

# TDK dolgozat

## Törtpellet-darabkák méreteloszlásának meghatározása lézerfüggöny diagnosztikával

**Sándli Lóránt - JVAXFO**

ELTE TTK, fizika BsC 3. év

2022



**ELTE**  
EÖTVÖS LORÁND  
TUDOMÁNYEGYETEM



Energiautudományi  
Kutatóközpont

Témavezető: Szepesi Tamás

*szepesi.tamas@ek-cer.hu*

Energiautudományi Kutatóközpont  
Fúziós Plazmafizikai Laboratórium

# Tartalomjegyzék

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Bevezetés</b>                                            | <b>1</b>  |
| 1.1. A fúziós energiatermelés megvalósítása a Földön . . . . . | 1         |
| 1.2. Mágneses összetartás . . . . .                            | 2         |
| 1.3. Diszrupciók . . . . .                                     | 3         |
| 1.4. SPI kísérletek . . . . .                                  | 4         |
| <b>2. Algoritmus fejlesztése</b>                               | <b>6</b>  |
| 2.1. Darabok megtalálása és ellipszis illesztés . . . . .      | 7         |
| 2.2. Duplikátumok szűrése . . . . .                            | 10        |
| <b>3. Méret validáció</b>                                      | <b>10</b> |
| <b>4. Valós mérések feldolgozása</b>                           | <b>12</b> |
| 4.1. Első mérések . . . . .                                    | 12        |
| 4.2. Mérések interferencia szűrővel . . . . .                  | 13        |
| <b>5. Threshold tesztek</b>                                    | <b>14</b> |
| <b>6. Átfedésben lévő darabok kezelése</b>                     | <b>18</b> |
| 6.1. Terület arány módszer . . . . .                           | 19        |
| 6.2. Terület különbség módszer . . . . .                       | 21        |
| <b>7. Konklúzió és kitekintés</b>                              | <b>23</b> |

## Kivonat

A tokamak típusú fúziós berendezésekben, különösen a nagyméretűekben, a plazma hirtelen összeomlása (diszrupció) jelentős anyagi károkat tud okozni. A diszrupciók negatív hatásainak csökkentésére számos módszert fejlesztenek, ezek egyike az ún. törtpellet-belövés, amely a jelenleg épülő ITER tokamak számára kiemelt fontosságú. A módszer lényege, hogy egy nagyméretű, fagyott hidrogénből (és egyéb adalékanyagokból, pl. neon) készült pelletet nagy sebességgel a plazmába lövünk, úgy, hogy közvetlenül a plazmába jutás előtt kisebb darabokra széttörjük. Egy ilyen törtpellet-belövő rendszer épült az Energia Tudományi Kutatóközpont Plazmafizika osztályán, egy ITER által támogatott pályázat keretében. Ebbe a kísérleti munkába csatlakozom bele a TDK dolgozatom elkészítésével. Célom a tört pelletdarabkák jellemzése, méretének meghatározása. Erre a célra egy nagysebességű kamerát használunk, amivel a darabkák egy lézerfüggönyön való áthaladását rögzítjük. Feladatom a mért adatok kiértékelése, a gyorskamera képeinek feldolgozása általam írt számítógépes programok segítségével.

## 1. Bevezetés

### 1.1. A fúziós energiatermelés megvalósítása a Földön

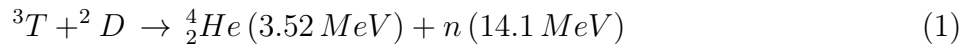
Az 1920-ban években felfedezték, hogy 4 hidrogén atom együttes tömege nehezebb egy hélium atoménál, amiből azt a következtetést vonták le, hogy a hidrogén atomok "összerakásával", azaz fúziójával energia nyerhető. 1928-ban megfigyelték, hogy a csillagok energiája a magból indul, ami a számítások szerint 40 millió Kelvin hőmérsékletű. Ahhoz, hogy ez a folyamat végbemehessen, az atommag energiájának elég magasnak kell lennie ahhoz, hogy legyőzze a Coulomb-gátat és elég közel kerüljön az erős kölcsönhatás felülkerekedéséhez. Ebben a folyamatban jelentős szerepe van az 1929-ben felfedezett kvantum-alagút-effektusnak is, ami a Coulomb-potenciálnál kisebb energiájú részecskéknek is lehetővé teszi a fúziót [1].

Az első fúziós kísérletek az 1930-as években kezdődtek részecskegyorsítók segítségével. 1932-ben sikerült létrehozni az első ember által végbement fúziót. Ezek a kutatások segítettek megérteni a Nap működését, azonban a földi energiatermelést nem sikerült megvalósítani a rendkívül alacsony hatásfok miatt. Ennek az az oka, hogy az atommagok nagy része nem talál el szemtől szembe egy másik atommagot, azaz szóródni fog, és energiájának jelentős részét átadja a másik részecskének - azaz a céltárgy melegedni fog, miközben a gyorsítóból érkező részecskék lelassulnak, és a továbbiakban nem lesz elég energiájuk fúziós reakció létrehozásához [2].

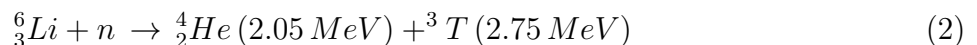
Erre a problémára a megoldás, ha a két részecskének a mozgási energiája hasonló, és ekkor szinte tökéletesen rugalmasan ütköznek, tehát az ütközések után sem változik az egyes részecskék energiája jelentősen. Mivel a fúzióhoz nagy mozgási energiára van szükség, és minden részecskének ilyen energiájúnak kell lennie azt kapjuk, hogy az anyagunk szükségszerűen rendkívül magas hőmérsékletű. Ilyen magas hőmérsékletű anyagban, ha a részecskék atomok, az ütközések leszakítják az atomok elektronjait, így egy töltött részecskékből álló anyagot kapunk, amit plazmának hívunk. A plazmának az egyik nagyon hasznos tulajdonsága, hogy hat rá a mágneses tér, amit a mai fúziós kutatások egyik főiránya, a mágneses összetartású fúziós berendezések ki is használnak (a másik fő irány az inerciális összetartás). A másik fontos tulajdonsága a plazmának, hogy elég nagy hőmérsékletű, ezért nem tudjuk csak belerakni egy tartályba mert az el fog olvadni (vagy a plazmát hűti le annyira, hogy ne legyen plazma)

Mivel az egész kutatási terület abból indult, hogy "építsünk egy Napot a Földön" arra gondolhatnánk, hogy a kutatók a Napban lezajló folyamatokat próbálják utánózni, ez azonban

nem igaz. A Napnak két fő fúziós folyamata van. Az egyik a proton-proton (p-p) ciklus, a másik pedig a szén-nitrogén-oxigén (CNO) ciklus. Sajnos mindkét folyamatnak igen kicsi a hatáskeresztmetszete, ami azzal magyarázható, hogy a reakcióban részt vevő egyik protonnak negatív béta bomlással neutronná kell alakulnia. Ezért a földi energiatermelésre még a részecskegyorsítóval végzett kísérletek során megfigyelt deutérium-trícium (D-T) reakció bizonyult a legkivitelezhetőbbnek [3].

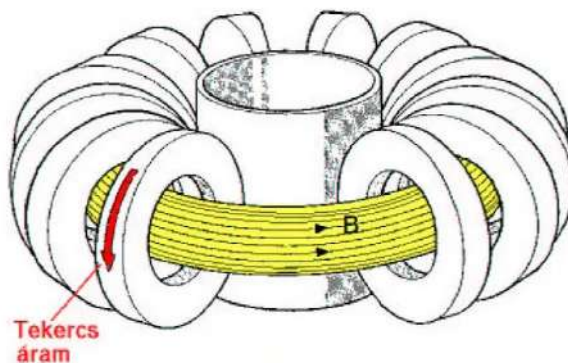


Az üzemanyag-ellátás kritikus része a trícium beszerzése, ugyanis a trícium - viszonylag rövid (12,3 év) felezési ideje miatt - a természetben alig fellelhető. Szerencsére egy fúziós erőmű képes lehet a számára szükséges trícium megtermelésére, a fenti reakcióban keletkező neutron lítiumban történő befogásával:



## 1.2. Mágneses összetartás

Használjuk ki, hogy a plazmákra hat a mágneses tér. Ezt úgy tesszük, hogy a plazmákat belerakjuk egy szolenoidba, és ekkor a mágneses tér a töltött részecskéket körpályára kényszeríti, ez a Larmor-mozgás. A körpálya sugara fordítottan arányos a mágneses tér nagyságával, így a plazmákat be tudjuk zárni egy tartályba úgy, hogy nem ér közben a tartályhoz. Ez a megoldás azonban még szabadon hagy egy irányt, amelyben a részecskék szabadon mozoghatnak, így előbb-utóbb mégiscsak a tartályunk falában fognak kikötni. Ezt úgy tudjuk orvosolni, ha szolenoidunkat kör alakúra hajtjuk és ekkor kapunk egy tóruszt az alábbi ábra szerint:



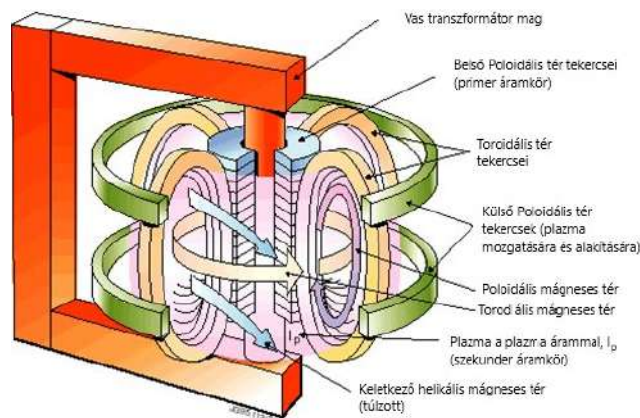
2. ábra. A tórusz alakú plazmatartály felépítése. Látható, hogy a mágneses tér az ún. toroidális irányba mutat, tehát a részecskék a Larmor-mozgást erre merőlegesen az ún. poloidális irányba végzik [2].

Ez azonban ismét nem hoz tökéletes megoldást. Amikor begörbítettük a mágneses terünket, akkor a tér úgy változott, hogy a tórusz közepe felé erősebb, míg a külseje felé gyengébb lett [4]. Ennek következményeként a Larmor-mozgás már nem körpálya alakú lesz, aminek következtében a részecskék elkezdenek vándorolni. Ezt a jelenséget általánosan driftnek, a mágneses tér inhomogenitása miatt bekövetkezőt pedig *grad B* driftnek nevezzük. Driftet nem csak a mágneses mező inhomogenitása okozhat, hanem bármely más a plazmára ható erő. A *grad B* drift iránya töltésfüggő is, emiatt a plazmában töltésszétválás jön létre, ami a függőleges irányú elektromos teret okoz. Ez az  $E \times B$  drifthez vezet, ami töltésfüggetlen, és a tórusz külseje felé mutat. A végkimenetel ismét az, hogy a plazmánk a tartályunk falában köt ki.

Szerencsére erre a problémára is van megoldás. Ehhez a mágneses erővonalainkat meg kell tekerni spirál alakba, ekkor ún. helikális mágneses térszerkezetet kapunk. Mivel az  $E \times B$  drift a mindig a tórusz külseje fele mutat, ha sikerül úgy felcsavarnunk a mágneses teret, hogy a részecske több időt töltsön a tórusz belső felén, akkor sikerülhet bent tartanunk a részecskét.

Két típusú mágneses összetartású berendezést különböztetünk meg, amelyek megfelelnek a fentieknek. Az első az ún. sztellarátor. Ebben a mágnesek megfelelő rendezésével érik el a helikális mágneses teret. A másikban úgy érik el, hogy a plazmában a transzformátor elve szerint áramot indukálnak. Ekkor a tekercsek által létrehozott mágneses tér és a plazmában lévő áram által keltett mágneses tér szuperpozíciója fogja létrehozni a helikális térszerkezetet. Ezeket a berendezéseket hívjuk tokamaknak [4], amelyek jelenleg a mágneses összetartású fúziós kutatások elsődleges vonalát képviselik.

Tokamakban a mágneses teret torodiális, többnyire "D" alakú tekercsekkel hozzák létre. Az áramot úgy hajtják a plazmában, hogy egy transzformátor primer tekercsében egy változó mágneses teret generálnak. Viszont nagyon fontos, hogy a plazmaáramnak egyenáramnak kell lennie, ezért a transzformátor primer tekercsében folytonosan növelni kell az áramot, amit nem tudunk a végtelenségig megtenni. Ennek következményeként a tokamakok nem képesek folytonos működésre, csak előre meghatározott idejű "kisülésekre". A plazmaáramnak egy igen fontos hasznos következménye, hogy erősen fűti a plazmát, ami elég a plazmaállapot létrehozásához és fenntartásához.



3. ábra. Egy tokamak felépítése. Látható a plazmaáramot generáló tekercs. [2]

### 1.3. Diszrupciók

A diszrupció, más szóval plazmaösszeomlás, a tokamakok egyik legveszélyesebb instabilitása. A fentiekben láthattuk, hogy a tokamakokban a plazmaáram által létrehozott mágneses tér a részecskeösszetartás alapvető feltétele, tehát a plazmaáram kontrollálatlan változása vagy megszűnése az összetartás elvesztéséhez vezet. Ekkor a plazma hirtelen lehűl, amitől elveszti a jó vezető képességét, azaz hirtelen megnő az ellenállása, azonban a plazmaáram még mindig folyik, ezért hirtelen hatalmas feszültség fog keletkezni. Ennek következtében a tokamak szemléletesen szólva egy ciklotronná változik és elkezd gyorsítani a töltött részecskéket. Bizonyos feltételek mellett az elektronok képesek ilyen módon több energiára szert tenni, mint amennyit ütközések közben veszítenek, azaz folyamatosan gyorsulnak, és így ki fog alakulni egy elektron nyaláb. Mivel a nyalábban elektronok vannak, itt igazából áram fut, amire hatni fog az ún. pinch effektus. Ennek a következménye az, hogy a nyaláb elkezd vékonyodni, más szóval fókuszálódni, tehát a nyaláb összetartja önmagát. Az ilyen nyalábokat nevezzük elfutó elektron nyalábnak. Egy kis idő után túl nagy lesz a nyaláb energiája, a tokamak mágneses tere már nem fogja a

berendezés belsejében tartani, és a nyaláb majd valahol beleütközik a kamrafalba, ami komoly károkat tud okozni. A jelenlegi számítások alapján az ITER-ben  $MeV$  energiaskálájú [5] elektronnyalábok lesznek képesek kialakulni.

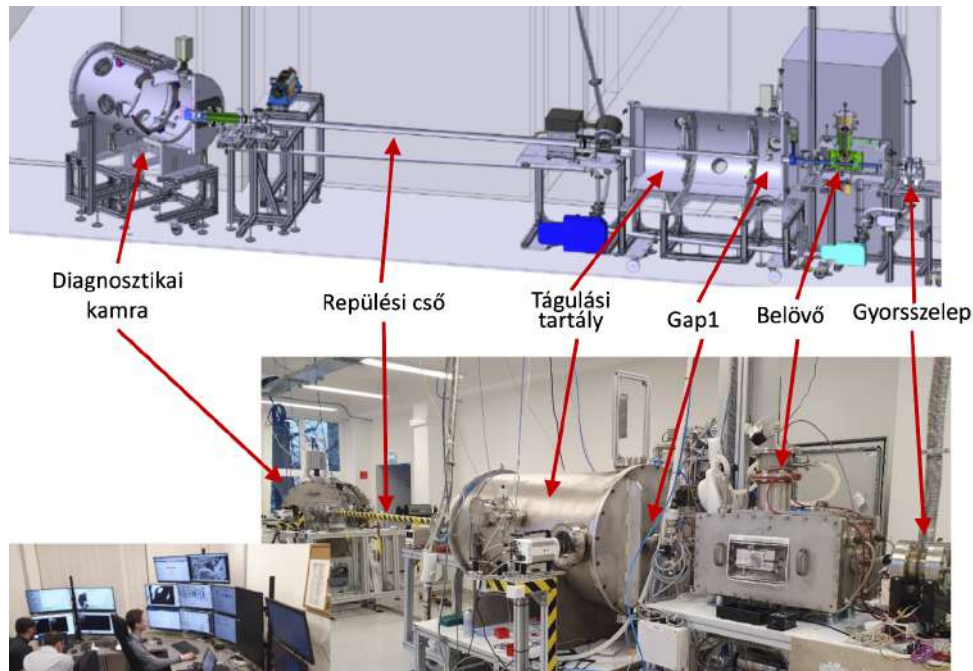
A mágneses tér hirtelen változása nem tesz jót a tartószerkezetnek sem, ezért ezt figyelembe kell venni a tartószerkezet tervezésekor, hiszen ezeket a hatalmas erőket el kell viselnie a szerkezetnek. Diszrupciókor a plazmában lévő energia nem távozik egészében az elektron nyalábbal, a maradék a plazmában marad. A mágneses összetartás megszűnésével a plazma elkezd tágulni és még magas hőmérsékleten a berendezés falába csapódik károsítva azt. Jelenlegi számítások alapján az ITER divertora maximum 5db ilyen eseményt képes elviselni [6], ami után cserélni kéne. Ezt szeretnénk elkerülni mert ez a berendezés hosszútávú leállítását eredményezi (1-2 éves nagyságrend).

A diszrupciók káros hatásainak enyhítésére az egyik lehetséges megoldás az ún. **Shattered Pellet Injection**, magyarul a törtpellet belövés. Ennek a módszernek a célja, hogy rövid idő alatt nagymennyiségű anyagot juttat a plazmába, ezzel jelentősen megnövelve a plazma sűrűségét, ami megakadályozza az elektronok gyorsulását. A pelleték üzemanyagból és adalékanyagokból (pl Ne) állnak. A Ne kisugározza az energiát, aminek eredményeképpen a plazma energiája egyenletesen távozik a berendezésbe ahelyett, hogy a divertorba koncentrálna. A belövés jelentősen lehűti a plazmát, tehát a kisülés le fog állni, ezért az SPI a tokamak berendezés vészleállítója [7].

## 1.4. SPI kísérletek

Az SPI az ITER diszrupció mitigáló rendszerének (DMS angol mozaikszó) alapvető technológiája. Az ITERben  $28.5 \times 57\text{ mm}$  (átmérő  $\times$  hosszúság) méretű, pár kelvin hőmérsékletű pelleteket terveznek használni. A pelleteket több száz  $m/s$ -s sebességre gyorsítják, majd a plazma határához közel törik darabjaira. Az ITERnek összesen 27 darab ilyen belövője lesz [8].

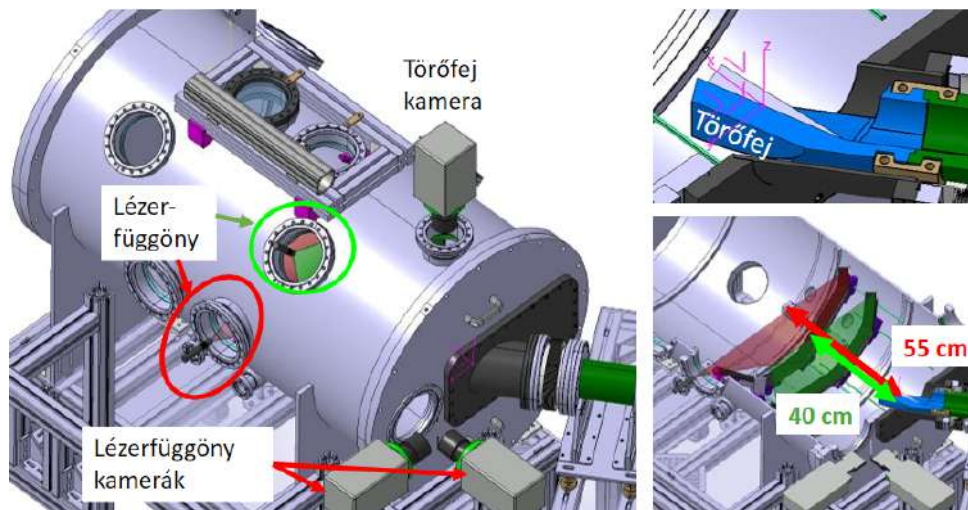
Egy ilyen belövő megépítését kapta feladatául az Energiatudományi Kutatóközpont Plazmafizikai osztálya, amellyel a pelleték létrehozását, kilövését és szétaprózását tanulmányozzák. A kísérleti rendszer felépítése a következő [9]:



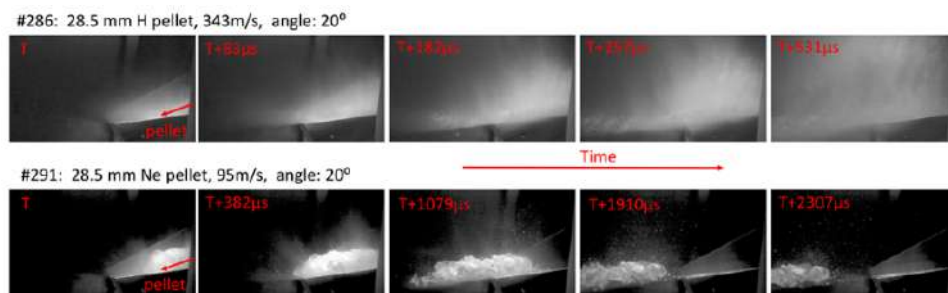
4. ábra. A szerkezet 3D-s modellje és a valóság. Bal alul a vezérlőterem látható. Az én munkám a diagnosztikai kamrához köthető

A pelletet magában a pelletbelövőben hozzák létre úgy, hogy kilövőcső egy részét folyékony héliummal lehűtik, miközben a kívánt gáz elkezd ráfagyni a cső belső falára, majd ez a réteg elkezd nőni egészen amíg el nem telíti a csövet. A pellet kilövéséhez egy egyedi építésű szelep segítségével hirtelen gázzal töltik meg mögötte a teret, amelyben így hirtelen megnő a nyomás egészen addig amíg a pellet el nem enged. A pellet a kilövőcsövet elhagyva átrepül az első diagnosztikán, ahol az alakját, sebességét, és azt figyelik, hogy megsérült-e a kilövés közben [10]. Ezen a szakaszon a repülési cső meg van szakítva, hogy a kilövőgáz a tágulási kamrába távozhasson. Ezt követően a pellet végig repül a kb. 3 m hosszú repülési csövön, majd a diagnosztikai kamrába jut, ahol egy a sebességével  $\sim 20^\circ - 30^\circ$ -t bezáró acéllappal ütközik és széttörik.

A széttörés folyamatát egy nagysebességű kamera figyeli miközben a törőlap meg van világítva. Ezt követően a darabkák két lézerfüggönyön fognak áthaladni. Az első egy zöld ( $520\text{ nm}$ ,  $60^\circ$ ,  $750\text{ mW}$ )-os lézer a törőlaptól  $40\text{ cm}$  távolságra, míg a második egy piros ( $635\text{ nm}$ ,  $35^\circ$ ,  $500\text{ mW}$ )-os lézer a laptól  $55\text{ cm}$  távolságra. Ahogy a darabkák áthaladnak a lézerfüggönyökön felvillannak, amit két gyorskamerával követünk le [11].



5. ábra. A diagnosztikai kamra (bal), a törőfej opcionális lappal (jobb felül), a lézerfüggönyök térbeli elhelyezkedése (jobb alul) [11]



6. ábra. A pellet széttörésének menete. [11]

A dupla lézerfüggöny további célja a darabkák sebességének meghatározása a két függönyön felvillanások között eltelt idő méréseivel. Ha ismerjük a darabkák sebességét következtetni tudunk a kamera síkjára merőleges irányú nagyságokra abból, hogy mennyi ideig villannak fel az egyes lézerfüggönyökön. Ezzel el tudjuk kerülni egy a jelenlegi képsíkra merőleges gyorskamera felszerelését. Továbbá ezzel az összeállítással pontosan tudjuk, hogy a darabkák milyen távol vannak a kamerától, így egyértelmű összekapcsolást tudunk adni a képeken látott pixel méret és a valós méret között.

TDK dolgozatom készítése során az EK SPI laboratóriumában folyó munkába kapcsolódtam be. Az én feladatom a pellet széttörése után keletkező darabok jellemzése, azaz a darabok méretének és térbeli helyzetének meghatározása, illetve az ehhez szükséges algoritmusok kifejlesztése és implementálása Python programozási nyelven. A darabkák meghatározott méreteloszlásából következtetni lehet a darabkafelhő és a plazma kölcsönhatására, ami végső soron meghatározza az SPI rendszer hatékonyságát, a diszrupció káros hatásainak enyhítését.

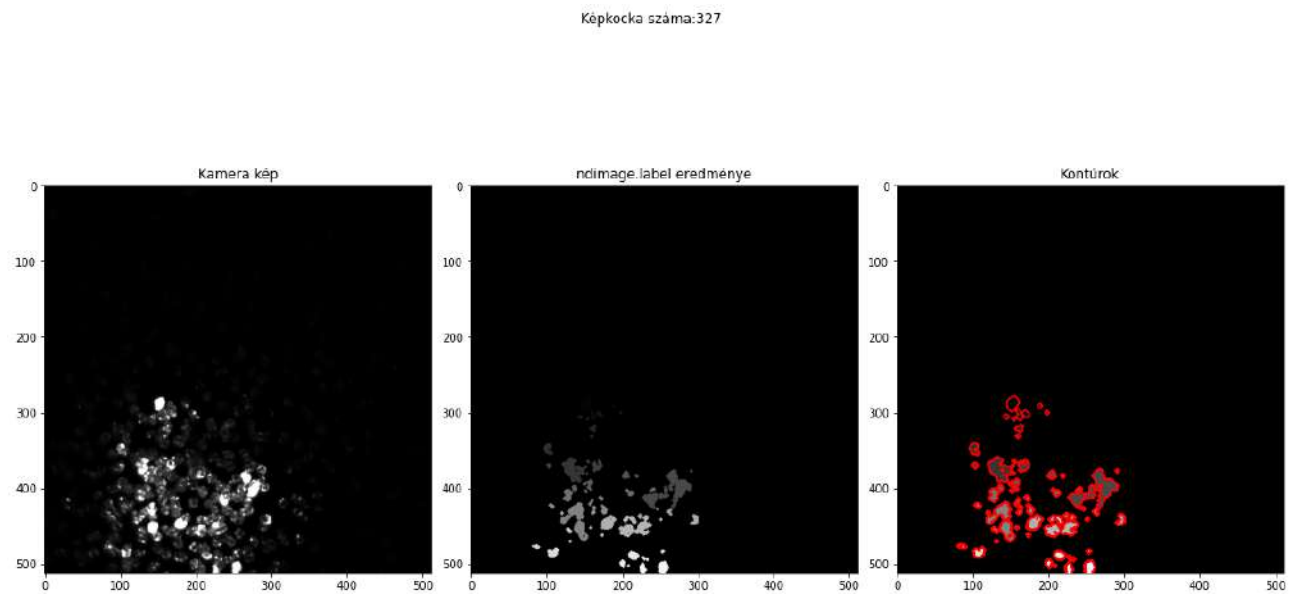
## 2. Algoritmus fejlesztése

A munka kezdetekor a valós kísérleti eszköz még építés alatt volt, ezért a kiértékelő algoritmus fejlesztését egy mock-up kísérleten végzett mérési adatokon kezdtem meg. Erre a célra egy fekete háttérű dobozba lövünk ismert méretű műanyag golyókat, amik a törtpellet-darabkákhöz hasonlóan egy lézerfüggönyön haladnak keresztül. Az erről készült videókon fejlesztjük a program alapjait.

## 2.1. Darabok megtalálása és ellipszis illesztés

A darabok megtalálásához először el kell őket különíteni a háttérzajtól. Ehhez a képet szintre vágjuk, azaz egy adott fényesség értéknél alacsonyabb részeket kinulláztuk. Miután a háttérzajt eltüntettük az `ndimage.binary_opening` morfológiai transzformációt hajtjuk végre, amely képen található összefüggő területeket igyekszik elválasztani egymástól, majd az `ndimage.label` függvénnyel számszedszjük, és egy listába rendezzük őket. A függvény a megtalált a darabokat sorszámozza úgy, hogy minden darab a hozzá tartozó sorszámokból fog állni. Végeredményként egy nullák által körülvett számozott szigetektől álló képet kapunk, ami 7 középső ábráján látható.

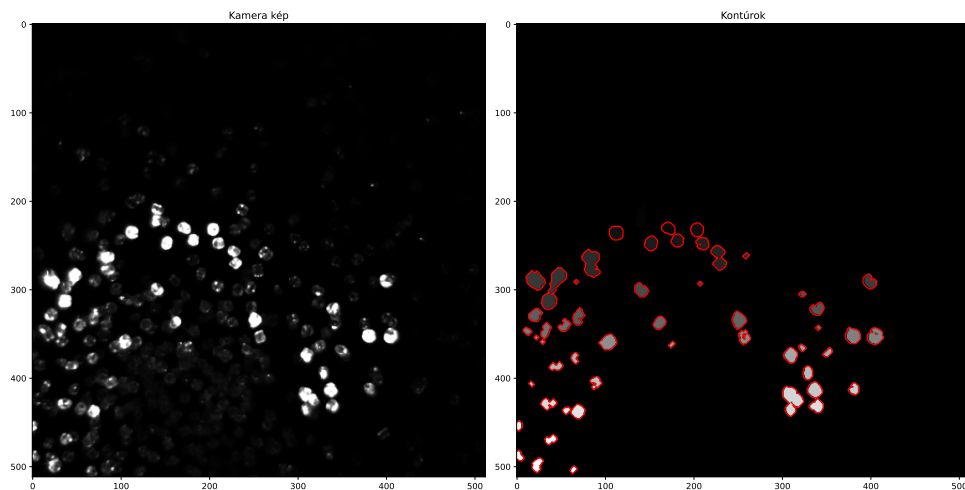
A darabkákra kontúrokat húzunk a `plt.contour` segítségével lásd. 7 jobb ábrája. A meghatározott kontúrok koordinátáit egy saját készítésű, egyszerű ellipszis-illesztő függvénynek továbbítjuk.



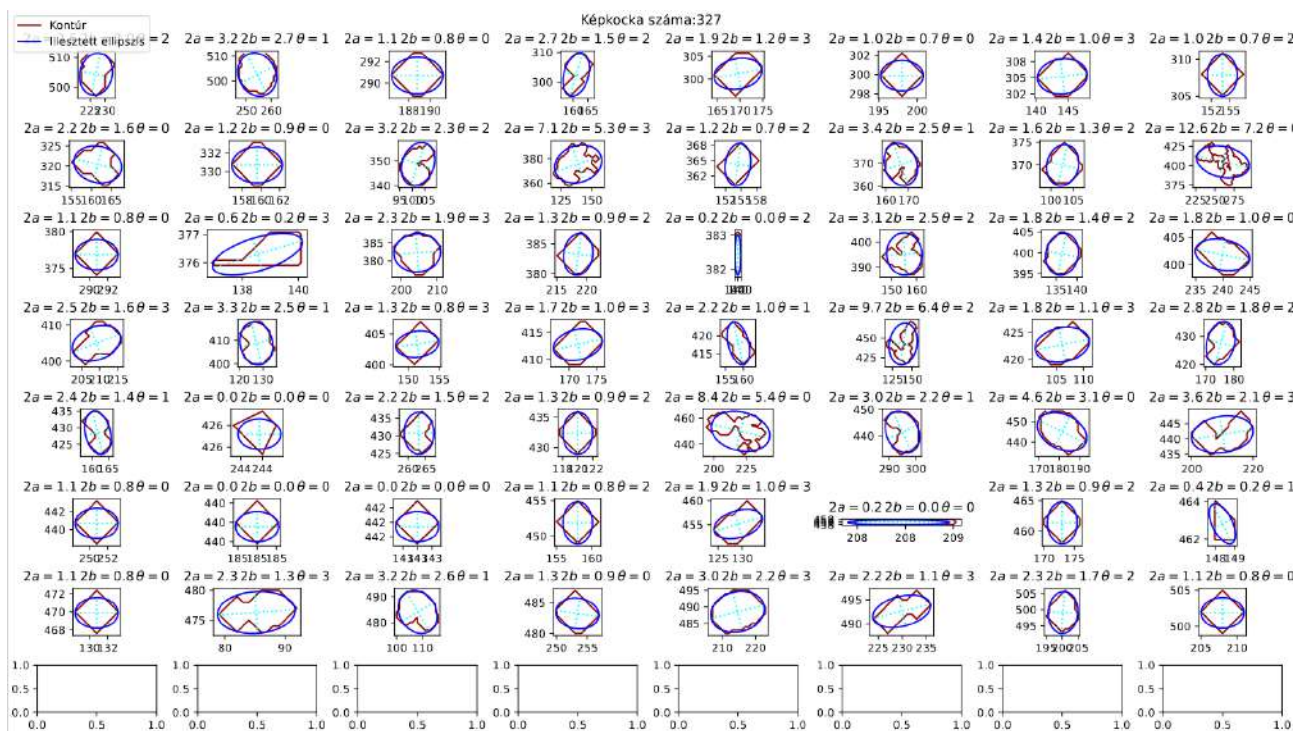
7. ábra. A darabok keresése és a kontúrok felrajzolása

Az illesztés menete a következő: a beérkező kontúr arraynek vesszük az x,y irányban az átlagát, ebből kapjuk az ellipszis középpontjának a helyét, majd ennek vesszük az x irányú kiterjedését és ezt kimentjük. Ezt követően elforgatjuk a kontúrt 1 fokkal majd az x-irányú kiterjedést ismét kimentjük. Ezt tesszük összesen 180-szor majd kiválasztjuk a kimentett hosszok közül a legnagyobbat, ami a nagytengely lesz és a legkisebbet, ami pedig a kistengely. Az ellipszis szöge pedig a legnagyobb érték indexe. Mivel a lézerfüggönyös mérések egy a kamera nézőirányára merőleges síkban történnek, a kamera térbeli kalibrációja, azaz a megtalált darabkák valódi méretének meghatározása igen egyszerű: jó közelítéssel egy konstans kalibrációs tényezőt használhatunk, amelynek értéke  $C_{kal} = 0.181 \text{ mm/pixel}$ -nek adódott. a valós méret ezzel az alábbiak szerint számítható:

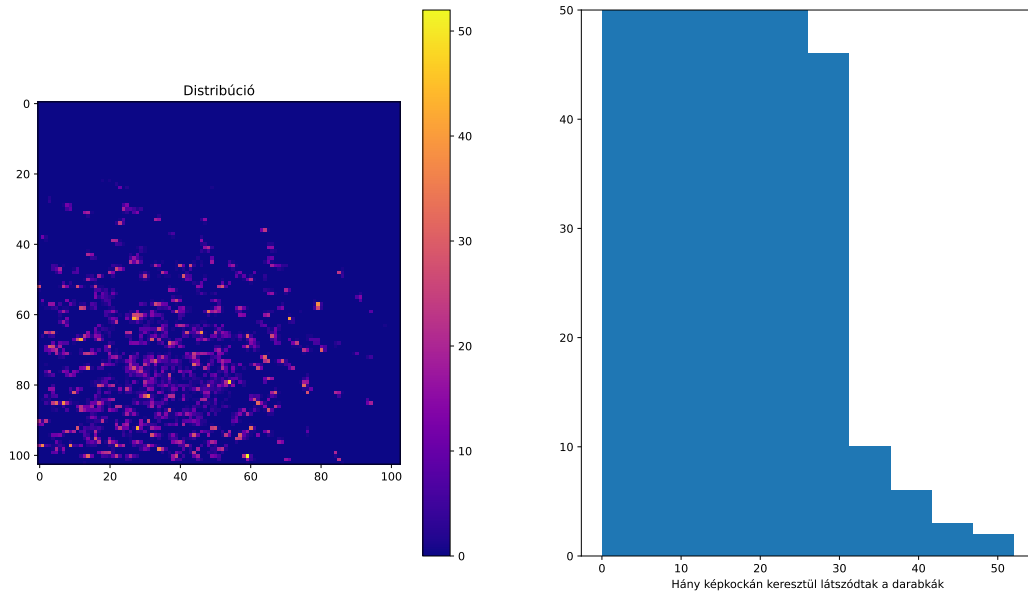
$$L_{mm} = C_{kal} \cdot L_{pixel}$$



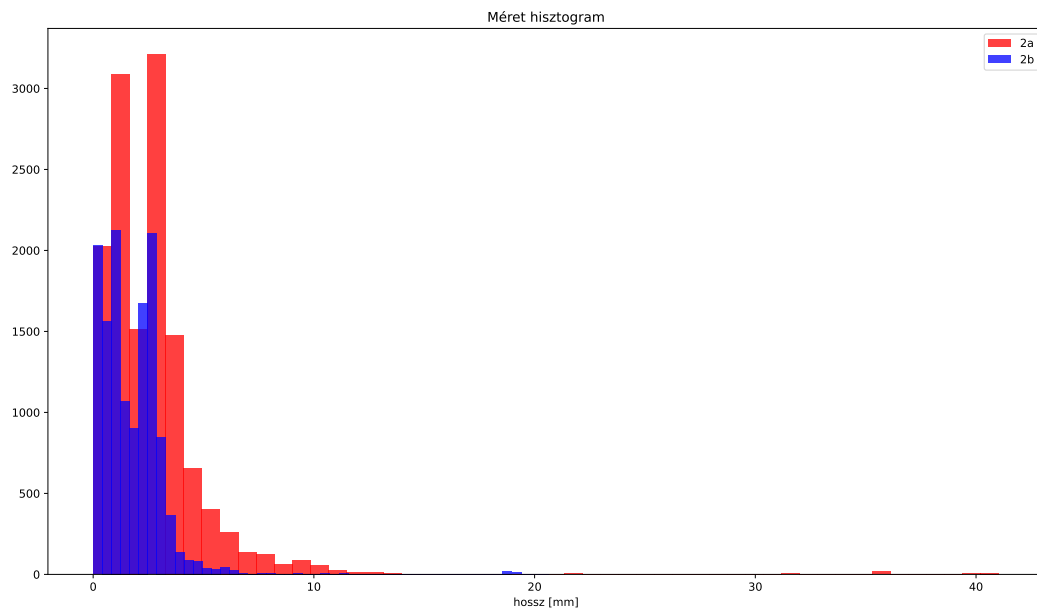
8. ábra. A darabok és a rájuk illesztett ellipszisek. Több elemnél is látható, hogy valójában több golyóból állnak.  $a$   $b$  az ellipszisek tengelyei  $mm$ -ben mérve.



9. ábra. A darabok és a rájuk illesztett ellipszisek. Itt is több elemnél látható, hogy valójában több golyóból állnak.  $a$   $b$  az ellipszisek tengelyei  $mm$ -ben mérve.



10. ábra. A disztribúciós ábra. Ezen négyzetekre bontottuk a képet és számoltuk, hogy hány képkockán keresztül van a négyzetben egy darabka közepe. A disztribúciós képen jól lehet látni, hogy az egész felvétel során hol, és mennyi ideig voltak látható darabok.



11. ábra. A darabok méret hisztogramja.

A fenti módon létrehozott algoritmus használatával sikeresen azonosítottam a képeken a darabkákat, ellipszist illeszttem rájuk, amely meghatározza a darabka karakterisztikus méretét ill. középpontját.

## 2.2. Duplikátumok szűrése

Most már tudjuk, hogy hol és mekkora darabjaink vannak minden képkockán, viszont szeretnénk elkerülni, hogy ha ugyanaz a darabka több képen is szerepel, akkor több példányban is bekerüljön az adatbázisba, és ezáltal torzítsa a méret eloszlást. Erre a célra kell implementálni egy olyan függvényt, ami figyeli, hogy az egymást követő képkockákon van-e ugyanazon a helyen darabka, mert az nagy valószínűséggel ugyanaz a darabka lesz, amit így kétszer számolnánk.

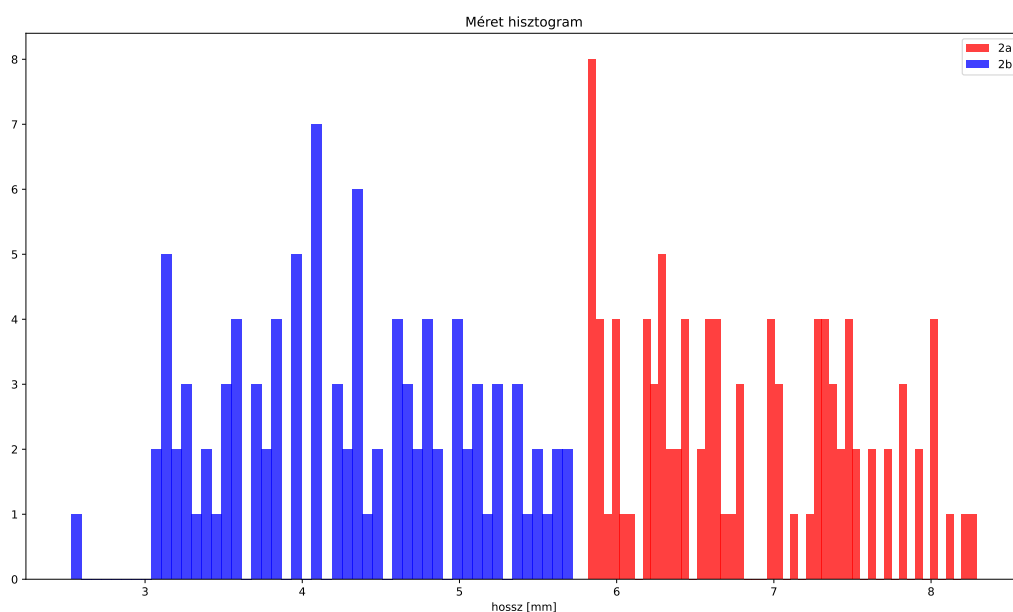
A darabok információit egy Pandas DataFrame objektumban tároljuk. Miután megillesztettük egy darabra az ellipszist lekérdezzük, hogy az előző képkockán van-e olyan darab, aminek a középpontja közelebb van a mostani darab középpontjához, mint a darab nagytengelye, és ha igen, akkor ezt a két darabkát egynek tekintjük. Ekkor a darabkának az összeillő elem indexéhez mentjük az adatait. Ha nem találunk párt akkor új index alá mentünk.

Mivel a darabkák mérete változhat ahogy átrepülnek a lézerfüggönyön, az azonos indexhez tartozó darabkák mérete nem lesz ugyanakkora. Ezért a továbbiakban a tengelyméret eloszláshoz az egy indexhez eltárolt maximum tengelyhosszt használtam.

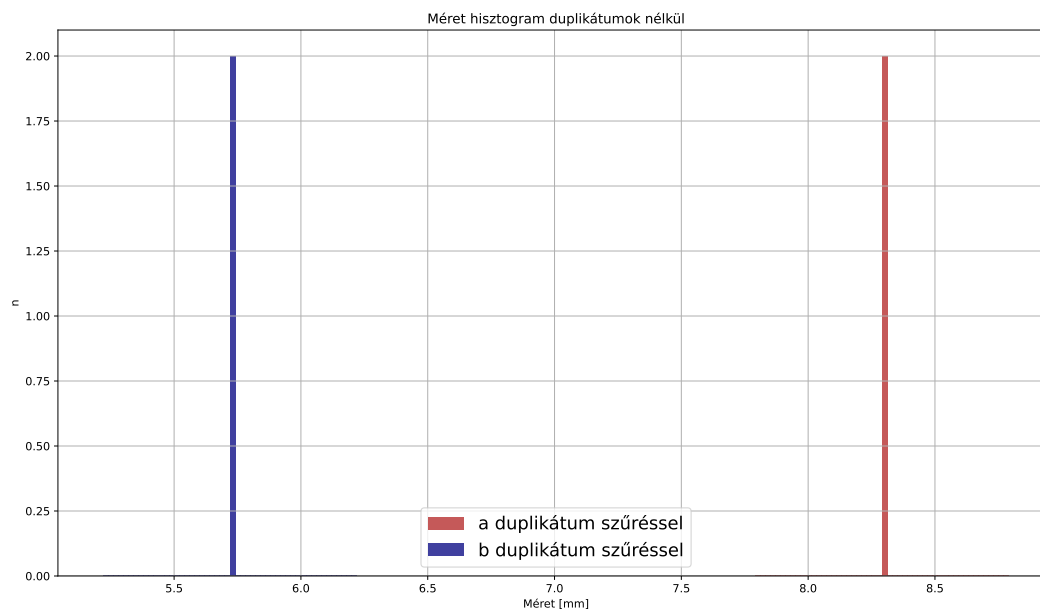
## 3. Méret validáció

A fenti mock-up kísérletekben műanyag törmeléket használtunk, azaz a darabkák pontos mérete nem volt ismert, ezért azok a mérések nem alkalmasak az algoritmusunk pontosságának ellenőrzésére. A pontosság meghatározásához egy olyan szintetikus videót készítettünk, amin egy darab, minden képkockán véletlenszerűen legenerált ellipszis fog oldalra mozogni. Maga az ellipszis alakja minden képkockán más lesz, amivel a méret validációt csináljuk. Azért mozog, hogy egyben a fent említett duplikátum szűrőt is ellenőrizzük.

A videó generelésakor kifejezetten úgy választottuk az ellipszisek tengelyméreteit, hogy a gép könnyen el tudja különíteni a nagy- és kistengelyt [12](#), hogy ezáltal ki tudjuk küszöbölni a közel kör alakú darabok szög mérésének a bizonytalanságát.



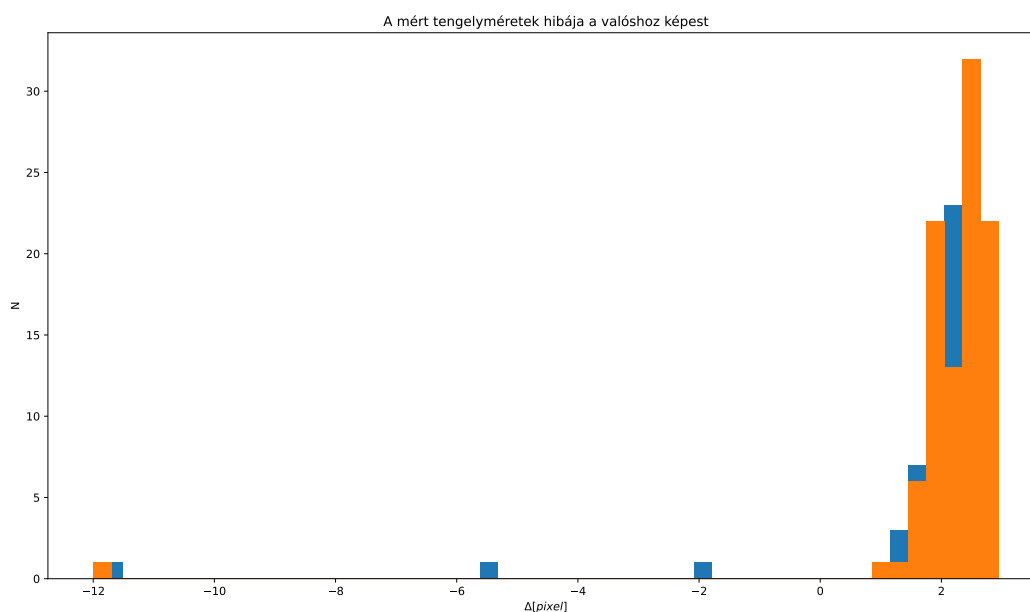
12. ábra. A darabok az algoritmus által meghatározott méret hisztogramja.



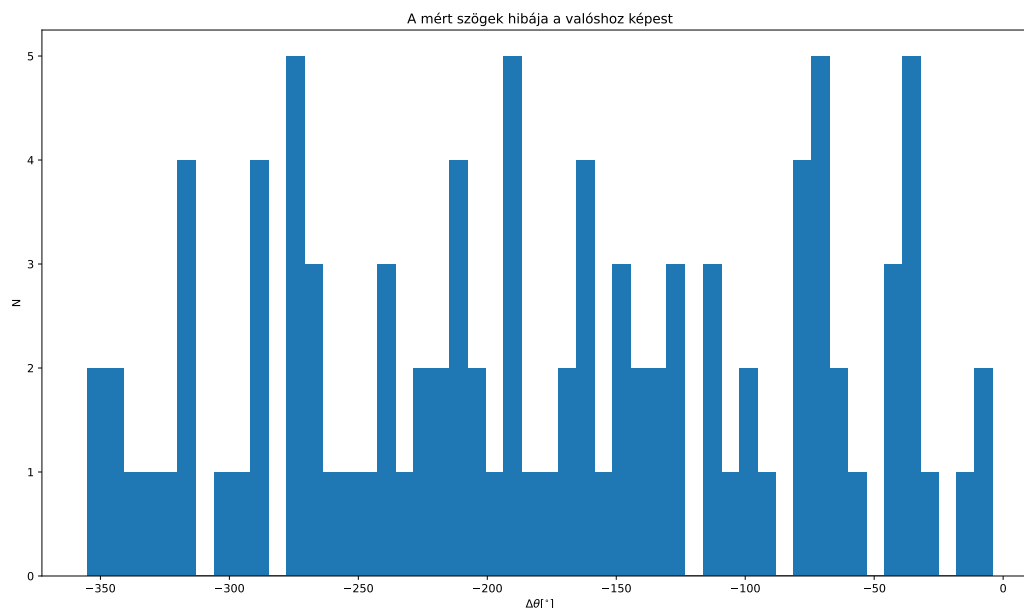
13. ábra. A darabok méret hisztogramja a duplikátum szűrés után.

Látható az 13 ábrán, hogy sikeresen kiszűrtük a duplikátumok nagy részét, azonban a vártakkal ellentétben nem egy darabra, hanem kettőre. Valahol a pálya egy pontjában új darabot talált, aminek az okát nem ismerem. Ezért a módszert véglegesnek tekintettem.

A szintetikus videó lényege, hogy pontosan ismerjük a rajta megjelenő darabok méretét, így azokat összehasonlíthatjuk a feldolgozóalgorithmus által szolgáltatott eredményekkel. A mért és a valós adatok különbsége a 14 (méret) és a 15 (szög) ábrán látható.



14. ábra. A darabok méret eltéréseinek a hisztogramja. Látható, hogy átlagosan egy kicsit több mint 2 pixel az eltérés a valós és a mért méret között



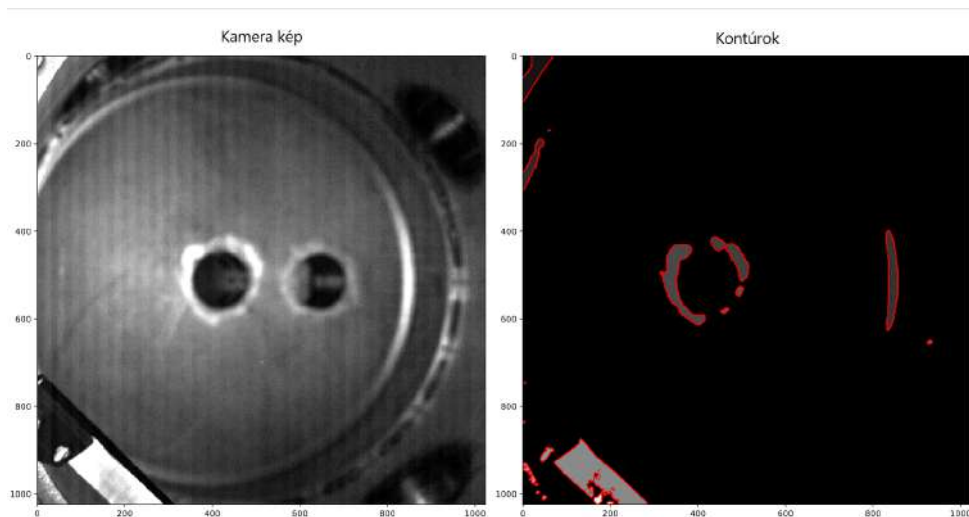
15. ábra. A darabok szögének eltérés hisztrogramja. Látható, hogy a szög meghatározása nem működik megfelelően.

Az eredmények feltárták az algoritmusnak egy szisztematikus hibáját: a darabkák mért mérete átlagosan 2-3 pixellel nagyobb a valóságosnál. Ezt a későbbiekben könnyen figyelembe lehet venni. Ennek lehetséges oka, hogy miközben preparáljuk a képet a kontúrokra, a darabkák szélén lévő a semmit és a darabot "egybeemosó" pixeleket felerősítjük teljes jogú, a darabkához tartozó pixelekké. A másik eredmény, hogy a szög mérésre lényegében egy véletlenszerű számot kapunk. Szerencsénkre a darabkák szöge a későbbiekben nem befolyásolja a munka további részét, mindazonáltal ennek a hibának a feltárása egy jövőbeli feladat részét képezi.

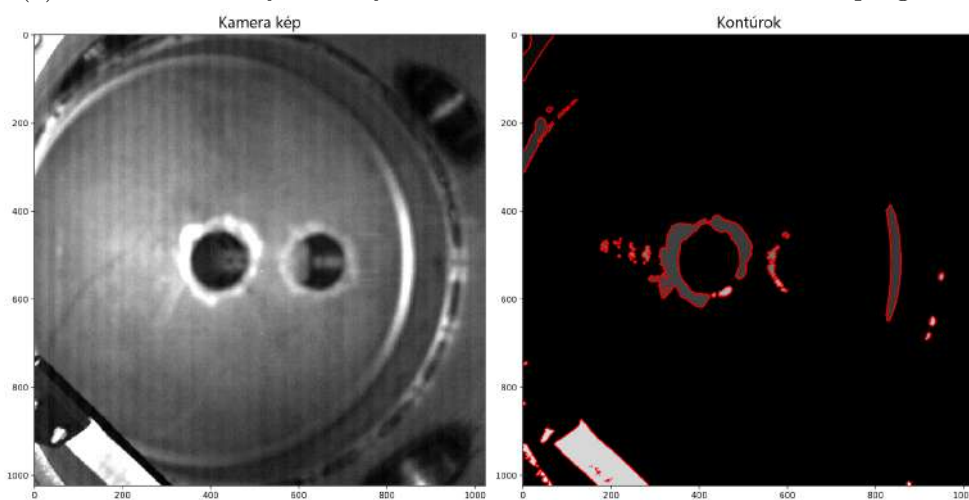
## 4. Valós mérések feldolgozása

### 4.1. Első mérések

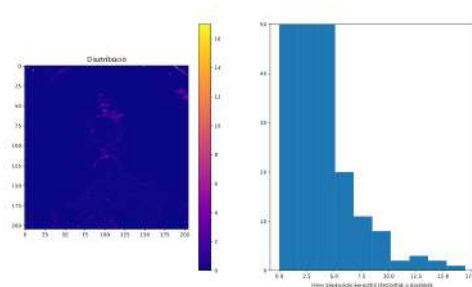
Miután elkészült a valós mérési berendezés a rajta készült első videón lefuttattuk az eddig elkészült programot. A tesztekhez képest a valós mérésekben számos új kihívással kell megküzdeni. Elsőként a darabkák itt jóval kisebbek a teljes képhez képest, és még jóval lassabban is mozognak, szinte egyhelyben maradnak. Viszont egy komoly problémába is belefutottunk. A tartály túl fényes a videón, helyenként még magukat a darabkáinkat is elnyomja:



(a) A vákuumtartály túl fényes ezért azt is darabként ismeri fel a program



(b) A valós darabok nagyrésztét nem is látja



(c) Sok darabkát nem lát

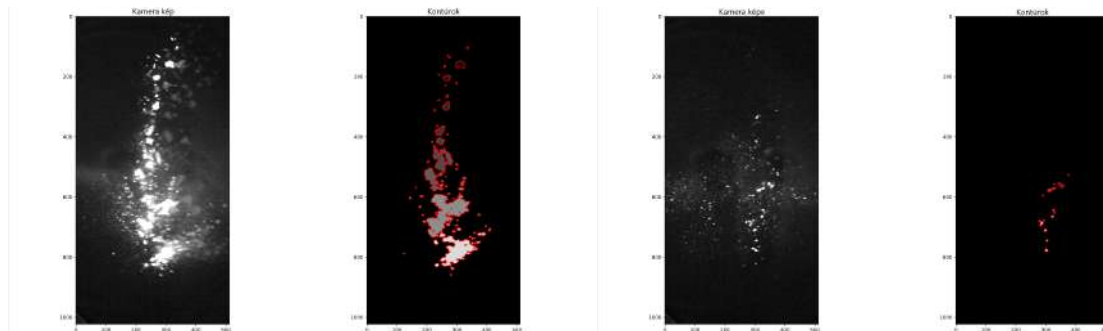
16. ábra. Részletek az első mérésből.

Valamilyen módon javítani kell a jel-zaj viszonyt, azaz el kell nyomni a tartály jelentette háttérét. Ezt többféleképpen lehet, egyrészt egy a kamera elé helyezett szűrővel, másrészt a szoftver továbbfejlesztésével.

## 4.2. Mérések interferencia szűrővel

A jel-zaj viszony javítása érdekében egy interferenciaszűrőt építettünk be az optikai rendszerbe. A szűrő egy szűk, 10 nm-es tartományban engedi csak át a fényt a lézerfüggöny hullámhossza

körül, azaz szinte a teljes, egyéb megvilágítások által okozott háttérrel elnyomja. A szűrő használata mellett a tartály már nem olyan fényes, és így a szoftver már nem találja meg darabkaként.



(a) Sok darabkát egy nagynak észlel.

(b) Sok darabkát nem észlel.

17. ábra. A második mérés fontosabb tanulságai.

Látható, hogy az algoritmust tovább kell fejleszteni a valós mérési körülményeknek megfelelően: Egyrészt, ha több fényes darab van egymáshoz közel akkor azokat egybefüggőként kezeli, másrészt a kevésbé fényeseket a háttérleválasztó levágja és eldobja. Ezeket a problémákat már csak programi úton tudjuk orvosolni.

## 5. Threshold tesztek

Az előzőekben láthattuk, hogy a háttér kezelésére az eddigi módszereink nem megfelelőek, ezért egy újat kell keresnünk. Ennek a legfőbb oka, hogy a mock-up mérésekkel szemben a valódi mérésben a háttér fényessége képről képre változik, és egy képkockán belül sem egységesen sötét. Az alábbi három módszert vizsgáltam:

### 1. Általános szint alatti levágás (eddig)

Ebben a módszerben egy általunk megadott szint alatt minden kinullázódik. Ennek a módszernek az előnye, hogy egyszerű, viszont nem alkalmazkodik az egyes mérésekben a háttér valódi értékéhez

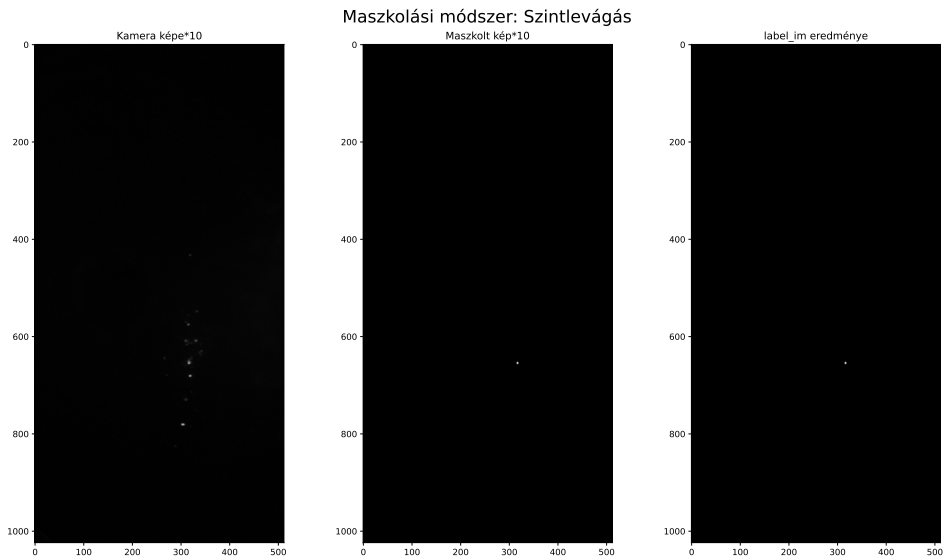
### 2. Otsu féle hisztogram módszer

Otsu módszere is egy globális küszöbértékkel működik, azonban az előzőhöz képest nem egy általunk tetszőlegesen választott értékkel, hanem egy analitikusan kiválasztottal dolgozik. A módszer két maximummal rendelkező fényesség hisztogramok esetén alkalmazható jól, és egy olyan fényesség küszöbértéket választ, amellyel a két csúcs a legjobban elkülönül.

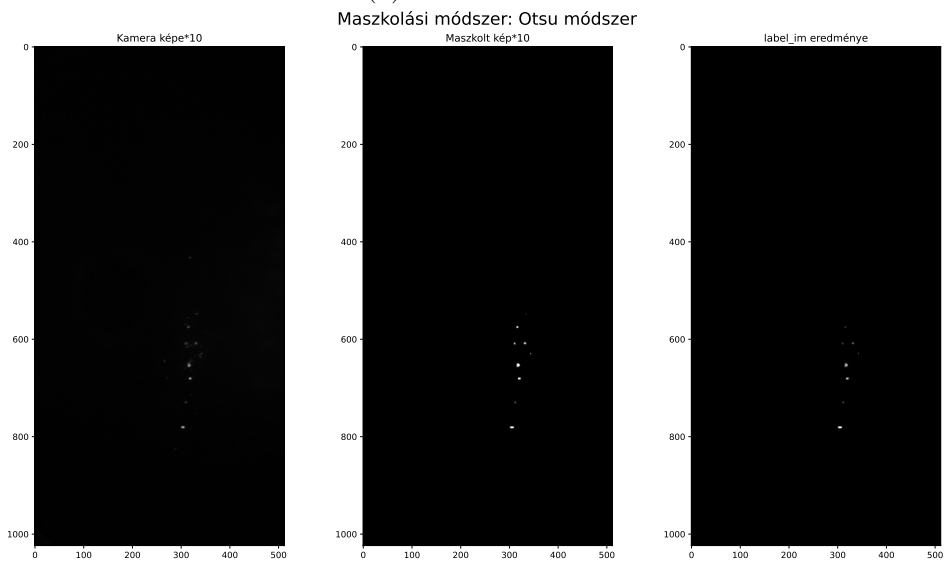
### 3. Lokális küszöbérték

Ez a módszer az előző továbbfejlesztése. Az alapja ugyanaz, azonban már nem az egész képre futtatjuk az algoritmust, hanem egy általunk meghatározott méretű kis elemére (doboz), így mindegyik doboznak saját küszöbértéke lesz, amivel még jobban leválasztott háttérrel kapunk, futási sebesség ellenében. A módszernek van egy második paramétere, az ún. "eltolás", amit 10-nek választottam. 10-es küszöbérték alatt a módszer túl érzékeny, és a kameraszensor zaját is darabkaként azonosítja.

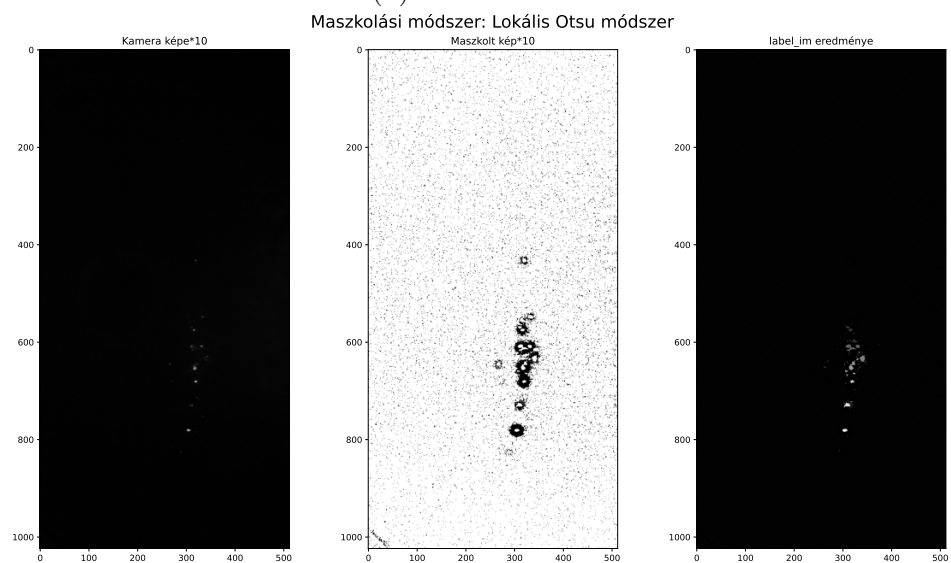
Az utóbbi két módszer minden képkockára külön-külön számítja a határértékeket. A tesztek elvégzésére egy szabadon választott képkockát használtunk az utolsó videóból, amire lefuttattuk mindhárom módszert és összehasonlítottuk őket.



(a) Általános szint.

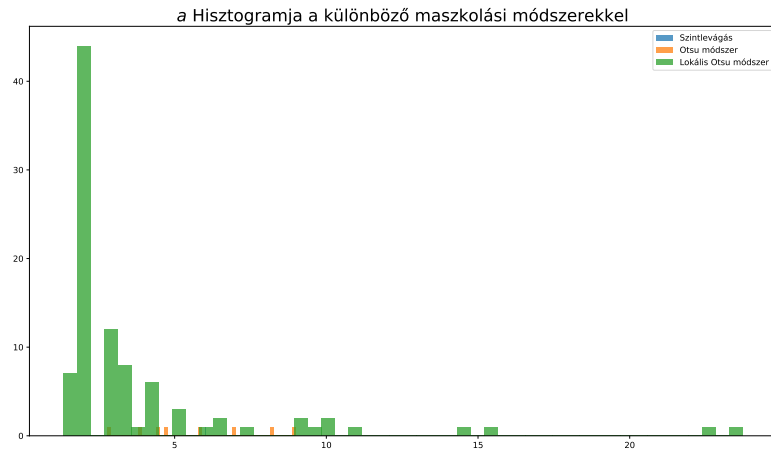


(b) Otsu módszer.

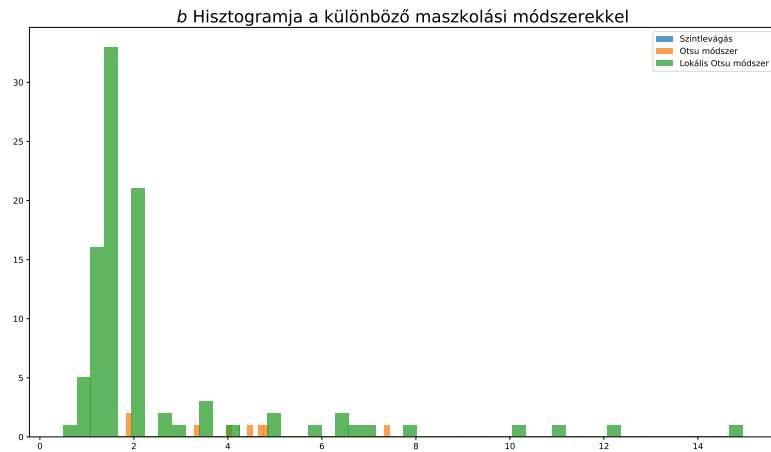


(c) Lokális Otsu módszer.

18. ábra. A különböző küszöbérték módszerek képi összehasonlítása. A kamera és a maszkolt kép azért van megszorozva 10-zel, hogy jobban látszódjanak szabad szemmel.



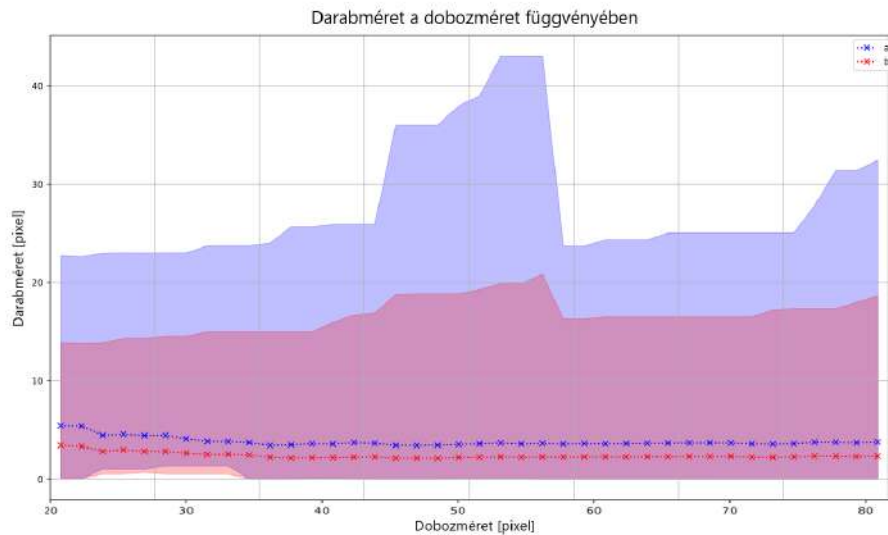
(a) A nagytengely hisztogramja.



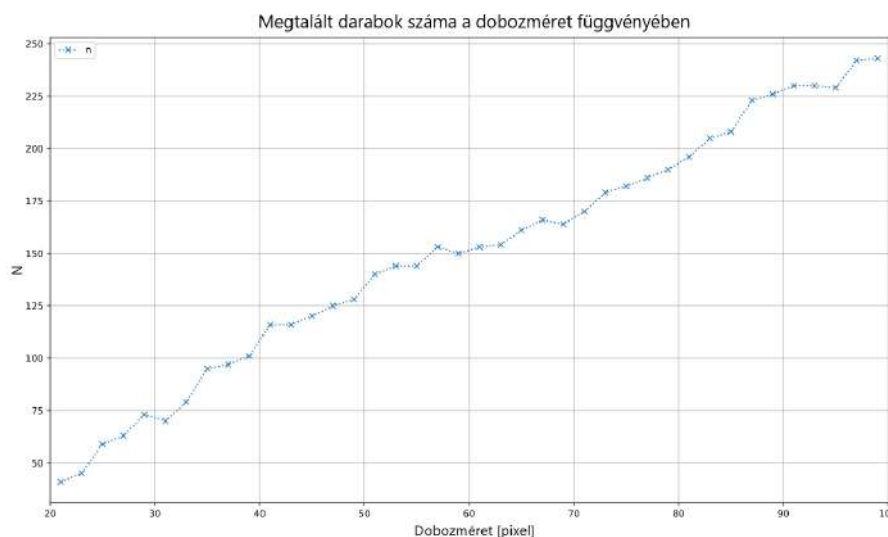
(b) A kistengely hisztogramja.

19. ábra. A különböző küszöbérték módszerek numerikus összehasonlítása.

Látható, hogy a lokális módszerrel találjuk meg a legtöbb darabot. Azonban a lokális módszernek bemenő paramétere a dobozméret, ezért meg kell vizsgálnunk, hogy milyen hatással van a fent említett elem méretének, azaz a doboz méretnek. Ennek vizsgálatához elvégeztem a képkocka elemzését különféle dobozméretek mellett.



(a) A darabok méretei a dobozérték függvényében. Az x-el jelölt összekötött pontok az átlagos tengely méretet jelölik, míg a besatírozott rész a legkisebbtől a legnagyobb mért tengelyméret tartományát jelöli.

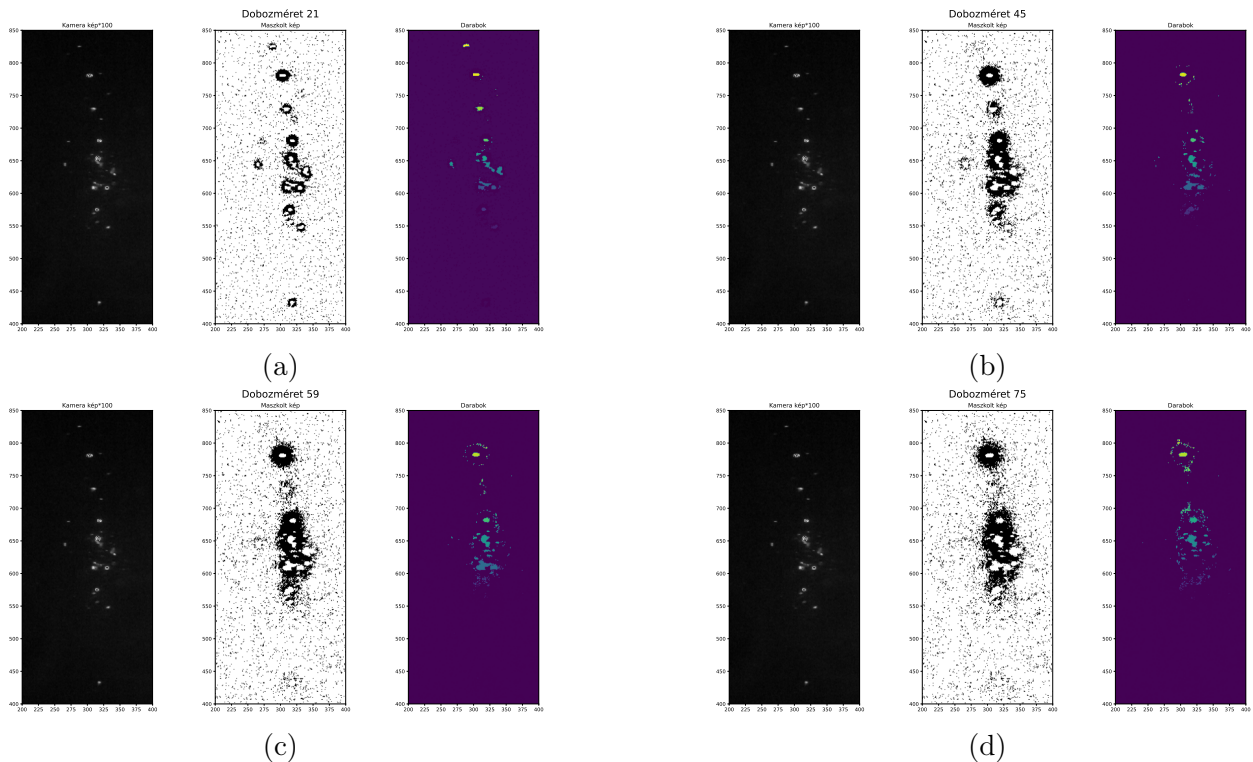


(b) A talált darabok száma a dobozméret függvényében.

20. ábra. A különböző küszöbérték módszerek numerikus összehasonlítása.

Láthatjuk, hogy a darabok átlagos mérete gyengén függ a dobozmérettől, enyhén csökken a dobozméret növelésével. A második ábrán pedig azt látjuk, hogy a darabkák száma körülbelül egyenesen arányos a dobozmérettel.

Mivel legnagyobb mért tengelyhossznak egy ugrása van az 50-es és a 70-es dobozméretek között, ezek okát szeretnénk részletesen megvizsgálni. Ezért vizsgáljuk meg kvalitatívan, hogy mi történik a dobozméret növelésével.



21. ábra. A különböző dobozméretetek kvalitatív összehasonlítása. A kamerakép meg lett szorozva 100-zal, hogy jobban látható legyen

Ha figyeljük a  $y = 600 - 650$  pixeleknél található darabkákat, akkor megfigyelhetjük, hogy ezek a dobozméret növelésével elkezdenek egybefolyni, majd hirtelen eltűnnek. Ennek az oka, hogy ha a doboz mérete túl nagy, akkor több különböző fényességű darabka is belekerül, ami adott esetben teljesen elronthatja a háttérszámítást. Ez megmagyarázza, hogy miért láttunk egy méret csúcsot a 60-as dobozméret környékén. Továbbá láthatjuk, hogy hamis darabkák keletkeznek szinte minden dobozméret mellett, minél nagyobb a dobozméret annál több. Ezért a 30-as dobozméret tartományt érdemes választani, ami jó középút a futási idő és a hamis darabkák száma között. Emellett még érdemes egy extra feltételt szabnunk az ellipszis illesztése előtt, miszerint a kontúrnak legyen egy minimális hossza, amit 10 pixelnek választottam. Ezzel a hamis darabkákat szinte teljesen kiszűrjük.

Ezeket figyelembe véve a lokális Otsu módszert választottam 29-es dobozmérettel és egy minimális kontúrméret-feltétellel, mert ez a módszer találja a legtöbb darabot. További előnye, hogy a küszöbérték dinamikusan alkalmazkodik a mérés változó körülményeihez, akár egy képkockán belül is.

## 6. Átfedésben lévő darabok kezelése

Azt a problémát sokszor láttuk a kiértékelések során, hogy egy valamilyen amorf alakú, szemmel egyértelműen több darabból álló kontúrra próbál egy darab ellipszist illeszteni a program, azaz átfedésben lévő vagy egymáshoz közeli darabkákat egy darabnak tekint. Egyetlen algoritmussal lehetetlennek tűnik minden darabkát szétválasztani, ezért egy külön algoritmust fejlesztünk ennek a problémának a kezelésére. Ez a feladat eredetileg nem képezte a dolgozat tárgyát, de a megoldás első lépése, az összetett darabkák felismerése, belefért az időkeretbe.

Mivel a valós képeink nem csak átfedésben lévő darabokkal vannak tele, sokkal hatékonyabb szintetikus darabkákat generálnunk átfedő ellipszisekből és ezekkel vizsgálni a kitalált algoritmusunk hatékonyságát. Ezt elég egyszerűen meg lehet tenni véletlen szám generátorokkal és a

*matplotlib* beépített ellipszis rajzoló funkciójával.

Két módszert is kidolgoztam annak a kérdésnek az eldöntésére, hogy a képen egy vagy több átfedő darabka látható-e.

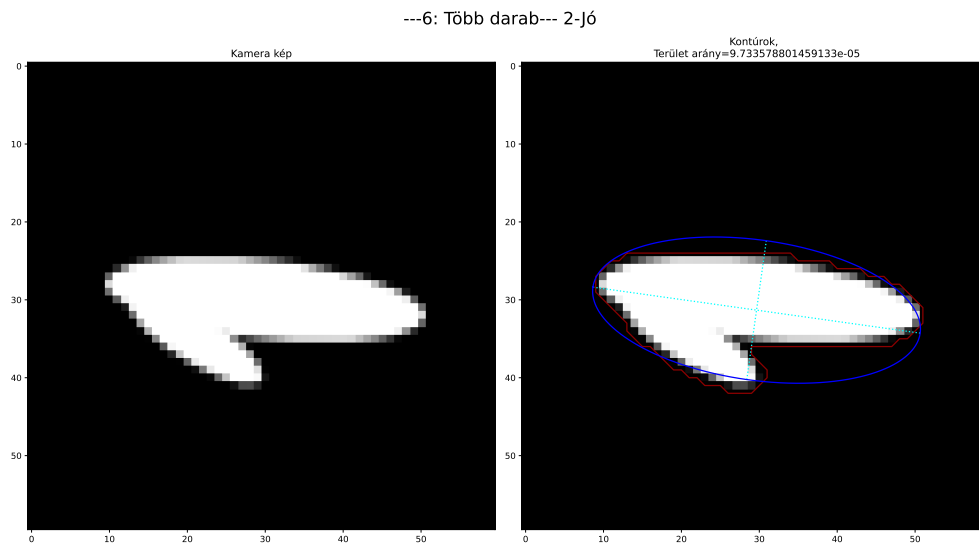
## 6.1. Terület arány módszer

Miután megillesztettük az ellipszist a darabkánkra, hasonlítsuk össze az illesztett ellipszis és a bejövő kontúr területét. A kontúr területének meghatározásához szimplán felszummázuk az eredeti képmatrixot. A 3 alfejezetből tudjuk, hogy az illesztett ellipszis egy picit nagyobb, mint a valós, ezért ezt figyelembe kell a terület kiszámolásakor. Miután ezt megtettük a két terület különbségét kivonjuk egymásból, és abszolút értéket veszünk, hogy ne kelljen bajlódni az előjelekkel. Ezek után felírhatunk egy egyenlőtlenséget ami, ha teljesül akkor egy darabból álló kontúrunk van.

$$\left| \frac{A_{in}}{A_{fit}^{(corr)}} - 1 \right| < 5e - 2 \quad (3)$$

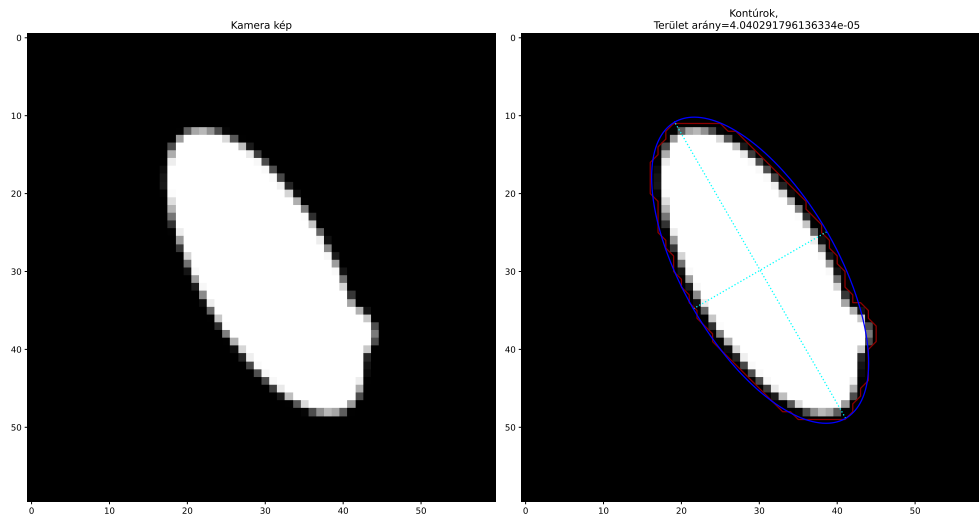
Ahol  $A_{in}$  a bejövő kontúr területe,  $A_{fit}^{(corr)}$  az illesztett ellipszis területe.

Fontos megjegyezni, hogy itt van egy teljesen önkényesen megválasztott érték, amik gyengíti a módszert. Ennek az az oka, hogy egy darab szabadsági fokkal nehéz sok különböző lehetséges formára egységesen jó feltételt kialakítani. Az algoritmus tesztelése közben megfigyeltem, hogy a fenti határérték nem ad jó eredményt, ha egy darab elnyúlt ellipszis van, de átenged egyértelműen két darabból álló darabkákat. Itt fel lehetne tenni azt a kérdést, hogy mégis hogyan felállítani egy ilyen kitételt, ha csak kettős darabokat generálunk? Erre a válasz az, hogy miközben a darabjaink valóban mindig két ellipsziszből állnak, a véletlenszerűség miatt lesznek olyan képek, amik úgy néznek ki mintha csak egy ellipszis lenne rajtuk. A módszer működésben:



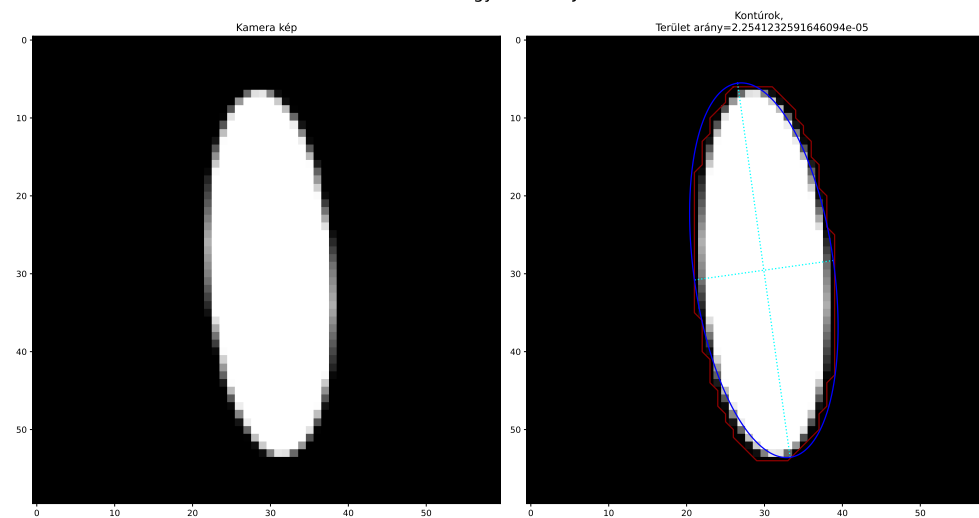
(a) Olyan eset amelyben egyértelműen több darab van egymáson.

---10: Egy darab--- Rossz



(b) Olyan eset amiben a módszer nem ismerte fel, hogy két darabból áll.

---0: Egy darab--- Jó



(c) Olyan eset, amiben egyértelműen egy elem van.

22. ábra. A terület alapú módszer néhány példája.

## 6.2. Terület különbség módszer

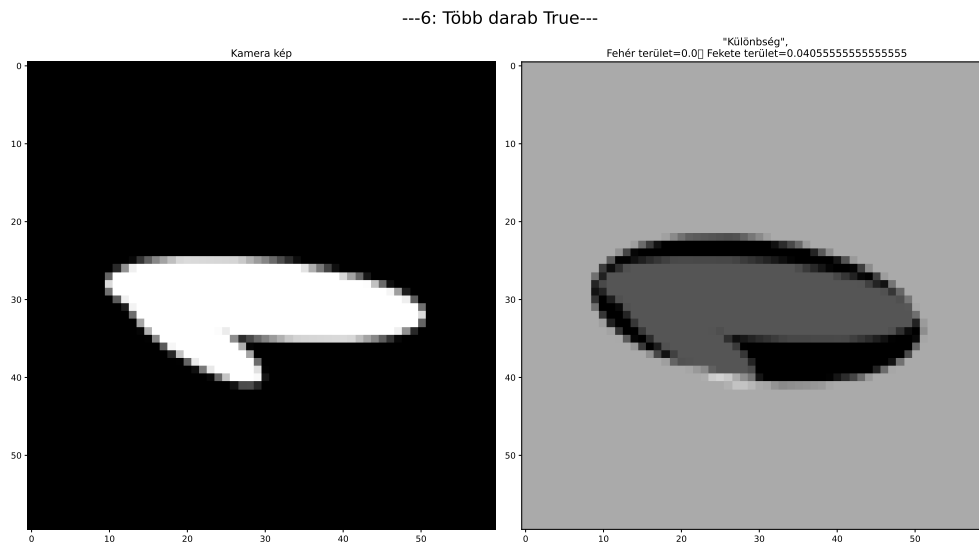
Itt miután megillesztettük az ellipszisünket, az illesztett ellipsziséből készítünk egy szintetikus képet, amelyen az ellipszisen belüli pixelek értéke 128, a háttér pedig nulla, és a szintetikus képet kivonjuk a valódi képből. Az így kapott képen egy pixel az alábbi értékek egyikét veheti fel:

- 0: a pixel mindkét képen a háttérhez tartozik (sötétszürke)
- 128: a pixel mindkét képen pelletedarabkához tartozik, azaz a kontúron és az ellipszisen is belülré esik (világos szürke)
- -128: a pixel az illesztett ellipszisen belül, de a kontúron kívül esik (fekete)
- 256: a pixel a kontúron belül, de az illesztett ellipszisen kívül esik (fehér)

Ezek alapján a következő feltételek egyikének teljesülnie kell, hogy összetett kontúrról beszéljünk:

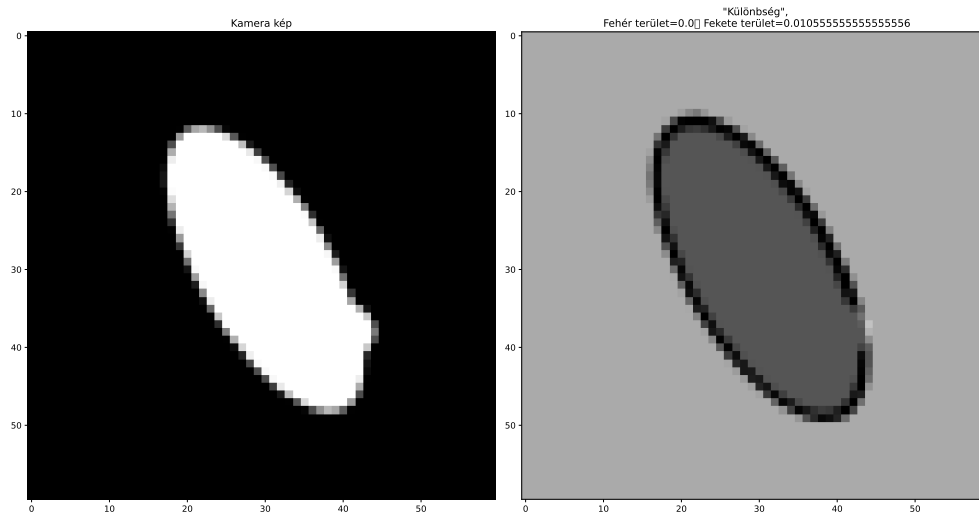
1. Ha a fehér terület nagyobb, mint a teljes kép 0.5%-a
2. Ha a fekete terület nagyobb, mint a teljes kép 1.5%-a.

Ezeket az értékeket még a valós mérésnél igazítani lehet (és valószínűleg kellene is fog).



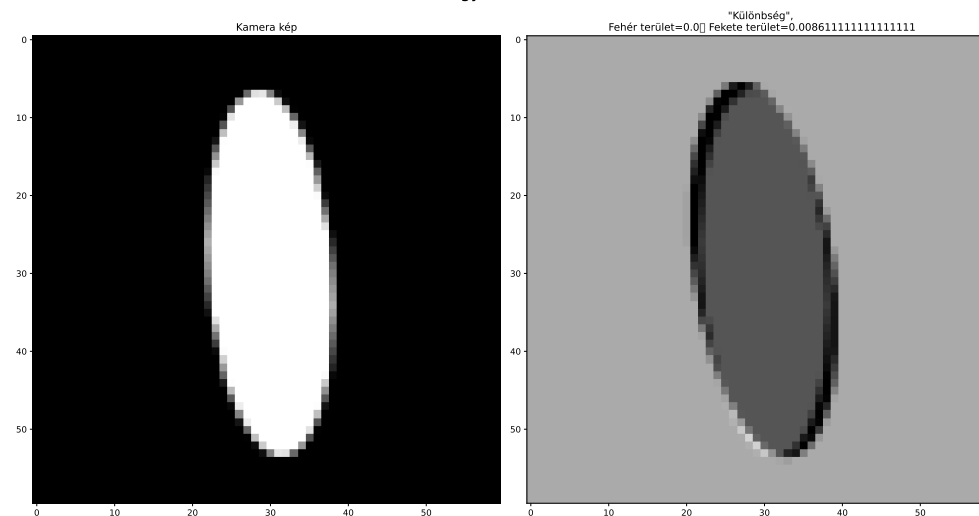
(a) Olyan eset amelyben egyértelműen több darab van egymáson.

---10: Egy darab --- False



(b) Olyan eset amiben a módszer nem ismerte fel, hogy két darabból áll.

---0: Egy darab --- True



(c) Olyan eset, amiben egyértelműen egy elem van.

23. ábra. A kivonásos módszer néhány példája.

A két módszer közül meg kell határozni, hogy melyik a jobb. Erre ugyanezt a szintetikus darabka generálót használjuk, annyi különbséggel, hogy egy véletlen szám generátor dönti el, hogy egy vagy két ellipszis legyen a képen. Ezekre vizsgáljuk a két módszer kimenetelét, 100-as blokkokban:

| Terület arány módszer |       | Terület különbség módszer |        |
|-----------------------|-------|---------------------------|--------|
| Jó                    | Rossz | Jó                        | Rossz  |
| 59                    | 41    | 90                        | 10 (7) |
| 71                    | 29    | 91                        | 9 (3)  |
| 79                    | 21    | 91                        | 9 (4)  |
| 70                    | 30    | 91                        | 9 (5)  |
| 73                    | 27    | 90                        | 10 (6) |

1. táblázat. Az eredmények. Minden sor egy-egy 100-as blokk eredménye a két módszerrel. A terület különbség módszer rossz oszlopában a zárójeles szám azoknak a daraboknak a számát adja meg amelyeket a generátor egymásba helyezett le.

Ezek alapján a terület különbség módszer bizonyult hatásosabbnak, ezért a továbbiakban ezt fogjuk használni.

Mivel a valóságban a pelletdarabkák nem ellipszis alakúak, a szintetikus képekkel nem lehet tökéletesen működő algoritmust létrehozni. Ezért ez az algoritmus csak egy alapszűrő, hogy kiszűrje az egyértelműen dupla darabokat.

## 7. Konklúzió és kitekintés

A TDK dolgozatomban célja az SPI laborban létrehozott törtpellet-darabkák méretének és térbeli eloszlásának meghatározása.

Kifejlesztettem egy algoritmust egy mock-up kísérlet segítségével, ami meghatározza a képen a darabkák helyét. Majd a darabkák 2D vetületét ellipszissel közelítem, és meghatározom ennek az ellipszisnek a méretét.

Mivel a kiértékelés videófelvevételekről történik le kell követnünk a darabkákat több képkockán keresztül, hogy ugyanazt a darabot ne számoljuk többször. Erre a célra fejlesztettem egy egyszerű algoritmust, ami két egymást követő képkockán lévő darabok helyét hasonlítja össze, és ez alapján dönti el, hogy ugyanaz a darab-e vagy sem. Az egy darabhoz tartozó adatok közül a legnagyobbat vettem figyelembe, az ábrákon ezek vannak reprezentálva.

Megvizsgáltam az algoritmus szisztematikus hibáját szintetikus képekkel, aminek a segítségével megállapítottam, hogy 2-3 pixellel túlbecsüli az ellipszis lineáris méreteit. Ugyanebben a tesztben vizsgáltam a duplikátum szűrést is, ami az elvártaknak megfelelően működött.

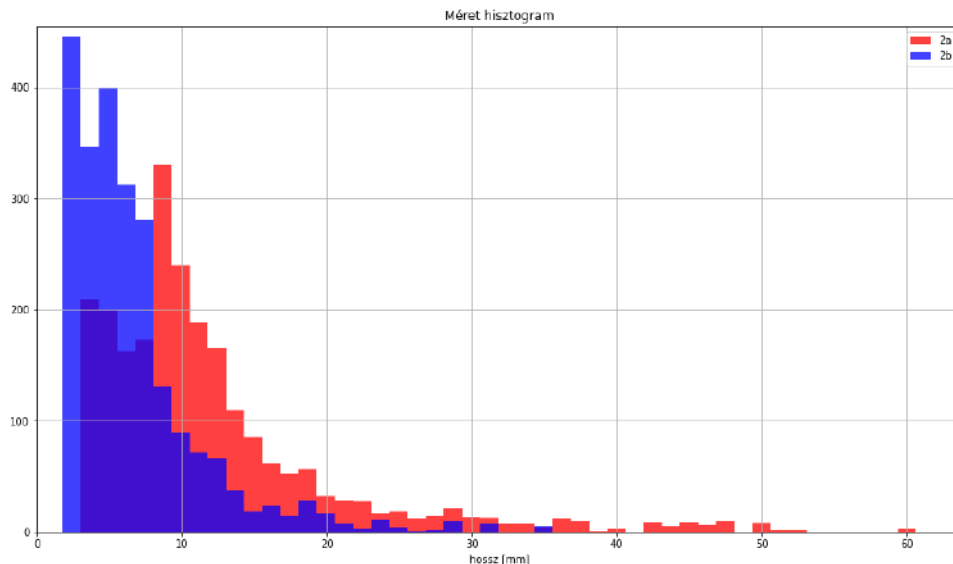
A valódi mérési adatok feldolgozása során megállapítottam, hogy a törőfej megfigyelő kamera világítása túlságosan nagy háttérteret okoz a lézerfüggöny kamera felvételén. Ezért a lézerfüggöny kamerát egy interferencia szűrővel kell ellátni, ami kiszűri a lézerek hullámhosszával nem egyező fényt.

A valódi mérés során tapasztaltak miatt szükség volt a darabka felismerés finomítására. Ennek oka, hogy a küszöbértéktől erősen függ, hogy mekkorának észleljük a darabokat. Továbbá, a pellet törésekor gáz és mikron nagyságrendű darabkákból álló "porfelhő" keletkezik,

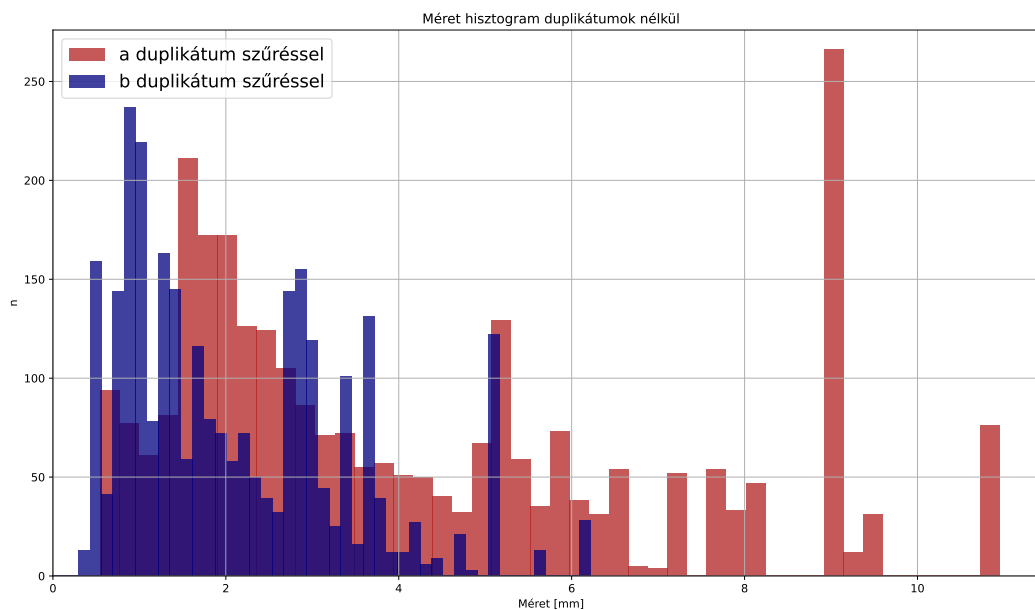
ami erősen szórja a fényt. A porfelhő inhomogenitása miatt egy képkockán belül is jelentősen változhat a háttér szintje. Első lépésben egy jobb háttérleválasztó módszert kerestem, amelyek közül a lokális küszöbérték módszer bizonyult leghatékonyabbnak. Ennek a módszernek két paramétere van: az első a dobozméret, amit 29-nek választottam a második pedig az eltolás, amit 10-nek. Az eltolásra azért van szükség, mert a lokális küszöbérték módszer nagyon érzékeny, és emiatt hamis eredményeket is adhat (pl. kameraszensor zaját is darabkaként észleli), ezt lehet elnyomni plusz eltolás hozzáadásával. Továbbá bevezettem egy zajszűrést, ami a talált kontúrok mérete alapján kiszűri a nagyon kicsi, valószínűsíthetően zajból származó darabokat.

Másodszor az egymással átfedésben lévő darabkákat felismerő algoritmusokat találtam ki, majd teszteltem őket szintetikus képeken. Az egyik módszerben a valós darabka és a ráillesztett ellipszis területét hasonlítottam össze, míg a másodikban a "kilógó" területeket figyeltem. Ezeken a teszteken a terület különbség módszer bizonyult hatásosabbnak, ezért ezt fogom használni a jövőben.

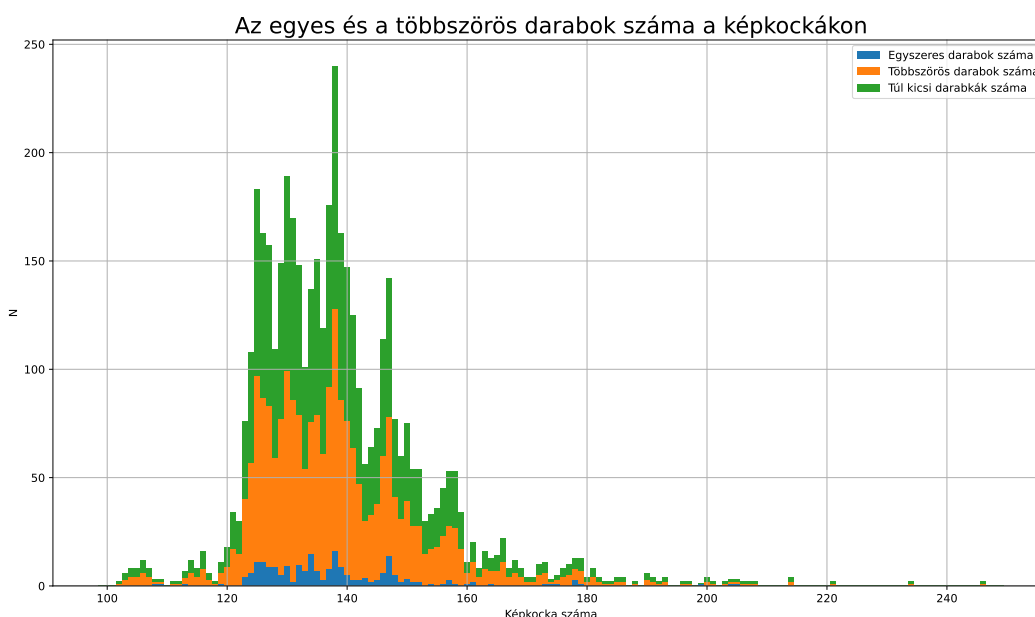
Minden eddigit implementálva a kódba kiértékeltem egy korábbi mérés felvételt, aminek az eredménye a 24,25,26 ábrán látható. Az egyetlen változás a fentiekhez képest, hogy a lokális küszöbérték módszer eltolás paraméterét 20-nak vettem.



24. ábra. A tengelyméretek hisztogramja a darabkák lekövetése nélkül.



25. ábra. A tengelyméretek hisztogramja a darabkák lekövetésével.



26. ábra. A különböző típusú darabok száma a képkocka függvényében. Látható, hogy sokkal több többszörös darabot talált, mint egyszereset.

A munkát a TDK dolgozat befejezése után is folytatni kívánom. A jövőbeli feladatok egyike a lokális küszöbérték módszer "eltolás" paraméterének vizsgálata, hogy meghatározzam ez milyen hatással van az algoritmus hatékonyságára. További lényeges feladat, hogy a megtalált átfedésben lévő darabkák elkülönítésére valamilyen módszert fejlesszek ki, és kidolgozni, hogy a duplikátum szűrésbe hogyan kell figyelembe venni a többes darabokat. Továbbá meg kell vizsgálni a 15 ábrán feltárt szög mérés hibájának az okát. A 26 alapján érdemes lehet megvizsgálni

pontosan a duplikátum szűrés határértékét, és a méret alapján történő zajszűrés határértékét is.

A dolgozat írása közben a második lézerfüggönyön történő áthaladást nem vizsgáltam. A jövőben ennek a vizsgálata és az első függönyön mérték összekapcsolása egy fontos feladat lesz. A két lézerfüggönyön felvillanó darabkák egymáshoz rendelésére például feltehetjük, hogy a darabka felhő csak radiális irányban fog nőni, az alakja hasonló marad a két függöny között. Ekkor direkt hozzárendelést tudunk adni darabkák között, ami által mindegyiknek az egyedi sebességét meg tudjuk határozni. A darabkák egyenkénti sebességével megbecsülhetjük a darabkák kamera síkra merőleges méretét azzal, hogy megmérjük, hogy hány képkockán keresztül villan fel az adott darabka.

## Hivatkozások

- [1] S. Zoletnik et al. Bevezetés a fúziós plazmazikába, egyetemi jegyzet, BME, 2014.
- [2] <https://magfuzio.hu/tanulmanyok/>.
- [3] A. Vértes. *Szemelvények a nukleáris Tudomány történetéből*. Akadémia Kiadó, 2009.
- [4] J. Wesson és D. Campbell. *Tokamaks (International series of monographs on physics sor)*. Clarendon Press, 2004.
- [5] S. Zoletnik et al. SOFT 2022 conference, P-1.23 (2022).
- [6] G Federici, A Loarte és G Strohmayer. *Assessment of erosion of the ITER divertor targets during type I ELMs. Plasma Physics and Controlled Fusion*, 45(9):1523, 2003. augusztus.
- [7] L.R. Baylor, S.J. Meitner, T.E. Gebhart, J.B.O. Caughman, J.L. Herfindal, D. Shiraki és D.L. Youchison. *Shattered pellet injection technology design and characterization for disruption mitigation experiments*. Nuclear Fusion, **59**(6):066008, 2019. április.
- [8] M Lehnen, D Campbell, D Hu, U Kruezi, TC Luce, S Maruyama, JA Snipes, R Sweeney, NW Eidietis, A Matsuyama, et al. *R&D for reliable disruption mitigation in ITER*. English. In Preprint: 2018 IAEA Fusion Energy Conf., EX-P7, 2018.
- [9] E. Walcz et al. SOFT 2022 conference, P-1.132 (2022).
- [10] T. Szepesi et al. SOFT 2022 conference, P-2.155 (2022).
- [11] G. Kocsis et al. SOFT 2022 conference, P-2.155 (2022).