

Horváth Krisztián¹ 

Vízi és víz alatti járművek csatolt vibroakusztikai modellezése

A víz alatti kisugárzott zaj fizikai alapjai, multifizikai predikciója és validációs kérdései

Coupled Vibroacoustic Modelling of Surface and Underwater Vehicles

Physical Foundations, Multiphysics Prediction, and Validation Aspects of Underwater Radiated Noise

A víz alatti kisugárzott zaj (underwater radiated noise, URN) predikciója a haditechnikai alkalmazásokban és a tengeri környezet védelmében egyaránt stratégiai jelentőségű. A szakirodalom és a szabványosítási gyakorlat alapján az URN nem értelmezhető pusztán hidrodinamikai jelenségként: a gerjesztések, a szerkezeti rezgések és a vízterhelés csatolt vibroakusztikai multifizikai (multiphysics) rendszerként határozzák meg a távoli térben mérhető hangnyomásszintet. Az áttekintés a víz alatti hangterjedés releváns fizikai alapjait, az URN fő forrásmechanizmusait (propellerkavitáció, szerkezet által terjesztett zaj, áramlás okozta zaj), a csatolt modellezési módszereket (strukturális végelelemes modell, folyadék–szerkezet kölcsönhatás, CFD-alapú áramlásmodellezés, akusztikai analógia, FEM–BEM csatolás), továbbá a prediktív modellek hierarchiáját és a számítási költség–pontosság kompromisszumait tárgyalja. Központi elemként részletesen bemutatok egy, URN-predikcióra alkalmas vibroakusztikai multifizikai munkafolyamatot (workflow), valamint a validáció és a tengeri mérések bizonytalanságait az ISO 17208 szabványsorozat kontextusában.

Kulcsszavak: víz alatti kisugárzott zaj, vibroakusztika, multifizika, folyadék–szerkezet kölcsönhatás, propellerkavitáció, ISO 17208, hidrofon, validáció

¹ Széchenyi István Egyetem Audi Hungária Járműmérnöki Kar Járműfejlesztési Tanszék, e-mail: horvath.krisztian@sze.hu

The prediction of underwater radiated noise (URN) is of strategic importance both in military applications and in the protection of the marine environment. Based on the scientific literature and current standardisation practice, URN cannot be interpreted as a purely hydrodynamic phenomenon. Instead, excitation mechanisms, structural vibrations, and hydrodynamic loading jointly determine the far-field sound pressure level through a coupled vibroacoustic multiphysics system. This review discusses the relevant physical foundations of underwater sound propagation, the principal source mechanisms of URN (propeller cavitation, structure-borne noise, and flow-induced noise), and the associated coupled modelling approaches, including structural finite element modelling, fluid–structure interaction, CFD-based flow modelling, acoustic analogy methods, and FEM–BEM coupling. Furthermore, the hierarchy of predictive models and the trade-off between computational cost and predictive accuracy are examined. As a central element, a detailed vibroacoustic multiphysics workflow suitable for URN prediction is presented, together with a discussion of validation strategies and the uncertainties of sea trial measurements in the context of the ISO 17208 standard series.

Keywords: *underwater radiated noise, vibroacoustics, multiphysics, fluid–structure interaction, propeller cavitation, ISO 17208, hydrophone, validation*

Bevezetés

A vízi és víz alatti járművek által keltett víz alatti kisugárzott zaj olyan összetett fizikai „akusztikai aláírás”, amely egyszerre függ a hajtás- és segédberendezések dinamikus gerjesztéseitől, a szerkezetek rezgésátvitelétől és sugárzásától, valamint a vízközeg hangterjedési sajátosságaitól. A tengeri platform zajkibocsátásának gyakorlati leírása ezért eleve több, egymástól eltérő fizikai forráscsaládot választ szét (gépegységek, hajtómű/propulzor, áramlási jelenségek), és a katonai szakirodalomban is ez a hármas felosztás jelenik meg a passzív akusztikai *signature* elemzésének kiindulópontjaként.² A szabványok és iparági iránymutatások már definíciószinten rögzítik, hogy a víz alatti zaj nem kizárólag a propeller és a hajótest körüli áramlás „hidrodinamikai mellékterméke”. Például a hajók víz alatti kisugárzott zaját tárgyaló irányelvek a sugárzott zajt azokra az akusztikai energiakomponensekre vezetik vissza, amelyek a fedélzeti gépek rezgésein keresztül a hajótest–víz határfelületre jutnak, továbbá a csővezetékek és kapcsolódó rendszerek folyadékoldali gerjesztéseire és a hajótest hidrodinamikai zajára.³

A modern URN-predikációs feladat ennek megfelelően csatolt vibroakusztikai multifizikai problémaként írható le. A csatolás kétirányú: a szerkezet rezgései akusztikai nyomásmezőt gerjesztenek a vízben, miközben a vízterhelés (hozzáadott tömeg, sugárzási csillapítás, impedanciahatások) visszahat a szerkezeti dinamikára. A fluidumterhelés ilyen jellegű mechanizmusait már a klasszikus rezgés–akusztika irodalom is a „virtuális tömeg” és a sugárzási csillapítás ekvivalenciájával értelmezi, és kimutatja, hogy a hatás erősen frekvenciafüggő:

² MOORE 2019.

³ Indian Register of Shipping 2025.

alacsonyabb frekvenciákon dominánsan tömegterhelésként, magasabb frekvenciákon inkább csillapító jelleggel jelenik meg.⁴

A bevezető tézis így a következőképpen fogalmazható meg: az URN predikciója nem garantálható pusztán a CFD-alapú áramlásszimuláció „felfelé skálázásával”, mert a hajó vagy víz alatti jármű zajkibocsátása alapvetően a gerjesztések–szerkezeti dinamika–akusztikai sugárzás–hangterjedés láncolatában áll elő. E tézis összhangban van azzal a gyakorlati tapasztalattal is, hogy a nagy felbontású hidrodinamikai modellek önmagukban sem szükségszerűen javítják az URN-illeszkedést: több összehasonlító tanulmány a nyomásimpulzusok jó egyezése mellett is jelentős szintkülönbségeket talál az URN spektrumban, és a különbségeket részben modellválasztási és numerikus okokra vezeti vissza.⁵

Kritikai összegzés

A vonatkozó definíciók és mérési standardok implicit módon is a csatolt vibroakusztikai szemléletet kényszerítik ki, ugyanakkor a „multiphysics” jelző a gyakorlatban gyakran csak részleges csatolást jelent (például CFD + utólagos akusztikai analógia). Ez a részlegesség – különösen a szerkezeti modell hiányában vagy egyszerűsítése esetén – a predikciók rendszerszintű torzulásához vezethet, amelyet a pusztán hidrodinamikai finomítás nem feltétlenül kompenzál.⁶

Jelen tanulmány célja, hogy áttekintse a vízi és víz alatti járművek víz alatti kisugárzott zajának fő fizikai mechanizmusait, valamint bemutassa azokat a csatolt vibroakusztikai és multifizikai modellezési megközelítéseket, amelyek a zaj predikcióját és validációját támogatják. A tanulmány külön figyelmet fordít arra, hogy a haditechnikai alkalmazások szempontjából mely modellezési, mérési és értelmezési kérdések tekinthetők kritikusnak.

A víz alatti kisugárzott zaj katonai jelentősége

A víz alatti kisugárzott zaj katonai jelentőségét elsősorban az határozza meg, hogy közvetlenül befolyásolja a haditengerészeti platformok passzív detektálhatóságát és ezáltal túlélőképességét. A fejezet áttekinti az akusztikai rejtettség (*stealth*) alapelveit, a szonárrendszerekkel kapcsolatos detektálhatósági összefüggéseket, valamint bemutatja a forrás-átviteli út–vevő szemlélet szerepét a katonai alkalmazásokban.

Akusztikai rejtettség és *stealth* koncepció

A katonai platformok – különösen a tengeralattjárók – esetében az akusztikai rejtettség elsődleges célja a vízbe kisugárzott zaj minimalizálása annak érdekében, hogy a platform passzív módon ne legyen könnyen detektálható. A tengeralattjárók zaj- és rezgéscsillapító technológiáit összefoglaló szakirodalom egyértelműen úgy fogalmaz, hogy a *stealth* képesség

⁴ LENIOWSKA 2008.

⁵ KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

⁶ Indian Register of Shipping 2025.

eléréséhez a platformnak a vízbe „kiszórt” akusztikai zajt kell csökkentenie, és ehhez a forrás-átviteli út-vevő (*source-path-receiver*) szemlélet a gyakorlati elemzések alapja.⁷

A platformok passzív akusztikai *signature*-je tipikusan tonális és szélessávú komponensek együttese. Nyílt irodalmi összefoglalók szerint alacsony frekvenciákon a tonális összetevők (például forgógépek, fogaskerekek, villanymotorok harmonikusai) meghatározóbbak, míg néhány száz Hz felett a spektrum jellemzően szélessávúbb jellegűvé válik, a jármű sebességének növelésével pedig a propulzor és az áramlás okozta zajkomponensek szerepe felerősödik. A katonai adatok jelentős része minősített, ezért az abszolút szintek nyílt publikálása ritka, de az elérhető áttekintések a trendekre és a komponensek relatív szerepére megbízható kvalitatív képet adnak.⁸

A katonai jelentőség nem csupán a detektálhatóság kérdésében jelenik meg, hanem a tervezési és üzemeltetési döntésekben is. A zajcsökkentés tipikus eszköztára (forráscsökkentés, rugalmas beépítés, többlépcsős izoláció, aktív/adaptív rendszerek) lényegében vibroakusztikai beavatkozások összessége, amelyek a szerkezeti rezgésátvitelt és a hajótest sugárzását célozzák. Ebből következik, hogy a csatolt modellezésnek közvetlen „haditechnikai haszna” van: lehetővé teszi a kritikus átviteli utak azonosítását és a zajcsillapító intézkedések célzott optimalizálását.

Szonár és detektálhatósági összefüggések

A szonárrendszerek teljesítményét a gyakorlatban gyakran a szonáregyenletek logaritmikus mérlegével közelítik, ahol a detektálhatóságot a cél által kisugárzott jel „forrásszintje”, a hangterjedési veszteség, a háttérzaj, a vevődirektivitás és a detektálási küszöb határozza meg. A passzív szonár elve szerint a vevő nem sugároz, hanem a cél által radiált hangokat hallgatja; a szonáregyenletek ezen a ponton közvetlen hidat képeznek az URN és a felderíthetőség között.⁹

A detektálhatóság azonban nem csak a cél által generált spektrum abszolút szintje; legalább ennyire meghatározó, hogy az adott műveleti környezetben (sekély tenger, parti zóna, mélytenger) a hang milyen módon terjed és hogyan alakul a jel-zaj viszony. Sekély vízben a fenékről visszaverődő és többszörösen szóródó komponensek jelentősen módosíthatják a mérhető hangnyomásszintet, miközben a fenék akusztikai tulajdonságai gyakran csak korlátozott pontossággal ismertek. Ezzel szemben mélyvízi környezetben a *repeatable* mérési konfigurációk egyszerűbbek, mert a közvetlen és a felszíni visszaverődés dominanciája jobban kontrollálható paraméter.¹⁰

Forrás-átviteli út-vevő modell katonai kontextusban

A katonai URN-kontextus ezért szükségszerűen összekapcsolja a) a forrásoldali vibroakusztikai csatolást (mi és hogyan sugárzik), b) a mérési metrikák és szabványok világát (mit nevezünk

⁷ HOWARD 2011.

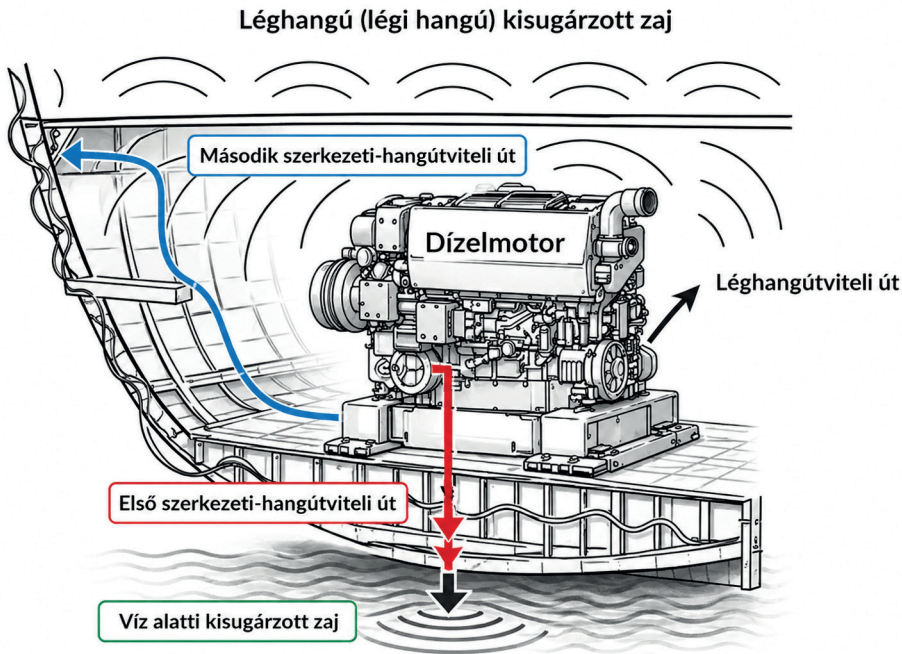
⁸ MOORE 2019.

⁹ AINSLIE–LEIGHTON 2015.

¹⁰ AINSLIE et al. 2022.

összehasonlítható „aláírás”-nak), valamint c) a hangterjedési modell kiválasztását (hogyan térképeződik át az URN lokális mérőpontból műveleti detektálási távolságokra). E hármas láncolat bármely elemének gyengesége stratégiai szinten torzíthatja a detektálhatósági következtetéseket.¹¹

Az 1. ábra a hajótest forrás-átviteli-lesugárzási modelljét mutatja be, kiemelve a szerkezeti és léghangú hangátviteli útvonalakat.



1. ábra: A hajótest forrás-átviteli-lesugárzási akusztikai modellje

Megjegyzés: A dízelmotor által keltett mechanikai gerjesztés szerkezeti úton a hajótesten keresztül a vízbe sugárzódik (structure-borne path), míg a léghangú komponens a fedélzet feletti térben terjed. Az ábra az elsődleges és másodlagos szerkezeti hangátviteli útvonalakat, valamint a víz alatti kisugárzott zaj kialakulását szemlélteti.

Forrás: a szerző szerkesztése SPENCE 2007 alapján

Kritikai összegzés

A katonai motiváció erős „validációs paradoxont” hoz létre: éppen a legrelevánsabb (alacsony szintű, taktikai környezetben mért) URN-adatok a legnehezebben hozzáférhetők, ami a nyílt irodalomban felnagyítja a skálázási és extrapolációs bizonytalanságokat. A szonáregyenleti gondolkodás ugyanakkor egyértelműen kijelöli, hogy a mérnöki szintű vibroakusztikai modellezés és a hangterjedési modellezés integrációja nélkül a „csendes platform” követelménye csak részlegesen támasztható alá.

¹¹ International Organization for Standardization 2025.

A víz alatti hangterjedés fizikai alapjai

A víz alatti hangterjedés fizikai alapjai

A víz alatti akusztika egyik alapvető sajátossága, hogy a hangsebesség és a közeg sűrűsége nagyságrendekkel eltér a levegőétől; a hullámhossz ugyanazon frekvencián ennek megfelelően nagyobb, a közeg karakterisztikus akusztikai impedanciája pedig lényegesen „keményebb”. Oktatási célú, de mérnöki pontosságú összefoglalók szerint a hangsebesség folyadékban a rugalmassági modulus és sűrűség hányadosának gyökeként értelmezhető; vízben tipikus paraméterek mellett körülbelül 1500 m/s nagyságrendű. Ugyanitt a karakterisztikus impedancia vízre nagyjából $1,5 \times 10^6$ Rayl, míg levegőre körülbelül 500 Rayl – ez a különbség közvetlenül befolyásolja a szerkezet–víz csatolás „erősségét”.¹²

A hangsebesség nem konstans: a hőmérséklet, a sótartalom és a mélység (nyomás) függvényében változik. A mérnöki gyakorlatban széles körben használt empirikus összefüggések (például Mackenzie-típusú egyenletek) és a nemzetközi standard algoritmusok (UNESCO/Chen–Millero) is ezt a függést írják le, explicit érvényességi tartományokkal. A hangsebességprofil (*sound speed profile*) ezért az akusztikai terjedési modellezés egyik legfontosabb bemenete.¹³

Frekvenciatartomány és abszorpció

Az URN vizsgálata jellemzően széles frekvenciasávon történik: iparági iránymutatások szerint a kereskedelmi hajók értékelési sávja 10 Hz–50 kHz, kutatóhajók esetében akár 100 kHz-ig is terjedhet. Ez a széles sáv részben azért indokolt, mert a különböző forrásmechanizmusok eltérő frekvenciasávokban dominálnak, részben pedig azért, mert a terjedési veszteség és az abszorpció frekvenciafüggése lényegesen módosítja a detektálható jeltartományt.¹⁴

A mérési és jelentési gyakorlatban a hangnyomásszintet gyakran harmadoktáv-sávokban, illetve döntő szerepet kapó szabványokban decidekád-sávokban adják meg. Az ISO 17208-1 mélyvízi összehasonlító mérésekhez például konkrétan rögzíti, hogy a távoli térben mért hangnyomásszintet 1 m-re normalizálva, sávonként kell jelenteni, és a kapott mennyiséget a szabvány *radiated noise level*-ként kezeli.¹⁵

Sekély- és mélyvízi sajátosságok

A mélyvízi hangterjedés egyik klasszikus jelensége a minimális hangsebességű zóna mentén kialakuló hangcsatorna (SOFAR), amelyben a hang refrakció révén csapdázódhat és nagy távolságokra eljuthat. A jelenség lényege, hogy a nyomás–hőmérséklet–sótartalom kombinációja

¹² Massachusetts Institute of Technology 2009.

¹³ National Physical Laboratory 2000.

¹⁴ Indian Register of Shipping 2025.

¹⁵ International Organization for Standardization 2016.

körülbelül 800–1000 m mélységben gyakran hangsebesség-minimumot eredményez, amelyhez a hangnyalábok visszahajlanak.¹⁶

Sekély vízben ezzel szemben a vízoszlop „hullámvezető” jellege a felszín és a fenék közötti többszörös visszaverődésekből, interferenciából és módusos terjedésből adódik; a közeg határfületei és a fenék tulajdonságai a terjedés alapvető részévé válnak. A sekélyvízi akusztika áttekintései hangsúlyozzák, hogy a terjedés erősen környezetfüggő, és a jelfeldolgozási/antennatechnikai megoldások (például tömbfeldolgozás) is a változó interferencia- és reverberációs környezethez igazodnak.¹⁷

ISO 17208 szabványi keret

A mélyvízi összehasonlító URN-mérések fogalmi keretét az ISO 17208-1 adja, míg a sekélyvízi mérésekre a 2025-ben publikált ISO 17208-3 külön eljárásokat rögzít, és kifejezetten előírja, hogy a sekély vízben végzett hangnyomásmérésekből a releváns sekélyvízi terjedési jelenségek figyelembevételével kell forrásszámításokat végezni. A szabványtervezet (FDIS) egyben definiálja a „mély víz” határát is: a vízmélységnek nagyobbnak kell lennie 150 m-nél, illetve az összhossz 1,5-szeresénél vett maximumértéknél.¹⁸

Kritikai összegzés

A hangterjedés fizikai leírása önmagában is többszintű modelhierarchiát igényel, de az URN-tervezés szempontjából a legnagyobb kockázat az, hogy a terjedési bizonytalanságokat a forrásmodellek „hibájaként” értelmezik. A mélyvízi és sekélyvízi mérések eltérő standardjai éppen azt jelzik, hogy a terjedési modell és a mérési geometria nem periferikus részlet, hanem az URN-metrika definíciójának része.

A víz alatti kisugárzott zaj forrásmechanizmusai

A víz alatti kisugárzott zaj nem egyetlen, izolált fizikai folyamat következménye, hanem több, eltérő eredetű gerjesztési mechanizmus együttes hatásaként jelenik meg. A vízi és víz alatti járművek esetében a zajkibocsátás alapvetően három fő forráscsaládra vezethető vissza: a fedélzeti gépegységek és hajtásrendszerek által keltett, szerkezet által terjesztett zajra, a propulzorok – különösen kavitációval terhelt – működéséből származó zajkomponensekre, valamint a hajótest és a környező víz kölcsönhatásából eredő áramlás okozta zajra. E mechanizmusok nem függetlenek egymástól: az áramlási tér módosítja a propeller terhelését és kavitációs viszonyait, a szerkezeti rezgések pedig befolyásolják a sugárzási viselkedést. A víz alatti kisugárzott zaj spektruma ezért a különböző források szuperpozíciójaként értelmezhető,

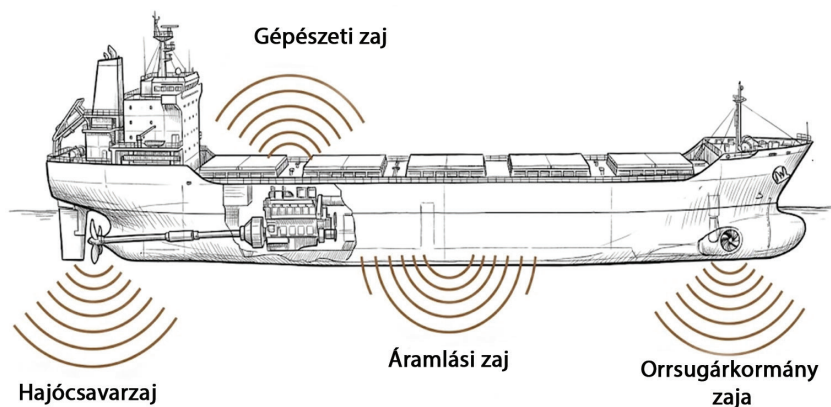
¹⁶ Britannica 2012.

¹⁷ KUPERMAN–LYNCH 2004.

¹⁸ International Organization for Standardization 2025.

amelynek relatív összetétele az üzemállapottól, a sebességtől és a vizsgált frekvenciatartománytól függően változik.

A 2. ábra szemlélteti, hogy a víz alatti kisugárzott zaj nem egyetlen domináns forrás eredménye, hanem több, eltérő fizikai eredetű komponens szuperpozíciója.



2. ábra: A víz alatti kisugárzott zaj fő forrásmechanizmusai hajóplatform esetén

Forrás: a szerző szerkesztése SMITH–RIGBY 2022 alapján

Propellerkavitáció

A propellerkavitáció az URN egyik legkritikusabb, üzemállapot-függő forrásmechanizmusa. A kavitáció kialakulása és fejlődése erősen nemlineáris, többfázisú jelenség, amelynek akusztikai következményei a tonális komponensek felerősödésétől a magas frekvenciás szélessávú komponensekig terjedhetnek. Az iparági mérési ajánlások kifejezetten a kavitáló propellerek zajmérésére fókuszálnak, és célként a teljes méretű (*full-scale*) akusztikai forrásjellemzők előrejelzését nevezik meg.¹⁹

A kavitációs zaj vizsgálatának egyik szűk keresztmetszete a modellkísérlet–teljes méret skálázás. A kavitációs alagútban végzett mérések és CFD-alapú előrejelzések között a vízminőség, a Reynolds-szám és a kavitációdinamika különbségei miatt jelentős eltérések adódhatnak. Nyílt hozzáférésű összehasonlító tanulmányok szerint a kavitációt kiváltó alagútgeometriai blokkolás a kavitációdinamikát és az URN-szinteket érdemben befolyásolhatja, miközben a nyomásimpulzusok predikciója akár kielégítő is lehet, az URN spektrumokban mégis számottevő diszkrepanciák maradhatnak.²⁰

¹⁹ ALVES PERREIRA et al. 2024.

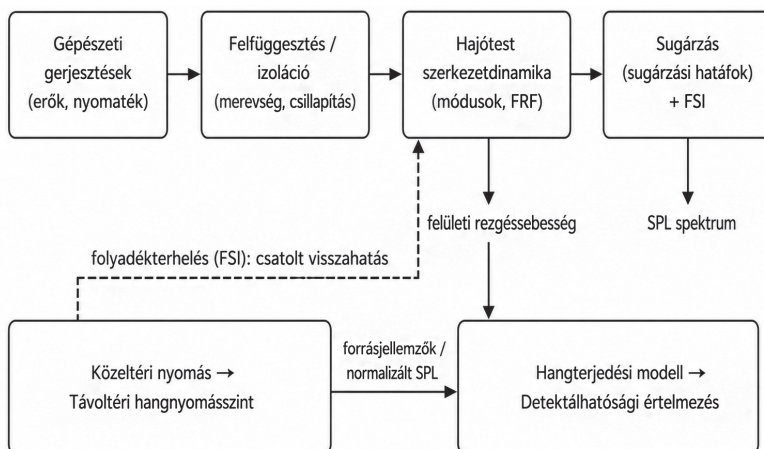
²⁰ KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

Szerkezet által terjesztett zaj

A szerkezet által terjesztett zaj forrásoldalon a fedélzeti gépek és tartószerkezeteik dinamikus gerjesztéseiből, útoldalon a gépalapok, bekötések, hossztartók és közbenső szerkezeti elemek rezgésátviteléből, vevőoldalon pedig a hajótest–víz határfelület sugárzó viselkedéséből áll össze. Az átviteliút-elemzés (*transfer-path analysis*) típusú megközelítések kifejezetten úgy tekintenek erre a folyamatra, mint *input–output* kapcsolatra a szerkezeti gerjesztések és a vízbe sugárzott hangnyomásszint között, és a módszert előzetes tervezési becslésekre, illetve zajcsökkentő megoldások hatásosságának értékelésére javasolják.²¹

A szerkezeti sugárzás hatásosságát a sugárzási hatásfok fogalma ragadja meg: azonos rezgésebbesség/rezgésenergia mellett a különböző szerkezeti módusok és panelgeometriák eltérő mértékben sugároznak a vízbe. A hajótest-panelrezgésekből történő URN-becslések egyik iránya a gyors, mérésalapú átviteli függvények használata, ahol a hajótesten mért gyorsulásokból és a hidrofonos mérésekből származtatott transzferfüggvény (a szerkezet–akusztika „átviteli útja”) képes kis hibával visszaadni a sugárzott komponenseket, legalábbis a vizsgált konfigurációk és zajviszonyok mellett.²²

A szerkezet által terjesztett zaj esetében a mechanikai gerjesztések a hajótest dinamikai válaszan keresztül jutnak el a vízbe történő akusztikai sugárzásig, amint azt a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra: A szerkezet által terjesztett zaj átviteli útja: gépészeti gerjesztések – hajótest szerkezetdinamika – vízbe történő sugárzás

Forrás: a szerző szerkesztése

Látható, hogy a folyadék–szerkezet kölcsönhatás nem csupán a sugárzás hatásfokát befolyásolja, hanem visszahat a szerkezeti dinamikai válaszra is.

²¹ SMITH – LA ROSA – WOOD 2024.

²² RODRIGO S. et al. 2023.

Áramlás okozta zaj

Az áramlás okozta zaj a hajótest menti határréteg, örvénykeltés, leválás, turbulens nyomás-fluktuációk és egyéb hidrodinamikai jelenségek következménye. A platform sebességének növekedésével a propulzor és áramlási zajok tipikusan gyorsan emelkednek; nyílt katonai áttekintések hivatkozási lánc alapján a sebességfüggés akár ötödik–hatodik hatványú trendet is mutathat, ami a nagyobb sebességtartományokban a gépzajhoz képest dominanciaváltást eredményezhet.²³

A gyakorlatban az áramlási és kavitációs zaj szorosan összekapcsolódik, mert a hajótest-propeller kölcsönhatás (*wake* mező) és a turbulens struktúrák befolyásolják a kavitáció kialakulását is. Ez az összefonódás különösen nehezé teszi a „tisztán hidrodinamikai” és a „tisztán vibroakusztikai” komponensek szétválasztását, és megerősíti azt a módszertani igényt, hogy a forrásmodellekben a nemlineáris áramlási zajforrások (például örvénykeltés) kezelése ne pusztán utófeldolgozási kérdés legyen.²⁴

Az áramlás okozta zaj egyik speciális formája az úgynevezett „éneklő hajócsavar” jelenség, amikor a lapát kilépő éle és az áramlási instabilitások kölcsönhatása keskenysávú, tonális zajt eredményez. A jelenség nem feltétlenül kapcsolódik kavitációhoz, hanem aero-/hidroelasztikus kölcsönhatásból származik

Tonális és szélessávú komponensek

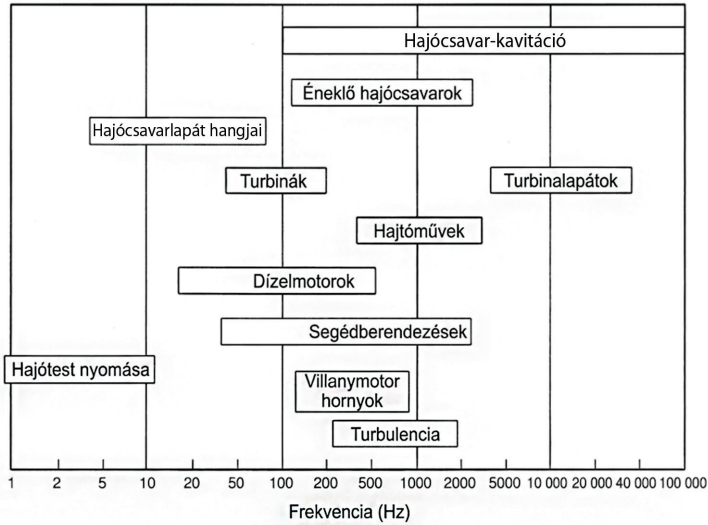
A tonális komponensek tipikusan periodikus gerjesztésekhez (forgógépek rendjei, fogazott kapcsolatok, lapátfrekvenciák) köthetők, míg a szélessávú komponensek turbulens és többfázisú folyamatokból (határréteg, kavitációbuborékok) keletkeznek. A katonai *signature* szemléletben ez a felosztás operatív szempontból is fontos: a tonális „vonalak” detektálhatósága és azonosíthatósága eltér a szélessávú háttértől, ezért zajcsökkentési stratégiák gyakran célzottan a vonalspektrum elfedésére vagy átalakítására is irányulnak.²⁵

A különböző zajforrások relatív hozzájárulása erősen frekvenciafüggő, amint azt a 4. ábra szemlélteti.

²³ MOORE 2019.

²⁴ SEZEN–ATLAR 2022.

²⁵ HOWARD 2011.



4. ábra: A vízi járművek víz alatti kisugárzott zajának fő forrásai és azok jellemző frekvenciatartományai

Forrás: a szerző szerkesztése

Látható, hogy az alacsony frekvenciatartományban a nagy tömegű gépegységek és hajtásrendszerek dominálnak, míg magasabb frekvenciákon a propellerkavitáció és az áramlási jelenségek válnak meghatározóvá.

Kritikai összegzés

A forrásmechanizmusok közötti határvonalak a valós járműveken gyakran elmosódnak: a kavitáció és az áramlás, illetve a géprezgések és a sugárzás közötti visszacsatolások miatt a „domináns forrás” az üzemállapottól és a vizsgált frekvenciasávtól függően változik. Mindez arra utal, hogy az URN-tervezésben nem elegendő egyetlen kiemelt forrásra optimalizálni; a csatolt vibroakusztikai modell akkor tekinthető hitelesnek, ha képes a dominanciaváltások reprodukálására és a komponensek közötti keveredés kezelésére.

Vibroakusztikai multifizikai modellezési módszerek

Sztrukturális végelelemes modellezés

A szerkezeti végelelemes modellezés (FEM) az URN-predikció „mechanikai gerince”: a gépegységek gerjesztései által keltett erőket (vagy gyorsulásokat, illetve frekvenciatartományú gerjesztéseket) a hajótest és alrendszerei dinamikus válaszává kell fordítani. A FEM előnye, hogy a bonyolult geometriák, heterogén anyagok és szerkezeti kapcsolatok (merevítőbordák, csomópontok, alapok, rugalmas bakok) explicit módon kezelhetők. A korlát ugyanakkor

a frekvenciával növekvő szabadságfok és az ismeretlen/nehéz paraméterezés: csillapítás, kontaktok, rögzítések, valamint a gépek és csőhálózatok növekvő részletezettségi igénye.²⁶

A strukturális modell prediktív határai különösen akkor élesek, amikor a cél nem csupán a lokális rezgési válasz, hanem a vízbe sugárzott akusztikai teljesítmény. Ehhez a szerkezet felületi rezgéssebesség-eloszlása és módusstruktúrája a kritikus. A sugárzási hatások frekvenciafüggő, és általános szerkezet-akusztika elmélet alapján a közegterhelés megváltoztatja a rezonanciacsúcsok helyét és fázisát; meghatározó, hogy a rendszer a tömegterhelés dominálta vagy a sugárzási csillapítás dominálta tartományban működik.

Folyadék-szerkezet kölcsönhatás

A folyadék-szerkezet kölcsönhatás az URN-probléma legszorosabb értelemben vett „csatolása”: a szerkezeti rezgések akusztikai teret keltenek, az akusztikai nyomás pedig terhelésként visszahat a szerkezetre. A klasszikus leírás szerint a fluidum reakciója ekvivalens hozzáadott tömeg és sugárzási csillapítás formájában. Konkrét, fluidumterhelt lemezeket vizsgáló modellek rámutatnak, hogy a hatás frekvenciaspektruma nem egynemű: egy határfrekvencia alatt a folyadék dominánsan tömegterhel, felette a hatás csillapító jellegűvé válik. Ez a megfigyelés közvetlenül releváns hajótestpanel-sugárzásnál, mert jelzi, hogy a vibroakusztikai csatolás tipikusan az alacsony-középfrekvenciás tartományban a legerősebb.

Módszertanilag a csatolás megvalósítható monolit (egyidejű) vagy partícionált (iteratív) eljárásokkal, idő- vagy frekvenciatartományban. Hajószerkezeti alkalmazásokban gyakori a frekvenciatartományú lineárisítás (harmadoktáv/decidekád vagy keskenysáv) és a strukturális-akusztikai csatolás BEM/FEM hibridjével történő kezelése. A választás meghatározza a számítási költséget is: a csatolt rendszerekben a mátrixok rossz kondíciója és a sűrű (BEM) operátorok számottevő erőforrást igényelnek.²⁷

CFD-alapú áramlásmodellezés

A CFD (különösen RANS/DES/LES) a propeller-hajótest-kormány kölcsönhatás és a kavitációdinamika leírásában megkerülhetetlen, ha a cél a nemlineáris áramlási eredetű gerjesztések és akusztikai források explicit kezelése. A *high-fidelity* CFD azonban nem jelent automatikus pontosságnövekedést: a turbulenciamodel, a hálófelfontás, az időlépés, a kavitációs tömegátadás modellje és a határfeltételek (*wake* mező, fal/légfelszín, forgó-álló interfész) mind domináns bizonytalansági forrás lehet. Egy teljes méretű propeller-URN tanulmány például kiemeli, hogy az LES nagyobb turbulenciafelbontást adhat, ugyanakkor teljes méretben rendkívül költséges; ezért a DES költség-pontosság kompromisszumként értelmezhető, de még így is előfordulhat URN-alulbecslés, ha például a tip-vortex kavitáció dinamikája nem jelenik meg megfelelően.²⁸

²⁶ International Maritime Organization 2019.

²⁷ LIANG et al. 2019.

²⁸ SEZEN-ATLAR 2022.

A CFD-alapú előrejelzések validációs korlátja, hogy a „köztes” mennyiségek (nyomásimpulzusok, tolóerő-ingadozás) illeszkedése nem garantálja az URN spektrumok illeszkedését. Nyílt hozzáférésű, modell- és teljes méretű összehasonlításokat végző cikkek szerint a nyomásimpulzusok predikciója lehet kielégítő, mégis jelentős URN-eltérések maradhatnak, és ezek egy része a permeábilis integrálási felület választására, illetve a numerikus *spurious* zajokra vezethető vissza.²⁹

Akusztikai analógia

Az akusztikai analógia (a gyakorlatban gyakran Ffowcs Williams–Hawkins típusú formulációkkal) a CFD és az akusztikai tér összekapcsolásának elterjedt eszköze. A módszer lényege, hogy az áramlási megoldásból származtatott felületi és térfogati források alapján számítja az akusztikai nyomást; a számítás jellemzően frekvenciatartománybeli spektrumok előállítására irányul. A permeábilis megfogalmazások számításlag előnyösek, mert bizonyos nemlineáris hozzájárulásokat a térfogati integrálokról felületi integrálokra transzformálnak, ugyanakkor a felület választása, a forgó–álló interfészek és az *end-cap* jellegű problémák érzékenyen tehetnek az eredményt.

Itt válik különösen láthatóvá, miért nem garantál a teljes nagy részletességű CFD-modell (*high-fidelity CFD*) nagyobb pontosságot minden esetben. Ha az akusztikai analógia bemeneti felülete vagy a kavitációs modell bizonytalan, akkor a CFD felbontásának növelése akár a numerikus zajt is felerősítheti. A gyakorlatban ezért az URN-predikció a CFD „komponens” mellett erős módszertani fegyelmet igényel: a felületválasztás, a spektrális konvergencia, a háló- és időlépés konvergencia, valamint a mérési geometriával való kompatibilitás igazolása nélkül a pontosság látszólagos.

FEM–BEM csatolás

A BEM különösen alkalmas a külső (szabadtéri) akusztikai sugárzás leírására, mert a problémát a határfelületre redukálja; ezzel a térdimenzió eggyel csökken, ami elméleti előny. Ugyanakkor a diszkretizált BEM operátorok sűrű mátrixokat eredményeznek, ami memória- és időigényt okoz, főként magas frekvencián, ahol a hullámosság miatt a diszkretizációs sűrűség nő. A gyorsított BEM (például *fast multipole*) és az iteratív megoldók csökkenthetik a per-iterációs költséget, de a konvergenciát és a kondicionálást a formuláció és az előkonkondicionálás határozza meg.³⁰

A hajószerkezeti URN esetében a FEM–BEM csatolás tipikusan úgy jelenik meg, hogy a FEM adja a szerkezeti felületi rezgéssebességet, a BEM pedig a vízben kialakuló nyomásmezőt és a távoli térbe sugárzott hangot. A csatolás előnye a fizikai „helyesség”: a hajótest lokális módusai és a vízközeg sugárzási feltételei egy keretben kezelhetők. A korlát a modellépítési

²⁹ KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

³⁰ IULIANO – CASUSCELLI – DE ANGELIS 2025.

költség és a csillapítás/határfeltételek bizonytalansága, ami a predikciót gyakran „kalibráció-függővé” teszi.³¹

Prediktív modellek hierarchiája és számítási kompromisszumok

A gyakorlati URN-tervezés ritkán engedheti meg magának, hogy minden projektfázisban „full-scale CFD + akusztikai analógia + csatolt szerkezeti sugárzás + terjedési modell” láncot futtasson. Ezért a prediktív modellek hierarchiája széles: empirikus és félempirikus módszerek, determinisztikus (alacsony frekvenciás) FE/BE modellek, közép- és magas frekvencián SEA vagy hibrid FE/BE/SEA megközelítések, illetve nagy felbontású CFD-alapú komponensek kombinációi. Nemzetközi technikai jelentések és iparági mátrixok kifejezetten úgy fogalmaznak, hogy FE és BE alacsony frekvencián jellemző, magasabb frekvencián hibrid módszerek, míg a legmagasabb frekvencián SEA dominál, és mindehhez jelentős szakértői tudás szükséges.

A hierarchia „kritikai” eleme, hogy a számítási igény és a prediktív pontosság nem monoton kapcsolatban áll. Az empirikus/félempirikus módszerek gyorsak, de paraméterérzékenyek, és a skálázási bizonytalanságok magasak lehetnek; a CFD-alapú módszerek részletesek, de a modellválasztás és numerika miatt akár az URN-illeszkedést is ronthatják, ha a validáció nem kielégítő. A legjobb gyakorlat ezért iteratív: a korai fázisban gyors, robusztus becslések, a kritikus átviteli utak azonosítása, majd a fókuszált *high-fidelity* számítások a leginkább zajdomináns jelenségek köré szűkítve.³²

Az 5. ábrán bemutatott predikciós lánc bal oldalán a gerjesztő erők jelennek meg, amelyek a hajó fedélzeti gépegységeiből és a propeller működéséből származnak. Ide tartoznak a géperők és nyomatékíngadozások, a fogaskerék-kapcsolódásból eredő komponensek, a propellerlapátokra ható hidrodinamikai terhelések, valamint a kavitáció térfogatdinamikájából és CFD-számításokból származó nyomásfluktuációk. Ezek a bemenetek időtartományban (például tranziens jelként) és frekvenciatartományban (rend-spektrum, keskenysávú felbontás) egyaránt értelmezhetők. A modul kimeneteként a szerkezeti csomópontokra redukált erővektorok, illetve a hajótest felületein ébredő nyomásmezők adódnak.

A következő lépcsőben a strukturális rezgések meghatározása történik, jellemzően véges-elemes modell segítségével, szükség esetén modellcsökkentési eljárásokkal kiegészítve. A gerjesztések hatására a hajótest és a gépalapok elmozdulás-, sebesség- és gyorsulásmezői számíthatók, továbbá meghatározhatók a modális jellemzők és az átviteli utak leírásához szükséges frekvenciaátviteli függvények (FRF). Ezen a ponton külön figyelmet igényel a csillapítás, a rögzítési feltételek és az izolátorok paraméterezése, mivel ezek alapvetően befolyásolják a rezgésenergia továbbadását.

³¹ International Maritime Organization 2019.

³² KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

A szerkezeti válasz ismeretében a sugárzási határfok, illetve az akusztikai sugárzási impedancia határozható meg. A bemenet itt a hajótest egyes paneljeinek vagy teljes felületének rezgésebség-eloszlása. A számítás történhet analitikus vagy empirikus közelítésekkel a korai tervezési fázisban, numerikus módszerekkel (például határelem- vagy végelelem-eljárással) részletes vizsgálatok esetén, illetve mérésalapú átviteli függvények alkalmazásával.

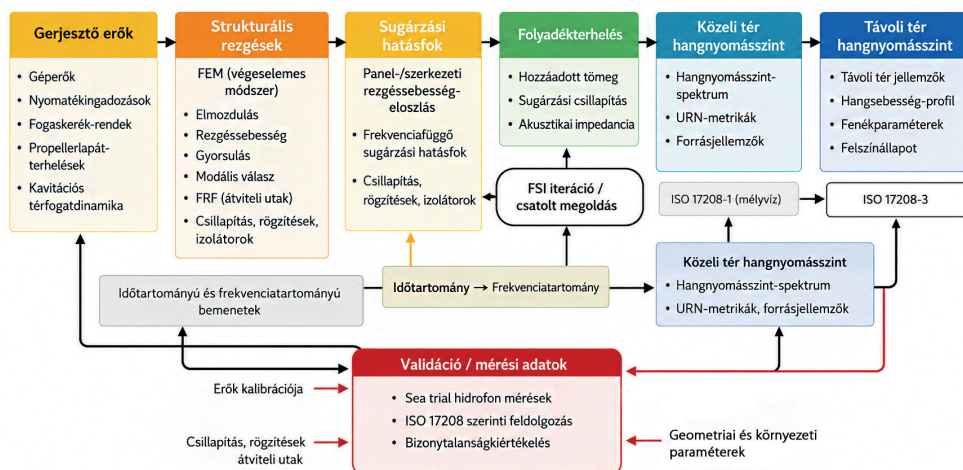
A folyadékterhelés figyelembevétele a folyadék–szerkezet kölcsönhatási modell keretében történik. Ebben a lépésben a hozzáadott tömeg, a sugárzási csillapítás és az akusztikai impedancia szerepe jelenik meg. A szerkezeti felületmozgás és adott esetben a CFD-ből származó nyomásmezők alapján meghatározható a víz visszaható nyomásterhelése, amely visszacsatol a strukturális modellhez. Ez az iteratív kapcsolat – az FSI-csatolás – biztosítja, hogy a szerkezet és a folyadék kölcsönhatása konzisztensen jelenjen meg a megoldásban.

A következő modul a közeli tér akusztikai nyomásának meghatározása. Itt a felületi rezgések, a sugárzási paraméterek, valamint a kavitációs és áramlási források együttesen szolgálnak bemenetként. A számítás végezhető akusztikai végelelemes vagy határelemes eljárással, illetve propeller esetén akusztikai analógia alkalmazásával. E lépésben történik meg az esetleges tartományváltás is: ha a kiinduló adatok időtartományúak, itt hajtják végre a spektrális transzformációt (FFT), valamint a sávositást, például harmadoktávós bontásban.

A távoli tér hangnyomásszintje a közeli térben meghatározott nyomásmező extrapolációjával állítható elő, a mérési geometriának megfelelő normalizálással. Az eredmény a távoli térbeli hangnyomásszint-spektrum, illetve az URN-metrikák – például normalizált forrásjellemzők – formájában jelenik meg. Ezen a ponton biztosítani kell az alkalmazott szabványokkal való kompatibilitást, külön kezelve a mélyvízi (ISO 17208-1) és a sekélyvízi (ISO 17208-3) számítási ágakat.

A lánc jobb szélén a hangterjedési modell helyezkedik el, amely a forrásjellemzőket a környezeti paraméterek – például hangsebességprofil, fenékszerkezet, felszíni állapot – figyelembevételével műveleti pontokra vetíti. A kimenet a terjedési veszteség, valamint a detektálhatóság szempontjából releváns mennyiségek, például a jel–zaj viszonyhoz kapcsolódó paraméterek. A modell különböző változatokban alkalmazható sekély- és mélyvízi környezetre.

Az 5. ábra alsó részén külön validációs visszacsatolási hurok jelenik meg. A távoli térbeli eredményekből és a terjedési modell kimenetéből származó adatok egy „Validáció / mérési adatok” blokkba futnak be, amely a tengeri próbák során végzett hidrofonos mérésekre, az ISO 17208 szerinti feldolgozásra és a bizonytalanság-kiértékelésre utal. E validációs blokk visszacsatolást biztosít a gerjesztési bemenetek kalibrálásához, a strukturális modell paramétereinek finomításához, valamint az akusztikai és terjedési modulok geometriai és környezeti beállításainak pontosításához. Így a predikciós lánc nem lineáris, egyszeri számításaként értelmezendő, hanem iteratív módon finomított, mérési adatokkal alátámasztott rendszerként.



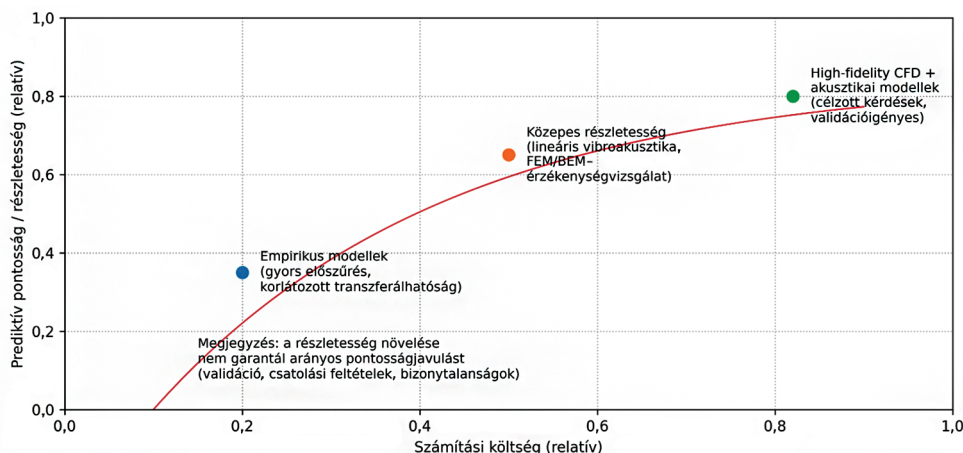
5. ábra: Vibroakusztikai multifizikai URN-predikciós workflow

Forrás: a szerző szerkesztése

Az ábra célja egy olyan, grafikai kivitelezésre alkalmas, csatolt predikciós lánc szemléltetése, amelyben a mechanikai gerjesztésekből a távoli térben értelmezett URN-metrikákig (hangnyomásszint, illetve szükség esetén forrásjellemzők) vezető út egyértelműen követhető.

A javasolt ábra vízszintes, balról jobbra haladó főfolyamatot tartalmaz, hét egymás utáni, téglalap alakú modulblokkal, a modulok között egyirányú nyilakkal. A blokkok alatt (kisebb betűmérettel) megadandók a tipikus bemeneti/kimeneti mennyiségek és a domináns tartomány (időtartomány / frekvenciatartomány).

A különböző prediktív megközelítések eltérő számítási költséggel és eltérő transzferálhatósággal rendelkeznek, amint azt a 6. ábra koncepcionális módon szemlélteti.



6. ábra: Prediktív modellek hierarchiája

Forrás: a szerző szerkesztése

Látható, hogy a nagy részletességű modellek nem lineárisan javítják a prediktív pontosságot, mivel a validáció, a csatolási feltételek és a környezeti bizonytalanságok korlátozó tényezőt jelentenek.

Kritikai összegzés

A multifizikai módszerek valódi hozzáadott értéke nem az, hogy „mindent számolnak”, hanem hogy a domináns csatolási mechanizmusokat helyesen rangsorolják, és a validáció felé zárják a modellt. A túlzottan részletes CFD önmagában – szerkezeti integráció és standard-kompatibilis metrikaképzés nélkül – könnyen „precízen téves” eredményeket adhat, míg egy jól paraméterezett, hierarchikusan felépített vibroakusztikai *workflow* a tervezési döntésekhez gyorsabb és robusztusabb út.

Validáció és mérési kihívások

Tengeri próbamérések és hidrofon elrendezés

A tengeri próbamérések (*sea trial*) az URN-modellek alapvető validációs referenciái, ugyanakkor költségesek, logisztikailag összetettek, és katonai környezetben gyakran korlátozott hozzáférésűek. A nyílt szakirodalom is hangsúlyozza, hogy teljes méretű URN-mérések sok esetben katonai vagy kutatási célból történnek, ami a validációs adatbázisok szűkösségéhez vezet. Ezzel párhuzamosan ugyanakkor akadnak nyílt projektek és adatbázisok, amelyek kifejezetten a teljes méretű adat-szimuláció összevetést támogatják.³³

Az ISO 17208-1:2016 a mélyvízi, összehasonlító célú mérésekre standardizált eljárást ad: a távoli térben, tipikusan *beam aspect* geometriában mért hangnyomásszintet a legkisebb megközelítési pont távolságával (CPA) normalizálja, és a kapott eredményt *radiated noise level*-ként jelenti. A szabvány rögzíti, hogy a módszer a felszíni tükörkép-interferenciából (Lloyd-tükörhatás) eredő variabilitást „simítja”, de nem tünteti el teljesen, és azt is jelzi, hogy az aljzat-visszaverődés, refrakció és abszorpció hatásaira nem ad explicit számítási korrekciót.³⁴

Iparági irányelvek a mérési terminológiát kiegészítik a közeli tér/távoli tér fogalmi definícióival, és számszerű támpontot is adnak: a közeli tér jellemző határa a hanghullámhossz, illetve a forrás legnagyobb méretének többszöröse. Ugyanezen dokumentumok a mérési terv részeként kezelik az „akusztikai középpont” fogalmát, amelyhez a normalizálás történik.

Hidrofon elrendezés

A hidrofon elrendezés (távolság, mélység, többcsatornás vagy egycsatornás geometria, aspektus) alapvetően meghatározza, hogy a mérés mennyire tekinthető távoli térnek, mennyire érintett a felszíni és fenékreflexiók interferenciájában, és milyen pontossággal invertálható

³³ SEZEN–ATLAR 2022.

³⁴ International Organization for Standardization 2016.

a forrásjellemző. A műszaki ajánlások ezért részletesen tárgyalják a mérési geometriát, a sávos feldolgozást és az üzemi feltételek stabilizálását (ITTC 2017/2021).

ISO 17208 és sekélyvízi bizonytalanságok

A sekély vízben végzett URN-mérés lényegesen nagyobb bizonytalanságot hordoz, mert a fenék hatása és a többszörös visszaverődések a mért hangnyomásszintet és az ebből származtatott metrikákat erősen módosítják. Ezt a problémát a szakirodalom a standardizáció szintjén is hangsúlyozta: a mélyvízi eljárások ismételhetőbbek, mert a közvetlen és a felszíni komponens kezelése elégséges, míg sekély vízben a fenék tulajdonságai és a többszörös reflexiók domináns szerepet kapnak, miközben a fenékparaméterek gyakran pontatlanul ismertek.³⁵

A 2025-ben publikált ISO 17208-3 erre válaszként kifejezetten sekélyvízi mérési és számítási eljárásokat rögzít, és előírja a forrásszint számítását a sekélyvízi terjedési jelenségek figyelembevételével. A szabványtervezetben ráadásul megjelenik az a gyakorlati motiváció is, hogy a mélyvízi mérőterületek a hajók üzemenélől olykor távol esnek, ezért a sekélyvízi standard szükségszerű.³⁶

A validációt tovább bonyolítja, hogy a mérés-szimuláció összevetés nem pusztán „spektrumok illesztése”: a mért URN anyagában hordozza a mérési geometria, a tengerszíni állapot és a Lloyd-tükörhatás lenyomatát. Nyílt szakirodalmi példák szerint az URN-mérések egyik legfontosabb torzító jelensége éppen a Lloyd-tükör interferencia, amely megbízható eljárásokat követel meg a jel-zaj viszony, a háttérzaj és a geometriai normalizálás értelmezésében.

A *broadband* validáció problémái

A *broadband* validáció hiánya több szinten jelentkezik. Egyrészt a teljes méretű mérések szűkösek és részben korlátozott hozzáférésűek, másrészt a kavitációs zaj és áramlási zaj szélessávú komponensei különösen érzékenyek a modellválasztásra és a numerikus beállításokra. Egy friss, nyílt hozzáférésű összehasonlító tanulmány kifejezetten azt találja, hogy bár a kavitációdinamika és nyomásimpulzusok egyezése jó lehet, az URN-szintekben jelentős eltérések maradnak, és több nyitott kérdés fennáll.

Harmadrészt a víz alatti akusztikai mérés jelenleg erősen „hangnyomásközpontú”. A mérési ajánlás jellegű mérési útmutatók kiemelik, hogy a részecskemozgás (sebesség/gyorsulás) és fenékrengés mérése – bár biológiai és fizikai szempontból is releváns lehet – jelenleg technológiailag és kalibrációs standardok hiánya miatt éretlenebb; emiatt a szélesebb vibroakusztikai validációs kép gyakran hiányos.³⁷

³⁵ AINSLIE et al. 2022.

³⁶ International Organization for Standardization 2025.

³⁷ ROBINSON–LEPPER–HAZELWOOD 2014.

Kritikai összegzés

A validációs kihívások nem „mellékes” problémák, hanem a predikciós módszer érvényességi tartományának definíciói. Az ISO 17208 szigorú metrikái és geometriai előírásai azt jelzik, hogy a mérés és a modell összehasonlítása csak standard-kompatibilis módon értelmezhető; enélkül a modell kalibrációja könnyen a mérési artefaktumokra illeszkedik. A *broadband* validáció hiánya pedig azt valószínűsíti, hogy a következő évek kutatási fókusza a bizonytalanságkezelés és a skálázási/terjedési korrekciók integrációja lesz.

Katonai alkalmazások és rendszerintegráció

Tengeralattjárók és UUV/USV rendszerek

A tengeralattjárók URN-követelményei a *stealth* filozófiából fakadnak: a zaj- és rezgéskezelés célja elsődlegesen a vízbe kisugárzott akusztikai zaj minimalizálása, ami közvetlenül a passzív detektálhatóságra hat. A nyílt áttekintések hangsúlyozzák, hogy a tengeralattjárók számos zaj- és rezgésforrással rendelkeznek (hajtás, segédgépek, propeller, áramlás), és az izolációs technológiák részben az átviteli utak megszakítására épülnek.

Az UUV/USV rendszerek esetében az URN kettős jelentőségű: egyrészt saját rejtettségi kérdés, másrészt a fedélzeti érzékelők (szonár, kommunikáció) számára a *self-noise* limitáló tényező lehet. Nyílt tudományos publikációk bizonyítják, hogy UUV-k passzív módon követhetők a motorok magasabb frekvenciás zajkomponenseiből, különösen sekélyvízi tömbkörnyezetben. Ez a tény a „kis méretű, elektromos és elvileg csendes” platformoknál is indokolja a teljes vibroakusztikai lánc elemzését.³⁸

Akusztikai *signature* management

Az akusztikai *signature* management a katonai gyakorlatban olyan rendszerszintű tervezési és üzemeltetési keret, amely a források, átviteli utak és sugárzó felületek együttes optimalizálását célozza. A nyílt szakirodalom azt is kiemeli, hogy a *signature control* technológiák haditechnikai részletei jellemzően minősítettek, emiatt a publikálható kutatás gyakran alapvető és módszertani szinten marad. Módszertani következtetésként ugyanakkor egyértelmű: a legnagyobb hatású beavatkozások többnyire a szerkezeti rezgésátvitel és a sugárzás csökkentésére irányulnak, vagyis a vibroakusztikai integráció nem opcionális, hanem a *signature management* „fizikai hordozója”.

Kutatási hiányosságok

A kutatási hiányosságok egyik központi eleme a bizonytalanságkezelés. A sekélyvízi standardizáció történetében kifejezetten megjelent az a probléma, hogy a megismételhető

³⁸ KITA et al. 2022.

mérésekhez a szenzorgeometria és elemzés kombinációinak hiánya akadályozta a fejlődést; a fenék- és terjedési paraméterek bizonytalansága pedig a metrikák összehasonlíthatóságát gyengítette. Bár az ISO 17208-3 publikálása részben választ ad, a gyakorlati alkalmazhatóság továbbra is adat- és környezetfüggő marad.³⁹

A digitális-alkalmazások az URN kontextusában két irányban formálódnak. Az egyik irány a hajózás/útvonaltervezés és a zajkitettség operatív csökkentése, ahol kiszámítható, „valós idejű” URN-becslések szükségesek. Nyílt hozzáférésű 2026-os munka például digitális iker alapú döntéstámogató rendszert mutat be hajóútvonal-tervezéshez, URN-minimalizálási céllal.⁴⁰

A másik irány kifejezetten a valós idejű predikció gépi tanulásos/online módszerekkel, különösen problémás adatkorlátok mellett. Friss tanulmányok fogalmaznak úgy, hogy a vibroakusztikai energiaátviteli mechanizmusok összetettsége, a korlátozott rezgésmonitoring és a kevés próbaminta miatt *ensemble*- és *feature*-optimalizáló online predikciós keretekre van szükség. E megközelítések ígéretesek, de egyértelmű haditechnikai korlátjuk, hogy generalizációjuk tipikusan az elérhető tanítóadatokra és üzemállapotokra korlátozódik; a fizikai interpretálhatóság és a „transzfer” új platformokra nem automatikus.⁴¹

A valós idejű predikció legkeményebb határa végső soron a számítási költség és a bemeneti paraméterek bizonytalansága. A csatolt FEM–BEM, illetve CFD + akusztikai analógia láncok sok esetben nagyságrendekkel meghaladják a fedélzeti vagy operatív időkereteket. Ezért a digitális iker és *real-time* célok felé vezető út várhatóan modellcsökkentéssel, *surrogates* megoldásokon és a kritikus átviteli utak szenzoros monitorozásán keresztül halad – de mindezt csak akkor lehet haditechnikailag releváns módon alkalmazni, ha a modellek bizonytalanságát explicit módon kezelik, és a standard-kompatibilis validáció nem marad el.⁴²

Kritikai összegzés

A katonai alkalmazásokban az URN-modellezés legnagyobb korlátja nem feltétlenül a numerikus módszerek hiánya, hanem a validációs adatok és a környezeti paraméterek kontrollálhatósága. A digitális iker és valós idejű predikció iránya stratégiaileg vonzó, de jelenleg többnyire a terjedési oldal és az empirikus URN-becslések felől közelít; a teljes vibroakusztikai multifizikai lánc *real-time* integrációja csak modellcsökkentéssel és szisztematikus bizonytalanságkezeléssel képzelhető el.

Összegzés

A víz alatti kisugárzott zaj predikciója a vízi és víz alatti járművek esetén szükségszerűen csatolt vibroakusztikai multifizikai feladat. A források (propellerkavitáció, szerkezet által terjesztett zaj, áramlás okozta zaj) és a terjedési környezet (sekély vs. mély víz) egymással szoros

³⁹ AINSLIE et al. 2022.

⁴⁰ VENKATESHWARAN et al. 2026.

⁴¹ HUANG–XU–LI 2025.

⁴² CHAILLAT – DARBAS – LE LOUËR 2017.

kölcsönhatásban határozzák meg a mérhető URN-metrikákat. A szabványosítás – különösen az ISO 17208-1 és az ISO 17208-3 – azt jelzi, hogy a mérési geometria és a terjedési jelenségek figyelembevétele a metrika definíciójának része, nem pedig utólagos korrekció.

A vibroakusztikai modellezési módszerek palettája a gyors empirikus becslésektől a csatolt FEM–BEM és CFD + akusztikai analógia láncokig terjed. A módszertani összehasonlítás legfontosabb tanulsága, hogy a számítási részletesség növelése nem garantál automatikus pontosságnövekedést: a kavitációs és akusztikai bemeneti felületek, a numerikus hibák, valamint a validációs adatok szűkössége miatt a *high-fidelity* modellek is jelentős URN-diszkrpanciákat mutathatnak. Emiatt a tervezési *workflow*-ban a prediktív hierarchia és a validációs visszacsatolás központi szerepe megkerülhetetlen.

A kutatási hiányosságok a *broadband* validáció, a bizonytalanságkezelés és a digitális iker/valós idejű predikció irányában koncentrálnak. E területek fejlődése várhatóan a standardizált mérési gyakorlat bővülésével, a terjedési modellezés és a vibroakusztika integrált kezelésével, valamint a csatolt rendszerek számítási csökkentésével érheti el azt a szintet, ahol a haditechnikai alkalmazhatóság a tervezési ciklusokban is megbízhatóan megjelenik.

A tanulmány eredményei a haditechnikai és hajóakusztikai területen dolgozó szakemberek számára elsősorban abban nyújthatnak támogatást, hogy rendszerszinten értelmezhetővé teszik a víz alatti kisugárzott zaj fő forrásait, a kapcsolódó predikciós láncokat és a validáció korlátait. Ez különösen hasznos lehet korai tervezési döntések, mérési kampányok előkészítése, valamint zajcsökkentő beavatkozások rangsorolása során. A kutatás folytatásának fő irányai közé tartozik a teljes méretű, szabványkompatibilis validációs adatbázisok bővítése, a sekélyvízi bizonytalanságok pontosabb kezelése, a modellcsökkentési eljárások fejlesztése, valamint a digitális iker alapú, részben valós idejű predikciós keretek kialakítása.

Felhasznált irodalom

- AINSLIE, Michael A. et al. (2022): International Harmonization of Procedures for Measuring and Analyzing of Vessel Underwater Radiated Noise. *Marine Pollution Bulletin*, 174. Online: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113124>
- AINSLIE, Michael A. – LEIGHTON, Timothy G. (2015): Sonar Equations for Planets and Moons. In *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22)*, Florence Italy 12–16 July 2015. Online: https://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/AinslieLeighton2015_Forence.pdf
- ALVES PEREIRA, F. et al. (2024): *ITTC Recommended Procedures and Guidelines. Model-Scale Propeller Cavitation Noise Measurements*. International Towing Tank Conference. Online: <https://www.ittc.info/media/11828/75-02-03-039.pdf>
- Britannica (2012): SOFAR Channel. *Encyclopædia Britannica*, 2012. szeptember 6. Online: <https://www.britannica.com/science/SOFAR-channel>
- CHAILLAT, Stéphanie – DARBAS, Marion – LE LOUËR, Frédérique (2017): Fast Iterative Boundary Element Methods for High-Frequency Scattering Problems in 3D Elastodynamics. *Journal of Computational Physics*, 341, 429–446. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.04.020>
- HOWARD, Carl Q. (2011): Recent Developments in Submarine Vibration Isolation and Noise Control. In *Proceedings of the 1st Submarine Science Technology and Engineering Conference* (Adelaide 8–10 November 2011), 283–288. University of Adelaide Digital Library. Online: <https://digital.library.adelaide.edu.au/items/818df72b-a66a-477e-a50b-f84dd144ff70>

- HUANG, Xin – XU, Rongwu – LI, Ruibiao (2025): An Online Prediction Method for Ship Underwater Radiated Noise Based on Differential Evolution Feature Optimization and Ensemble Method. *Ocean Engineering*, 333. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121517>
- IULIANO, Andrea – CASUSCELLI, Francesca – DE ANGELIS, Emilio (2025): Vibro-Acoustic Simulations for Prediction of Underwater Radiated Noise from Onboard Machinery. In *Technology and Science for the Ships of the Future*, NAV 2025 Proceedings. Online: <https://doi.org/10.3233/PMST250020>
- Indian Register of Shipping (2025): *Guidelines on Underwater Radiated Noise and Measurements*. Revision 1. March 2025. IRS-G-DES-15. Indian Register of Shipping. Online: https://www.irclass.org/media/7786/irs-guidelines-on-underwater-radiated-noise_rev-1_march-2025.pdf
- International Maritime Organization (2019): *MEPC 74/INF.28 Ship Underwater Radiated Noise Technical Report and Matrix (Canada)*. Marine Environment Protection Committee 74th session 8 March 2019. International Maritime Organization, London. Online: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/NOISE/MEPC%2074-INF.28%20-%20Ship%20underwater%20radiated%20noise%20technical%20report%20and%20matrix%20%28Canada%29.pdf>
- International Organization for Standardization (2016): ISO 17208-1:2016 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization (2025): ISO 17208-3:2025 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 3: Requirements for measurements in shallow water. Geneva: ISO.
- KHRAISAT, Qais Shehadeh – PERSSON, Martin – BENSOW, Rickard E. (2026): Cavitation Underwater Radiated Noise Methodology Applied to a Propeller Operating In-Behind Condition. *Ocean Engineering*, 349. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124084>
- KITA, Kristen R. – RANDENI, Supun – DIBIASO, Dino – SCHMIDT, Henrik (2022): Passive Acoustic Tracking of an Unmanned Underwater Vehicle Using Bearing-Doppler-Speed Measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 151(2), 1311–1324. Online: <https://doi.org/10.1121/10.0009568>
- KUPERMAN, William A. – LYNCH, James F. (2004): Shallow-Water Acoustics. *Physics Today*, 2004. október 1. Online: <https://doi.org/10.1063/1.1825269>
- LENIOWSKA, Lucyna (2008): Influence of Damping and Fluid Loading on the Plate Vibration Control. *Archives of Acoustics*, 33(4), 531–540. Online: <https://distantreader.org/stacks/journals/aa/aa-550.pdf>
- LIANG, Tengfei – WANG, Junpeng – XIAO, Jinyou – WEN, Lihua (2019): Coupled BE–FE Based Vibro-acoustic Modal Analysis and Frequency Sweep Using a Generalized Resolvent Sampling Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 345, 518–538. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.09.038>
- Massachusetts Institute of Technology (2009): *Basic Physics of Underwater Acoustics*. MIT OpenCourseWare 2.017J Design of Electromechanical Robotic Systems. Online: https://ocw.mit.edu/courses/2-017j-design-of-electromechanical-robotic-systems-fall-2009/9647b0bb5dbe2f570cb14fe0a4c58d0a_MIT2_017JF09_acoustics.pdf
- MOORE, Stephen (2019): Acoustic Signature Control on Maritime Platforms. In *Proceedings of Acoustics 2019: Sound Decisions – Moving Forward with Acoustics*. Australian Acoustical Society Annual Conference Cape Schanck Victoria Australia, 1–12. Online: https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2019/papers/p72.pdf
- National Physical Laboratory (2000): *Technical Guides – Speed of Sound in Sea-Water: Effects of Salinity Temperature and Pressure*. Online: https://www.comm-tec.com/library/technical_papers/speedsw.pdf
- ROBINSON, Stephen P. – LEPPER, Paul A. – HAZELWOOD, Richard A. (2014): *Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement*. NPL Good Practice Guide No. 133. National Physical Laboratory. Online: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/gpg133underwater.pdf>

- RODRIGO S., F. Javier et al. (2023): Analysis of the Underwater Radiated Noise Generated by Hull Vibrations of the Ships. *Sensors*, 23(2). Online: <https://doi.org/10.3390/s23021035>
- SEZEN, Savas – ATLAR, Mehmet (2022): Marine Propeller Underwater Radiated Noise Prediction with the FWH Acoustic Analogy Part 3: Assessment of Full-Scale Propeller Hydroacoustic Performance versus Sea Trial Data. *Ocean Engineering*, 266. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112712>
- SMITH, Tom A. – LA ROSA, Andrea G. – WOOD, Bill (2024): Underwater Radiated Noise from Small Craft in Shallow Water: Effects of Speed and Running Attitude. *Ocean Engineering*, 306. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118040>
- SMITH, Tom A. – RIGBY, Jake (2022): Underwater Radiated Noise from Marine Vessels: A Review of Noise Reduction Methods and Technology. *Ocean Engineering*, 266. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112863>
- SPENCE, Jesse et al. (2007): A Summerx of Existing and Future Potential Treatments for Reducing Underwater Sound from Oil and Gas Industry Activities (NCE Report 07-001). Noise Control Engineering, Inc. Online: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449420>
- VENKATESHWARAN, Akash – DEO, Indu K. – JAIMAN, Rajeev K. (2026): MUTE-DSS: A Digital-Twin-Based Decision Support System for Minimizing Underwater Radiated Noise in Ship Voyage Planning. *Ocean Engineering*, 343. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123343>

Rövidítésjegyzék és fontosabb fogalmak

URN – *underwater radiated noise*, víz alatti kisugárzott zaj
 FSI – *fluid–structure interaction*, folyadék–szerkezet kölcsönhatás
 FEM – *finite element method*, végelelemes módszer
 BEM – *boundary element method*, határelemes módszer
 CFD – *computational fluid dynamics*, számítógépes áramlástani szimuláció
 RANS/DES/LES – eltérő részletességű turbulenciamodellek
 FRF – *frequency response function*, frekvenciaátviteli függvény
 SPL – *sound pressure level*, hangnyomásszint
 CPA – *closest point of approach*, legkisebb megközelítési távolság
 Broadband validáció – szélessávú validáció, vagyis a modell és a mérés egyezésének vizsgálata nemcsak egyes tonális csúcsoknál, hanem a teljes szélessávú spektrum mentén is
 Workflow – munkafolyamat vagy számítási lánc
 High-fidelity modell – nagy részletességű, nagy számítási igényű modell