

Úszóművek és hullámzás kölcsönhatásának numerikus modellezése

Tudományos Diákköri Konferencia
2022

Szerző:
Weber Krisztián

Konzulensek:
Dr. Fleit Gábor
Dr. Homoródi Krisztián

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Budapest, 2022

Tartalom

Absztrakt.....	3
Jelölésjegyzék.....	4
1 Bevezetés.....	6
2 Módszerek	9
2.1 Empirikus összefüggések	9
2.1.1 Hullámátvitel rögzített merev szerkezetek esetén	9
2.1.2 Hullámátviteli rögzítetlen merev szerkezetek esetén	11
2.2 Numerikus áramlásmodell bemutatása	12
2.2.1 Áramlási alapegyenletek	12
2.2.2 Szabadfelszín számítás	13
2.2.3 Víz-mozgótest interakció.....	13
2.2.4 Hullámzástgenerálás	13
3 Eredmények.....	15
3.1 Modell igazolás és rácsháló konvergencia vizsgálat	15
3.2 Balatoni esettanulmány	18
3.2.1 A Balatonszemesi kikötő spektrális hullámzásmodellje.....	18
3.2.2 Finomléptékű hidrodinamikai modellezés.....	20
3.3 Eredmények összevetése empirikus összefüggésekkel	26
4 Diskusszió és konklúziók.....	28
Hivatkozások.....	29

Absztrakt

A tavi medencés kikötőkbe behatoló hullámokból a medencés kialakítás, illetve a kikötött hajók és azok kikötésére szolgáló úszóművek miatt összetett hullámmási viszonyok alakulnak ki. A hullámok visszaverődnek a partfalakról, felfutnak a rézsűs kialakítású mólókra stb. Ezekon kívül az úszó pontonoknak is érdemi hatása van a hullámmásra. A hullámenergia egy része áthalad alattuk, egy része viszont visszaverődik vagy disszipálódik.

Jelen munka keretein belül részletes numerikus modellvizsgálatokon keresztül tanulmányoztam az vízben úszó és azzal együtt mozgó szerkezeteket. A modellt egy jól dokumentált szakirodalmi laborkísérlet eredményei alapján igazoltam, illetve elvégeztem egy rácshálókongvergencia vizsgálatot is.

Áttekintettem a szakirodalomban fellelhető empirikus összefüggéseket az úszóművek hullámmáscsillapító hatásának becslésére, majd egy sematikus, de valós körülményeket jól reprezentáló balatoni esettanulmányra alkalmaztam őket. A már igazolt numerikus modellel szintén szimulációkat végeztem különböző szabadságfokok esetére, majd az eredményeket összevetettem az empirikus becslésekkel.

A vizsgált esettanulmány eredményei rávilágítottak a hullámmás csillapítás érkező hullámoktól való erős függésére. Míg irreguláris (spektrális hullámmásmodellel becsült) hullámperemfeltételek esetén a modell alábecsülte a szerkezet hullámmcsillapító hatását az empirikus képletekhez képest, úgy az irreguláris hullámok átlagértékeivel végzett monokromatikus hullám esetén épp ellenkezőleg: az érkező hullámenergiának elenyésző része jutott csak át a szerkezeten.

Jelölésjegyzék

Latin jelölések

a_j	j-edik hullámösszetevő amplitúdója	[m]
B	a szerkezet szélessége	[m]
c_f	a különböző f frekvenciájú hullámösszetevők közti energiadiffúzió sebessége	[m/s]
$c_{g,x}, c_{g,y}$	a hullámterjedés sebessége x és y irányban	[m/s]
C_t	átviteli együttható	[-]
c_θ	a különböző θ irányú hullámösszetevők közti energiadiffúzió sebessége	[m/s]
D	a szerkezet merülése	[m]
d	teljes vízmélység	[m]
$E = E(f, \theta, x, y, t)$	az f frekvenciájú, θ irányba terjedő elemi hullám energiája (x,y) helyen, t időpillanatban	[J]
g	gravitációs gyorsulás	[m/s ²]
$I_1 \frac{2\pi D}{L_i} a$	elsőrendű módosított Bessel-függvény, első fajú	[-]
j	a hullámkomponens sorszáma	[-]
K	lineáris rugóállandó	[N/m]
$K_1 \frac{2\pi D}{L_i}$	elsőrendű módosított Bessel-függvény, második fajú	[-]
k_i	hullámszám	[rad/m]
L_i	beeső hullámhossz	[m]
M, M_a	a szerkezet súlya és a kiegészítő tömeg	[kg]
n	a hullámkomponensek száma	[-]
P	hidrodinamikai nyomás	[N/m ²]
$S_{tot} = (f, \theta, x, y, t)$	a forrástag	[-]
u	t idő alatt átlagolt áramlási sebesség	[m/s]
x	térbeli geometriai lépték	[-]
z	a vizsgált pont szabad felszíntől mért előjeles távolsága	[m]

Görög jelölések

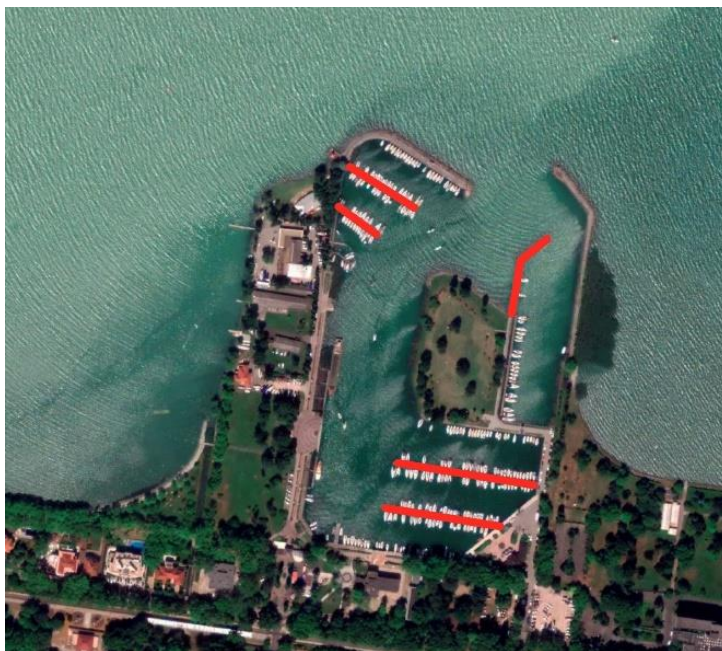
ϵ_i	az egyes hullámkomponensek fázisa	[-]
η_0	közepes vízszint	[m]
$\eta(t)$	vízszint t időpillanatban	[m]
ν	kinematikai viszkozitás	[m ² /s]
ρ_v	a víz sűrűsége	[kg/m ³]
Φ_j	a j -edik hullámösszetevő fázisszöge	[-]
ω_0	a legnagyobb hullámhosszú hullám körfrekvenciája	[1/s]
ω_h	a természetes hullámzás frekvenciája	[rad/s]
ω_i	körfrekvencia	[1/s]

1 Bevezetés

A tavi kikötők elhelyezkedésük és az adott területre jellemző szélviszonyok függvényében különböző mértékben vannak kitéve a szél keltette hullámnak. A kitétség mértékét figyelembe veszik a kikötők kialakítása során. Például a Balatonnál a D-i parti kikötők kitéttebbek az uralkodó É-ÉÉNy-i szél keltette hullámnak, mint az É-i partiak, ezért a kikötött hajókat a D-i part mentén jellemzően medencés kikötőkkel védik a hullámzás okozta károktól (1. ábra, 2. ábra), míg az É-i part esetén erre általában nincs szükség.

A medencés kikötők kialakítása során arra törekednek, hogy a kikötő védett vízterében minél kisebb hullámterhelés érje a hajókat. A hullámzás következtében ugyanis a hajók és a kikötésükre szolgáló úszóművek egymáshoz üthetnek és ebből jelentős károk származhatnak. Azonban a hullámok teljes kizárása a kikötőkből még körültekintő tervezéssel sem lehetséges.

A tavi medencés kikötőkbe behatoló hullámokból a medencés kialakítás, illetve a kikötött hajók és azok kikötésére szolgáló úszóművek miatt összetett hullámvizsgálati viszonyok alakulnak ki. A rövidhullámok hatékony csillapításához csak a vízoszlop felső részének blokkolása szükséges, mert ott van a legtöbb hullámenergia jelen. Hosszabb hullámok esetén a szerkezetnek nagyobb méretekkel kell rendelkeznie, hogy elzárja a vízoszlop nagyobb részét.



1. ábra: A Balatonföldvári kikötő és annak úszóművei (pirossal)



2. ábra: A Balatonlelle kikötő műholdképe.

Kikötők tervezésekor vagy átépítésekor az egyik legfontosabb szempont, hogy a kikötött hajók és a kikötői infrastruktúra megfelelő mértékben védve legyenek a szél keltette hullámzás káros hatásaitól.

Az úszóművek és hullámok kapcsolatával számos helyen foglalkoznak, például úszó hullámtörő művek tervezésekor (Ji et al., 2016). 1811-ben Plymouth kikötőjében építettek egy fából készült úszó hullámtörőt, amelyet a világon elsőként tartanak számon. Ettől kezdve az úszó hullámtörőt használták a kikötők védelmére, és bebizonyosodott, hogy képesek csökkenteni a hullámenergiát. Azóta az emberek a leghatékonyabb konfigurációt keresik az úszó hullámtörők számára.

A hagyományos hullámtörőkkel összehasonlítva az úszó hullámtörőknek számos előnye van. A hagyományos hullámtörők költsége gyorsan nő a vízmélységgel, míg az úszó hullámtörők olcsóbb megoldást kínálnak. Az úszó hullámtörő gát barátságosabb a tengeri vagy tavi környezet számára. Ez ugyan úgy igaz a hajók kikötésére szolgáló pontonokra is, így a medencés kikötőkben célszerű a használatuk. A parton egymás mellett rögzített úszóművek hullámtörőként is funkcionálnak. A medencés kikötőkbe bejutó hullámok ugyan jóval kisebbek, mint a nyílt vízi hullámok, de az úszóművek ezeket is tovább csillapítva egyre kedvezőbb feltételeket biztosítanak a part felé haladva. Annak ellenére, hogy a tavi kikötők jellemzően úgy kerülnek kialakításra, hogy a lehető legkisebb hullámterhelés érje a védett vízteret, a hullámok teljes kizárása nem lehetséges, a kikötőkön belül is számtalan hullámjelenséggel találkozhatunk. Ezen komplex folyamatok során, szerepet kap a

visszaverődés, rézsűs kialakítás esetén a hullámfelfutás, illetve a pontonok hullámcsillapító hatása is, amely kulcsfontosságú a kikötő viselkedése szempontjából. Egy modell alkalmazása elkerülhetővé teszi az emberi figyelmetlenségből származó tervezési hibákat és egyszerűbbé teszi a különböző jelenségek vizsgálatát.

A dolgozat célja egy sematikus (de a balatoni viszonyokat jól reprezentáló) pontongeometria hullámcsillapító hatásának, illetve a környezetében kialakuló áramlási viszonyoknak a megismerése numerikus kísérleteken keresztül különböző mozgási szabadságfokok esetén. A modellt egy jól dokumentált szakirodalmi laborkísérleten keresztül igazolom, majd annak tanulságai alapján építem fel a nagyléptékű (balatoni) modellt. A TDK kutatás keretein belül feltártam az úszóművekre vonatkozó elérhető empirikus összefüggéseket is, melyekkel szintén becslést teszek a szerkezet hullámmzás csillapító hatására. Az empirikus és numerikus eredményeket összevetem és megvitatom.

2 Módszerek

2.1 Empirikus összefüggések

2.1.1 Hullámátvitel rögzített merev szerkezetek esetén

A rögzített merev szerkezetek olyan szerkezetek, amelyeknek a tófenékhez viszonyított mozgása elhanyagolhatóan kicsi, és maga a szerkezet nem deformálódik. Az első kutatók, akik a hullámátvitelt tanulmányozták részlegesen víz alá merülő szerkezetek esetén, Ursell és Macagno voltak. A szerkezet hullámzáscsillapító hatását az átviteli együtthatón (C_t) keresztül értelmezzük, mely a szerkezet utáni és a szerkezethez érkező hullámmagasságok arányát fejezi ki.

Ursell (1947) mélyvízi hullámok részleges átvitelével és részleges visszaverődésével foglalkozott. Elmélete a következő feltételezéseken alapul:

- merev szerkezetek
- rögzített szerkezetek
- végtelenül kis szélesség
- mély víz (lineáris hullámelmélet)
- a vízoszlop felső részének teljes visszaverődése, azon a szakaszon, ahol a szerkezet található
- a hullám nem csap át a szerkezet fölött

A módosított Bessel-függvény segítségével Ursell a következő kifejezést kapta az átviteli együtthatóra:

$$C_t = \frac{K_1 \frac{2\pi D}{L_i}}{\sqrt{\pi^2 I_1^2 \frac{2\pi D}{L_i} + K_1^2 \frac{2\pi D}{L_i}}} \quad [1]$$

Macagno (1954) a következő feltételezéseket tette:

- merev szerkezetek
- rögzített szerkezet
- véges szélesség
- mély víz (lineáris hullámelmélet)

- nem tudjuk, hogy a visszaverődést figyelembe vette-e
- a hullám nem csap át a szerkezet fölé

Ezek alapján a következő egyenletet dolgozta ki:

$$C_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{k_i B \sinh(k_i d)}{2 \cosh(k_i d - k_i D)} \right]^2}} . \quad [2]$$

Wiegel (1960) megvizsgálta a hullámenergia-átvitel fogalmát, és kidolgozott egy elméletet, amely a hullámenergiával foglalkozik.

feltételezései:

- merev szerkezet
- rögzített szerkezet
- mély víz (lineáris hullámelmélet)
- nincs visszaverődés
- a hullám nem csap át a szerkezet fölé

A hullámteljesítmény a hullám által kiváltott nyomás ($P_{hullám}$) és a hullám által indukált vízszintes folyadéksebesség (u) szorzata.

Wiegel modelljében azt feltételezte, hogy a teljes vízmélységben átvitt hullámerő a szerkezet alja és a tenger vagy tó feneké között történik, ami valójában a beeső hullámerő töredéke.

$$\int_{-d}^0 P_{hullám,t} u_t dz = \int_{-d}^{-D} P_{hullám,i} u_i dz . \quad [3]$$

A $P_{hullám}$ és az u értékeket behelyettesítve az egyenletben és kiértékelve az integrált az átviteli együtthatóra a következő összefüggést kapjuk:

$$C_t = \sqrt{\frac{2k_i(d - D) + \sinh(2k_i(d - D))}{\sinh(2k_i d) + 2k_i d}} . \quad [4]$$

Módosított erőátviteli elmélet

Számos kutató vizsgálta Wiegel elméletét, és hasonlította össze fizikai modell tesztekkel. Kiderült, hogy a Wiegel-elmélet túlbecsüli a hullámátvitelt mélyvízi körülmények között és alul becsüli sekélyvízi körülmények között. Wiegel elmélete nem veszi figyelembe a részleges hullámvisszaverődést és az energiadisszipációt.

Kriebel és Bollmann 1996-ban kidolgozta a módosított erőátviteli elméletet Wiegel elmélete alapján, ez már tartalmazta a részleges hullámvisszaverődést is. Szerintük azt feltételezzük, hogy a szerkezet alatti hullám által kiváltott nyomás egyenlő a beeső hullám által indukált nyomás és a visszavert hullám által indukált nyomás összegével. Az eredmény az, hogy a szerkezet alatti nettó nyomás nagyobb, mint ahogy azt Wiegel feltételezte. Ebből az előző integrálhoz hasonló egyenletet kaphatunk. A Kriebel és Bollmann által javasolt egyenlet a következő volt:

$$\int_{-d}^0 (P_{hullám,i} + P_{hullám,r})(u_i - u_r) dz = \int_{-d}^{-D} P_{hullám,t} u_t dz \quad [5]$$

A visszaverődő hullám bevezetése miatt az egyenlet megoldása két ismeretlent tartalmaz. A probléma megoldásához az úszószerkezet alatti folyadéksebesség folytonosságát használjuk. A fáziseltolódásokat figyelmen kívül hagyva és lineáris hullámelméletet feltételezve, Kriebel és Bollmann a következő összefüggést vezette le:

$$C_t = 1 - C_r \quad [6]$$

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad [7]$$

Ezzel az összefüggéssel és a Kriebel-Bollmann féle egyenlet megoldásával a hullámátviteli együtthatóra a következő kifejezést kapjuk:

$$C_t = \frac{2C_{t,Wiegel}^2}{1 + C_{t,Wiegel}^2} \quad [8]$$

2.1.2 Hullámátviteli rögzítettlen merev szerkezetek esetén

Ha az úszóművek nem rögzítettek, és képesek mozogni, a szerkezet mozgását be kell építeni a hullámátviteli együttható képletébe. Ruol és társai 2013-ban kidolgoztak egy módosító

tényezőt Macagno képletéhez, hogy közelítsék a láncokkal vagy kábelekkel rögzített hullámtörők hullámátviteli együtthatóit. A legtöbb szakirodalomban bemutatott egyéb képlet numerikus kódokon alapuló számítógépes modell.

Az úszószerkezetek természetes periódusát nehéz kísérletek nélkül meghatározni. Ennek oka a hozzáadott tömeg, melyet kiegészítő tömegnek tekintünk, és a folyadék tömegét jelenti, a szerkezet gyorsulásakor fel kell gyorsítani. Ezért ezt a kiegészítő tömeget a szerkezet tömegével együtt kell figyelembe venni.

A dőlésmozgás sajátfrekvenciája a csillapítás elhanyagolása esetén a következőképpen írható le:

$$\omega_h = \sqrt{\frac{K}{M_{össz}}} = \sqrt{\frac{K}{M + M_a}} = \sqrt{\frac{\rho_v g B}{M + M_a}}. \quad [9]$$

Az emelőmozgás esetén a hozzáadott tömeg az úszó szerkezet alatti víztérfogatként vehető figyelembe, ahol a térfogat határát egy félkör írja le, melynek sugara a szerkezet szélességének felével egyenlő.

$$\omega_h = \sqrt{\frac{\rho_v g B}{\rho_v B D + \rho_v \frac{\pi}{8} B^2}} = \sqrt{\frac{g}{D + \frac{\pi}{8} B}}. \quad [10]$$

2.2 Numerikus áramlásmodell bemutatása

2.2.1 Áramlási alapegyenletek

Numerikus modellezésre a norvég fejlesztésű, ingyenes és nyílt forráskódú REEF3D nevű programot használjuk (Bihs et al., 2016). Ezt a modellt számtalan hasonló kísérletre alkalmazták már, elsődlegesen a hullámvázok és az ahhoz kapcsolódó jelenségek, mint például a hullám refrakció, diffrakció, hullámtörés modellezésére. Összetett geometriai és áramlási szituációk szimulációjára is alkalmas, hiszen levegő fázisra is képes megoldani az alapegyenleteket.

A modell véges differencia módszerrel dolgozik, a Reynolds-átlagolt Navier–Stokes egyenletek összenyomható folyadékokra érvényes változatát közelíti:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad [11]$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_v} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - u_i u_j \right] + g_i, \quad [12]$$

2.2.2 Szabadszín számítás

A szabad felszínt az ún. level set method (LSM, Sussman et al., 1994) alkalmazásával kapjuk meg, ahol $\phi(\vec{x}, t)$ egy előjeles távolság függvény, melynek nulla értéke a levegő és a víz közötti határfelület ábrázolására szolgál. A függvény értékét a teljes számítási tartományon definiáljuk kezdeti feltételként, majd változását passzív skalárként modellezzük a szimulációk során egy advekción egyenlettel.

$$\phi(\vec{x}, t) = \begin{cases} > 0, & \text{ha } \vec{x} \in \text{levegő fázis} \\ = 0, & \text{ha } \vec{x} \in \text{szabadszín} \\ < 0, & \text{ha } \vec{x} \in \text{víz fázis} \end{cases} \quad [13]$$

Az LSM módszer használatának az az előnye, hogy elkerülhető a túlszűfolt hálók használata és az objektum minden mozgása utáni újrakészítése, ami számításigény szempontjából hatékonyabb szimulációt eredményez.

2.2.3 Víz-mozgótest interakció

A mozgó objektumok modellezésére egy hat szabadságfokú (six degrees of freedom, 6DOF) algoritmust alkalmaztunk. A 6DOF algoritmus egy háromszögekből álló felületi hálót hoz létre, összeköttetés nélkül, amely kizárja a test egyes adatait például a fizikai tulajdonságait. A test geometriája STL (stereo lithography) formátumban egy fájlból is importálható. A felületi háló és az alatta lévő Descartes-i rácsháló metszéspontjainak meghatározásához egy sugárkövetéses algoritmust használunk, amely a rácsponthoz legközelebbi háromszög legrövidebb távolságát számítja ki. A határok definiálására itt is az LSM módszer kerül alkalmazásra. A felületre (Ω) ható erőket minden irányra (i) külön-külön a nyomással (p) és a viszkozus feszültségtenzorral (τ) határozzuk meg:

$$F_{i,e} = \int_{\Omega} -n_i p + n_i \tau \, d\Omega \quad [14]$$

A merev test és a folyadék közt kialakuló erők ismeretében számítható azok egymásra hatása is a 6DOF algoritmus részletei Bihs és Kamath 2016-os munkájában olvashatók.

2.2.4 Hullámzást generálás

A diszkrét Fourier-transzformáció (DFT) matematikai eszközként használható az időtartomány és a frekvenciatartomány közötti kapcsolat leírására. A gyors Fourier transzformációval (Fast

Fourier Transform, FFT) az idősorokból spektrumokat tudunk készíteni, az inverz gyors Fourier transzformációval (inverse fast Fourier Transform - IFFT) pedig spektrumokból idősorokat. A Fourier transzformáció a szabálytalan összetételű, de kvázi periodikus hullámokat tiszta szinuszos hullámok összegével közelíti:

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{j=1}^n a_j \sin(j\omega_0 t + \Phi_j) \quad [15]$$

A hullámgenerálás a bemeneti határon az úgynevezett relaxációs módszerrel történik, amely a megadott hullámparaméterek alapján biztosítja a sebességek, a nyomás és a szabad felület pozíciójának zökkenőmentes bevezetését a számítási tartományba (Jacobsen et al., 2012; Bihs et al., 2016). A relaxációs módszer nem csak azt biztosítja, hogy a hullámok zavartalanul keletkezzenek, hanem azt is, hogy a visszavert hullámok a bemeneti határon ne okozzanak numerikus problémát. A hidrodinamikai változók (sebesség $[u, w]$, nyomás (p) , szabadfelszín helyzet (η)) peremen megadott értékei egy relaxációs függvény segítségével kerülnek fokozatosan bevezetésre a számítási tartomány aktív részére.

A lineáris hullámelmélet szerint a tetszőleges N számú hullámkomponens szuperpozíciójából eredő felszíni szint (η) , vízszintes és függőleges sebességek (u, w) a következőképpen írhatók fel:

$$\eta(t)|_{x=0} = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\epsilon_i - \omega_i t) \quad [16]$$

$$u(z, t)|_{x=0} = \sum_{i=1}^N A_i \omega_i \frac{\cosh(k_i(z + d))}{\sinh(k_i d)} \cos(\epsilon_i - \omega_i t) \quad [17]$$

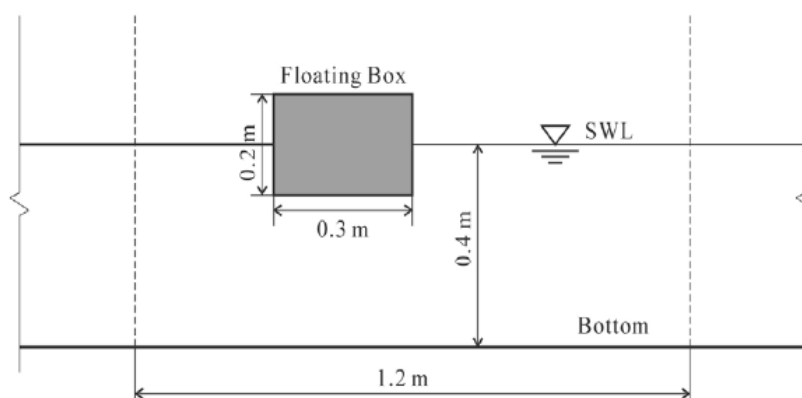
$$w(z, t)|_{x=0} = \sum_{i=1}^N A_i \omega_i \frac{\sinh(k_i(z + d))}{\sinh(k_i d)} \sin(\epsilon_i - \omega_i t) \quad [18]$$

Tekintettel arra, hogy egy kellően finom felbontású felbontott 3D modell számítási igénye hatalmas lenne, a hullámmodellezéshez egy egyszerűsített, vertikális 2D (2DV) modellezési megközelítést alkalmazunk. Ez az uralkodó hidrodinamikai viszonyok jelentős leegyszerűsítését is eredményezi.

3 Eredmények

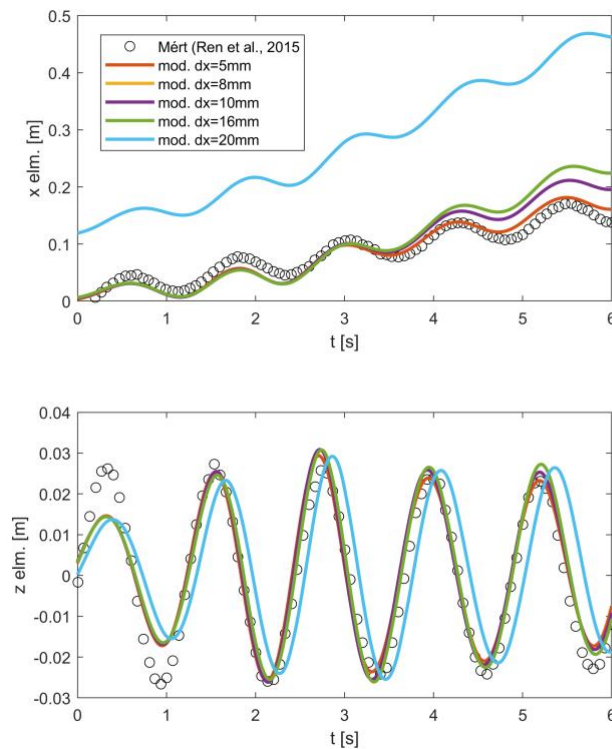
3.1 Modell igazolás és rácsháló konvergencia vizsgálat

A modell igazolását Ren et al. (2015) munkája alapján végeztük el. Ők laborkísérleteket végeztek egy hullám csatornában a Dalian Műszaki Egyetemen. A csatorna 23 m hosszú és 0,44 m széles, a kezdeti vízmélység 0,4 m. A csatorna bal oldalán egy dugattyú típusú hullámkeltőt, a másik oldalán pedig egy hullámelnyelőt helyeztek el. A csatorna közepén egy szabadon mozgó téglatest alakú doboz található, amely 8 mm vastag plexiüveglemezből készült, és merev testnek tekinthető. A doboz szélessége 0,3 m, magassága pedig 0,2 m. Összesen 2 cm rés marad a doboz két szélső oldala és a csatorna oldalfalai között, így alig van olyan ellenállás, amely korlátozza a 2D szabadon lebegő mozgást. A hosszirány közepén két függőleges üveglappal külön teret alakítottak ki, és ellensúlyként szemcsés anyagokkal töltötték meg. Az ellensúlyt úgy számították ki, hogy a dobozt félig merítse a vízbe, tehát a sűrűsége fele a vízének. A szerkezet jellemző méreteit a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra: A laborkísérlet sematikus ábrája (Forrás: Ren et al., 2015)

A 4. ábra a szabadon mozgó úszó szerkezet mért mozgását, illetve a modellel számított értékek összevetését mutatja. A mérési adatok Ren et al. (2015) cikkéből digitalizáltam. Az érkező hullámok magassága 0,04 m, periódusideje 1,2 s volt. A vizsgálatok során alkalmazott koordináta rendszerben x a hullámok terjedési iránya, y az erre merőleges horizontális irány (melyet figyelmen kívül hagyunk) és z a függőleges irány.



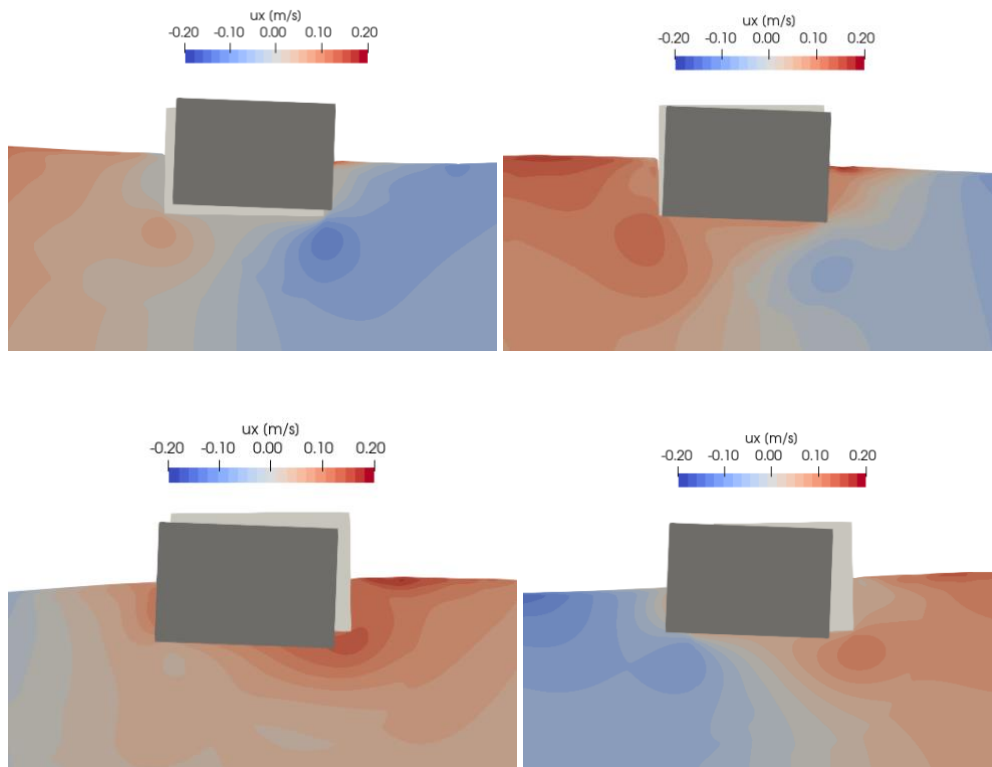
4. ábra: Ren et al. által mért és modellezett idősorok összehasonlítása (Forrás: Ren et al., 2015). Fent: x-irányú elmozdulás (elsodródás); lent: z irányú elmozdulás.

Ez alapján építettem fel egy minta modellt, amelyet a kísérlet igazolására és vizsgálataim alapjaként használtam. Ez a folyamat egyszerűen elvégezhető, csak pár parancs szükséges hozzá a DIVEMesh nevű (speciálisan a REEF3D-hez fejlesztett) rácsháló generáló programban. A modellt különböző rácshálófelbontásokkal vizsgáltuk meg. A célunk az volt, hogy a lehető legdurvább felbontást megtaláljuk, amivel még megbízhatóan működik a modell, hiszen minél több cellából áll annál pontosabb a megoldás. 5, 8, 10, 16, és 20 milliméteres felbontásokat használtunk.

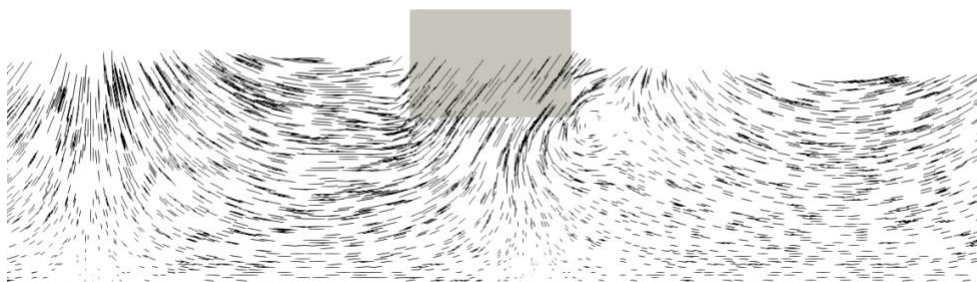
A fenti eredmények alapján látható, hogy míg a függőleges elmozdulásokat szinte az összes modellváltozat jól képes leírni, úgy az elsodródás pontos közelítéséhez a legfinomabb felbontású, 5 mm-es rácsháló volt szükséges. Az eredmények ilyen formán megfelelnek a konvergencia kritérium elvárásainak.

Ez a felbontás a kisminta modellünkre igaz, ahol a vízmélység csupán 40 cm, így ki kellett találnunk, hogy balatoni mélyvízi viszonyokra milyen felbontás lesz alkalmas. Azt feltételeztük, hogy leginkább a mélységmenti változékonyság leírása miatt szükséges a finom felbontás. A kísérleti vízmélységet elosztva a cellák magasságával, azaz 5 mm-rel megkaptuk,

hogy adott vízmélységhez hány cella szükséges: jelen esetben 80. A következő ábrákon a laborkísérlet alapján felépített modell eredményei láthatjuk.



5. ábra: Horizontális áramlási sebességek eloszlása az úszómű közvetlen környezetében. Világos szürkével a szerkezet kezdeti helyzete, míg sötéttel az éppen aktuális pillanatképhez tartozó.



6. ábra: Pillanatnyi áramlási sebességek vektoros megjelenítése az úszómű közvetlen környezetében

3.2 Balatoni esettanulmány

3.2.1 A Balatonszemesi kikötő spektrális hullámzásmodellje

Vizsgálataimhoz a SWAN - Simulating Waves Nearshore - numerikus hullámzásmodellt választottam. Ezt a szoftvert a Dél-Hollandiában található Delfti Műszaki Egyetemen fejlesztik, elsősorban tengerek partközeli, sekélyebb részeinek és mély tavak hullámzásának vizsgálatára dolgozták ki, de a Balaton (Török G., 2010) és a Fertő-tó (Homoródi K., 2012) modellezésére is alkalmazták és tesztelték már.

A tapasztalati módszerek csak pontszerű eredményeket szolgáltatnak és számos hullámzást lényegesen befolyásoló jelenséget nem vesznek figyelembe, valamint a különböző eljárások eredményei között nagy szórás tapasztalható.

A SWAN a hullámenergiát a számítási háló csomópontjaiban határozza meg a hozzájuk tartozó diszkrét irány-frekvencia értékpárookra úgy, hogy megoldja a hullámzást leíró differenciálegyenletet:

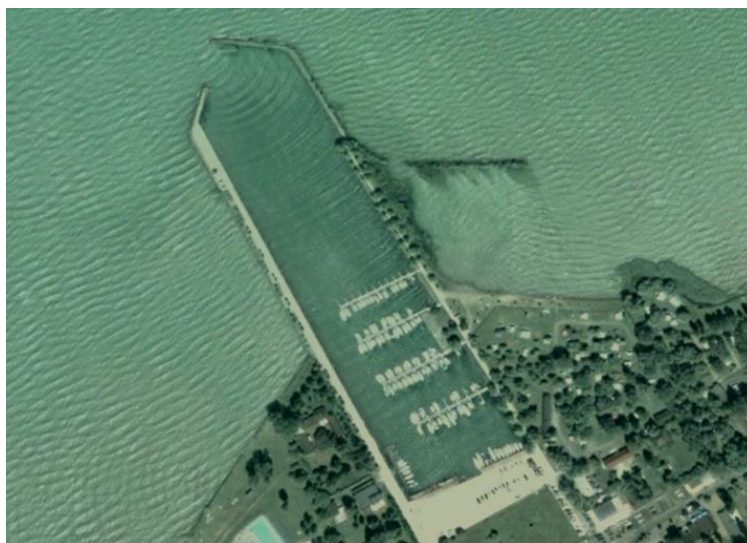
$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x}E}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}E}{\partial y} + \frac{\partial c_f E}{\partial f} + \frac{\partial c_\theta E}{\partial \theta} = S_{tot}(f, \theta, x, y, t)$$

Mivel a SWAN a hullámzás kialakulásának energiaforrásaként a szelet veszi figyelembe, az olyan folyamatok, mint például a hullámtörés vagy a hullámok tarajosodása, veszteségként jelennek meg a rendszerben. Ez alapján, a jobb oldalon álló forrástagban (S_{tot}) a rendszerrel közölt és az abból távozó energiák jelennek meg: a szél által közölt energia, az elemi hullámok közti kölcsönhatás, a hullámok tarajosodásából származó energiaveszteség, a medersúrlódásból származó energiaveszteség és a hullámtörésből származó energiaveszteség.

Balatoni viszonyok esetében a legtöbb módszer csak korlátozottan alkalmazható, de mivel a SWAN használhatósága már több esetben is igazolva lett a hazai viszonyokra, így kézenfekvő volt ezt választani, viszont a műtárgyokról visszaverődő hullámzást nem tudja számítani, így a kialakuló hullámkép a valóságostól eltérő lehet.

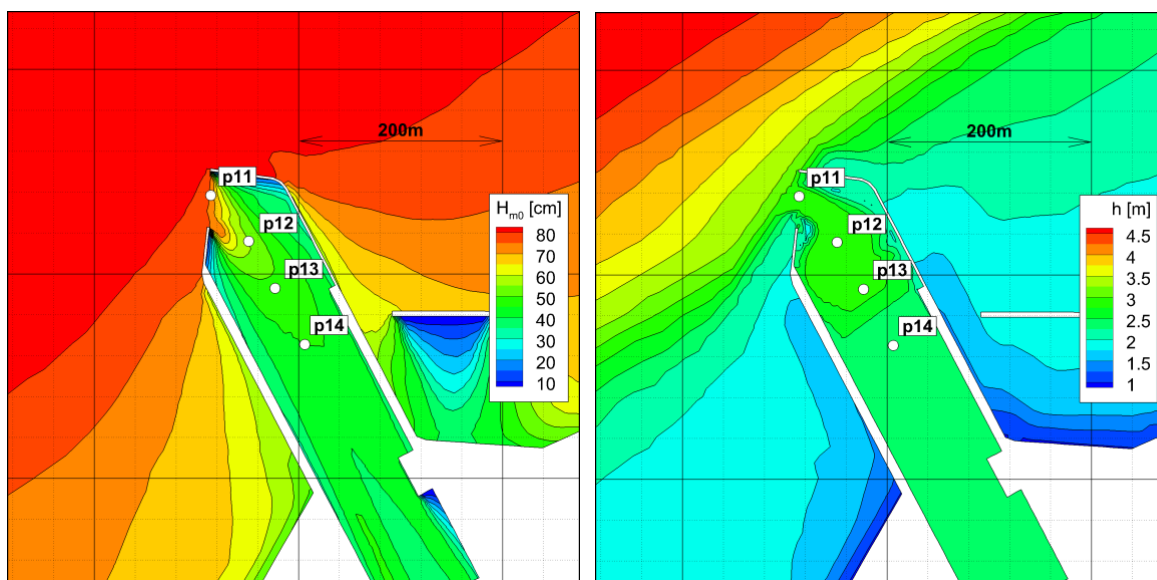
A modell segítségével a hullámzás dinamikáját leíró differenciálegyenletet a vizsgált területre fektetett kétdimenziós rácsháló rácspontjaiban oldjuk meg. A modell arra az elméletre épül, miszerint a hullámzás a vízfelszín egy adott pontjában különböző irányokba haladó és

különböző frekvenciájú elemi hullámokból tevődik össze. Ezek az elemi hullámok terjedésük iránya és frekvenciájuk mellett az energiatartalmukkal is jellemezhetőek.



7. ábra: A Balatonszemesi kikötő.

A SWAN modellt nem én készítettem, a balatonszemesi kikötő egy meglévő modelljét használtam (Magi, 2015). A modell által számított vízmélységek és szignifikáns hullámmagasságok eloszlását szemlélteti a következő ábra.

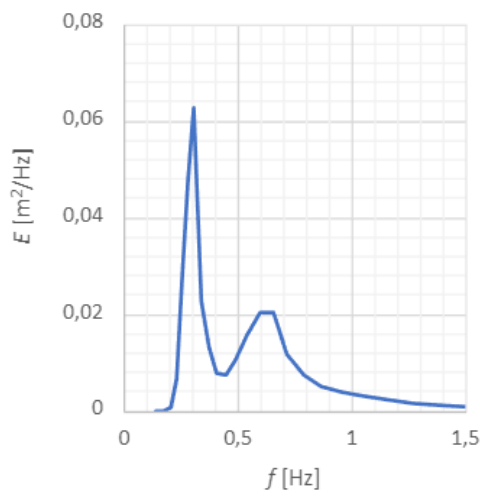


8. ábra: szignifikáns hullámmagasság mező és vízmélység mező

A két kép jól szemlélteti, hogy a hullámmagasságok a kikötőn kívül jóval nagyobbak, mint a kikötőn belül. Ebből látszik, hogy a kikötő megfelelő kialakítású és jól működik, a hullámokat

teljesen kizárni nem tudja, de azokat lényegesen lecsökkentve engedi csak a kikötő belseje felé, ezzel biztonságban tartva a várakozó hajókat és az úszóműveket.

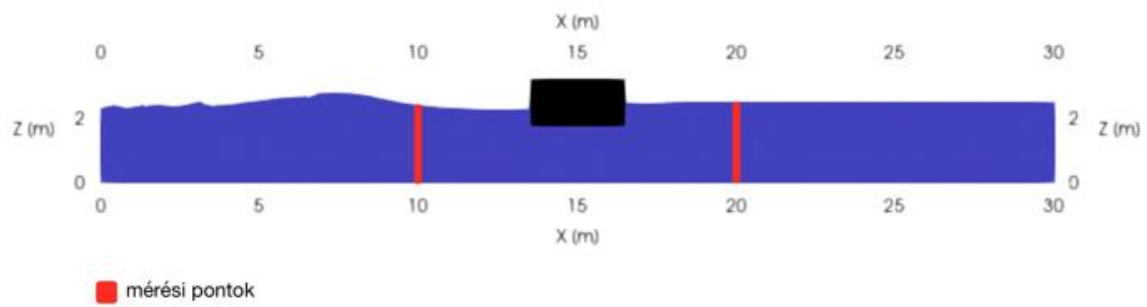
A fentiek, illetve műholdképek alapján megbecsültük a szerkezeti méreteket és felépítettünk egy sematikus modellt. A modellezéshez a P14-es pontot választottam, mert ez van a legközelebb az első úszóműhöz, valamint a hullámok közelítőleg merőlegesen érkeznek az úszómű hosszirányú tengelyére, így viszonylag egyszerű geometria alakul ki, amelyben könnyű a hatások vizsgálata. A választott ponton a vízmélység 2,5 m. A spektrumokat, a vízmélységmezőt és a szignifikáns hullámmagasság mezőt 95 cm-es síófoki vízállás és ÉÉNy-i 14,3 m/s-os szél eredményezte.



9. ábra: P14-es pontban lekérdezett hullámspektrum.

3.2.2 Finomléptékű hidrodinamikai modellezés

A vizsgált szerkezet egy vízben félig elmerülő 3 méter széles és 1,5 méter magas homogén sűrűségű téglatest, melynek sűrűsége 500 kg/m^3 . A modellezett tartomány hossza 30 m, a szerkezet ennek a közepén található. A hullámokat az úszómű előtt ($x = 10 \text{ m}$) és az úszómű után ($x = 20 \text{ m}$) mérjük – ezen idősorok alapján számítjuk a csillapító hatást. A rácshálókongruencia vizsgálatok eredménye alapján a szükséges rácshálófelbontás 2,5 m vízmélység esetén 3,125 cm-re adódik, de a biztonság javára ezt 2,5 cm-re kerekítettük.



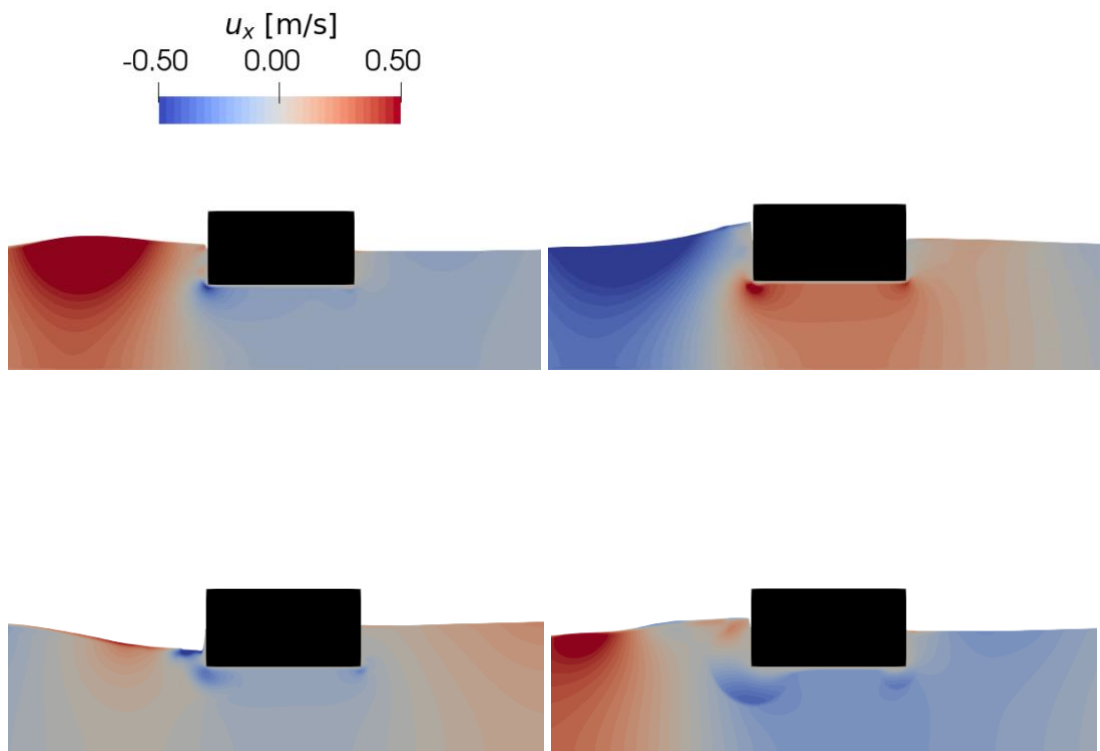
10. ábra: az úszómű előtti ($x=10\text{ m}$) és utáni ($x=20\text{ m}$) mérési pontok

A felépített modellel ezután négy modellkísérletet végeztünk, hogy lássuk, a különböző szabadságfokoknak milyen hatása van.

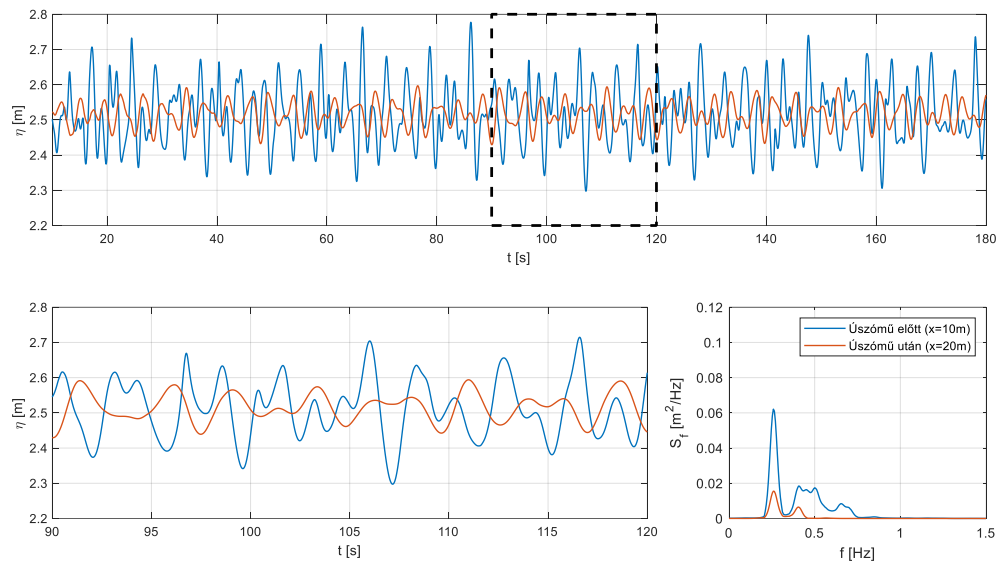
A következő szabadságfokokat vizsgáltuk:

a) Fix szerkezet

Az úszómű teljesen rögzített, a hullámok semmilyen mozgató hatást nem gyakorolnak rá.



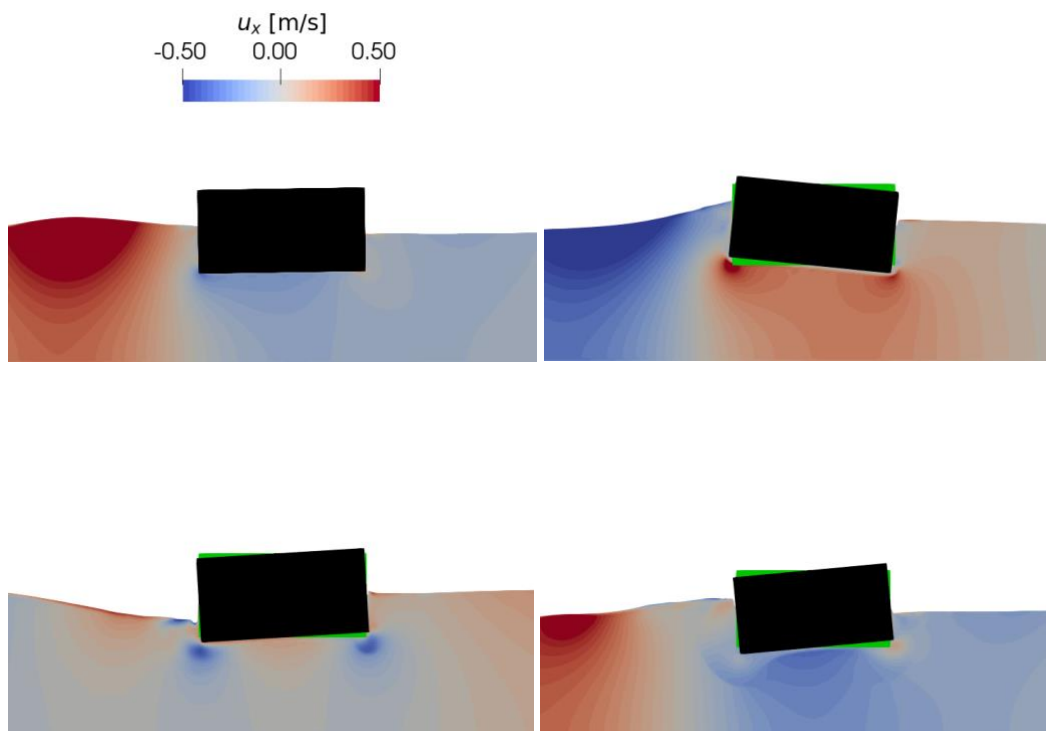
11. ábra: Fix szerkezet esetén kialakuló áramlási sebességek. Pillanatképek.



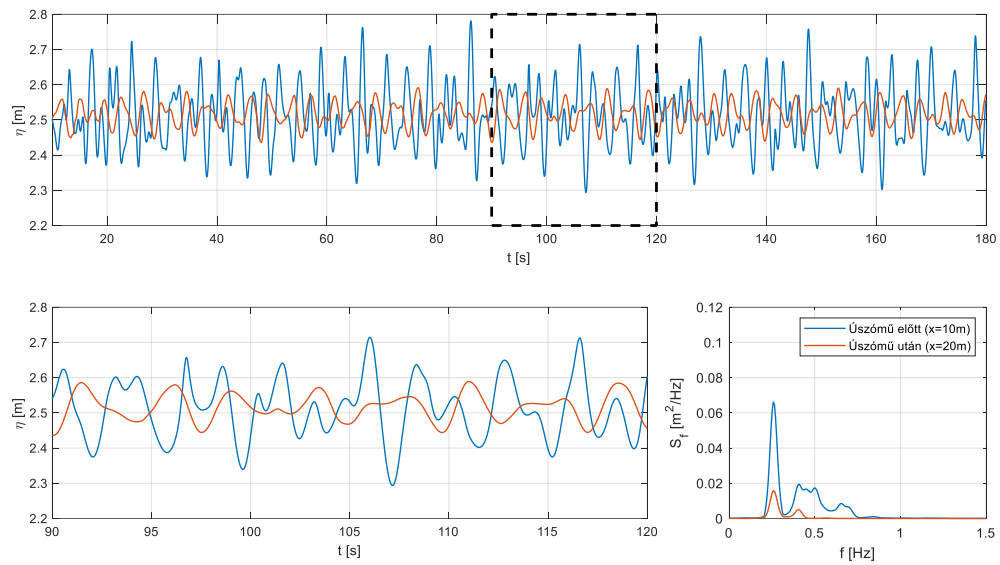
12. ábra: Úszómű előtti és utáni hullámok időszora és spektruma (fix szerkezet)

b) Y tengely körüli elfordulást engedélyeztünk

A szerkezet csak a hullámokra merőleges irányú tengely körüli elfordulásra képes.



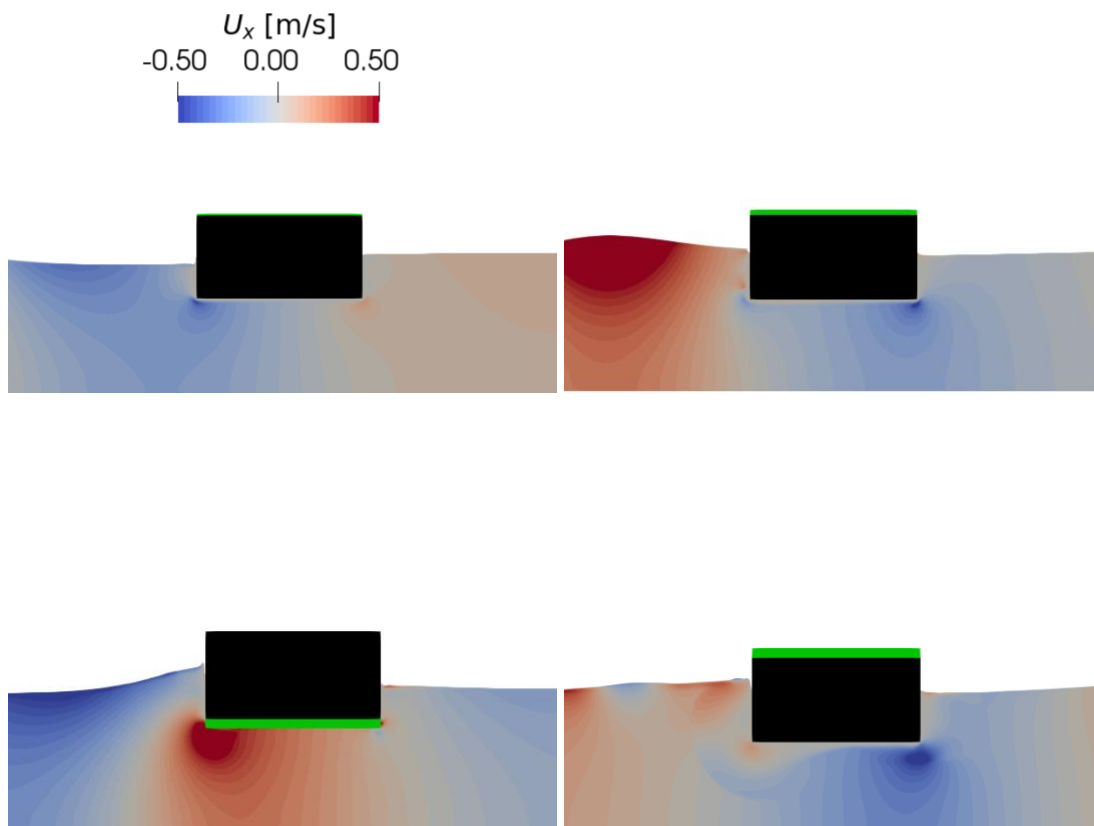
13. ábra: Y irányban elfordulni tudó szerkezet esetén kialakuló áramlási sebességek. Pillanatképek.



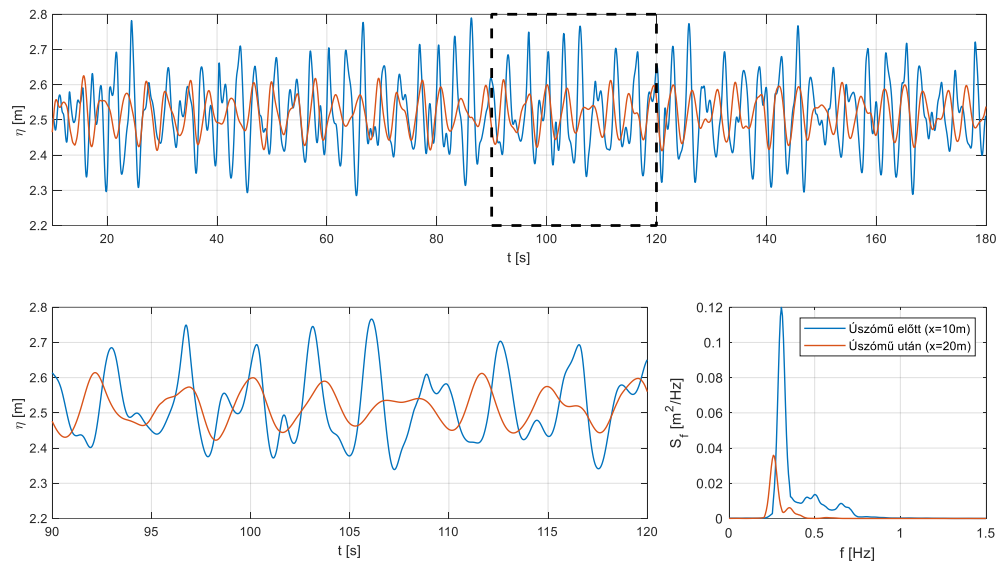
14. ábra: Úszómű előtti és utáni hullámok időszora és spektruma (y tengely körüli elfordulás)

c) Z irányú elmozdulást engedélyeztünk

A szerkezetnek csak a fel-le mozgás megengedett.



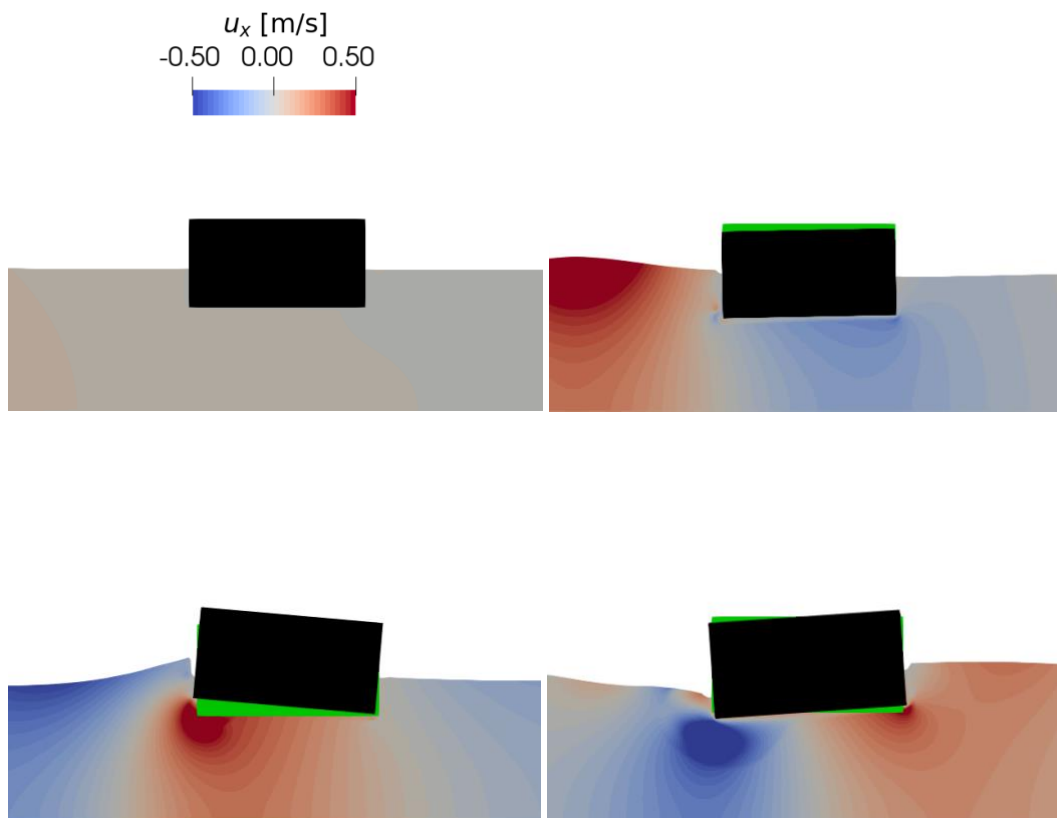
15. ábra: Függőlegesen elmozdulni képes szerkezet esetén kialakuló áramlási sebességek. Pillanatképek.



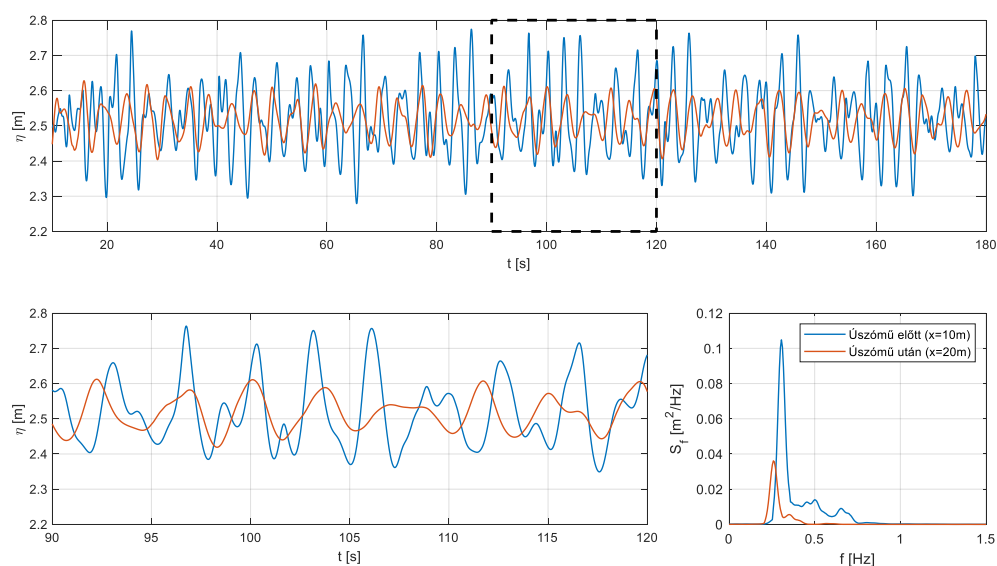
16. ábra: Úszómű előtti és utáni hullámok időszora és spektruma (z irányú mozgás)

d) Y tengely körüli elfordulást és Z irányú elmozdulást is engedélyeztünk

Az úszómű egyszerre képes a hullámok irányára merőleges tengelye körül forogni és fel-le mozogni, a vizsgált esetek közül ez a legszabadabb mozgás.



17. ábra: Y irányban elfordulni és z irányban elmozdulni képes szerkezet esetén kialakuló áramlási sebességek. Pillanatképek.



18. ábra: Úszómű előtti és utáni hullámok időszora és spektruma (Y tengely körüli elfordulás és Z irányú elmozdulás)

Az ábrázolt frekvenciákon jól látszik, hogy a feltételezés megállja a helyét, az úszó pontonok előtt nagyobbak a hullámok, mint utánuk, ebből jól látszik a csillapító hatásuk. A

hullámenergia egy része áthalad alattuk, egy része viszont visszaverődik vagy disszipálódik. Ha például az első úszómű után 30 méterrel helyezzük el a következő úszóművet, ahogy ez a balatonszemési kikötő kialakításán is megfigyelhető, akkor azt már sokkal kisebb erők érik el, gyakorlatilag a pontonok egymás számára is kedvezőbb helyzetet alakítanak ki ilyen módon. Ezen kívül az is látszik, hogy a különböző szabadságfokoktól függő kialakítások (fix szerkezet, y tengely körüli elfordulás, z irányú elmozdulás, y tengely körüli elfordulás és z irányú elmozdulás egyszerre) különböző hullámviszonyokat eredményeznek. Megfigyelhető, hogy azokban az esetekben a legnagyobbak a hullámok amikor a z irányú elmozdulást engedélyezzük. Ennek vélhetően az az oka, hogy ha a szerkezetet képes a hullám elmozdítani, akkor kevésbé veszít az energiájából és kevésbé verődik vissza, de az is megfigyelhető, hogy nem csak az úszómű utáni, hanem az úszómű előtti hullámok is nagyobbak, mint az előző eseteknél. Minél jobban mozog a szerkezet annál inkább képes hullámok keltésére is, ami a pontonok előtti és utáni hullámokat is jelentősen befolyásolja.

3.3 Eredmények összevetése empirikus összefüggésekkel

Kriebel és Bollmann azért dolgozta ki módosított erőátviteli elméletet mert Wiegel elmélete túlbecsüli a hullámátvitelt mélyvízi körülmények között és alul becsüli sekélyvízi körülmények között. Ami azt eredményezi, hogy a Wiegel által meghatározott C_t átviteli tényező mélyvízi hullámok esetén jóval nagyobb, mint a többi elmélet szerint. Ez a képletekbe való balatoni mélyvízi viszonyoknak megfelelő értékek behelyettesítésével és számolásával is jól látszik, tehát a Balaton esetére is igazolni tudtuk a tapasztalati képleteket.

	Ursell	Macagno	Wiegel	Kriebel-Bollmann
C_t	0,124	0,093	0,258	0,125

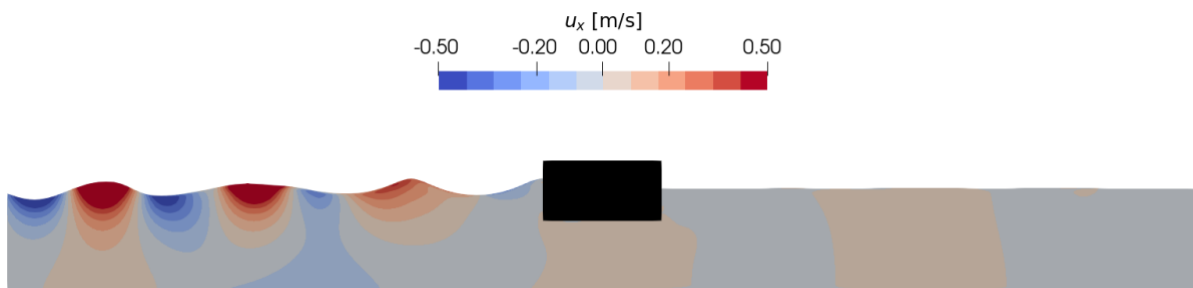
19. ábra: Az átviteli tényező értékei az egyes tapasztalati képleteket alkalmazva

	C_t
Fix szerkezet	0,418
y tengely körüli elfordulás	0,397
z irányú elmozdulás	0,499
y tengely körüli elfordulás és z irányú elmozdulás	0,520

20. ábra: Az átviteli tényezők értékei a különböző szabadságfokú modellek alapján

A modelleredmények átviteli tényezői viszont jóval nagyobbra adódtak, mint az empirikus összefüggésekkel kapott értékek, közel kétszer akkora számokat tapasztaltunk. Ahogy az már a hullámmagasságokból és a frekvenciákból is látszott az utolsó esetben alakulnak ki a legnagyobb hullámok az úszómű után, tehát az átviteli tényező is ebben az esetben lesz a legnagyobb.

Megvizsgáltuk a modelt teljesen szabályos hullámok esetén is és meglepő eredményeket tapasztaltunk. Mivel mélyvízi hullámokat vizsgálunk a balatoni viszonyokból kifolyólag, az úszóműre ható erők szempontjából csak a hullámok felszín közeli szakaszát kell figyelembe vennünk, hiszen itt van a legnagyobb sebesség jelen. A szabályos szinusz hullámok a szerkezetnek csapódva kisé felfutnak, de nagyobb részt visszaverődnek így az úszómű utáni mozgás változás elhanyagolhatóan kicsi, a hullámok gyakorlatilag nem jutnak el a ponton túloldalára ($C_t = 0,03$).



21. ábra: A teljesen szabályos hullámok modell eredményei

4 Diszkusszió és konklúziók

A szél keltette hullámváz kikötőn belüli hatásainak ismerete elengedhetetlen az úszóművek létesítésekor.

A dolgozatban arra kerestem a választ, hogy az egyes tapasztalati képletek és a mai gyakorlatban is alkalmazott numerikus hullámvázmodellek képesek-e balatoni kikötői viszonyok vizsgálatára, valamint, hogy hazai viszonylatban a tavi kikötőkön belül milyen hullámgeometria alakul ki. Bemutattam, hogy a SWAN numerikus modell a balatoni kikötőkben is megállja a helyét annak ellenére, hogy elsősorban tengerek partközeli, sekélyebb részeinek és mély tavak hullámvázának vizsgálatára készült. A REEF3D-be bevitt spektrum alapján hullámidősort készítem, majd egy balatoni viszonyoknak megfelelő modellt építem fel.

A numerikus és a kísérleti eredmények összehasonlítása a numerikus modell érvényességét igazolja. A modelleredményeket összevettem a szakirodalomban talált összefüggések eredményeivel és értékeltem azok tavi környezetben való alkalmazhatóságát. A modell kiválóan bemutatja, hogy a csillapító hatás jelentősen függ az adott hullámvázról.

A numerikus modell a véletlenszerűen generált, realisztikus szél keltette hullámok esetén az empirikus összefüggésekhez képest alá-, míg a szabályos szinusz hullámok esetén túlbecsüli a csillapító hatást.

Nem sikerült minden kérdésre választ találni, viszont számtalan új kérdés merült fel, amelyek további kutatást igényelnek.

Hivatkozások

- Bihs H., Kamath A., Chella M. A., Aggarwal A., Arn-sten Ø. A. (2016). A new level set numerical wave tank with improved density interpolation for complex wave hydrodynamics. *Computers and Fluids*, 140:191-208
- Bihs H., Kamath A. (2016) A combined level set/ghost cell immersed boundary representation for floating body simulations. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS* 83(12):905-916.
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9):1073–1088.
- C.-Y. Ji, X. Chen, J. Cui, O. Gaidai, A. Incecik (2016) Experimental study on configuration optimization of floating breakwaters. *Ocean Engineering* 117:302–310.
- D.L. Kriebel and C.A. Bollmann. Wave transmission past vertical wave barriers. In *COASTAL ENGINEERING CONFERENCE*, 2:2470–2483 ASCE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1996.
- Magi J. (2015) Szél keltette hullámváz figyelembe vétele tavi kikötők tervezésekor. Diplomamunka, BME VVT:
- E. Macagno. Wave action in a flume containing a submerged culvert. *La Houille Blanche*, 1954.
- Ren B., He M., Dong P., Wena H. Nonlinear simulations of wave-induced motions of a freely floating body using WCSPH method. *Applied Ocean Research* 50 (2015) 1–12.
- P. Ruol, L. Martinelli, and P. Pezzutto. Formula to predict transmission for π -type floating breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139(1):1–8, 2013a.
- Sussman, M., Smereka, P., and Osher, S., 1994, "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, 114(1):146–159.
- F. Ursell. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water. In *Proc. Cambridge Philos. Soc*, 43:374–382. Cambridge Univ Press, 1947.

R. L. Wiegel (1960), Transmission of waves past a rigid vertical barrier. *J. WatWay Harbour Div., ASCE WW1*, 1–1.