

Számítógépes teremakusztikai szimuláció hangtér optimalizáláshoz

Wersényi György
Széchenyi István Egyetem

Absztrakt

A teremakusztikai tervezés, utózungési idő számítása és a hangtér optimalizálása régóta a műszaki akusztika egyik nehéz feladata. Tekintettel arra, hogy bizonyos közelítésekkel a számítások egyszerűen és gyorsan gépesíthetők, mára többféle számítógépes tervező program segíthet bennünket. Ez a cikk bemutatja, hogy a CARA (Computer Aided Room Acoustics) program segítségével miként lehet tetszőleges termeket, azok berendezési tárgyait CAD módszerrel megépíteni, és az ismert formulák segítségével számításokat végezni az utózungési időre, visszaverődésekre, hangnyomástérképekre. Továbbá segítségével optimalizálhatjuk a terem kiépítését, a hangsugárzók és a lehallgatási pozíciók elhelyezését. A vizsgálat aktualitása a Széchenyi István Egyetem új, D1-es jelű felújított nagyelőadójának átadása, a hangosítás vizsgálata. Egy másik példán röviden egy lakószoba házimozi optimalizálását láthatjuk.

Abstract

Room design, reverberation time calculations and sound field optimization are the most important tasks in room acoustics. Using simple geometric calculations and some restrictions these tasks are optimal for computer design (CAD applications). The CARA (Computer Aided Room Acoustics) software is able to handle various types of rooms and textures, 3D objects, it calculates reverberation time, sound pressure levels and even optimizes room layouts, loudspeaker and listener positions. Our demonstration is based on the newly designed and reconstructed D1 lecture room at the Széchenyi István University. Furthermore, some results are shown for an optimized 5.1 home theater system in a normal living room.

Kulcsszavak: teremakusztika, CARA, CAD, utózungés, hangtéroptimalizáció.

Keywords: room acoustics, CARA, CAD, reverberation, sound field optimization.

1. BEVEZETÉS

Egy terem akusztikai kialakítása, hangosítása vagy éppen hangszigetelése és a „mi szól jól?” kérdések megválaszolása nehéz feladat. Léteznek objektíven vizsgálható, mérhető paraméterek, mint pld. a hangnyomás(szint) és annak eloszlása, az utózengési idő, a terem módusai és az esetleges állóhullámok kialakulása. Ezek gyakran azonban másodlagosak a szubjektív élvezet szempontjából és csak becslést, közelítő értékeket adnak, iránymutatást tudnak nyújtani a tervezéshez, átalakításhoz [1, 2]. A paraméterek kiszámításához azonban a geometriai akusztika, amely tulajdonképpen a geometria optika számításait használja fel, segítségünkre lehet. Hasonlóan, végeelem-, peremelem módszerek, nagy számításigényű hangtérleírások egyre pontosabban szimulálják számunkra a „hallanivalót”. Mára a számításigény kielégíthető a számítógépekkel, egyszerű de nagy mennyiségű számolások rábízhatóak a szoftverekre. Nem várjuk el, hogy pontosan megmondják nekünk, mit hova és hogyan kell elhelyezni, de útmutatást adhatnak a helyes kialakításhoz. E szimulációk sikeressége pedig jórészt a felhasznált modellek pontosságán múlik.

A piacon többféle akusztikai tervezőprogram is létezik. A legismertebb a CATT programcsomag [3]. A kevésbé ismertek közé tartozik az itt is bemutatásra kerülő német fejlesztésű CARA (Computer Aided Room Acoustics) [4]. Az interneten elérhető, megrendelhető, ára is gazdaságos. Lehetőséget biztosít a termék létrehozására és berendezési tárgyainak megtervezésére ismerős CAD felületen. Hasonló elveken tetszőleges hangsugárzókat is megépíthetünk, ha nem elégséges a hozzá kapott adatbázis. A kettő együttes ismeretében a program először analizálja nekünk a termet és annak utózengési idejét az ismert formulás segítségével. Majd a hangszórók és a hallgatók elhelyezésével optimalizálási stratégiákat dolgoz ki a jobb hangzás (egyenletesebb eloszlás) érdekében. Utóbbiak gyakran nem egyértelműek, néha több megoldást is kapunk, melyeket aztán saját szubjektív ízlésünk szerint szelektálhatunk.

Ebben a cikkben bemutatásra kerül a program néhány alapfunkciója, a győri egyetem felújított előadója és egy otthoni nappali szoba példáján keresztül.

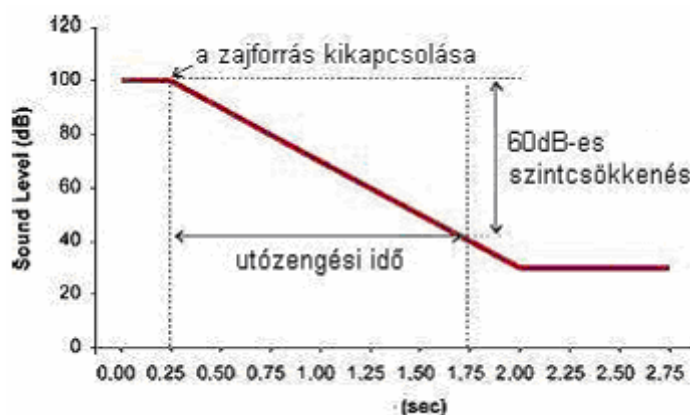
2. A GEOMETRIAI AKUSZTIKA SZÁMÍTÁSAI

A geometriai hullámterjedés az optikából ismeretes. Az a tény, hogy használhatjuk-e az ismert optikai törvényeket (pld. a Snellius-Descartes, töréstörvények, elnyelés és visszaverődés, tükörforrások elve stb.), attól függ, mekkora a hullámhossz. Megfelelő frekvenciatartományban jó közelítésekkel számolhatunk, ha a fenti törvényeket alkalmazzuk. Ha a hullámhossz jóval kisebb a fal felületénél, a beesési- és visszaverődési szögekre, a hangutak kiszámításához alkalmazhatók a fénytörési törvények (pld. beesési szög = visszavert szög). Röviden bemutatjuk mely paraméterek azok, amelyeket papíron vagy számítógép segítségével meghatározhatunk.

2.1 Utózengési idő

Az utózengési idő definíció szerint az az időtartam, amely alatt a terembe betáplált és állandó szinten tartott hangteljesítmény a hang megszűnése után 60 dB-el esik [5]. Kétféle elterjedt mérési módszere van. A nehezebb, amikor a definíció szerint mérünk és egy hangforrás (jellemzően fehér zajszerű, ún. referencia hangforrás, nagy, állandó teljesítménnyel)

kikapcsolása után vizsgáljuk az eredményt. A másik gyakoribb módszer az impulzusválasz vizsgálata, amikor a terem nagy teljesítményű impulzussal gerjesztjük (riasztópisztoly, lufi durrantása). A méréseinket általában valamilyen műszer segíti, a modern kézi zajanalizátorok nem csupán zajszintet mérnek, hanem többek között az utózengési időt is meghatározzák.



1. ábra. Az utózengési idő szemléltetése.

Az utózengési idő frekvenciafüggő. Teli koncerttermek esetén az 1,8 – 2,5 mp is elfogadható középfrekvenciákon [6]. Jellemzően templomokban 5 - 8, koncerttermekben 1,5 - 2,2, színházakban 1,0 - 1,5, stúdiókban 0,2 - 0,6, süketsobákban pedig kisebb mint 0,05 másodperc az utózengési vagy lecsengési idő. Az utózengési időből jól lehet következtetni a terem méretére, „zengésére”, beszédakusztikai tulajdonságaira.

Az utózengési időt ismert közelítő formulából számítással is megbecsülhetjük [5, 7]. Nem túl kicsi utózengési idő (τ) esetén a *Sabine*-formula az alábbi:

$$\tau = \frac{0,161V}{A} \quad (1)$$

Ahol az utózengési időt sec-ban kapjuk meg, ha V -t köbméterben, A -t négyzetméterben helyettesítjük, a 0,161-es konstansnak pedig [s/m] a dimenziója. Az A itt nem a felületet jelenti közvetlenül, hanem az abszorpciót:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i \quad (2)$$

Ebben a képletben az S változó már ténylegesen egy adott felületet jelent négyzetméterben, a hozzátartozó elnyelési tényezővel (alfa). Az elnyelési tényező általában adott, táblázatból kikereshető [8, 9]. Gyakorlatilag arról van szó, hogy a különböző anyagú felületeket súlyozzuk. Így ha van egy betonszoba adott felülettel és alfával, akkor az azon nyitott faajtó felületét is a fa alfájával kell súlyozni. Alfa mérhető is, és számolható is, ráadásul frekvenciafüggő.

Ez a képlet nagy utózengési időknél használatos, és egyenletes terjedést feltételez minden irányban (izotróp), a terem módusait elhanyagolva. Nagyobb A és egyre kisebb τ esetén az eredmény egyre pontatlanabb lesz. Kisebb τ esetén a másik használatos képlet az *Eyring*-formula:

$$\tau = \frac{0,161V}{S \ln(1 - \alpha)} \quad (3)$$

ahol egy átlagos alféval dolgozunk:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i}{S_1 + S_2 + \dots + S_i} \quad (4)$$

és

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_i \quad (5)$$

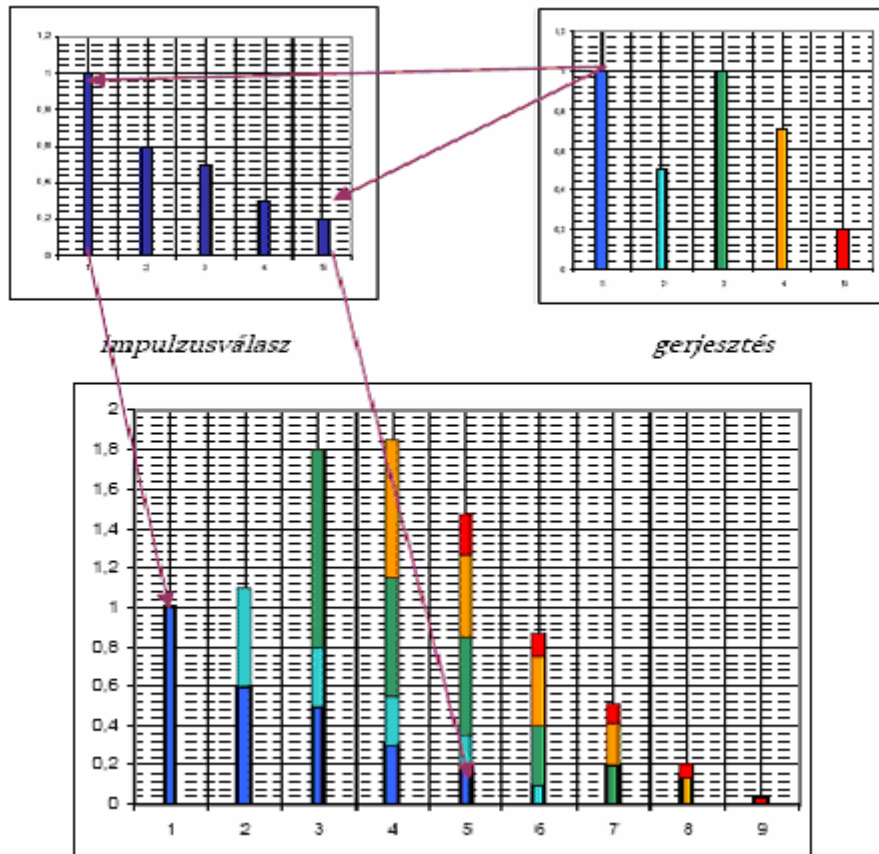
Akkor a legpontosabb ez a formula, ha az α -k kb. egyelők (hátrány), ugyanakkor matematikailag korrektebb, mert süketszobára, ahol alfa értéke egy, τ -ra zérus jön ki.

Ezekhez a számításokhoz csak a terem geometriai méreteire, és anyagára van szükség. Az anyagok felületének és elnyelési tényezőjének ismeretében (utóbbiakat táblázatból kiolvashatjuk), viszonylag egyszerű módon számolhatunk. Ebben a számítógép sokat segíthet.

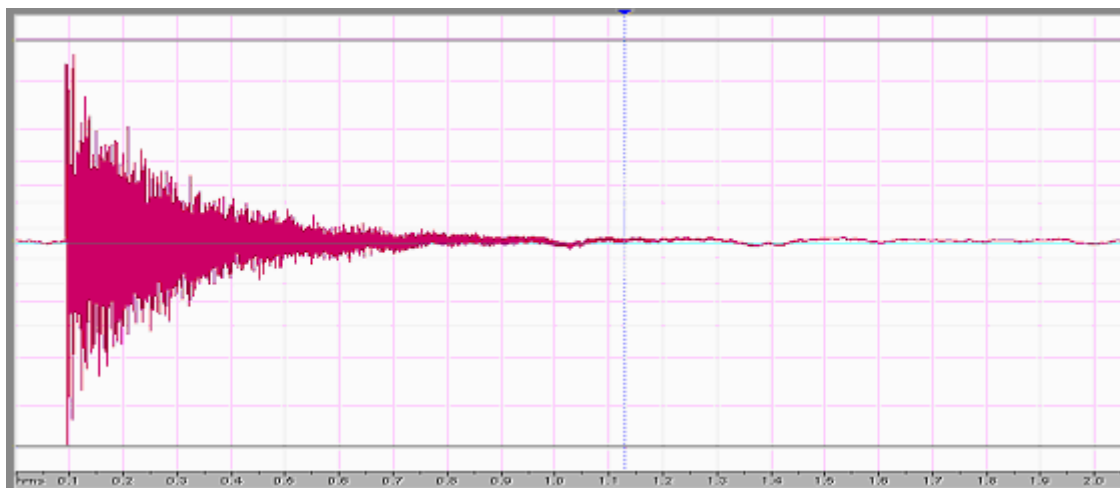
2.2 Echogram és a terem impulzusválasza

A terem választ egyszerűen meghatározhatjuk az impulzusválaszával. Az impulzusválasz rendszerleíró függvény, és mint ilyen, az időtartományban teljes egészében hordozza az adott rendszer átviteli tulajdonságait. Egyszerűen, gyorsan mérhető, hátránya, hogy általában kis energiájú (rossz jel-zaj viszonyú), különösen mélyfrekvencián nehéz egy teremmet gerjeszteni. Villamosságтанból tudjuk, hogy az impulzusválasz Fourier-transzformáltja a komplex átviteli függvény, melyet könnyedén meghatározhatunk. Korábban a számításigény miatt az időtartománybeli manipuláció nem volt lehetséges. Ezért a frekvenciatartománybeli szorzással, és FFT, IFFT algoritmusokkal gyorsítottuk a folyamatokat. Manapság az időtartománybeli konvolúciónak nincs különösebb akadálya, így az impulzusválasz az egyik legfontosabb leíró függvényünk lett. Nincs más dolgunk, mint egy wave fájlban rögzített impulzusválaszt a megfelelő szoftver segítségével egy mono stúdiófelvétellel konvolválni, és végeredményünk olyan lesz, mintha az eredeti mono stúdiófelvétel az adott teremben szólna. A konvolúciós integrál alakja az alábbi:

$$f * g = \int_0^t f(t - \tau)g(\tau)d\tau \quad (6)$$



2. ábra. A konvolúció hatása egy impulzusválasz és gerjesztés esetén.



3. ábra. A későbbiekben bemutatott D1-es terem impulzusválasza.

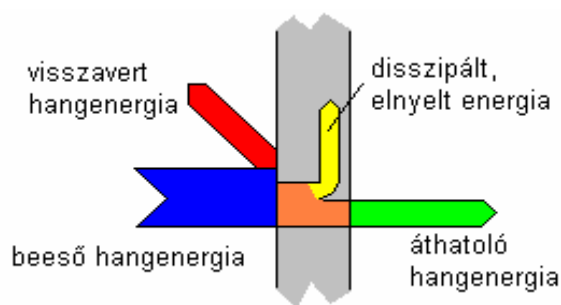
Ehhez segítséget nyújtanak speciális programok, mint pld. az Altiverb [10] vagy az Adobe Audition, de MATLAB alatt is egyszerűen elvégezhető a művelet. Az így megmért teremátviteli függvényt tehát sok mindenre felhasználhatjuk (angol elnevezéssel Room Impulse Response (RIR)). A CARA program ezt is megteszi számunkra. Az echogram tulajdonképpen egy terem impulzusának és a visszaverődéseknek a lekövetése az időtartományban.



4. ábra. Stilizált echogram.

2.3 Refrakció, diffrakció, reflexió

A hang terjedése során többféle hatásnak van kitéve. Ezek súlya attól függ, mekkora az akadály vagy lyuk mérete a hullámhosszhoz képest. A hang beeséskor jórészt visszaverődik, reflektálódik. Egy másik része elnyelődik, amely egyrészt kis mértékben hő formájában felszabadul, egy másik része pedig megmozgatva az akadályt átjut és ismételtlen lesugárzódik.



5. ábra. A beeső hangenergia útjai.

A hanghullámok mellett elhajlási jelenségeket is mutatnak, valamint szóródnak és árnyékba hatolnak. Egy adott hangterjedés esetén ezek szerepe és fontossága a frekvencia függvényében változik. Ne feledjük, hogy a hanghullámok a néhány centimétertől akár 17 méteres hullámhosszig is terjedhetnek. A mélyfrekvenciák lesugárzása, csillapítása, iránytól függő érzékelése lényegesen nehezebb probléma, mint a magasabb frekvenciáké.

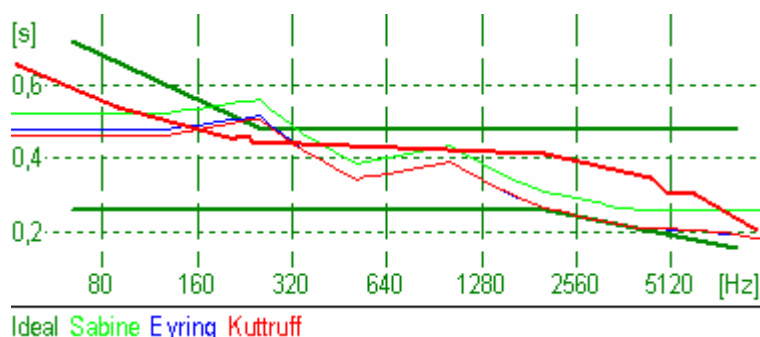
2.4 Egyéb paraméterek

Néhány a fentiekkel rokon, azokból származtatható paraméterek is segíthetik munkánkat. Az EDT (Early Decay Time) az első 10 dB eséshez tartozó idő. Ajánlatos, hogy ennek átlaga haladjon meg a utózengési idő átlagát nagyszámú emberrel telített termekben. Olyan paraméterek, mint a tisztaság (Clarity, C_{80}), vagy a 'Lateral Efficiency' (LE) a szoftverek segítségével meghatározhatók.

3. A SZÁMÍTÓGÉPES SZOFTVER

A CARA lehetővé teszi a fenti paraméterek szimuláción történő becslését, meghatározását. Ennek első lépéseként a terem kialakítását, felépítését (room design) kell létrehoznunk. Ezután van lehetőségünk az akusztikai számításokra (room acoustics calculations); az eredmények 2D és 3D ábrázolására (presentation of results); valamint a hangszugárzó tervező modul kihasználására (loudspeakers).

A tervezés első lépéseként a CARACAD-ben kell a termék létrehozni. Ebbe beletartozik a geometriai méret és alak, a falak, padlók, ajtók, ablakok burkolása és a berendezési tárgyak elhelyezése. A tervezés centiméteres pontosságú. Itt lehet megadni a kívánt térhangzást is a sztereótól a 8.1-es rendszerekig, a hangszugárzók fajtáját, méretét, elhelyezkedését. A nagyobb gyártók termékei megtalálhatóak egy adatbázisban (mely az internetről frissíthető is), a hiányzókat pedig magunk létrehozhatjuk és elmenthetjük.



6. ábra. Toleranciasémába illő ill. nem illő utózengési idő diagramok.

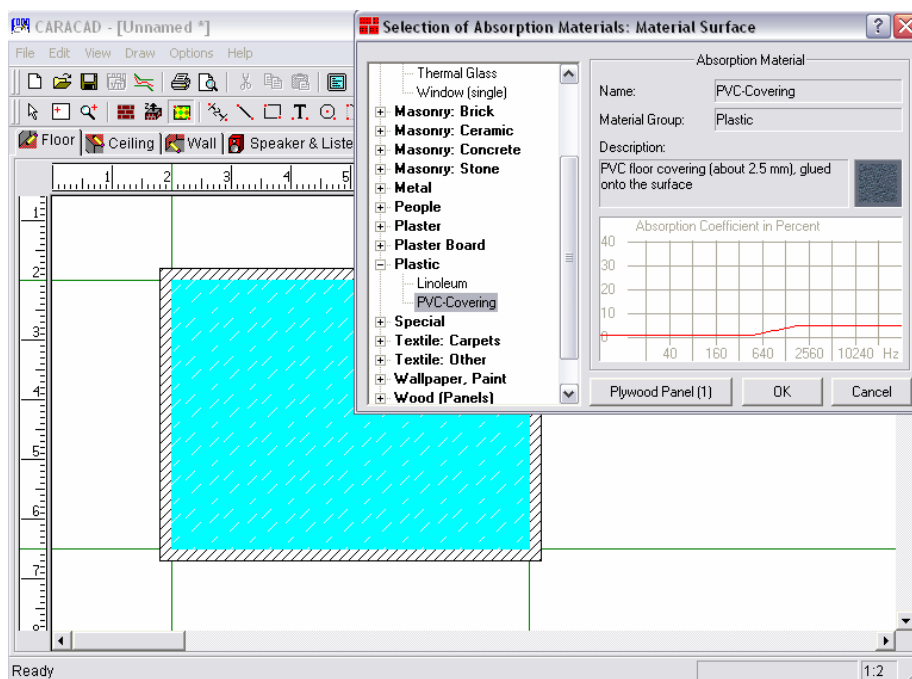
A tervezés után akusztikai ellenőrzést kell végeznünk (acoustic ambience), mely az idő- és frekvenciaviszonyokat bemutató kiszámítja és megjeleníti a toleranciasémát és a terem tulajdonságait (utózengési idők, reflexiók, elnyelődések).

Az akusztikai kalkuláció során a terem több ezer rácspontra lesz felosztva. Meghatározásra kerül az optimális hangszugárzó elhelyezés a lehallgatási pont(ok) függvényében, néha több javaslat is előkerül. Az eredményeket 2D vagy 3D ábrázolásban is megtekinthetjük, bejárhatjuk.

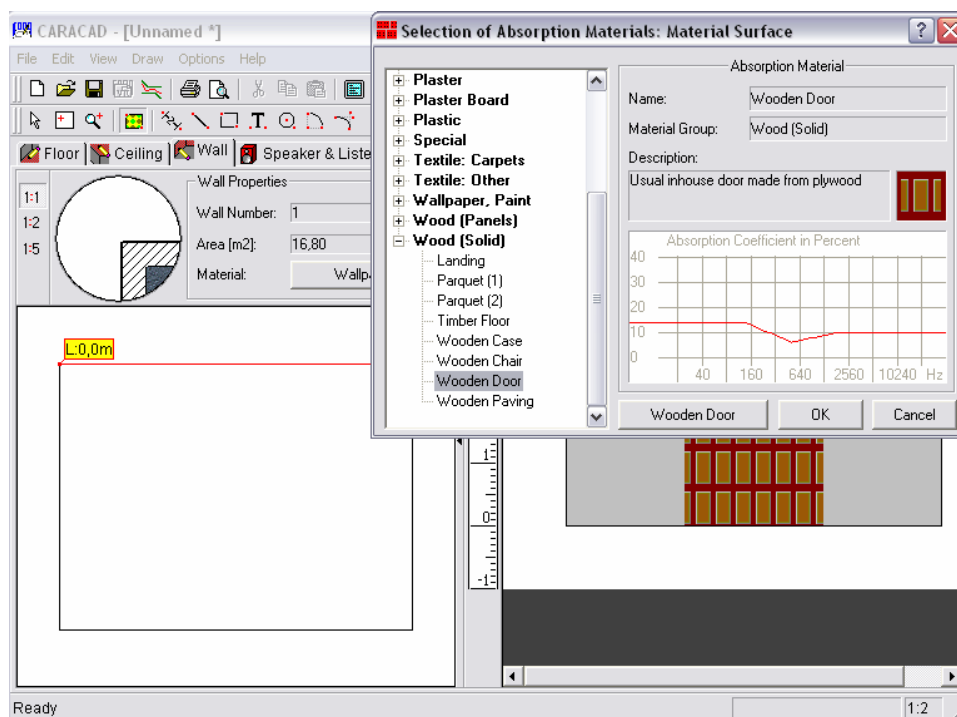
3.1 A D1 előadó

A D1-es előadó a győri egyetemen a legnagyobb, falai vasbeton szerkezetűek. A terem teljes falterülete légrésekkel ellátott gipszkarton lemezzel van borítva, ami hang- és hőszigetelő. A mennyezet is a lámpák között ilyen szigetelő lapokkal van kitöltve. A terem lejtős, alján található két darab fa ajtó a tábla két oldalán. Fent a bejáratú dupla ajtó is fa. A padló borítása 8 mm-es PVC szőnyeg.

A CARACAD-ben téglalap alapsémából kiindulva építhetjük fel a termet. Megadhatjuk a padló anyagát (plastic, PVC covering), a falak kialakítását, a plafon burkolatát. A teremben ablak nem található, csak ajtókat és egy táblát kell elhelyezni (wooden door, video screen).

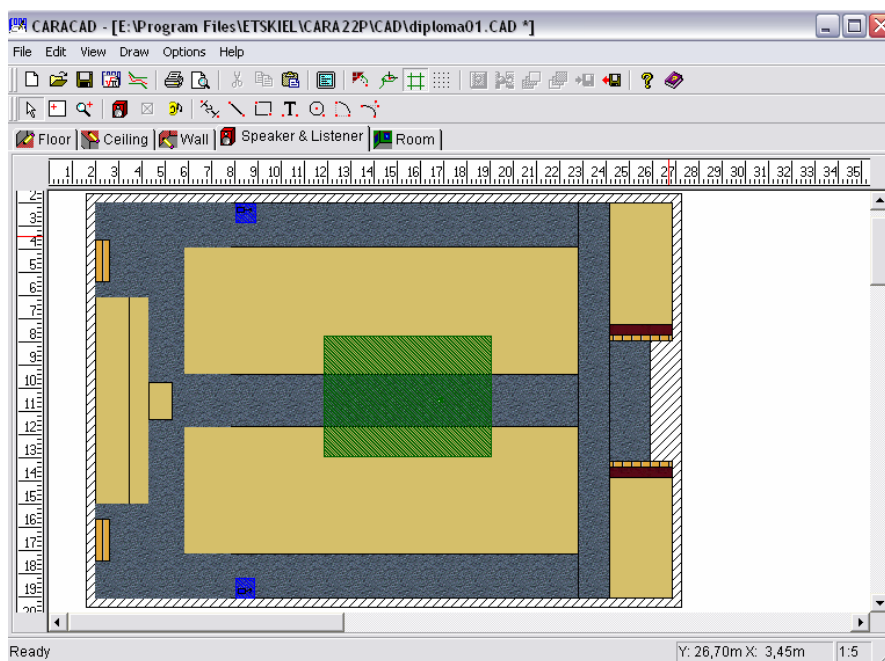


7. ábra. A padló virtuális beborítása PVC-vel és annak elnyelési görbéje a frekvencia függvényében.

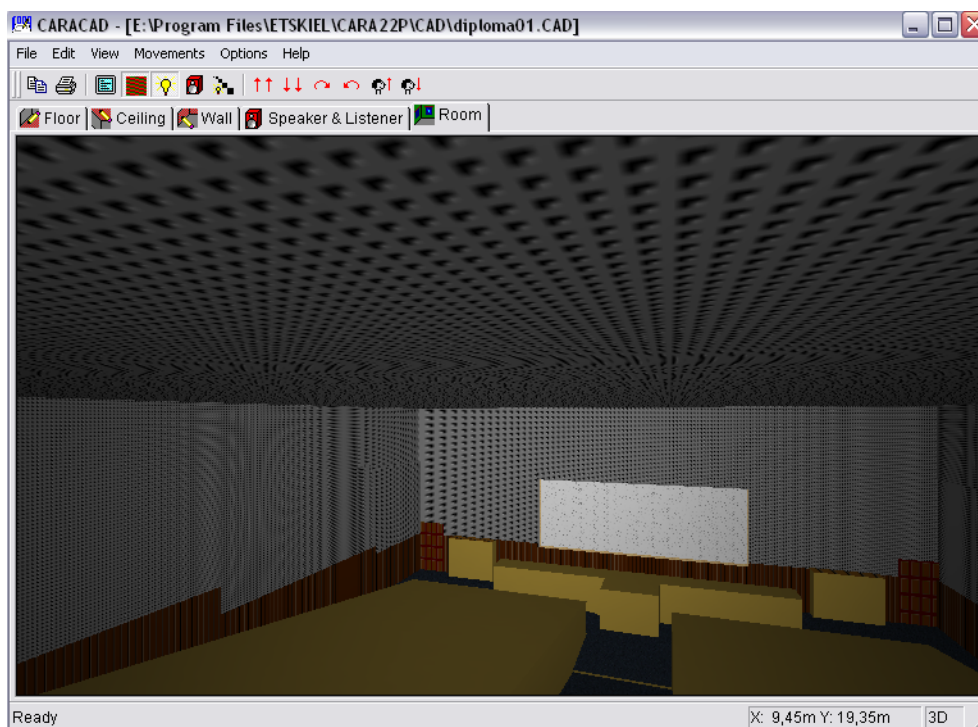


8. ábra. Faajtók elhelyezése és elnyelési tényezője.

A tanári asztal, padosorok és radiátorok, mint 3D objektumok kerülnek be a modellbe. Ha ezek nem találhatók meg a sémában, kénytelenek vagyunk megépíteni őket a méretük alapján. A padok, mivel nem négyszögletesek, egyben a székekkel kerültek megtervezésre (fából). Ilyen jellegű termeknél a fa padok és székek helyett „emberrel” is boríthatjuk a felületet, magyarul vizsgálhatjuk az üres ill. az emberekkel teli környezetet is.



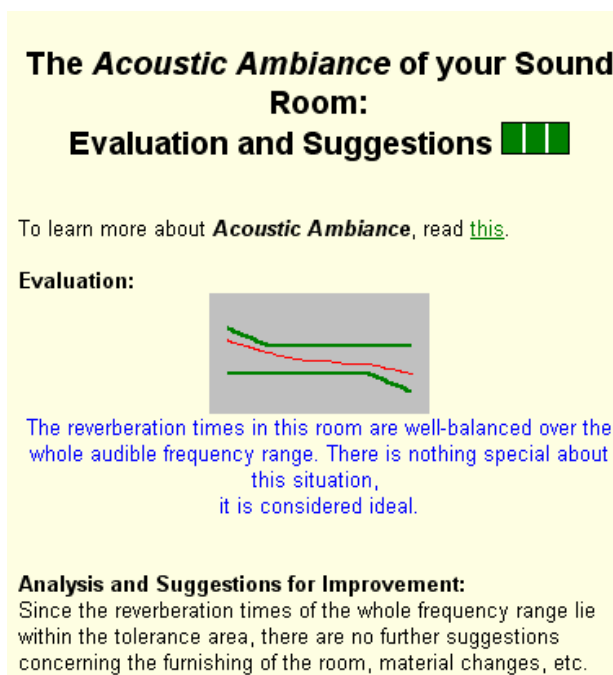
9. ábra. A kész terem 2D felülnézeti képe. Bal oldalon a katedra és a két faajtó. Középen a két nagy padsor, zölddel egy lehetséges lehallgatási zóna. Kékkel két hangszóró az oldalfalakon, a jobb oldalon a terem kijárata és még két padsor.



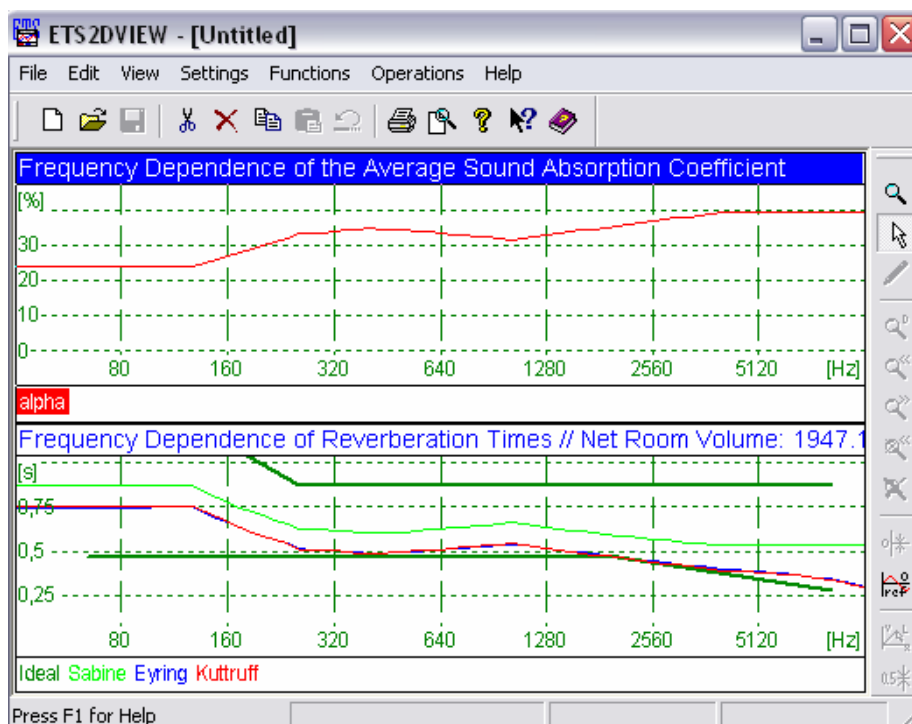
10. ábra. A kész terem 3D nézeti képe textúrázva. A hátsó sorokból látható a tanári asztal, a tábla és az ajtók. A padsorok egybefüggő fafelületűek.

Az akusztikai vizsgálat során az így kialakított termet vizsgálja a program. Ahogy az ábrán is látszik, elégedett az eredménnyel. Ezt a következtetést az utózengési idő és az átlagos

elnyelési tényező ismeretében vonta le. Természetesen, ha a modellünk nem jó vagy nem elég pontos, az eredmények hibásak is lehetnek. Ilyen esetben célszerű méréssel ellenőrizni azokat.

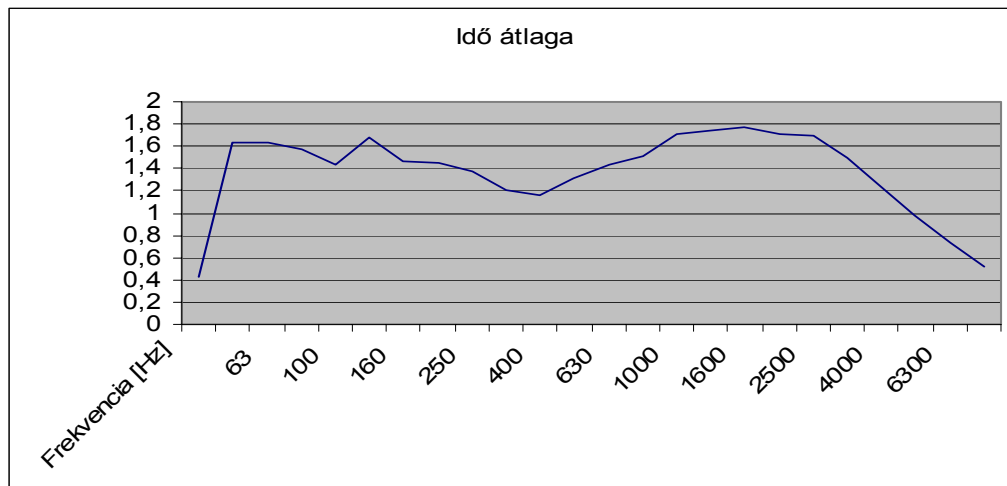


11. ábra. Az akusztikai vizsgálat eredménye.



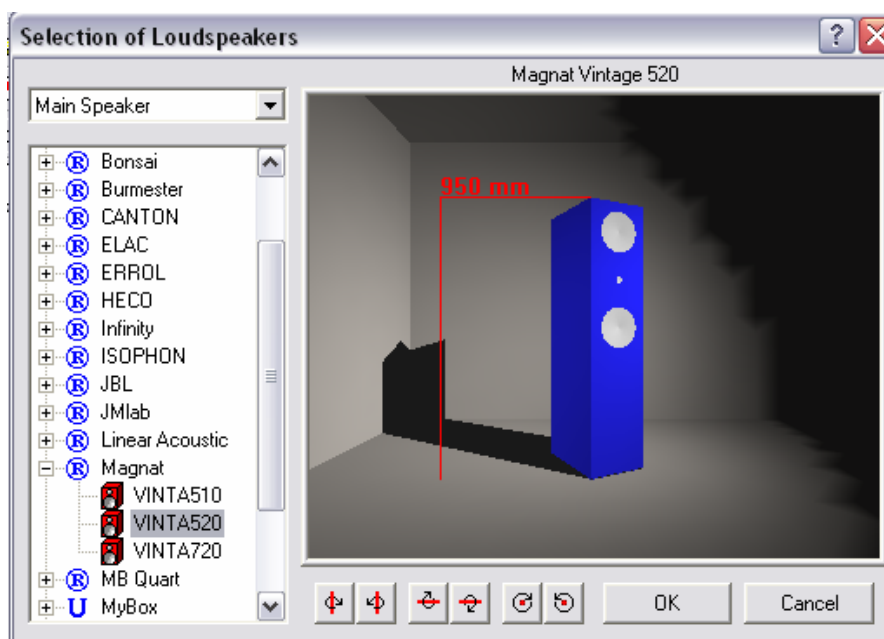
12. ábra. Felül az átlagos elnyelési tényező, alul az utózengési idő frekvenciafüggése a modell alapján számolva.

Az utózengési idő gyanúsán alacsony értékű, méréssel ellenőrizve – különösen mélyfrekvencián – nagy eltérést tapasztalunk. Ennek oka az elégtelenül felépített modell lehet.



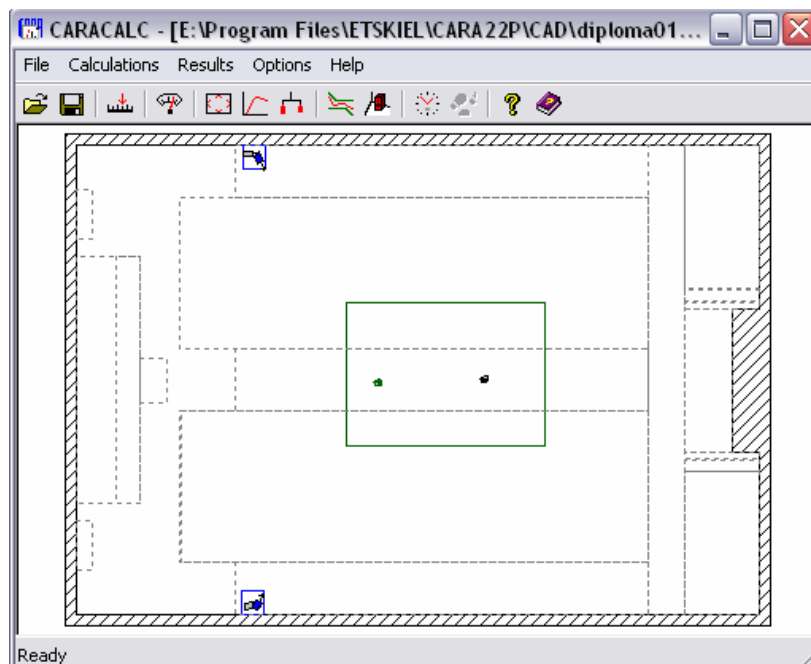
13. ábra. Az utózengési idő mérése, Brüel Kjaer 2260-as analízátorral, lufi durrantásos módszerrel.

A hangsugárzók kiválasztása történhet a meglévő listából, vagy magunk is megszerkeszthetjük őket.



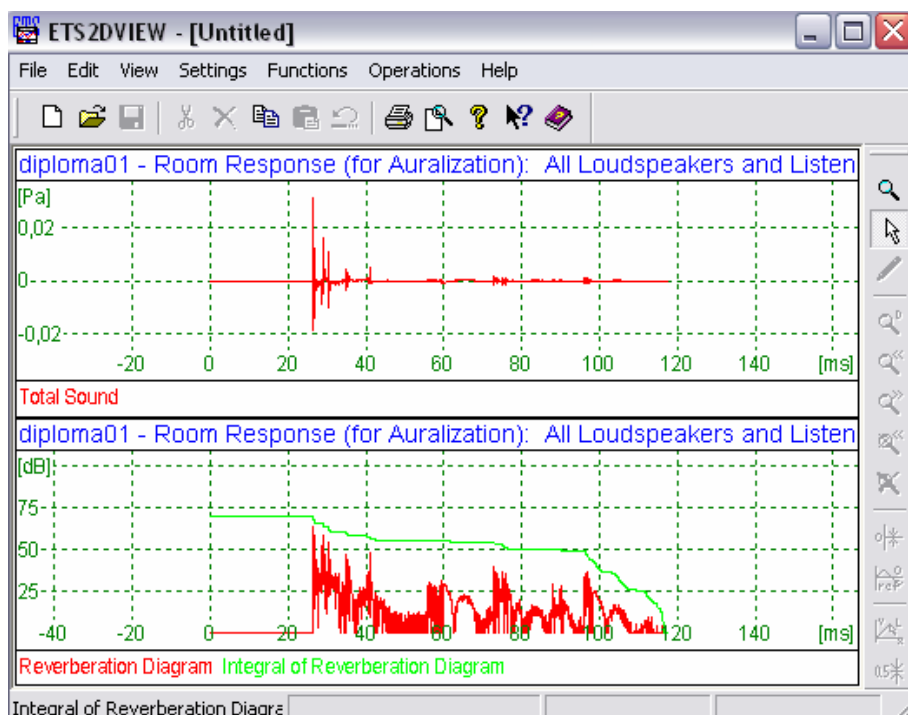
14. ábra. Magnet hangsugárzó a listából kiválasztva.

A továbbiakban a CARACALC segítségével optimalizáljuk a termet, elsősorban a hangsugárzók elhelyezése és irányítottsága a kérdés. A program futása során több ezer lehetséges pozíciót próbál ki, és általában 12-16 optimális javaslattal áll elő.

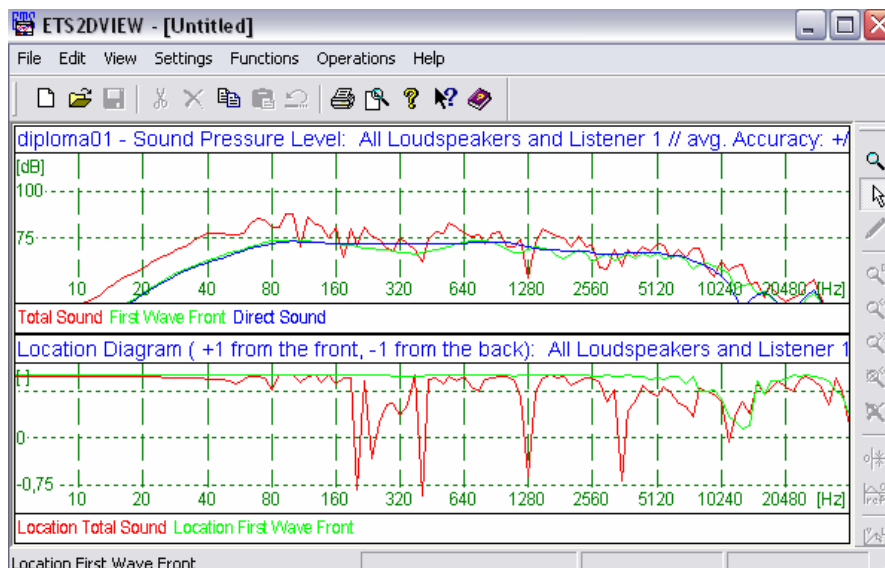


15. ábra. Az új hangsugárzó elhelyezés (kékkel) és a hallgató helye a zónán belül. A hangszórókhoz közeli hallgatási pont a legjobb.

A program lehetőséget nyújt auralizációra is [11]. Lehet az összes hangsugárzóval egyszerre vagy egyesével is a szimulációt létrehozni. Wave fájlba elmenthető a terem szimulált impulzusválasza, mellyel tetszőlegesen betöltött hangmintát, zenét színezhünk. Egy utasítással összehasonlíthatjuk a hangzást optimalizálás előtt és után.

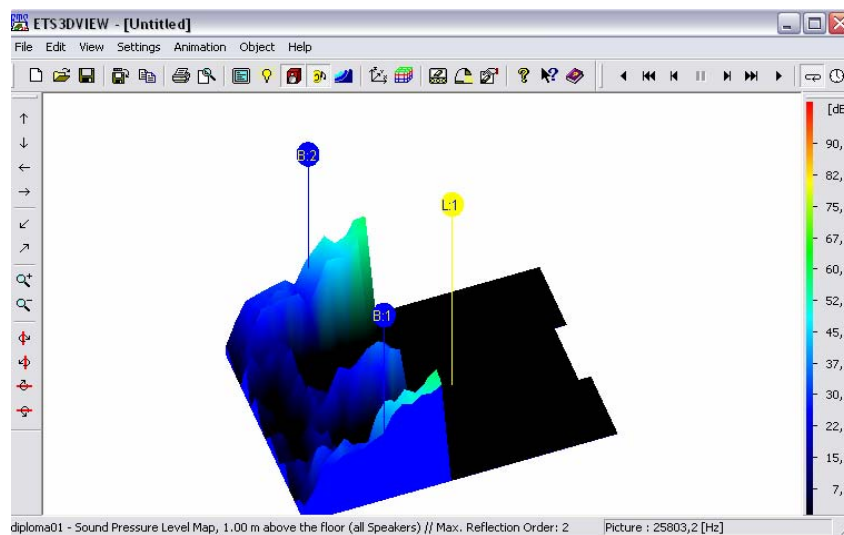
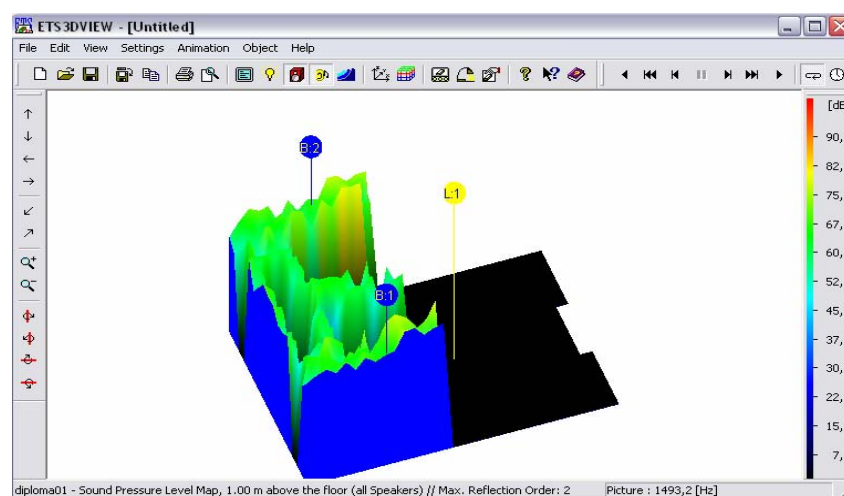
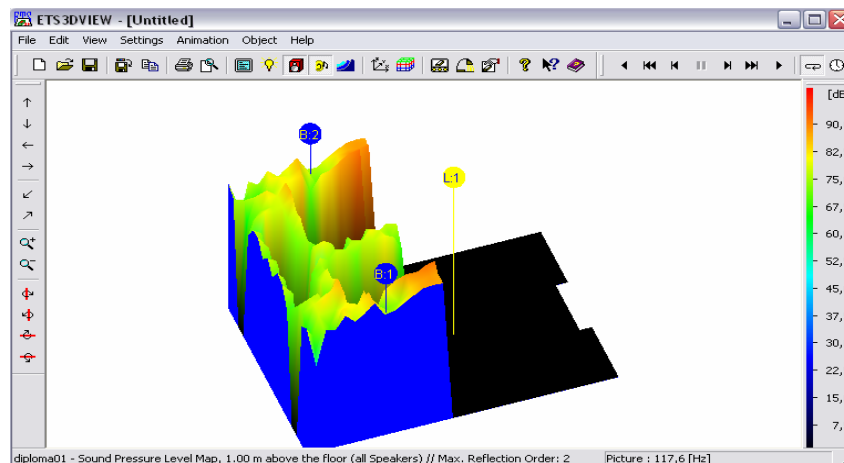


16. ábra. A terem válaszfüggvényei. Fent az impulzusválasz, alul az echogram.



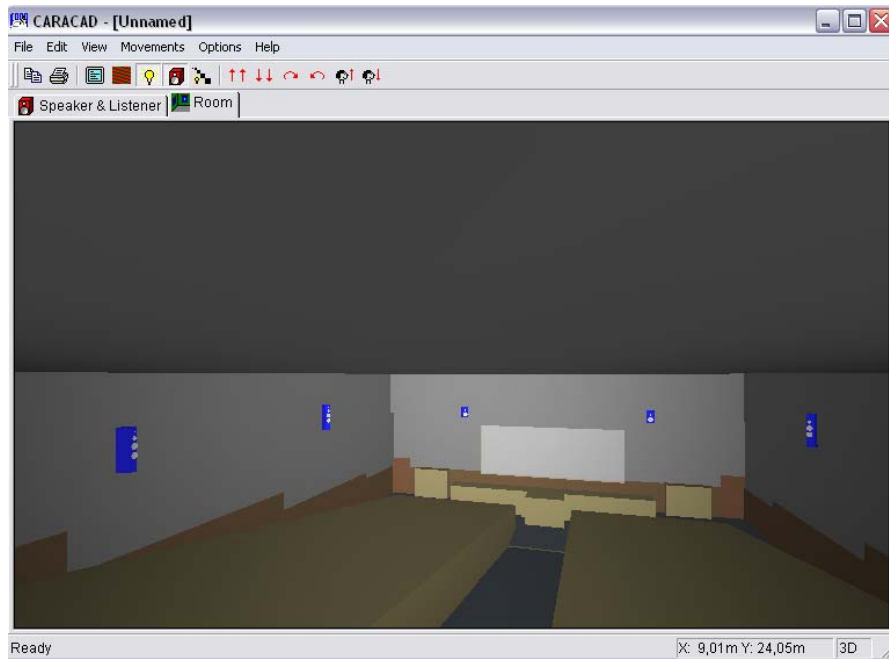
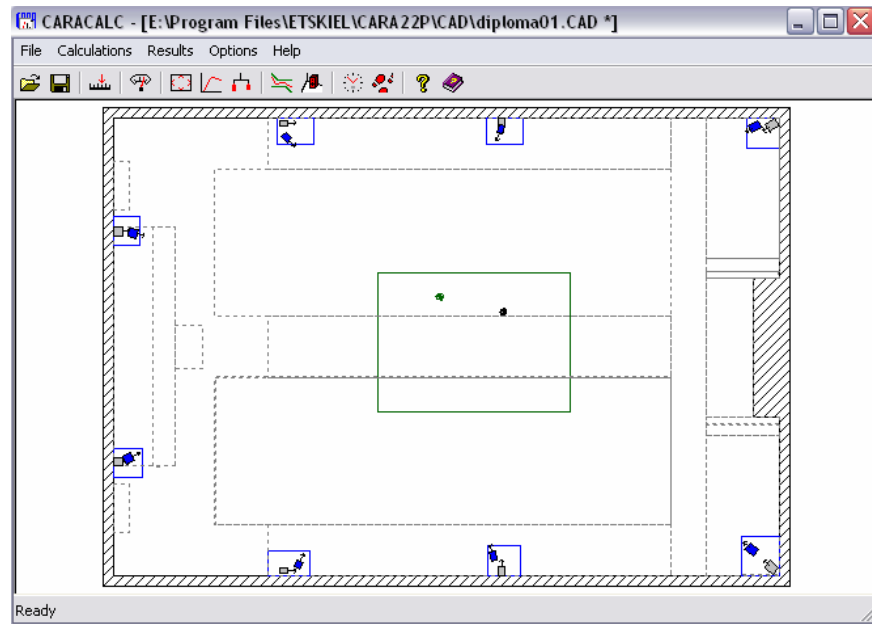
17. ábra. A hangnyomásszint frekvenciafüggése a lehallgatási pozícióban az összes hangsugárzó működése esetén, valamint az ún. hely-diagram, mely a teljes hang ill. az első hullámfront elhelyezkedését mutatja (+1 szemből, -1 hátulról).

A program ezen túl színes, mozgó 3D ábrákkal szemlélteti a frekvenciában vagy az időben történő hangnyomásszint ingadozásokat. Ezzel eloszlástérképeket és káros állóhullámokat kereshetünk. A mozgó ábráktól itt el kell tekintenünk, de néhány jellemző ábrát bemutatunk.



18. ábra. 117 Hz, 1500 Hz és 25000 Hz-es kialakult hangnyomásszint eloszlás a teremben.
Kékkel a hangsugárzók, sárgával a hallgató.

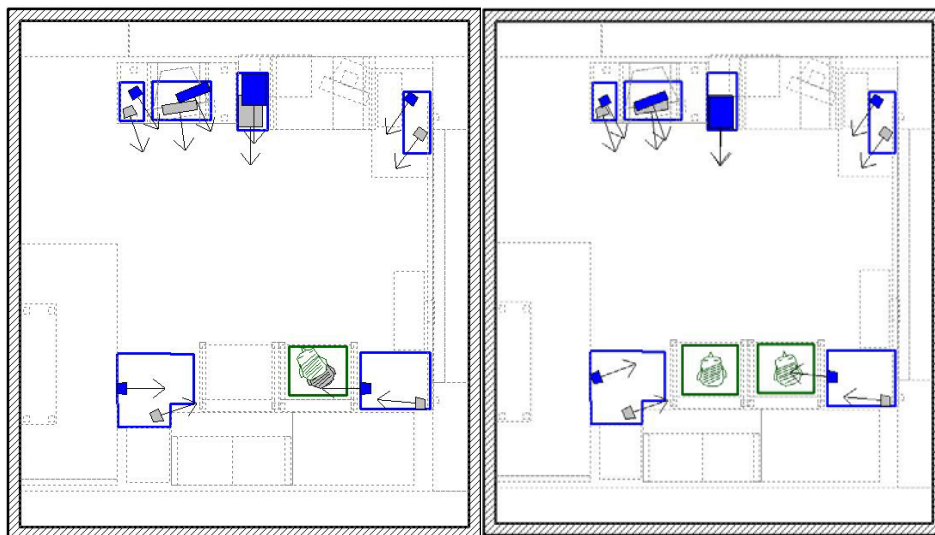
Hasonlóan, rögzített frekvencia mellett az időbeni hullámterjedést is felrajzoltathatjuk. Végezetül két ábra egy optimalizált, nyolchangszórós elrendezésre 2D-ben és 3D-ben ugyanazon terem számára.



19. ábra. Nyolc hangszóróra optimalizált terem 2D és 3D ábrázolása.

3.2 Otthoni lakószoba

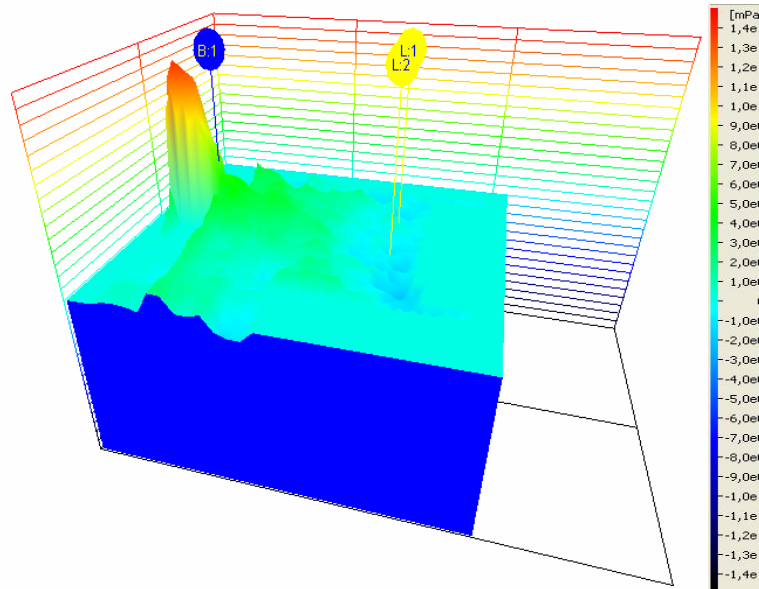
Ebben a rövid példában egy otthoni nappali házimozsi hangrendszer vizsgálatát láthatjuk. A 20. ábra bal és jobb oldalán az 5.1 elrendezés optimalizált javaslat látható egy hallgató ill. két hallgató esetén. Lejjebb a 3D megjelenítés azok elhelyezésére, illetve az 50 Hz-es mélyhang eloszlása a mélynyomó (subwoofer) környezetében.



20. ábra. Egy ill. két hallgatóra optimalizált elrendezés.



21. ábra. 3D megjelenítés.



22. ábra. 50 Hz-en a maximális hangnyomásszint eloszlás a mélynyomó által kibocsátva.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A teremakusztikai tervezés számítógépes lehetőségei közül bemutatásra került egy költséghatékony, jól használható szoftveres megoldás. A program képes az alapvető akusztikai paraméterek becslésére, számítására, látványos 2D és 3D megjelenítésére. A győri egyetem előadójának szimulációja rámutatott a modell pontosságának és a szimulációk mérésel történő ellenőrzésének fontosságára. Ugyanakkor látható, hogy a mai számítási kapacitás lehetővé teszi az akusztikai tervezés és hangtérkialakítás alapvető lépéseinek felgyorsítását és vizualizálását. Segítségével képet kaphatunk a terem hangképéről, követhetjük a javaslatokat és az optimalizálási stratégiákhoz ötleteket meríthetünk. A végső szót úgyis a hallgató, a tesztalany, a nézősereg hozza meg szubjektív benyomásai alapján.

5. IRODALOM

- [1] Tarnóczy T: Hangnyomás, hangosság, zajosság. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1984.
- [2] Tarnóczy T: Teremakusztika I-II. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1986.
- [3] <http://www.catt.se/>
- [4] <http://www.cara.de/>
- [5] Wersényi Gy: Műszaki Akusztika, egyetemi jegyzet, 2004.
- [6] Kotschy A.: Egy hangversenysterem akusztikai tervezése – tervezett és kész állapot. Akusztikai Szemle, VI. évf., 2. szám, pp. 19-21, 2005.
- [7] Tarnóczy T: Akusztikai tervezés I-II. Akadémiai kiadó, Budapest, 1986.
- [8] <http://www.isover.hu/termekeink/owa/owacoustic/hangelnyeles.html>
- [9] <http://www.isover.hu/acoustic/absorption/acoustics/contentframe.html>
- [10] <http://www.audioease.com/Pages/Altiverb/AltiverbMain.html>
- [11] M. Kleiner, B. I. Dalenbäck, P. Svensson: Auralization – an overview. J. Audio Eng. Soc. Vol 41, pp. 861-875, 1993.