

Pelletek által keltett mágneses perturbációk vizsgálata fúziós plazmakísérletekben

Szepesi Tamás¹, Kálvin Sándor¹, Kocsis Gábor¹, Karl Lackner², Peter T. Lang²,
Marc Maraschek², Pokol Gergő³, Pór Gábor³

¹MTA KFKI-RMKI, EURATOM Association 1525 Budapest, Pf. 49.

²Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association Boltzmannstr. 2, 85748 Garching, GERMANY

³BME Nukleáris Technika Intézet 1521 Budapest, Pf. 91.

Az ELM-ek (periodikus energiakitörések fúziós plazmákban) keltése deutérium pelletekkel manapság rutinfeladat, ugyanakkor a keltési mechanizmus eddig még nem tisztázott. A folyamat részletes megértése kulcsfontosságú ahhoz, hogy a jövőbeli, nagyméretű fúziós berendezésekben az ELM-ek pelletekkel való keltéséhez és szabályozásához szükséges és elégséges feltételeket megbecsülhessük. Egy pellet a plazmába jutva erős elektromágneses perturbációt okoz, ami az ELM keletkezésének egyik feltételezett kiváltó oka. A pellet által okozott perturbáció mágneses komponensét különböző mágneses szondák jelein vizsgáltuk az ASDEX Upgrade tokamakon, ún. L-mód és I-es típusú ELM-es H-mód plazma-konfigurációkban. A pellet által keltett perturbációt mindkét konfigurációban azonos frekvencián és módusszámmal észleltük, amely eltért az I-es típusú ELM-eket kísérő perturbációk ugyanezen jellemzőitől.

Bevezetés

Az I-es típusú ELM-ek (*Edge Localised Mode*) H-módban üzemelő fúziós plazmákban periodikusan fellépő magneto-hidrodinamikai (MHD) instabilitások, amelyek következtében jelentős mennyiségű részecske lökődik ki a szélplazmából ezredmásodperces időskálán. A részecskék által szállított energia a berendezés belső falára, legfőképpen a divertorra érkezik, ahol a kis felület és a rövid időskála miatt a csúcsterhelés akár több MW/m² is lehet. A jelenlegi skálatorvények szerint az ELM-ek által okozott hőterhelés a berendezés méretével növekszik. A jelenleg építés alatt álló legnagyobb kísérleti fúziós reaktor (ITER) esetében az I-es típusú ELM-ek által okozott hőterhelés meghaladná az 5-10 MW/m² értéket, amely már számottevő kárt okozna, és irreálisan alacsony értékre szorítaná le a divertorelemek élettartamát 0. A plazmát az ELM instabilitások nélküli tartományban is lehetséges üzemeltetni, azonban ekkor olyan gyenge a plazma és a környezete közötti gázcsera, hogy nem oldható meg a plazma sűrűségének szabályozása és a szennyezők kivonása. Az ELM-mentes esetek mellett vannak olyan üzemmódok is, amikor kisméretű, sűrű ELM-ek jelentkeznek a plazmában. Fenomenológiai alapon ezeket különböző típusokba sorolják. A legjobb energiaösszetartású plazmákban a nagyméretű, I-es típusú ELM-ek jellemzők, a többi típus esetében a plazma energiaösszetartása általában kisebb, ezért ezek nem optimálisak egy fúziós erőműhöz.

Az ELM-ek káros hatásainak kivédésére többféle módszert is kifejlesztettek. Ezek jelentős része az ELM-ek ismétlődési gyakoriságának (f_{ELM}) növelését alkalmazza, mivel kísérleti megfigyelések szerint az ELM-ek gyakorisága fordítottan arányos az egy ELM által szállított energiával (ΔW_{ELM}) 0. Az ELM-gyakoriság- többek között – üzemanyag-utánpótló pelletek (fagyasztott deutérium) sorozatos belövésével növelhető meg. Megfigyelések szerint minden belőtt pellet szinte azonnal képes egy újabb ELM-et triggerelni, így ha a pelletbelövési gyakoriság (f_{pellet}) meghaladja az ELM-ek természetes ismétlődési frekvenciáját (f_{ELM}^0), akkor az ELM-gyakoriság beáll az f_{pellet} értékre. Az ASDEX Upgrade tokamakon végzett kísérletek alapján a valóságban ez akkor teljesül, ha $f_{pellet} \geq 1.5 f_{ELM}^0$; az ELM-ek által szállított energia ennek megfelelően csökken 0.

Technikai korlátok miatt az ELM-gyakoriságot eddig még csak megduplázni sikerült pelletek belövésével, szemben az ITER esetében szükséges tízszeres faktorial. A jelenlegi berendezéseknél a pelletbelövési gyakoriság további növelése nem lehetséges, mert a plazmatérfogathoz képest túlságosan nagy mennyiségű anyagot juttatnának a pelletek a plazmába. Ezért az ilyen kísérleteket csak a jelenleg épülő nagyméretű berendezéseknél lehet megvalósítani, amelyeket alacsonyabb ELM-frekvencia jellemez (aminek megtízszerezése tehát egyszerűbb feladat). Ezért a jelenlegi berendezéseken az ELM-triggerelés *folymatát* érdemes vizsgálni, és annak mélyebb megértése által becslést adni az ITER méretű tokamakokban ELM-ek triggereléséhez szükséges minimális pelletparaméterekre.

Kísérleti eszközök

Jelen cikkben a pelleték által okozott mágneses perturbációt vizsgáltuk az ASDEX Upgrade tokamakon (nagy sugár $R = 1,65$ m, kis sugár $a = 0,5$ m, tipikus plazmatérfogat $V_{\text{plazma}} = 13$ m³), két különböző típusú plazmakonfigurációban. A kísérletekben használt pelleteket a centrifuga elvén működő pelletbelövő szolgáltatja. A centrifugával 240–1000 m/s sebességű, $1,6\text{--}4,0 \times 10^{20}$ deutériumatom anyagot tartalmazó pelleték állíthatók elő maximum 83 Hz ismétlési frekvenciával. A pelleték egy optimalizált repülési csőben a tórusz nagy mágneses terű (*high field side*, HFS) belső-felső oldalára jutnak, és a vízszinteshez képest 72°-os szögben repülnek a plazmába.

A plazma mágneses tevékenységét tekercsekkel vizsgálják, amelyek közül jelen cikkben az ún. ballooning (BAL) tekercsekből álló készlettel foglalkozunk. A BAL-tekercsek a tórusz alacsony mágneses terű (LFS) külső oldalán a plazmához lehető legközelebb, helyezkednek el, és a mágneses tér változásának radiális komponensére érzékenyek. Mintavételezésük 2 MHz gyakorisággal történik, így a mágneses tevékenység legmagasabb kimutatható frekvenciája 1 MHz.

Feldolgozási módszerek

A BAL-tekercsek jeleinek frekvencia-analíziséhez és annak időbeli változásának vizsgálatához az ún. STFT (*Short-time Fourier Transform*) eljárást használtunk, amely egy folytonos Fourier-transzformáció. A jelen cikkben az STFT-t egy 200 pont (100 μ s) széles Gauss-ablakkal számoltuk, ahol a szélesség a Gauss-függvény kétszeres szórása. Az STFT-ből számolt idő-frekvencia-energiásűrűség-eloszlást hívjuk spektrogramnak.

A toroidális módusszámok (a perturbációk toroidális irányban vett periódusai számának) meghatározása a toroidális BAL-tekercskészlet jeleinek felhasználásával történt folytonos analitikus wavelet-transzformáció által szolgáltatott fázisértékek alapján. Az idő-frekvencia sík minden pontjára meghatároztuk a relatív fázist a toroidális tekercsek minden lehetséges kombinációjára. Egy tisztán szinuszos szerkezetű plazmamódus esetében a relatív fázisok egy egyenesre esnek a tekercsek egymáshoz viszonyított helyzete függvényében, és az egyenes meredeksége megegyezik a módusszámmal. A módszer egyben a wavelet-koherencia kiszámítására is alkalmas, amivel a módus globális jellege ellenőrizhető.

A módus intenzitására vonatkozó információ gyors kinyerésére definiáltuk az „MHD-amplitúdót”, amivel a mágneses perturbáció (módus) erősségét kívánjuk jellemezni. Az általunk vizsgált jelenségek (pelletbelövések és ELM-ek mágneses lenyomatai) a spektrogramokon tipikusan az 50 – 300 kHz közötti frekvenciákon jelentkeznek. Ezért az MHD-amplitúdót úgy definiáltuk, hogy az ennél alacsonyabb frekvenciájú jelenségekre ne legyen érzékeny. A mágneses jelre egy numerikus felületeresztő szűrőt alkalmazunk, majd 25 μ s-os ablakokban meghatározzuk a jel maximumának és minimumának különbségét, ami

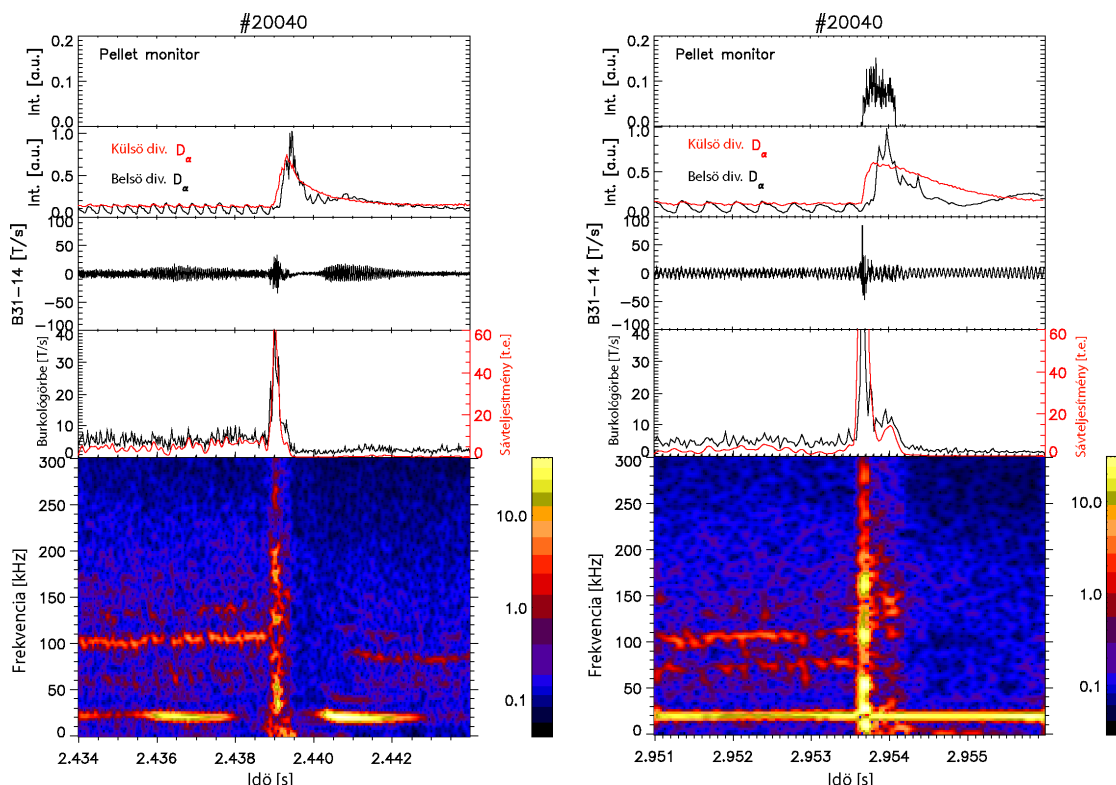
tulajdonképpen a jel nagyfrekvenciás komponensének burkológörbéje („envelope”). A burkolójel időbeli viselkedése kvalitatívan nagyfokú egyezést mutat az 50–300 kHz-es tartományban számolható *sávteljesítménnyel*, ugyanakkor előállításra igen egyszerű és gyors, ezért jelen cikkben ezt a mennyiséget használjuk a mágneses perturbáció erősségének jellemzésére.

Kísérleti eredmények

I-es típusú ELM-es H-mód

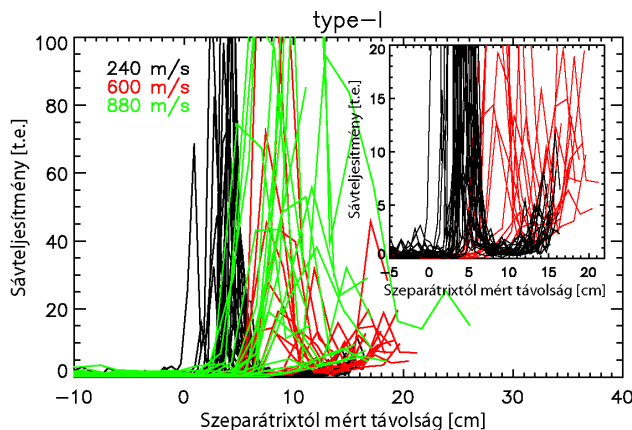
Vizsgálataink célja az I-es típusú ELM-ek keltési folyamatának mélyebb megértése. Ebben az alfejezetben a pelleték által keltett és természetesen előforduló I-es típusú ELM-ek mágneses jellemzőit ismertetjük. Az **Error! Reference source not found.** a plazma számunkra értékes jellemzőit tartalmazza a fenti két esetre. Az I-es típusú ELM markánsan jelentkezik mind a divertor H-alfa sugárzásában, mind a mágneses szondák jelein. Az MHD-amplitúdó jelen a természetes és a triggerelt ELM is egy éles csúcsot produkál. Az egyedüli különbség, hogy a triggerelt esetben az „ELM-csúcs” után a burkolójel nem csökken nullára, hanem ismét emelkedik egészen addig, amíg a pellet teljesen ki nem ég (ld. pelletablációs monitorjel). Ez csak olyan esetekben figyelhető meg, ahol a pelletabláció meghaladja az ELM időtartamát, azaz nagy valószínűséggel állíthatjuk, hogy az ilyen módon észlelhető mágneses tevékenység a pellettel közvetlenül összefüggésbe hozható. Így módunk nyílik rá, hogy az ELM és a pellet által keltett mágneses tevékenységet egymástól függetlenül vizsgáljuk, legalábbis az ELM lezajlása után.

Látható az 1. ábra jobb oldali spektrogramján, hogy a pellet által keltett mágneses tevékenység a 100 – 250 kHz-es frekvenciatartományba esik, igen hasonlóan az ELM alatt tapasztalhatóhoz. A burkolójel viselkedése minden pellet (és ELM) esetében igen hasonló (ELM-csúcs és monoton növekedés a pellet kiégéséig), és független a pelletparaméterektől. Az egyedüli eltérés – különböző sebességű pelleték esetén – az időbeli lefutás, hiszen a gyorsabb pelletek hamarabb jutnak a plazma forróbb régióiba, és az ELM-et is hamarabb triggerelik. Ez a különbség kiegyenlíthető, ha az időtengelyt minden pellet-eseményre kicseréljük az adott pellet szeparátrixtól mérhető pillanatnyi távolságával, azaz az időtengelyt „beszorozzuk” a pellet sebességével. Így távolságot kapunk, amelynek zérus értékét a pelletpálya-szeparátrix metszésponthoz állítjuk. A burkolójelet tehát a szeparátrixtól mért távolság függvényében ábrázolva a különböző sebességű pelletekre is hasonló lefutást kapunk (2. ábra), kivéve az ELM-csúcs helyét. Bár a tapasztalat szerint 0 az ELM-et mindig ugyanazon a helyen triggerelik a pelleték a plazmában, az instabilitás észlelhető mértékűvé növekedéséhez idő kell. Ez alatt az állandó növekedési idő alatt a gyorsabb pelletek nagyobb távolságot tesznek meg, ezért az ELM-csúcs nagyobb távolságnál jelentkezik, mint a lassabb pelleteknél. Az ELM-csúcs azonban – a fentieknek megfelelően – magához az ELM-instabilitáshoz tartozik, ezért a pellet által



1. ábra: Divertor H-alfa sugárzás, pellet monitorjel, mágneses jel, burkolója és spektrogramja természetes (balra) és pellettel triggerelt (jobbra) ELM közben.

közvetlenül keltett perturbáció vizsgálatához tekintünk el tőle. Ezt természetesen csak akkor tehetjük meg, ha pelletabláció hosszabb, mint maga az ELM (ld. 2. ábra, kinagyított részlet). Jól látható a fent említett monoton növekedés, ami a két különböző sebességű esetben hasonló. A burkolójel a pellet kiegészékor aktuális amplitúdójáról 50-100 μs-os időállandóval exponenciálisan lecseng a háttérzaj szintjére. Erre a lecsengésre a következő alfejezetben még visszatérünk.

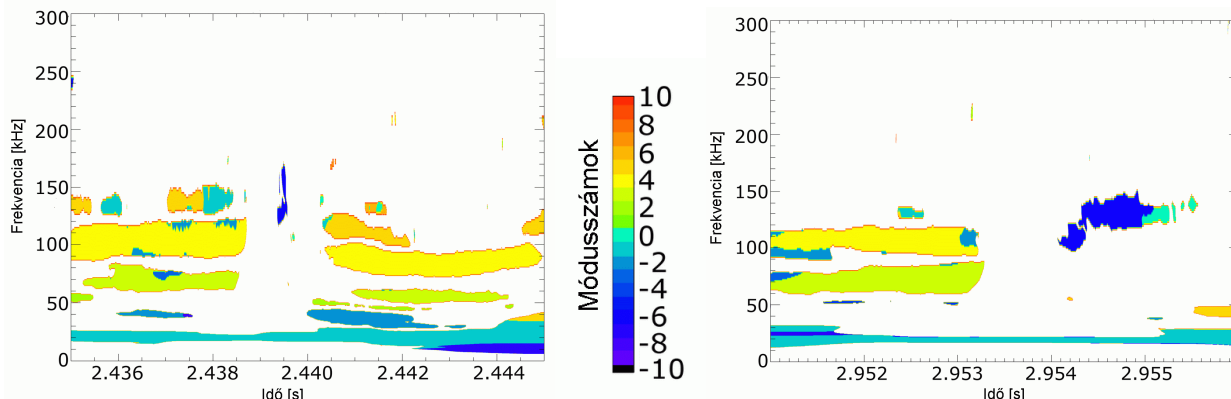


2. ábra: MHD-amplitúdó (burkolójel) I-es típusú ELMy H-módban, különböző pelletsebességekre, a lassabb pelletekre kinagyított részlettel

A módusszámok meghatározásával további információkhoz juthatunk (3. ábra). Mindkét esetben azonosíthatók az alábbi jelenségek: kb. 20 kHz-es frekvenciával és $n=1$ toroidális módusszámmal láthatók a plazma magjában folyamatosan jelen lévő módusok, valamint az ELM-ek előtt és után, különböző frekvenciákon (70-100-130 kHz) egyszerre megjelenő (és ez által létrafokokhoz hasonló képet rajzol) módusok $n=3, 4, 5$ módusszámokkal. Az I-es típusú ELM-ek alatt sajnos a jelenleg használt módusszám-meghatározás nem használható, de a szakirodalomban nemrég megjelent igen alapos analízis 0 szerint az ELM-ek alatt is $n=4$ mérhető. A természetes és a triggerelt eset azonban eltérést is mutat: a 100-150 kHz közötti frekvenciatartományban egy $n=6$ módusszámmal jellemezhető koherens módus jelenik meg, ami a triggerelt esetben számottevően hosszabb élettartamú. Ez a módus a burkolójelnél már szintén észlelt pellet által keltett perturbációhoz köthető.

Tisztán ohmikus fűtésű L-mód

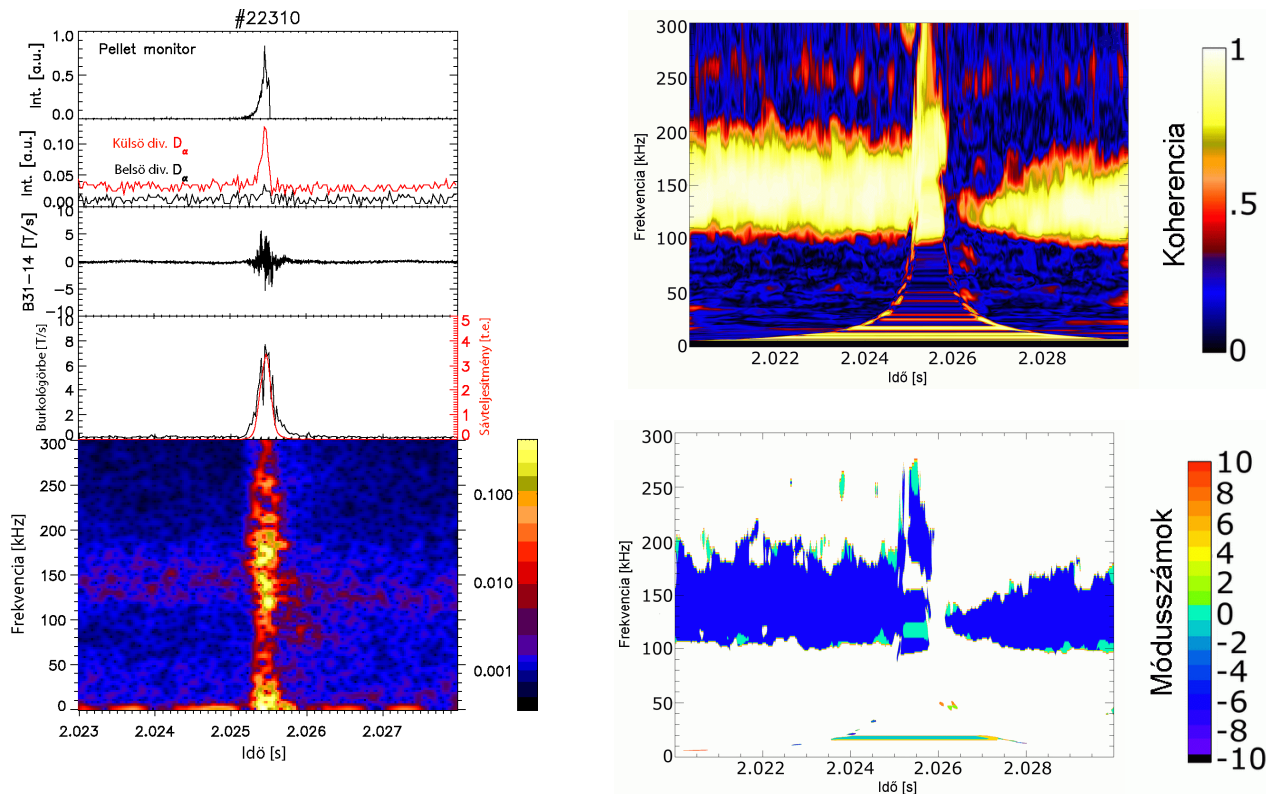
Az I-es típusú ELM-es H-módban a pellet által keltett MHD perturbációról közvetlenül az ELM előtt nem szerezhetünk információt, mivel minden pelletbelövést szinte azonnal követ egy ELM, és az ELM mágneses lenyomata elfedi a pellet által keltett perturbáció lenyomatát. A pellet által keltett perturbációt olyan plazmakonfigurációban tudjuk csak vizsgálni, amelyben nincsenek ELM-ek. Ilyen konfiguráció pl. a tisztán ohmikus fűtésű L-mód („OH”).



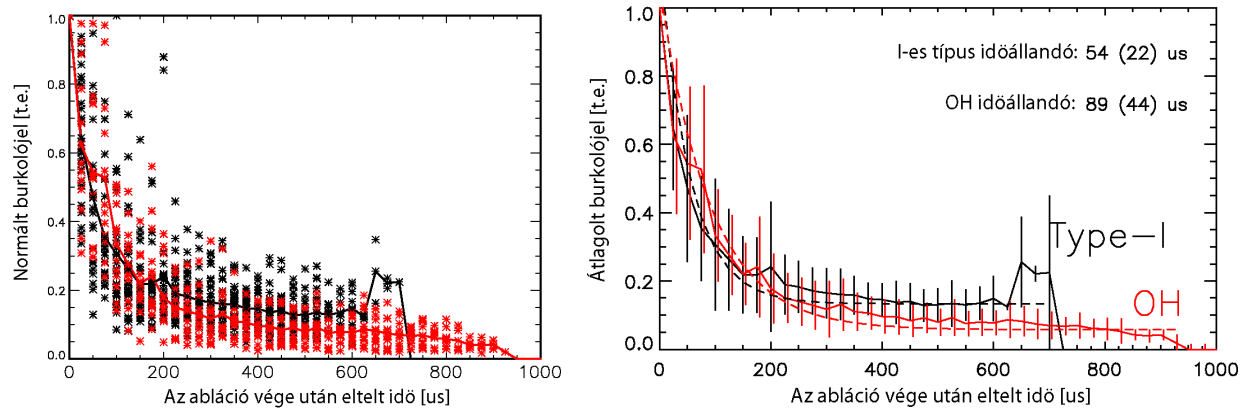
3. ábra: Módusszám-spektrumok természetes (balra) és triggerelt (jobbra) ELM-ek esetében

A 4. ábra (balra) ugyanazokat a mennyiségeket tartalmazza az OH módra, mint az 1. ábra az I-es típusú H-módra, valamint a módusszámot és a toroidális BAL-tekercsek között számolt minimális koherenciát (jobbra). A divertor H-alfa sugárzásában a pellet saját fénye látható, és a mágneses szonda jele is eltér a H-módban tapasztalttól: amplitúdója több mint egy nagyságrenddel kisebb, időtartama pedig a pellet élettartamával egyezik meg. A spektrogramon és a wavelet-koherencián is jól látható a kb. 150 kHz-nél jelentkező, $n=6$ módusszámú TAE (Toroidal Alfvén Eigenmode), ami az AUG standard OH plazmájában is megtalálható koherens módus 0. A pelletabláció ideje alatt széles frekvencia-tartományban koherens oszcilláció

észlelhető, amelynek módusszáma szintén -6-nak adódik. Ennek alapján feltételezhető, hogy a pellet széles frekvenciasávban gerjeszti az Alfvén-hullámokat, amelyek azonban a plazmában csak bizonyos helyeken és keskeny frekvenciasávokban csillapíthatatlanok. Ezek a hullámok észlelhetők a már említett 150 kHz környékén, míg a többi hullám a csillapításnak megfelelően a gerjesztés megszűnése (pellet kiegészése) után exponenciálisan lecseng. Az exponenciális lecsengés időállandója az OH esetben is 50-100 μ s, amit könnyen összehasonlíthatunk az I-es típusú ELMy H-módban tapasztalttal, ha a burkolójelet lenormáljuk a pellet kiegészésekor vett értékkel (minden pellet-eseményre külön-külön), ld. 5. ábra.



4. ábra: A pellet által keltett mágneses perturbáció főbb indikátorai: spektrogram (balra), koherencia (jobbra fent) és módusszámok (jobbra lent) OH plazmakonfigurációban



5. ábra: Balra: A pellet által keltett (normált) MHD perturbáció exponenciális lecsengése a pellet kiégése után OH és I-es típusú ELM-y H-mód esetében (pontok: mért adatok, vonal: átlag). Jobbra: Folytonos vonal - átlag, szaggatott vonal - illesztett exponenciális lecsengés, függőleges vonal: az illesztés hibája.

A fentiek alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy a pellet csupán a plazmában már jelenlévő módusokat gerjeszt és erősít fel. A pellet által keltett perturbációt mágneses diagnosztikával észlelhető ismert módusokkal összehasonlítva arra lehet következtetni, hogy a pellet Alfvén-hullámokat gerjeszt OH plazmakonfigurációban,

igen széles frekvenciatartományban. Az I-es típusú ELM-es H-móddal való összehasonlítás eredményeként feltételezhetjük, hogy ebben a konfigurációban is Alfvén-hullámokat kelt a pellet, mert a gerjesztett perturbáció igen hasonló tulajdonságokat mutat, mint az OH módban.

Irodalomjegyzék

- [1] Polevoi A.R. et al., *Nuclear Fusion* 43 (2003) 1072
- [2] A. Herrmann et al., *Plasma Phys. and Control. Fusion* 44 (2002) 883
- [3] P.T. Lang et al., *Nuclear Fusion* 44 (2004) 665
- [4] S. Mallat: *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 2001.
- [5] G. Pokol et al., *AIP Conference Proceedings*, vol. 993 (2008) 215
- [6] J. Neuhauser et al., *Nucl. Fusion* 48 (2008) 045005
- [7] G. Kocsis et al., *Nucl. Fusion* 47 (2007) 1166
- [8] M. Maraschek et al., *Phys. Rev. Letters* 79 (1997) 4186