogathatók-e a pelletek által triggerelt és a természetes ELM-ek.

Meghatároztuk az elektronsűrűség prekursor oszcillációra jellemző frekvenciát, amire $f_{prekursor} = 1\text{kHz} \pm 2\text{kHz}$

adódott. Kiderült, hogy ilyen oszcillációt csak spontán keletkező ELM-ek előtt figyelhettünk meg, de ott sem mindig. Sikerült összefüggést találnunk az ELM-ek által okozott relatív plazmaenergia-esés és a prekursor oszcilláció jelenléte között is: ha az ELM-ek által okozott relatív plazmaenergia-esés nagyobb, mint 9% és az ELM spontán keletkezett, nagyobb valószínűséggel tapasztalunk prekursor oszcillációt. Viszont az is kiderült, hogy csak az elektron sűrűség prekursor oszcillációk vizsgálatával nem tudjuk megállapítani egy ELM-ről, hogy pellet által triggerelt vagy természetes módon keletkezett-e.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni a KFKI RMKI Plazmafizikai Főosztályán dolgozó kollégáknak a közreműködést, illetve a JET-nél dolgozó kutatóknak, különösen Peter Langnak és Ronald Wenningernek a segítségét. Köszönjük Pokol Gergőnek, hogy rendelkezésünkre bocsátotta az NTI Wavelet Tools programcsomagot.

Irodalomjegyzék

- [1] F. Wagner et al: *Regime of improved confinement and high beta in neutral-beam-heated divertor discharges of the ASDEX tokamak*; *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982) 1408-1412
- [3] H. Zohm: *Edge localized modes (ELMs)*, *Plasma Phys. Control. Fusion* 38 (1996) 105-128
- [3] Az ITER berendezés honlapja: <http://www.iter.org>
- [4] Szepesi T. et al: *Pelletek által keltett mágneses perturbációk vizsgálata fúziós plazmakísérletekben*, *Nukleon II* (2009) 48
- [5] F. Ryter et al: *H-Mode Results in ASDEX Upgrade*, *Plasma Phys. Control. Fusion* 36 (1994) A99-A104.
- [6] P. T. Lang et al: *ELM pace making and mitigation by pellet injection in ASDEX Upgrade*; *Nuclear Fusion* 44 (2006) 665
- [7] A. Herrmann: *Overview on stationary and transient divertor heat load*, *Plasma Phys. Control. Fusion* 44 (2002) 883
- [8] C.P. Perez et al: *Type-I ELM precursor modes in JET*, *Nucl. Fusion* 44 (2004) 609-623
- [9] I. H. Hutchinson: *Principles of plasma diagnostics Second Edition*; Cambridge University Press, p112
- [10] A. Boboc et al: *Simultaneous Cotton-Mouton and Faraday rotation angle measurements on JET*; *Rev. Sci. Instrum.* 77 (2006) 10F324
- [11] S. Mallat: *A wavelet tour of signal processing. Academic Press, second edition, 2001.*
- [12] G. Kocsis et al: *Spatio-temporal investigations on the triggering of pellet induced ELMs*; *Nuclear Fusion* 47, 1166-1175, 2007, IF:3.278