
Sima felületen történő becsapódás akusztikai vizsgálatán alapuló helymeghatározó rendszer fejlesztése

OTDK Dolgozat

Készítette: **Kertész Levente**[†]

[†] Kolozsvári Műszaki Egyetem, Elektronika és Távközlésmérnöki Szak (MSc), 1. Évfolyam

Konzulens: **Németi Péter**[‡]

[‡] FVT Fejlesztőmérnök, National Instruments Hungary Kft.

2013. január 7.

Tartalomjegyzék

1. Összefoglalás	4
2. Bevezetés	4
3. A probléma megoldása	7
3.1. A matematikai modell felépítése.....	7
3.2. Röviden a LabView programozási környezetről.....	10
3.3. A matematikai modell megvalósítása LabView programozási környezetben	11
3.4. A becsapódások érzékelésének metodológiája	13
3.5. A tábla és becsapódó tárgyak anyagának kiválasztása.....	15
4. Elért eredmények	17
5. Eredmények kiértékelése	17
6. Irodalomjegyzék	18
7. Mellékletek	18

1. Összefoglalás

A rezgéshullámok alapján történő pozíciómeghatározás sokoldalú alkalmazásoknak ad helyet. A projekt célja egy sima felületű, homogén anyagú táblán történő becsapódás helyének meghatározása, az alkalmazott matematikai modell sokoldalúságának bemutatása.

A dolgozatban bemutatásra kerülnek: a becsapódás meghatározása, vizsgálata; a használt matematikai modell a becsapódás helyének meghatározásához; a becsapódás vizsgálatához, helyének meghatározásához használt matematikai modell LabView környezetben való felépítése; a tábla, illetve a becsapódó tárgy esetében használt különböző anyagok akusztikai tulajdonságai; kísérleti eredmények.

Kulcsszavak: becsapódás, akusztika, rezgésszenzor, helymeghatározás, LabView, NI USB 4432

2. Bevezetés

Eredeti elképzelésként egy interaktív-kijelző megvalósításának gondolatából indultam ki. Ennek érdekében egy függőlegesen felszerelt táblára egy számítógép kijelzőjének képét kell kivetíteni. A táblán történt becsapódás helyének meghatározását követően pedig egy egér-kattintást lehet generálni a meghatározott koordinátákon. Így gyakorlatilag bármilyen – eredetileg egér segítségével irányított - számítógépes alkalmazás kezelhetővé válik a tábla segítségével is, amelyen a becsapódások történnek.

Összesen 4 gyorsulásmérő van elhelyezve az eredetileg téglalap alakú tábla 4 sarkában. A szenzorok jelölése a jobb felső saroktól kezdődik, óramutató járásával megegyező irányban, A, B, C, D - vel jelölve a szenzorok helyét (lásd 1. Ábra). A koordináta-rendszer felépítése a bal-felső sarokból kezdődik ((0,0) koordináták) függőleges irányban lefele (az y tengely mentén), illetve vízszintes irányban jobbra (az x tengely mentén). Azért választottam ez a koordináta-rendszert, mert megegyezik a számítógép kijelzőjének standard koordináta-rendszerével.

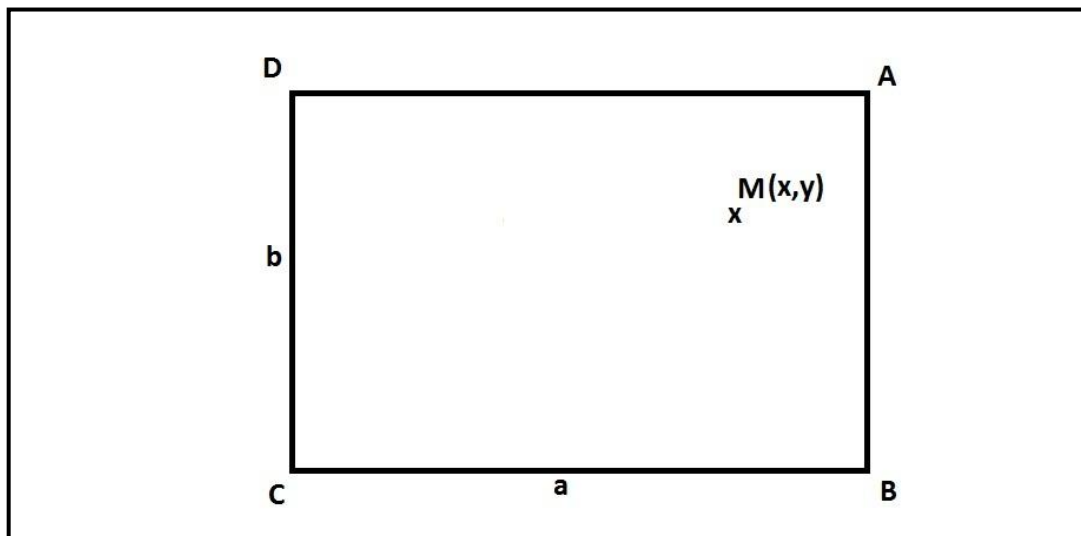
'M' ponttal jelölöm a becsapódás helyét ((x,y) koordináták által meghatározott pont); 'a'-val és 'b'-vel jelölöm a tábla hosszúságára és szélességére vonatkozó adatokat; 'c'-vel jelölöm a hang terjedési sebességét a táblában.

Egy becsapódás következtében rezgéshullámok fognak szétterjedni a táblában. Fontos, hogy a használt tábla anyaga homogén legyen, így a rezgéshullámok azonos sebességgel terjednek minden irányba.

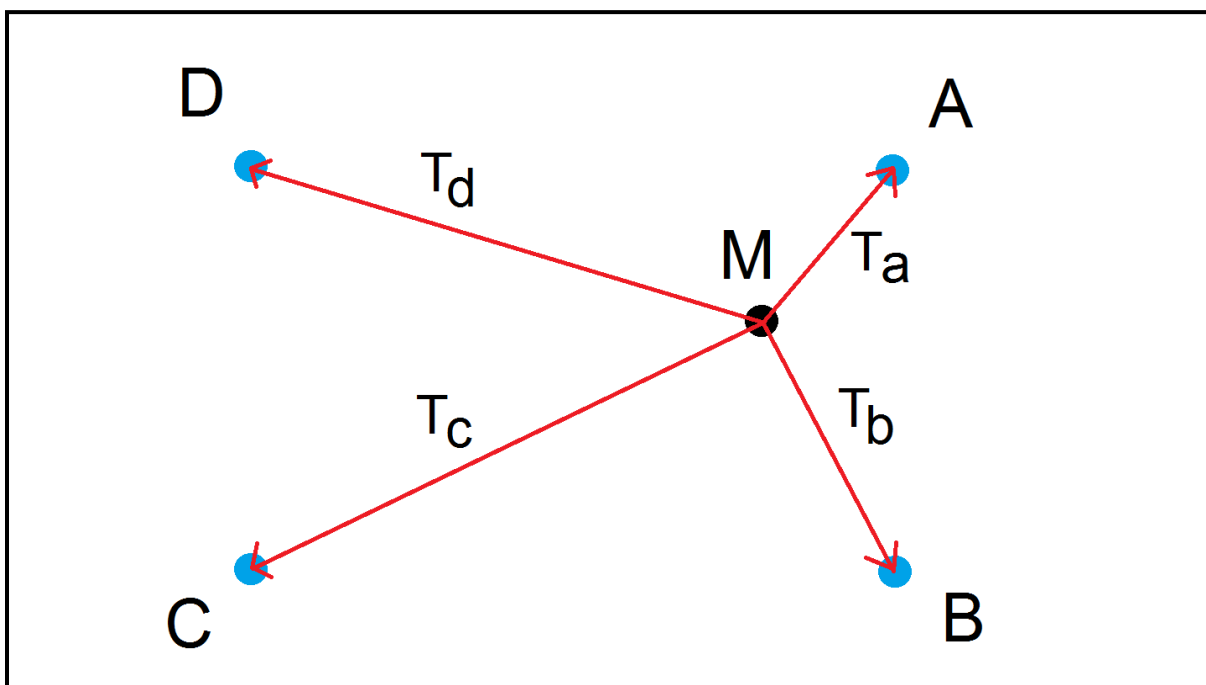
A becsapódás helyének függvényében különböző időpillanatokban érkeznek be a rezgéshullámok a különböző szenzorokhoz, arányosan a szenzor és a becsapódási pont távolságával (lásd 2. Ábra). Mindenik szenzor egy nagy pontosságú jelfeldolgozó egységhez (NI USB-4432) továbbítja a mérési adatokat, amelyek szimultán feldolgozásra kerülnek LabView programozási környezetben. A szenzoroktól beérkező adatok alapján mért időkülönbségeket (fáziskülönbségeket) felhasználva (lásd 3. Ábra) lett felépítve a matematikai modell a becsapódás helyének kiszámításához. A módszert 'Time Difference of Arrival' (TDOA) módszernek is nevezik. Ezt a továbbiakban részletesen bemutatom. [1]

Felhasznált eszközök:

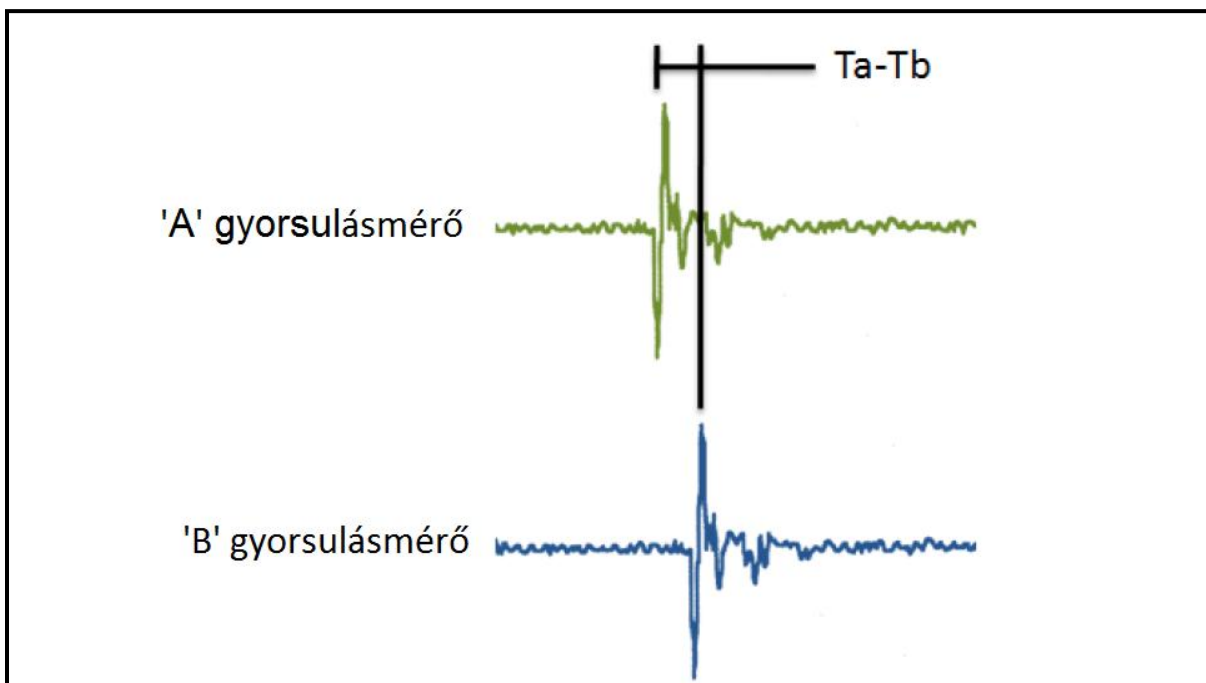
- 4 db. 50 mV/g gyorsulásmérő (IMI 603C01)
- NI USB-4432 nagy pontosságú jelfeldolgozó egység
- LabView programozó környezet
- Impulzuskalapács
- Különböző anyagú, méretű, formájú táblák
- Becsapódás gerjesztésére használt tárgyak



1. Ábra – a tábla modellje



2. Ábra - A rezgéshullámok különböző időpillanatokban érkeznek be a különböző szenzorokhoz, arányosan a szenzor és a becsapódási pont távolságával



3. Ábra – Szenzorokhoz beérkező rezgéshullámok fáziseltolódásai

3. A probléma megoldása

3.1 A matematikai modell felépítése

A matematikai modell felépítésénél figyelembe kellett vennem a következő feltételeket:

1. Nem ismert az időpillanat, amikor a becsapódás történik.
2. A táblában a hanghullám terjedésének sebessége nem ismert.

A becsapódás időpillanatának ismeretében egy egyszerű modellt kapnánk a rezgéshullám terjedési idejének kiszámítására a becsapódás helyétől a szenzorokig. Ez csak abban az esetben lenne lehetséges, ha egy impulzuskalapáccsal történne meg a rezgéshullám gerjesztése (ez esetben tudnánk a becsapódás pillanatát). Az impulzuskalapáccsal folytatott kísérletek eredményeit egy további alfejezetben mutatom be.

A matematikai modell felépítésénél a fenti két feltétel által létrejött hátrányok kiküszöbölése mellett döntöttem. 'M' ponttal jelölöm a becsapódás helyét ((x,y) koordináták által meghatározott pont); 'a'-val és 'b'-vel jelölöm a tábla hosszúságára és szélességére vonatkozó adatokat; 'c'-vel jelölöm a hang terjedési sebességét a táblában.

Felhasználva Pithagoras tételét felírhatjuk a távolságokat a becsapódási ponttól a szenzorokig:

$$MA = \sqrt{(a - x)^2 + (b - y)^2}$$

$$MB = \sqrt{(a - x)^2 + y^2}$$

$$MC = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$MD = \sqrt{x^2 + (b - y)^2}$$

T_A, T_C, T_B, T_D -vel jelölöm az eltelt időt, amíg a rezgéshullám eljut a becsapódási ponttól a szenzorokig.

Felhasználva az út/idő/sebesség összefüggést felírható:

$$T_A = \frac{1}{c} \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2} \quad (1.)$$

$$T_B = \frac{1}{c} \sqrt{(a-x)^2 + y^2} \quad (2.)$$

$$T_C = \frac{1}{c} \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.)$$

$$T_D = \frac{1}{c} \sqrt{x^2 + (b-y)^2} \quad (4.)$$

A fenti képletek segítségével kiszámítható az eltelt idő, amíg a rezgéshullám eljut a becsapódási ponttól a rezgésszenzorokig. A becsapódás pillanatának ismeretének hiányában viszont nem lehet számolni. Így a modell időkülönbségekre kell hogy épüljön, időkülönbségeket tudunk mérni.

A (3.) és (2.) egyenletet kivonva egymásból a következő összefüggéshez jutunk:

$$y = \sqrt{\frac{(k^2 + a^2 - 2ax)^2}{4k^2}} - (a-x)^2 \quad (5.) \quad (\text{jelölöm: } k = c(T_C - T_B))$$

A (4.) és (1.) egyenletet kivonva egymásból a következő összefüggéshez jutunk:

$$y = b - \sqrt{\frac{(l^2 + a^2 - 2ax)^2}{4l^2}} - (a-x)^2 \quad (6.) \quad (\text{jelölöm: } l = c(T_D - T_A))$$

A (4.) és (3.) egyenletet kivonva egymásból a következő összefüggéshez jutunk:

$$x = \sqrt{\frac{(m^2 - b^2 + 2by)^2}{4m^2}} - y^2 \quad (7.) \quad (\text{jelölöm: } m = c(T_D - T_C))$$

Az (1.) és (2.) egyenletet kivonva egymásból a következő összefüggéshez jutunk:

$$x = a - \sqrt{\frac{(n^2 - b^2 + 2by)^2}{4n^2}} - y^2 \quad (8.) \quad (\text{jelölöm: } n = c(T_A - T_B))$$

Az (5.), (6.) és (7.), (8.) egyenletekből áll össze a matematikai modell. Megoldva bármelyik egyenletrendszer (y koordinátára x függvényében, vagy x koordinátára y függvényében) megkapjuk a keresett (x,y) koordinátapárt.

Az y koordinátára meghatározása x függvényében ((5.), (6.) egyenletekből alkotott egyenletrendszer) az AD és BC oldalakhoz (lásd 1.Ábra) viszonyított koordináta meghatározás (AD-BC oldalpárok szerint).

Az x koordinátára meghatározása y függvényében (((7.), (8.) egyenletekből alkotott egyenletrendszer)) az AB és CD oldalakhoz (lásd1.Ábra) viszonyított koordináta meghatározás (AB-CD oldalpárok szerint).

Ideális esetben a két koordinátarendszer által kapott eredmény egyenlő, a modell gyakorlati alkalmazása esetén azonban vannak különbségek, a használt tábla anyagának függvényében. Ilyen esetekben lehetőség van a végső koordinátapár meghatározására a két egyenletrendszer megoldásainak átlagolásával, a nagyobb pontosság érdekében.

Két egyenletrendszerrel rendelkezve a következő szélsőséges esetekre is van megoldás: ha a becsapódás vízszintes vagy függőleges irányban a tábla közepén történt, illetve ha a becsapódás pontosan a tábla közepén történt (ilyen esetekben a mért időkülönbségek értéke 0 lenne, a modell nem működne megfelelőképpen).

Összesen 5 esetet különböztettek meg a becsapódási koordináták meghatározására (lásd 4. Ábra). Szinte minden esetben más-más oldalpár szerint kell számolni, hogy a modell megfelelő képpen működjön. A megoldásokat az 1. Táblázatban foglaltam össze.

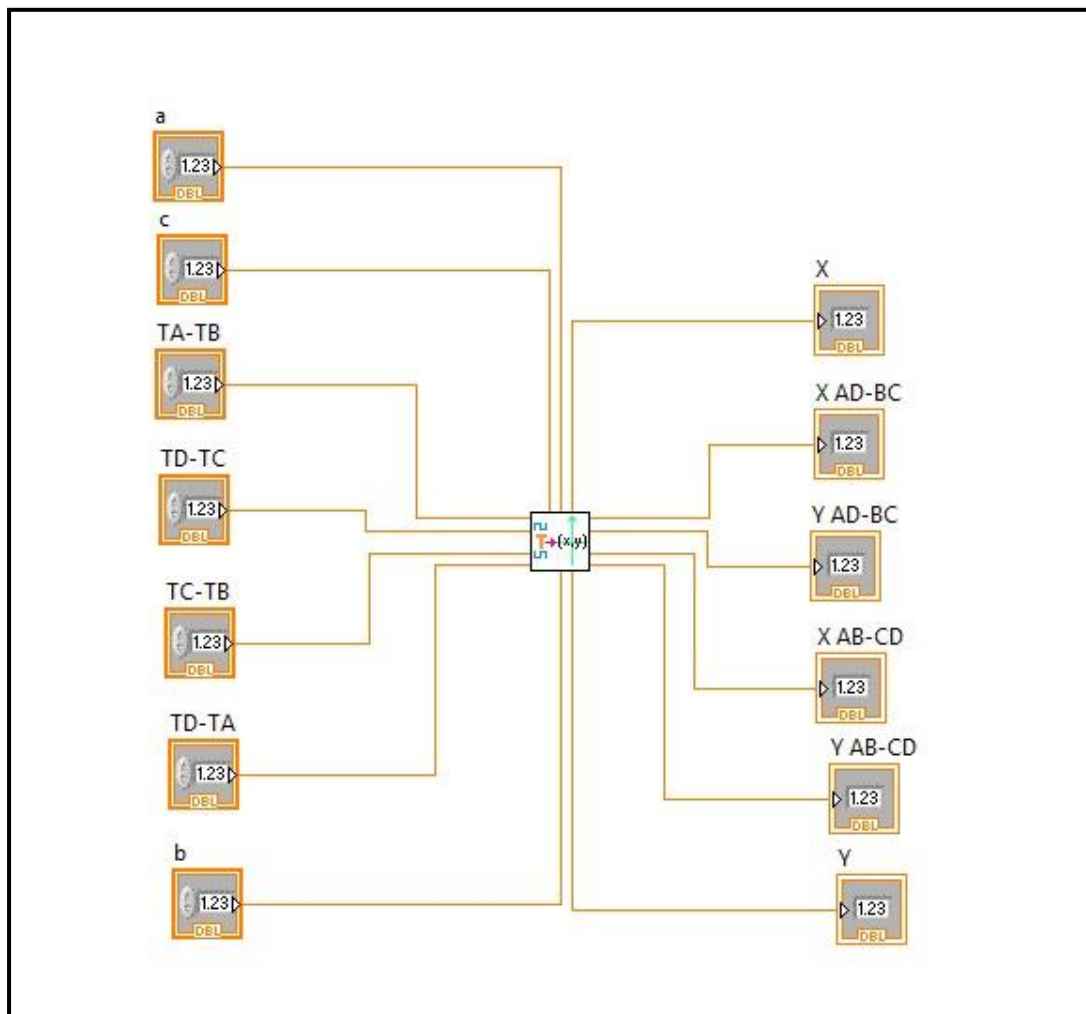
<i>eset</i>	<i>becsapódás helye</i>	<i>oldalpárok szerinti tárgyalás</i>
1.	a tábla jobb féltékén	AD-BC és AB-CD szerinti eredmények átlaga
2.	a tábla bal féltékén	AD-BC és AB-CD szerinti eredmények átlaga
3.	a tábla közepén függőleges irányban	AB-CD oldalpár szerint
4.	a tábla közepén vízszintes irányban	AD-BC oldalpár szerint
5.	pontosan a tábla közepén	$(x,y) = (a/2, b/2)$

1. Táblázat – esetek tárgyalása a becsapódási koordináták meghatározására

3.3 A matematikai modell megvalósítása LabView programozási környezetben

A matematikai modellt megvalósító fő VI a 6. Ábrán látható. Bemeneti paraméterei: a tábla szélessége és hosszúsága (a és b), a hang terjedési sebessége a táblában (c), a különböző szenzorokhoz beérkező rezgéshullámok időkülönbségei (összesen 4). Kimeneti értékek: összesen 3 koordinátopár: AB-CD oldalpár szerint számolt értékek, AD-BC oldalpár szerint számolt értékek és az utóbbi kettő átlagolásából létrejött korrdinátopár. A matematikai modellt megvalósító fő VI blokkdiagramja részletesen a B. mellékletben tekinthető meg.

A fő VI 3 subVI-t foglal magába: egy subVI, amely tárgyalja az 5 megkülönböztetett esetet a becsapódási koordináták meghatározására (lásd 1. Táblázat), ugyanakkor további 2 subVI-t, amely a matematikai modellt felépítő egyenletrendszerek megoldásait téríti vissza. A teljes subVI-ok a C.,D. és E. mellékletekben tekinthetők meg.

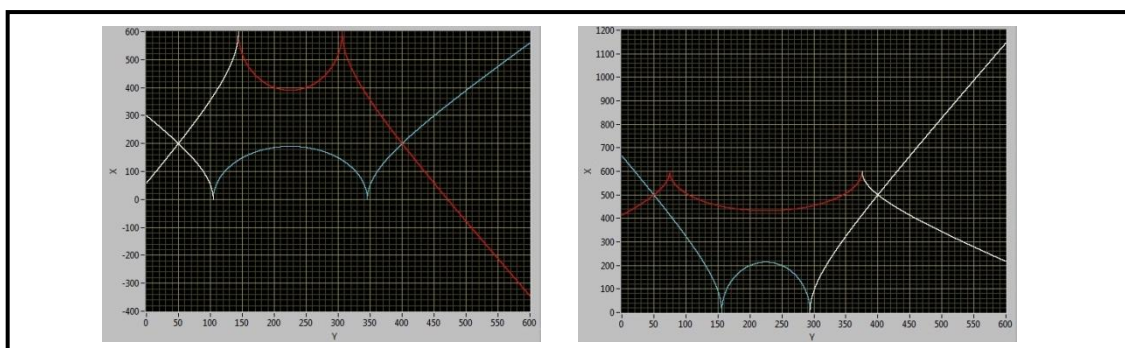


6. Ábra - A matematikai modellt megvalósító fő VI ki- és bemenetei

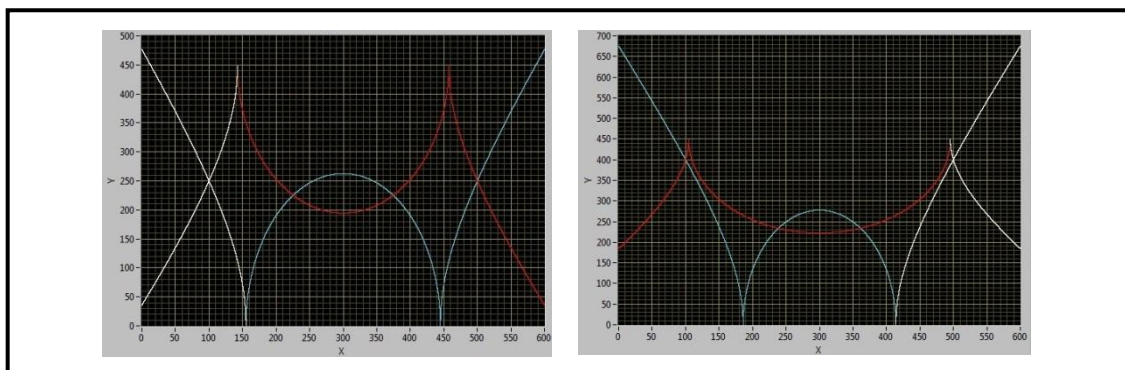
A matematikai modellt felépítő egyenletrendszer megoldása érdekében a következőképpen jártam el: grafikusan ábrázoltam az egyenleteket (külön-külön mindegyik egyenletrendszer esetében), majd megkerestem a grafikonok közös metszéspontját, melyek a keresett koordinátapárt térítik vissza.

A grafikus ábrázolás következtében a két egyenletnek ((5.), (6.) az AD és BC oldalak szerinti koordináta meghatározás esetén, illetve (7.), (8.) az AB és CD oldalak szerinti koordináta meghatározás esetén) összesen 4 metszéspontja figyelhető meg (lásd 7. Ábra és 8. Ábra).

Az egyetlen és helyes metszéspont megállapítása érdekében a következő szabály általánosítható mindkét esetben (kísérletek alapján): ha a becsapódás a tábla bal (alsó) féltékén történt akkor a baloldali metszéspont a helyes, ha a becsapódás a tábla jobb (felső) féltékén történt akkor a jobboldali metszéspont a helyes. A grafikonokat szűröm, fölösleges részeit (lásd 7. Ábra és 8. Ábra fehéren nem kiemelt részei) figyelmen kívül hagyva keresem a közös metszéspontot.



7. Ábra - AB és CD oldalak szerinti koordináta meghatározáskor fellépő két eset: amikor a becsapódás a tábla alsó, illetve felső oldalán történt



8. Ábra - AD és BC oldalak szerinti koordináta meghatározáskor fellépő két eset: amikor a becsapódás a tábla bal, illetve jobb oldalán történt

3.4 A becsapódások érzékelésének metodológiája

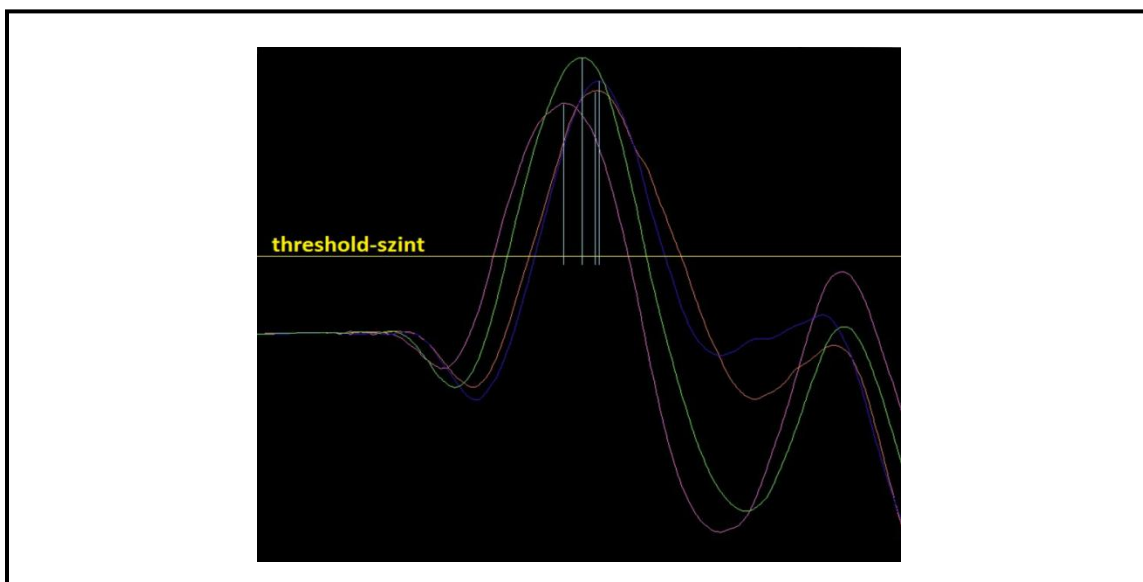
Ebben az alfejezetben bemutatom azt a módszert amit a becsapódások meghatározására és a különböző szenzorokhoz beérkező rezgéshullámok időkülönbségeinek mérésére használtam.

Mérőeszközként 4 gyorsulásmérőt [2] és egy NI USB-4432 nagy pontosságú jelfeldolgozó egységet [3] használtam, melyet LabView programozási környezetben konfiguráltam és programoztam be.

A táblán történő mérések kalibrálására egy impulzuskalapácsot használtam [4]. Az eszköz lényegében szintén egy gyorsulásmérő, azzal a különbséggel, hogy az általa előidézett gerjesztések vizsgálatánál megállapítható a becsapódás pillanata, míg a hagyományos gyorsulásmérőkkel ez nem lehetséges.

Kísérleteim alapján a táblán történő gerjesztések előidézésére legmegfelelőbb eszköz az impulzuskalapács bizonyult, ugyanis ez rendelkezett egy megfelelő keménységű teszt-heggyel, amivel pontszerű gerjesztéseket sikerült generálni a táblán.

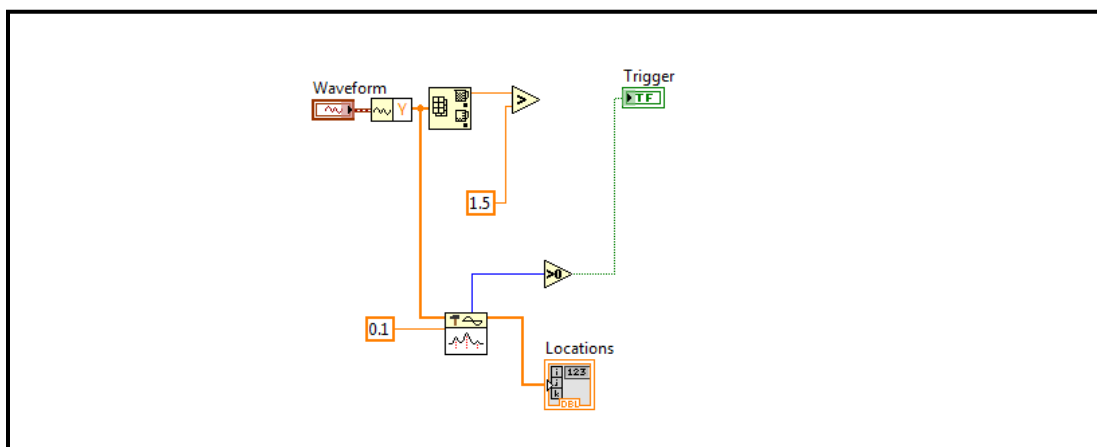
A pontszerű gerjesztések következtében olyan formájú rezgéshullám keletkezett, amin könnyű volt egy trigger-érték meghatározása. A triggerelés és az időkülönbségek mérése a következőképpen történt: ha a beérkező jel amplitúdója meghaladott egy küszöb-szintet (threshold) akkor feltételezem, hogy becsapódás történt, a threshold-szint fölötti első 4 maximum pontot kerestem meg (lásd 9. Ábra), majd a maximumoknak megfelelő idő-értékeket olvastam le, mindenik szenzor adatait külön-külön. Ezen értékek kivonásával nyert időkülönbségek bementeként szolgáltak a matematikai modellbe.



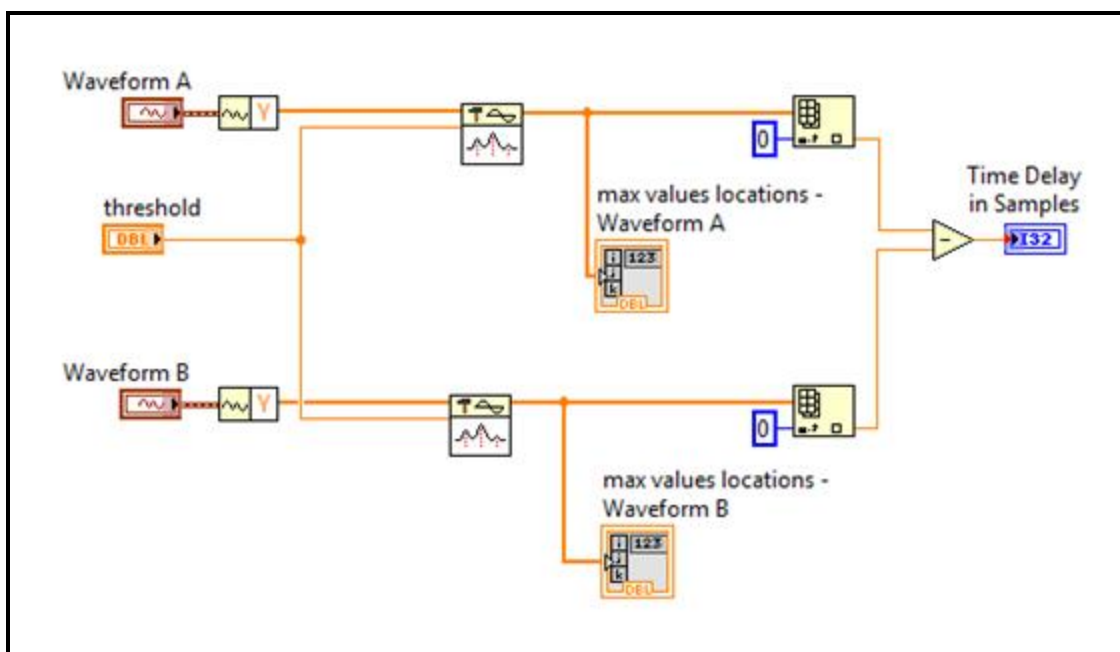
9. Ábra – Rezgéshullámok triggerelése
(a különböző színek a különböző szenzorok által mért adatokat jelölik)

A triggerelést megvalósító LabView kód blokkdiagramja a 8. Ábrán látható. Bemeneti értéke a szenzortól érkező adatjel. Kimeneti értéke egy logikai változó (Meg lett haladva a threshold érték? Történt becsapódás vagy nem?).

Az időkülönbségek mérését megvalósító LabView kód blokkdiagramja a 9. Ábrán látható. Bemeneti értékei: két szenzortól érkező adatjel, threshold-szint értéke. Kimeneti értéke a két adatjel közti fáziskülönbség.



10. Ábra - A triggerelést megvalósító LabView kód blokkdiagramja



11. Ábra - Az időkülönbségek mérését megvalósító LabView kód blokkdiagramja

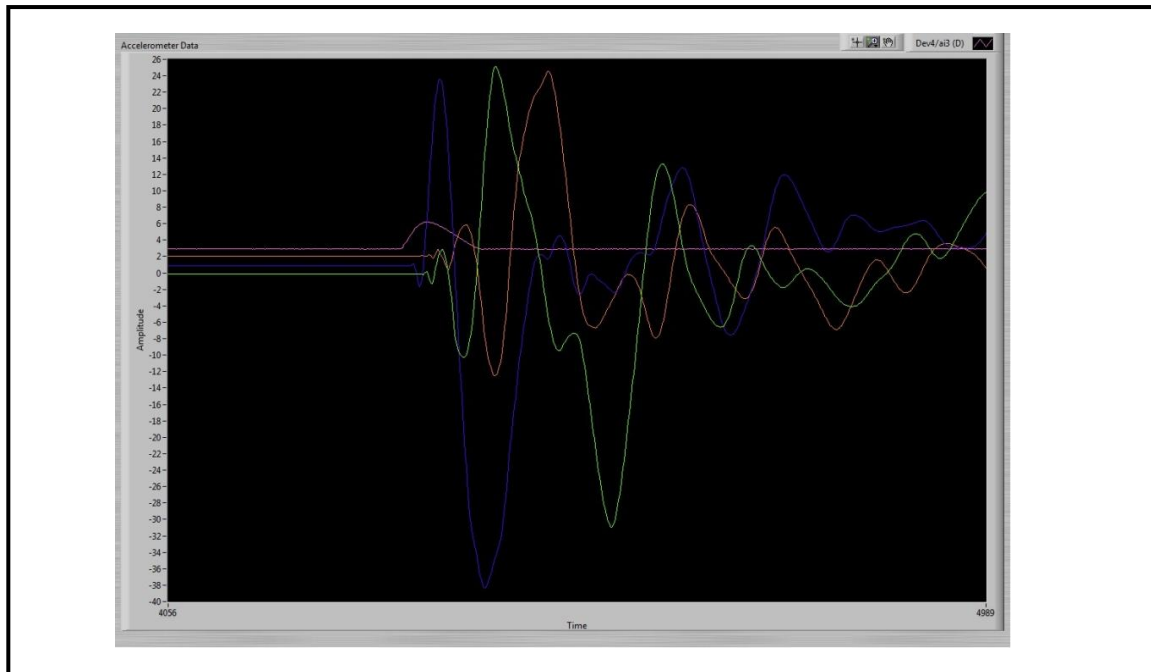
3.5 A tábla és a becsapódó tárgyak anyagának kiválasztása

A tábla anyagának kiválasztásánál a következő szempontok lettek figyelembe véve: elég erősnek kell lennie ahhoz, hogy bírja a becsapódások erejét; egy becsapódás következtében nem szabad meghajlania, ugyanis ez fölösleges berezgéseknek tenné ki az alkalmazást, rontva ezáltal a modell pontosságát; anyaga homogén kell legyen, hogy egyenletesen terjedjenek benne a rezgéshullámok; ha lehetséges akkor a hang terjedési sebessége is alacsony legyen a pontosabb triggerelés és fáziskülönbség mérése esetében.

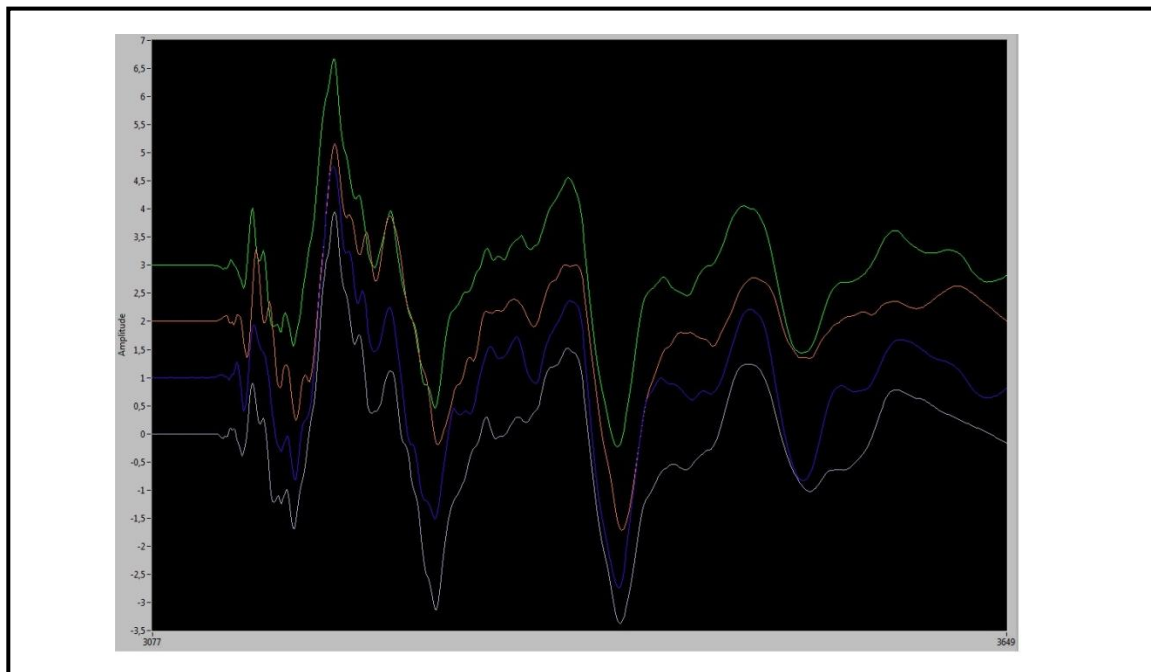
A legelső kísérleteknél egy 8 mm vastagságú farostlemezt használtam, ami akusztikai szempontból gyenge paraméterekkel rendelkezett (anyaga nem volt homogén, a becsapódás következtében létrejött utólagos berezgések rontották a modell pontosságát). A továbbiakban egy 10 mm-es plexi lemezzel folytattam kísérleteimet. Akusztikai szempontból sokkal jobban megfelelt.

A becsapódások előidőzésre legmegfelelőbb tárgy az impulzuskalapács bizonyult. Ez rendelkezett egy megfelelő keménységű műanyag teszt-heggyel, amivel pontszerű gerjesztéseket sikerült generálni a táblán (lásd 12. Ábra). Az impulzuskalapács másik előnye, hogy alkalmazásával lehetőség volt a becsapódás pontos pillanatának megállapítására. Így adva volt egy referencia pont amihez viszonyítva lehetett mérni az időkülönbségeket. Ennek a modell kalibrálásánál és precizitásának meghatározásánál volt fontos szerepe. Egy 50 cm x 50 cm méretű (plexi) táblán megfelelő gerjesztés előidézése mellett sikerült ± 7 mm-es hibával meghatározni a becsapódás helyét.

Az impulzuskalapács mellett alumínium hegyű darts-nyilakkal is folytattam kísérleteket. Ezek esetében nem volt olyan pontszerű a becsapódás (lásd 13. Ábra), mint az előző esetben, és a trigger-érték beállítása is körülményesebb volt. A megfelelő paraméterek beállításával viszont a modell hasonló pontossággal viselkedett, mint az előző esetben.



12. Ábra – Impulzuskalapáccsal előidézett gerjesztések. A rózsaszínnel megjelenített görbe az impulzuskalapáccsal mért adatjel – jól látható a becsapódás pillanata.



13. Ábra – Darts- nyíllal előidézett gerjesztés

4. Elért eredmények

A projekt keretén belül sikerült felépíteni, majd LabView programozási környezetben megvalósítani egy matematikai modellt, amely képes egy táblán történő becsapódás helyét meghatározni, a tábla sarkaiban elhelyezett gyorsulásmérőkhöz beérkező rezgéshullámok időkülönbségei alapján. A teljes kód blokkvázlata részletesen az **A. Mellékletben** tekinthető meg.

A tábla és becsapódó tárgyak anyagának helyes kiválasztása kulcsfontosságú. Ezek megfelelő kiválasztásával és az alkalmazás pontos kalibrálása esetén a modell akár milliméter pontossággal is képes a becsapódás helyes koordinátáinak visszatérítésére, és ezzel számtalan alkalmazásnak adhat helyet.

A megvalósított számítási modell alapján akár tábla nélkül, légtérben történő hanghullámok (vagy akár egyéb hullámok - rádióhullámok) különböző szenzorokhoz történő beérkezésének különbségeire alapozva pontos és működőképes helymeghatározó rendszert kapnánk. Az alkalmazás sokoldalúsága abban nyilvánul meg, hogy az előbb említett alkalmazások megvalósításához csupán a szenzorokat kellene kicserélni, az többi rész nagyobb átalakítás nélkül alkalmazható.

5. Eredmények kiértékelése

A megvalósított alkalmazás mellett a felépített és LabView programozási környezetben megvalósított matematikai modell bármely helymeghatározó rendszer esetében használható, ahol a különböző referenciapontokon elhelyezett szenzorokhoz beérkező jelek fáziseltolódásait vesszük alapul.

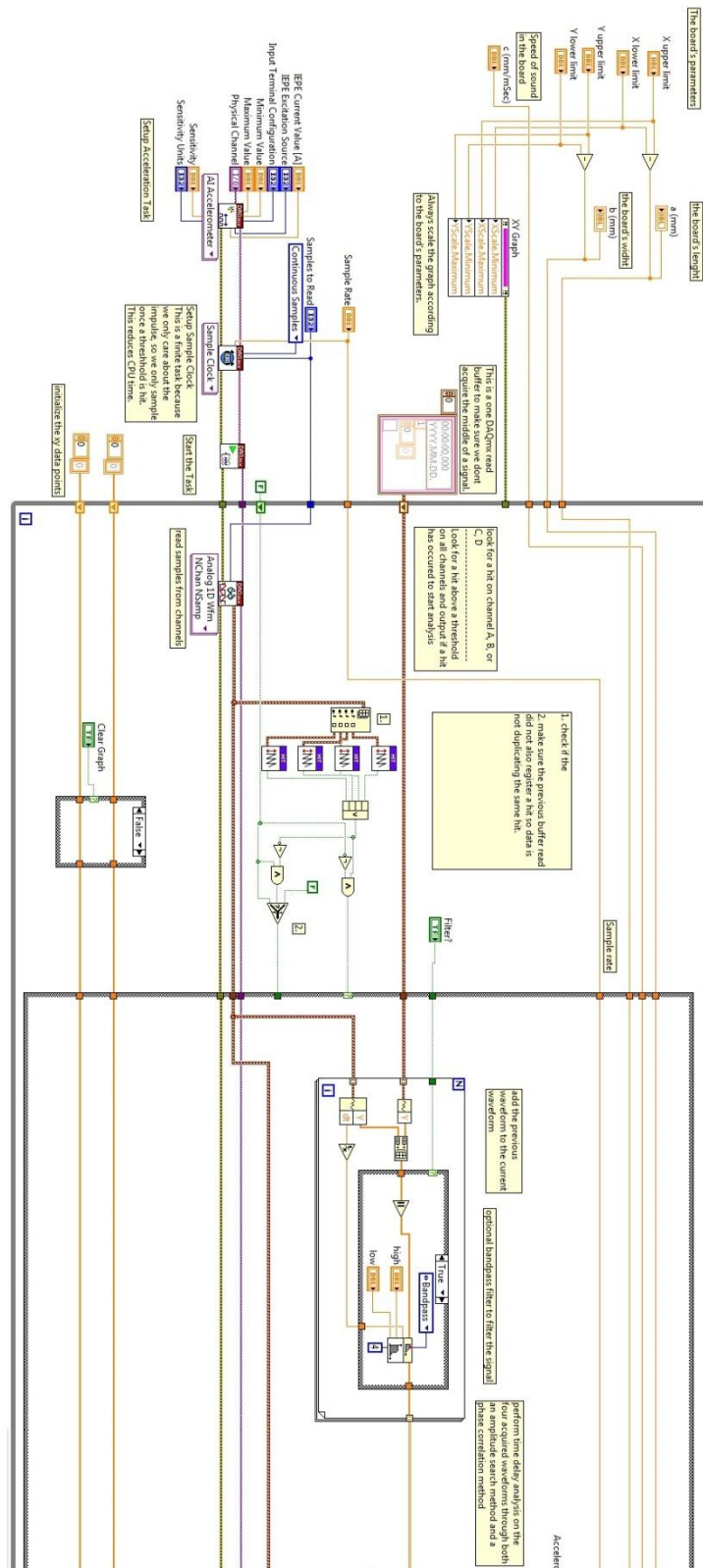
A modell felépítését követő, különböző anyagokkal folytatott kísérletek (a tábla, illetve a becsapódó tárgy anyagát illetően) még nem értek véget. A jelen esetben használt anyagok kísérleti céloknak kiválóan megfelelnek, de tudnunk kell milyen erővel csapódhat be egy tárgy a helyes működés érdekében. A feladat folytatásaként további anyagokkal kísérletezem, a hasonló pontosságú, de nagyobb általánossággal bíró végső alkalmazás megvalósítása érdekében.

6. Irodalomjegyzék

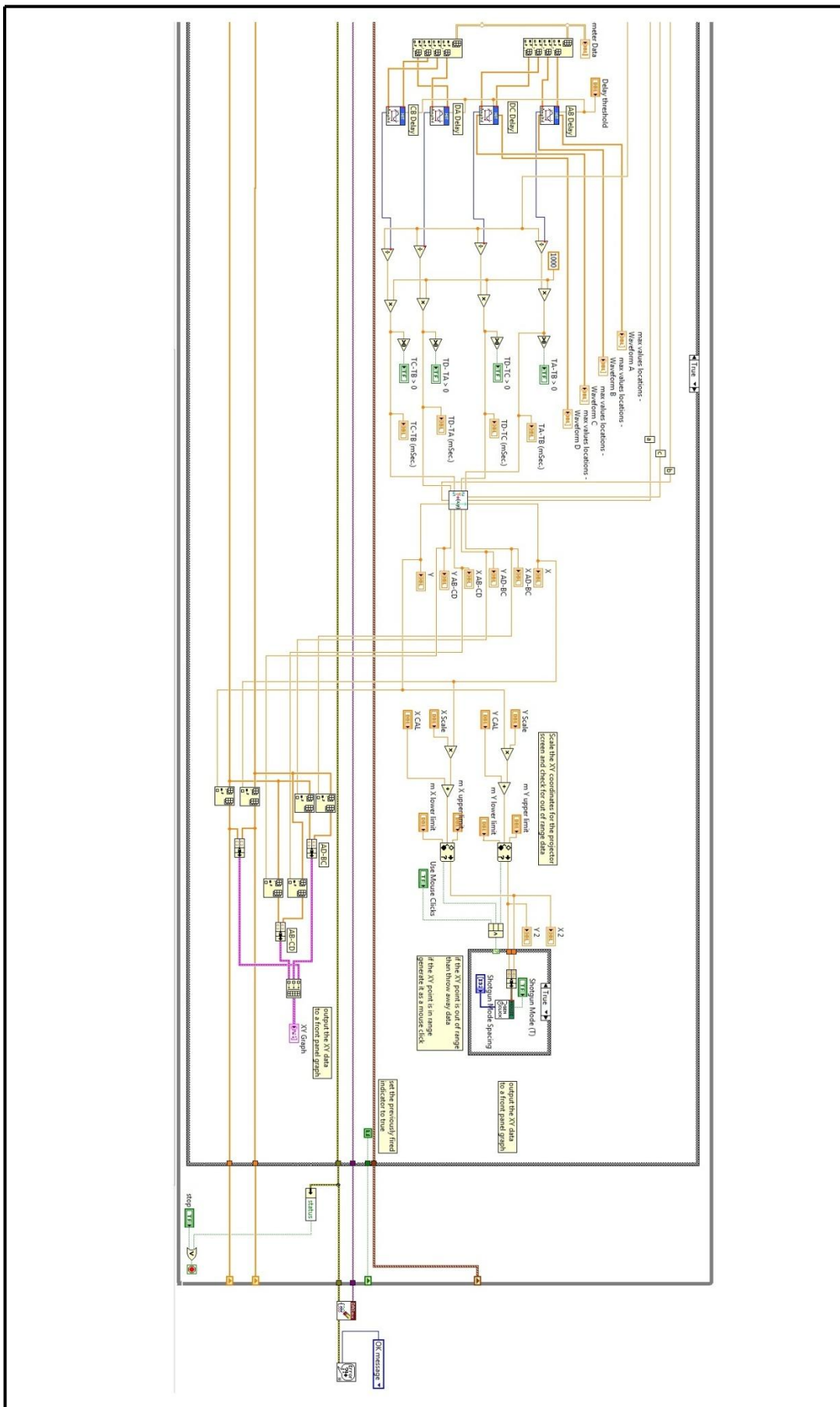
- [1] Waterloo Labs – FPS with Real Guns [Online]
Available: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-6106>
- [2] IMI 603C01 Accelerometer Datasheet [Online].
Available: <http://ebookbrowse.com/603c01-h-pdf-d146919955>
- [3] NI USB 4432 Datasheet [Online]
Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/206677>
- [4] NI Vibration Sensor Guide Specs [Online]
Available: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-364/lang/en>
- [5] NI LabView [Online]
Available: <http://www.ni.com/labview/whatis/>

7. Mellékletek

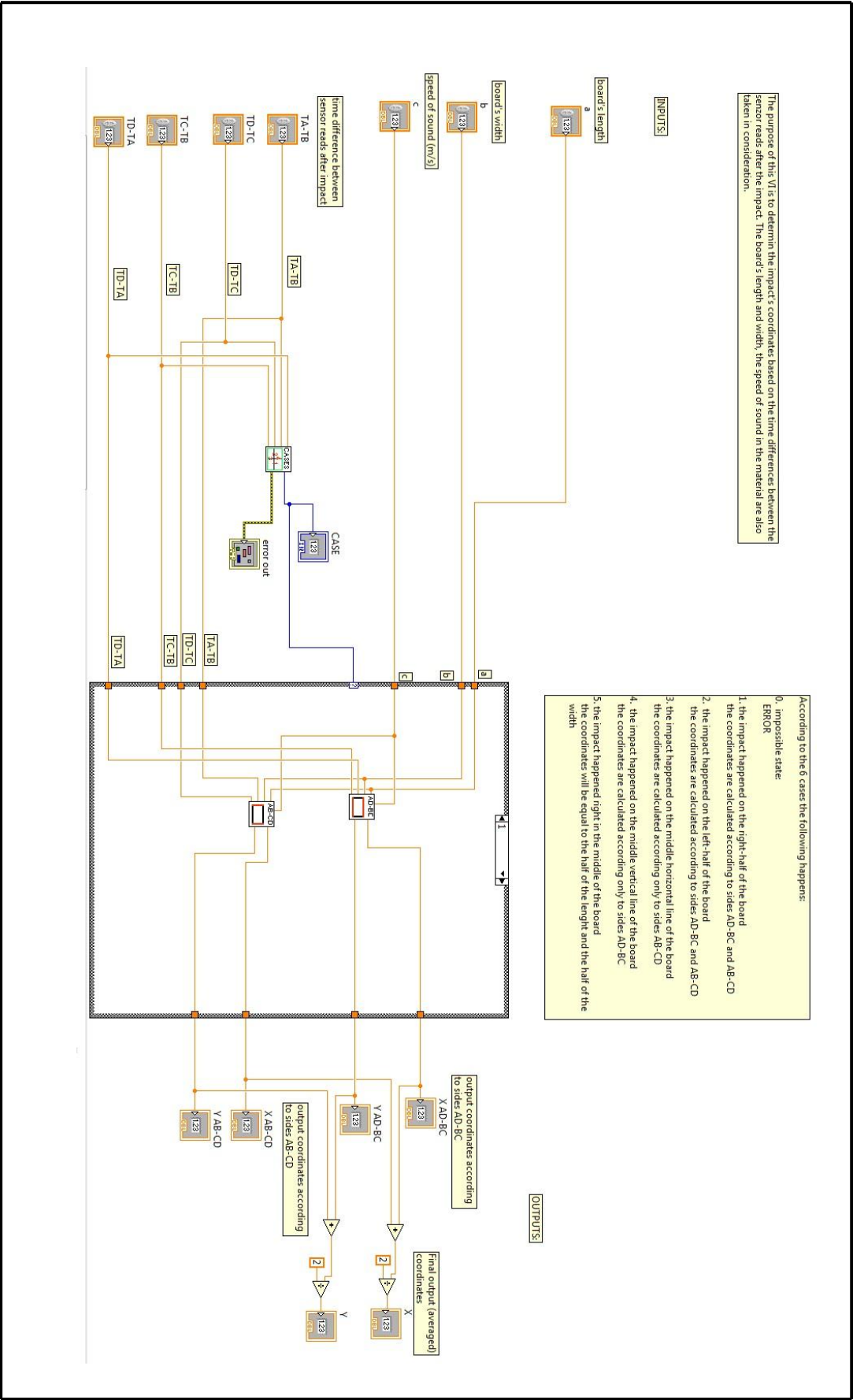
A. Melléklet – A teljes kód blokkvázlata (1/2)



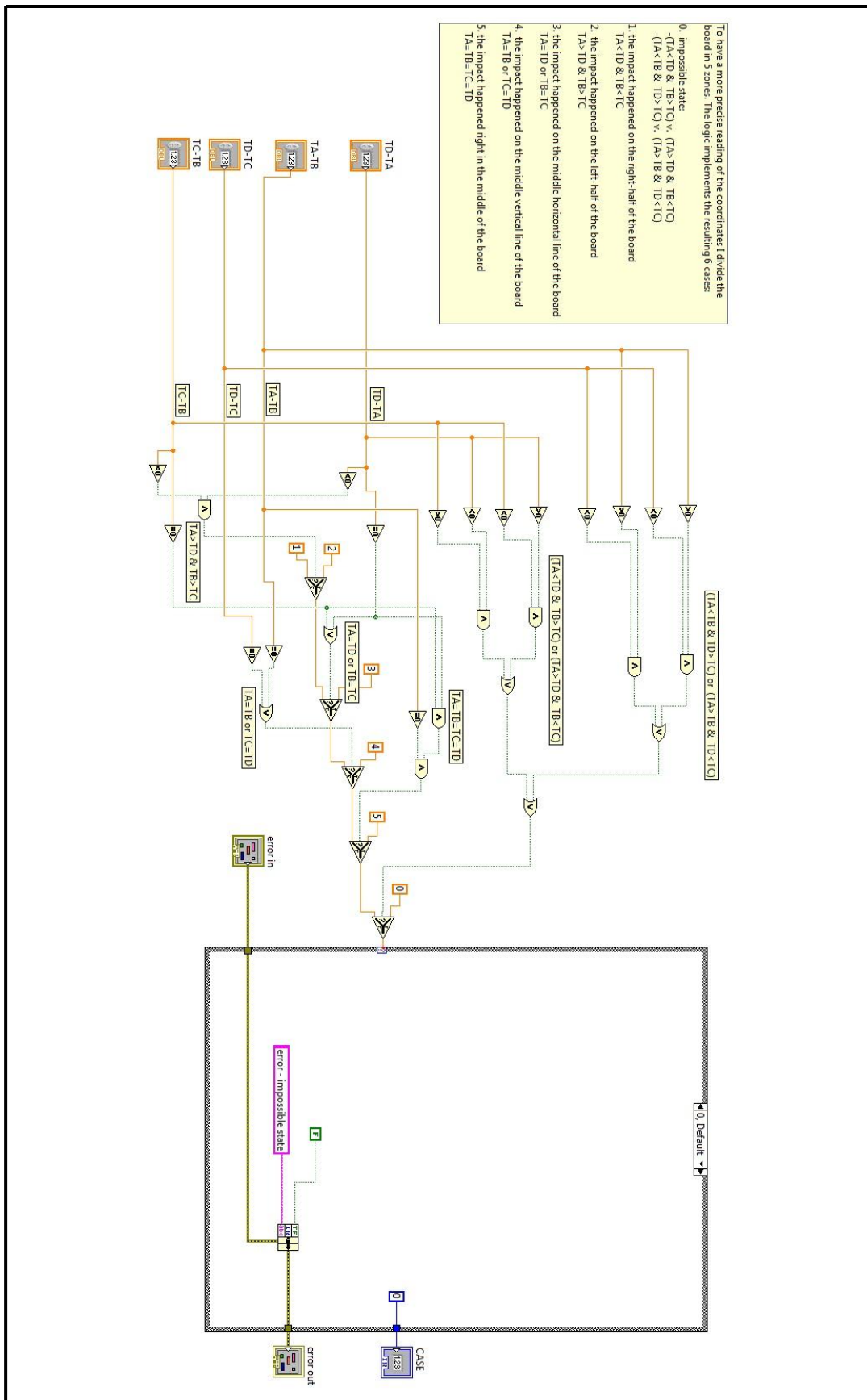
A. Melléklet – A teljes kód blokkvázlata (2/2)



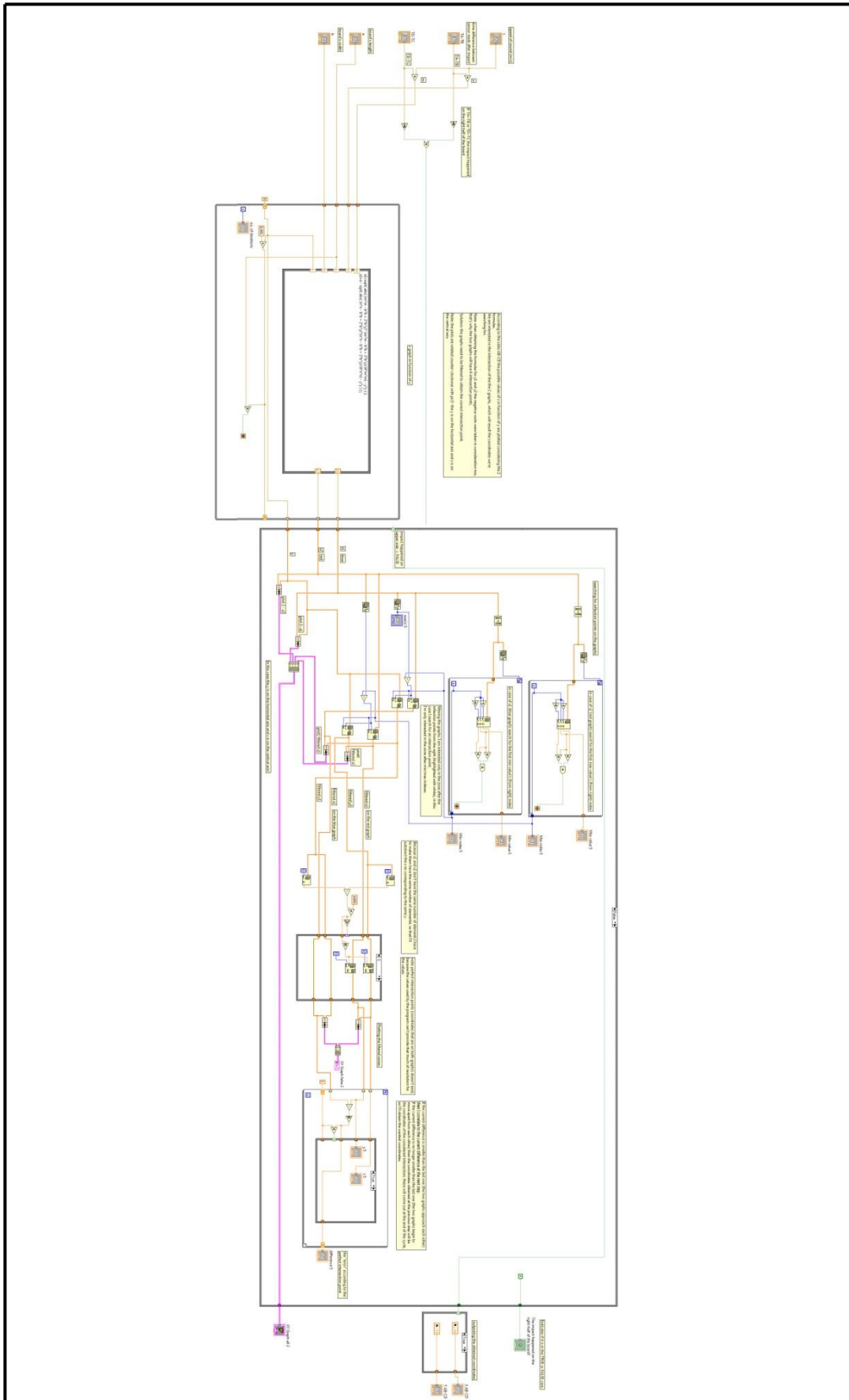
B. Melléklet – matematikai modellt megvalósító fő VI blokkdiagramja



C. Melléklet – subVI, amely tárgyalja az 5 megkülönböztetett esetet a becsapódási koordináták meghatározására



D. Melléklet – subVI, amely a matematikai modellt felépítő egyenletrendszer megoldásait téríti vissza AB-CD oldalakhoz viszonyítva



E. Melléklet – subVI, amely a matematikai modellt felépítő egyenletrendszer megoldásait téríti vissza AD-BC oldalakhoz viszonyítva

