

# Számítógépes teremakusztikai szimuláció hangtér optimalizálásához

WERSÉNYI GYÖRGY

Széchenyi István Egyetem, Távközlési Tanszék  
wersenyi@sze.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** teremakusztika, CARA, CAD, utözengés, hangtéroptimalizáció

A teremakusztikai tervezés, utözengési idő számítása és a hangtér optimalizálása régóta a műszaki akusztika egyik nehéz feladata. Tekintettel arra, hogy bizonyos közelítésekkel e számítások egyszerűen és gyorsan gépesíthetők, mára többféle számítógépes tervező program segíthet bennünket. 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 utözengési időre, visszaverődésekre, hangnyomástérképekre. 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 lakószobai házimozsi optimalizálását láthatjuk.

## 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 például a hangnyomás (szint) és annak eloszlása, az utözengési idő, a terem módusai és az esetleges állóhullámok kialakulása. Ezek gyakran azonban másodlagosak a szubjektív élvezet szempontjából és csak becslést, közelítő értéket adnak, illetve iránymutatást tudnak nyújtani a tervezéshez, átalakításhoz [1,2]. A paraméterek kiszámításához azonban segítségünkre lehet a geometriai akusztika, amely tulajdonképpen a geometria optika számításait használja fel. Hasonlóan, végelem-, peremelem módszerek, nagy számításigényű hangtérleírások egyre pontosabban szimulálják számunkra a „hallanivalót”. Mára a számításigény kielégíthető a számítógépekkel, egyszerű, de nagy mennyiségű számolások rábizhatóak 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. Legismertebb közülük 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 utözengési idejét az ismert formulák segítségével. Majd a hangszórók és a hallgatók elhelyezésével optimalizá-

lasi 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.

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 (Snellius-Descartes, töréstörvények, elnyelés és visszaverődés, tükröforrások 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 (például beesési szög = visszavert szög). Röviden bemutatjuk, mely paraméterek azok, amelyeket papíron vagy számítógép segítségével meghatározhatunk.

### 2.1. Utözengési idő

Az utözengési 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, úgynevezett referencia-hangforrás, nagy, állandó teljesítménnyel) ki kapcsolása után vizsgáljuk az eredményt. A másik gyakoribb módszer az impulzusválasz vizsgálata, amikor a termet 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.

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, süketszobákban 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 formulákból számítással is megbecsülhetjük [5,7]. Nem túl kicsi utózengési idő ( $\tau$ ) 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:

$$A = \sum \alpha_i S_i. \quad (2)$$

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. Az 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  $\tau$  esetén az eredmény egyre pontatlanabb lesz. Kisebb  $\tau$  esetén a másik használatos képlet az Eyring-formula:

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

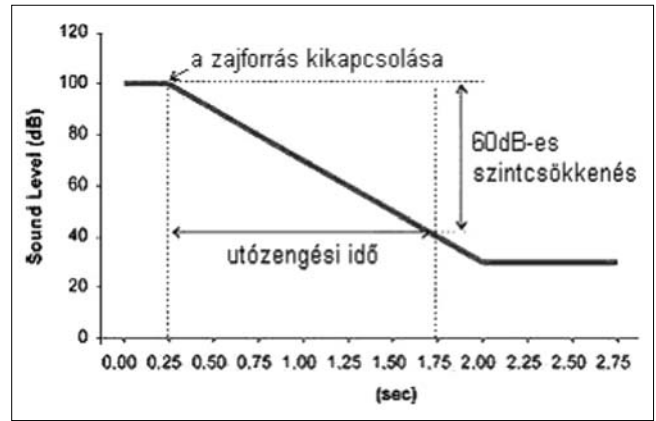
ahol egy átlagos alfával dolgozunk:

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

$$\text{és } S = S_1 + S_2 + \dots + S_i. \quad (5)$$

Akkor a legpontosabb ez a formula, ha az  $\alpha$ -k körülbelül egyenlők (hátrány), ugyanakkor matematikailag korrektebb, mert süketszobára, ahol alfa értéke egy,  $\tau$ -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.



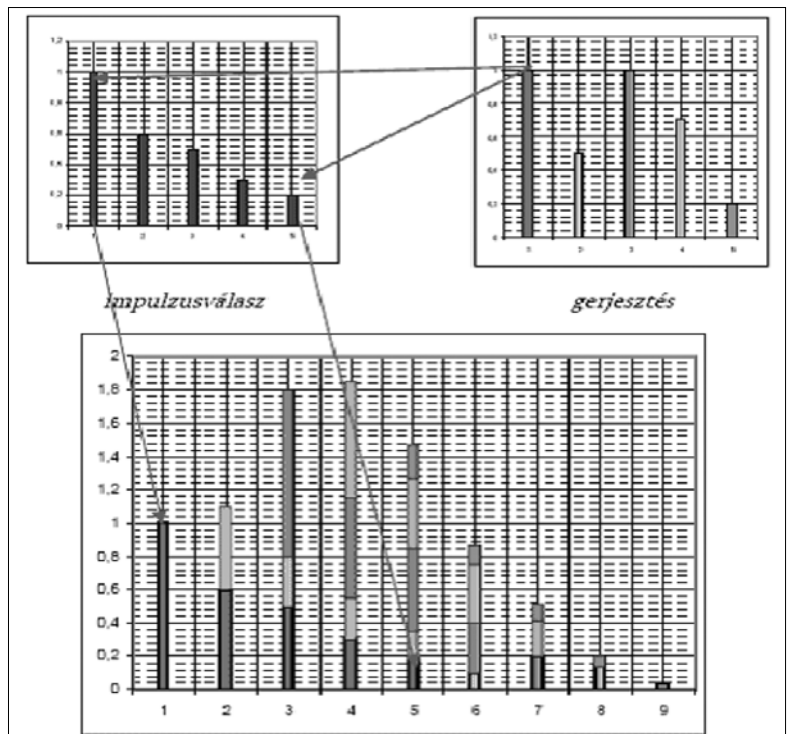
1. ábra Az utózengési idő szemléltetése

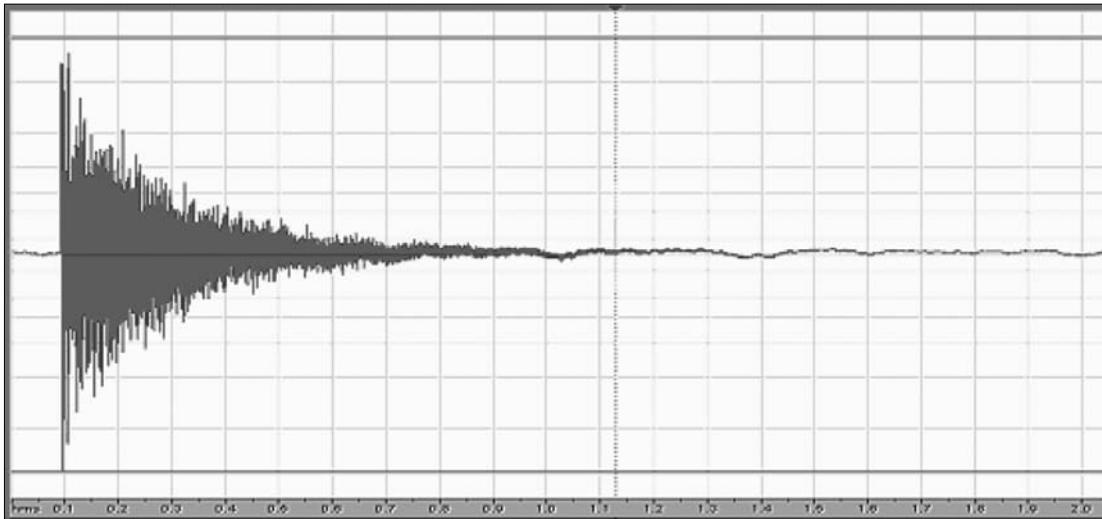
## 2.2. Echogram és a terem impulzusválasza

A terem válaszát 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 termet gerjeszteni. Ismert, 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

2. ábra A konvolúció hatása egy impulzusválasz és gerjesztés esetén





3. ábra  
A későbbiekben bemutatott D1-es terem impulzusválasza

az impulzusválasz az egyik legfontosabb leíró függvényünk lett. Nincs más dolgunk, mint egy wave-fájlból rögzített impulzusválaszt a megfelelő szoftver segítségével egy mono stúdiófelvétellel konvolvíálni és végeredményünk olyan lesz, mintha az eredeti mono stúdiófelvétel az adott teremben szólna. A konvolúciós integrál alakja az alábbi:

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

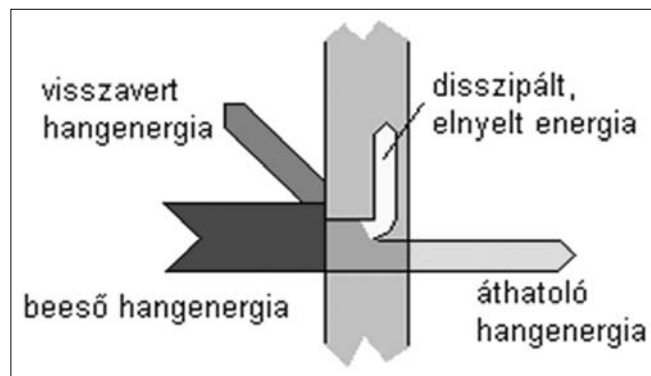
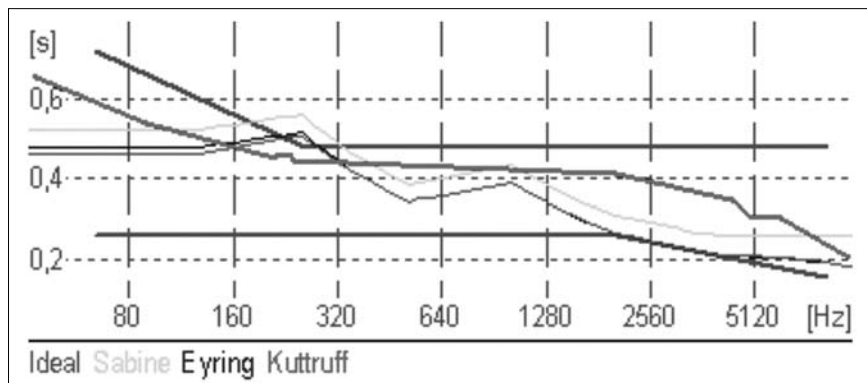
Ehhez segítséget nyújtanak olyan speciális programok, mint az Altiverb [10], vagy az Adobe Audition, de MATLAB alatt is egyszerűen elvégezhető a művelet. Az így megmért teremátviteli függvényt (Room Impulse Response – RIR) tehát sok mindenre felhasználhatjuk. A CARA program ezt is megteszi számunkra.



4. ábra Stilizált echogram

Az echogram tulajdonképpen egy terem impulzusának és a visszaverődéseknek a lekövetése az időtartományban.

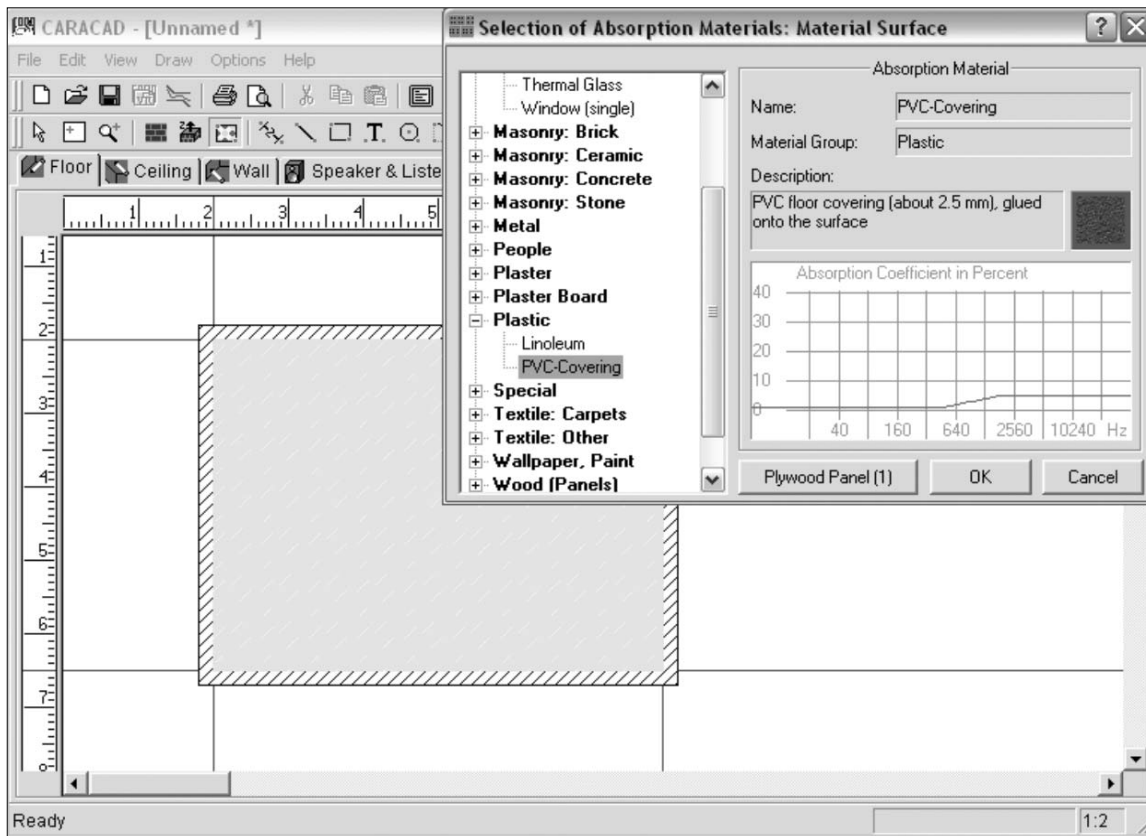
6. ábra  
Toleranciasémába illő, illetve nem illő utózengési idő diagramok



### 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 jó részt visszaverődik, reflektálódik. Egy másik része elnyelődik, amely egyrészt kis mértékben hő formájában felszabadul, egy másik része pedig megmozgatva az akadályt átjut és ismételtlen lesugárzódik.

A hanghullámok emellett 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.



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

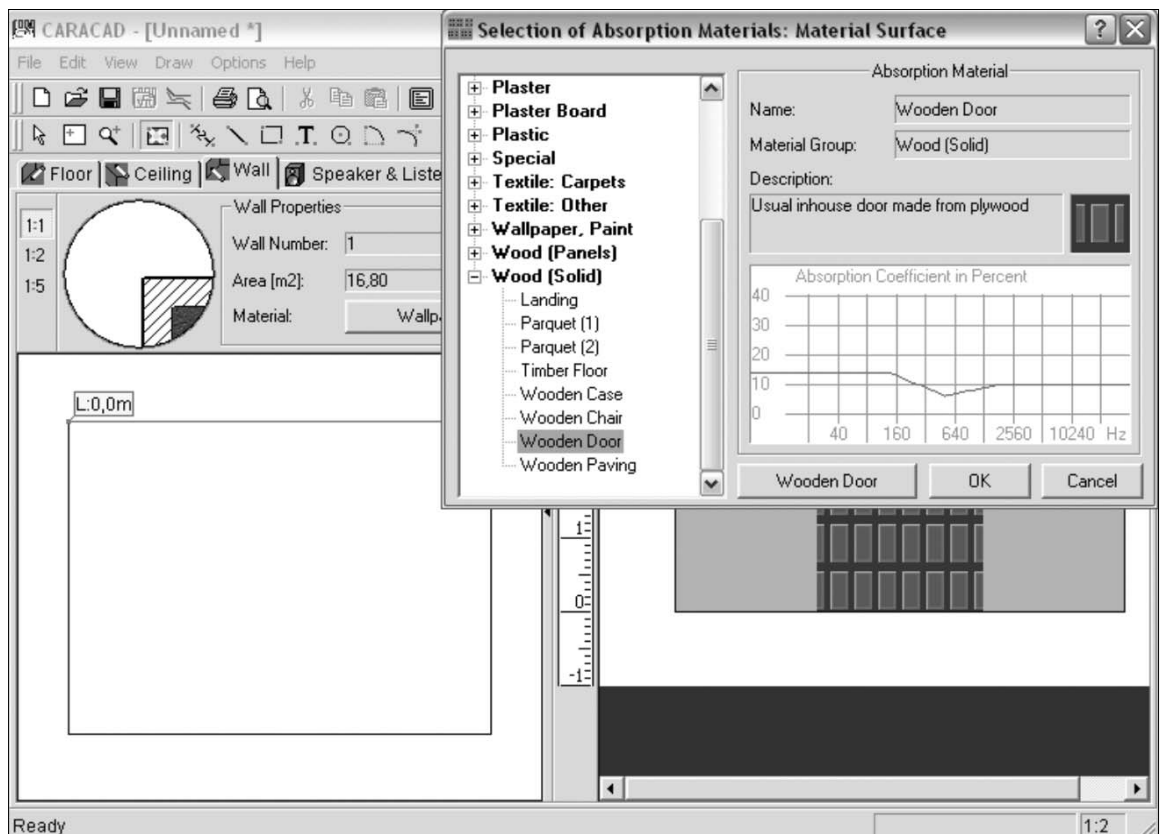
### 2.4. Egyéb paraméterek

Néhány a fentiekkel rokon, azokból származtatható paraméterek is segíthetik munkánkat.

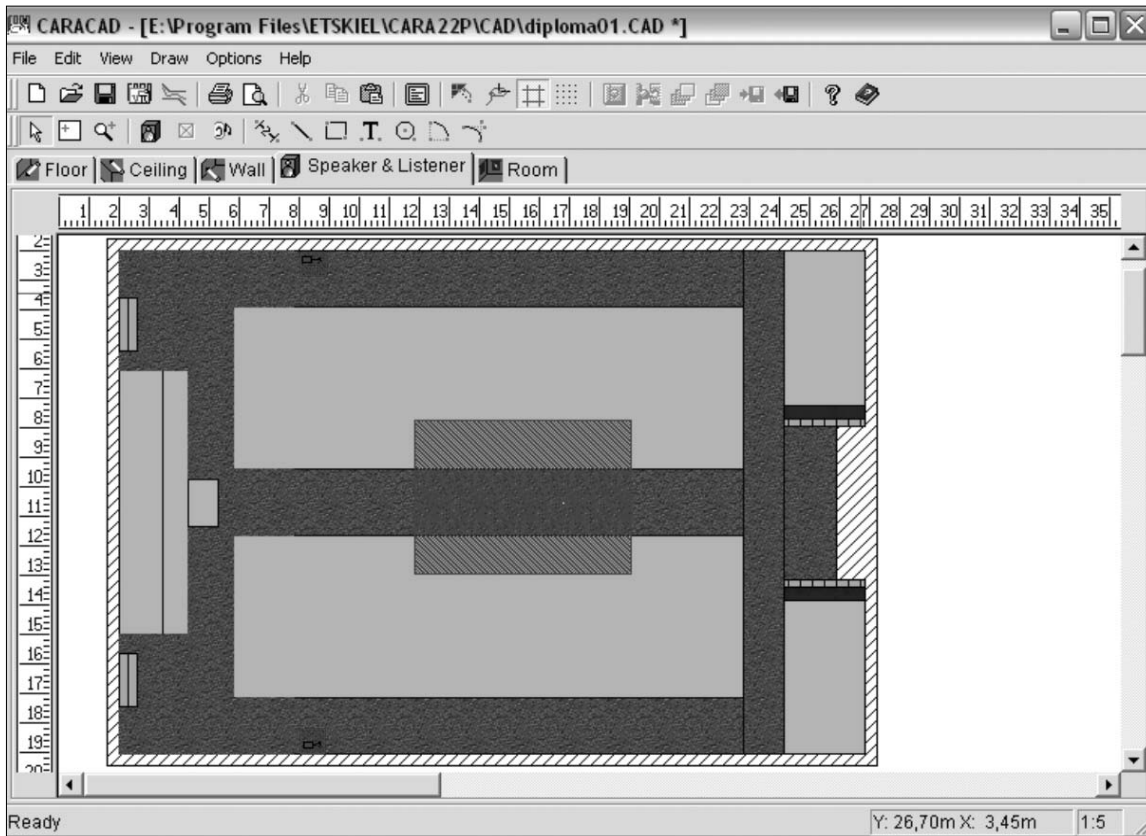
Az EDT (Early Decay Time) az első 10 dB-es eséshez tartozó idő. Ajánlatos, hogy ennek átlaga haladja meg

a utózenngési idő átlagát nagyszámú emberrel telített termekben.

Olyan paraméterek, mint a tisztaság (Clarity,  $C_{80}$ ), vagy a 'Lateral Efficiency' (LE) a szoftverek segítségével meghatározhatók.



8. ábra  
Faajtók elhelyezése és elnyelési tényezője

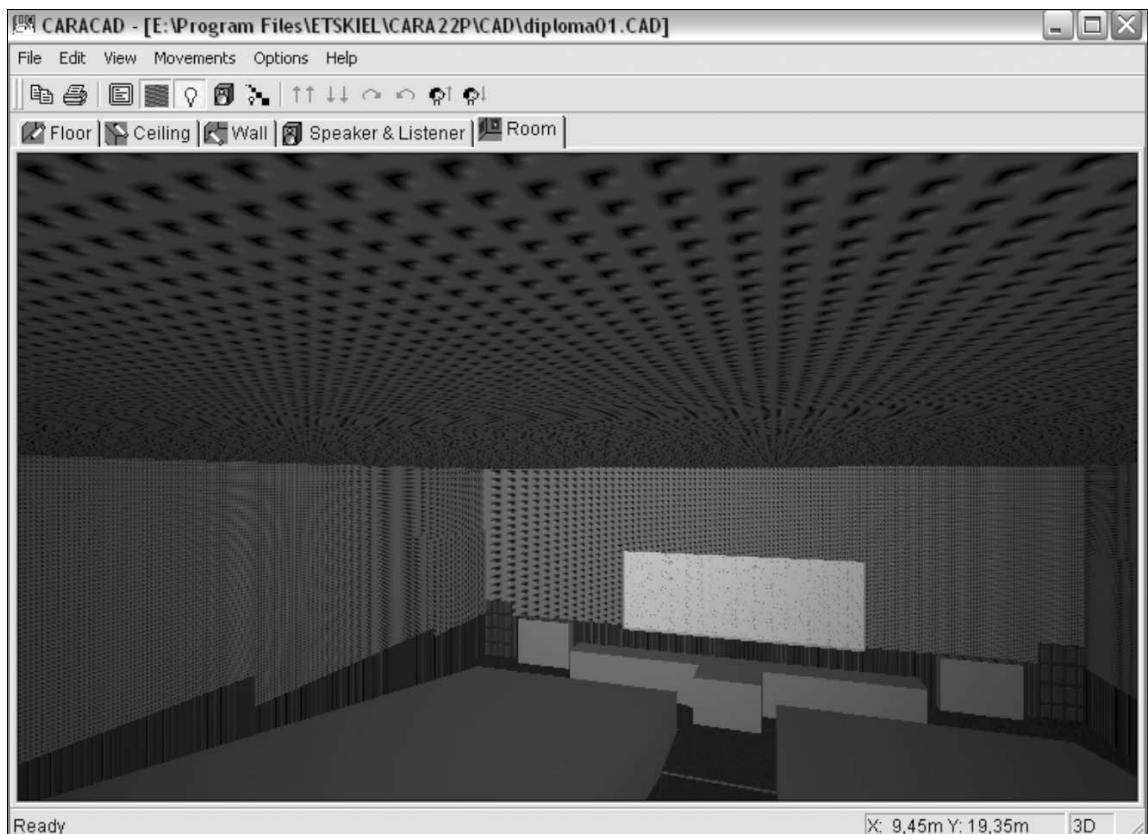


9. ábra  
A kész terem  
2D felülnézeti  
képe.  
Bal oldalon  
a katedra és  
a két faajtó.  
Középen a két  
nagy padosor  
és egy  
lehetséges  
lehallgatási  
zóna.  
Két hangszóró  
az oldal-  
falakon,  
a jobb oldalon  
a terem  
kijárata és  
még két  
padosor.

### 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 hangsugárzó tervező modul felhasználásra (loudspeakers).

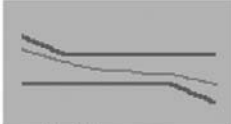


10. ábra  
A kész terem  
3D nézeti képe  
textúrázva.  
A hátsó  
sorokból  
látható  
a tanári asztal,  
a tábla és  
az ajtók.  
A padosorok  
egybefüggő  
tafelületűek.

### The Acoustic Ambiance of your Sound Room: Evaluation and Suggestions

To learn more about **Acoustic Ambiance**, read [this](#).

**Evaluation:**



The reverberation times in this room are well-balanced over the whole audible frequency range. There is nothing special about this situation, it is considered ideal.

**Analysis and Suggestions for Improvement:**  
Since the reverberation times of the whole frequency range lie within the tolerance area, there are no further suggestions concerning the furnishing of the room, material changes, etc.

11. ábra  
Az akusztikai vizsgálat eredménye

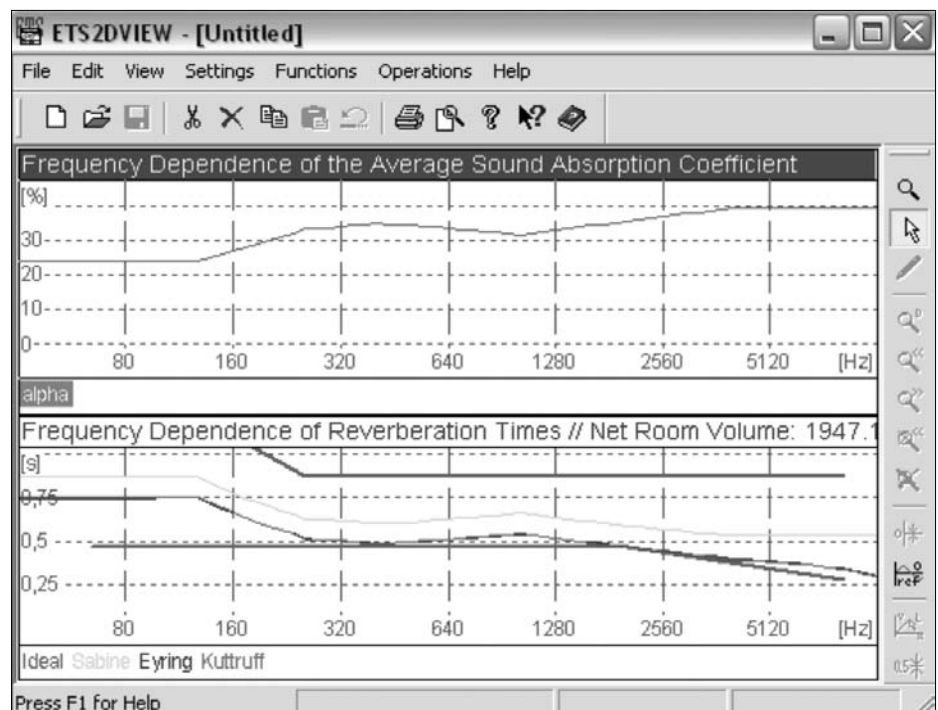
A tervezés első lépéseként a CARACAD-ben kell a termet létrehozni. Ebbe beletartozik a geometriai méret és alak, a falak, padlók, ajtók, ablakok burkolása, valamint a berendezési tárgyak elhelyezése. A tervezés centiméteres pontosságú. Itt lehet megadni a kívánt térhangzást is a sztereótól a 8.1-es rendszerekig, a hangsugárzók fajtáját, méretét, elhelyezkedését.

A nagyobb gyártók termékei megtalálhatók egy adatbázisban (mely az internetről frissíthető is), a hiányzókat pedig magunk létrehozhatjuk és elmenthetjük.

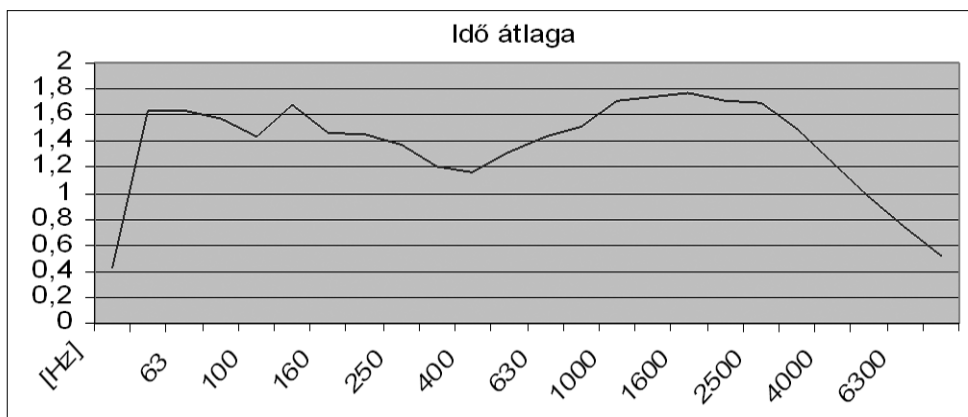
A tervezés után akusztikai ellenőrzést kell végeznünk (acoustic ambiance), mely az idő- és frekvenciaviszonyokat bemutató kiszámítja és megjeleníti a toleranciasémát és a terem tulajdonságait (utóhangési idők, reflexiók, elnyelődések).

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

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

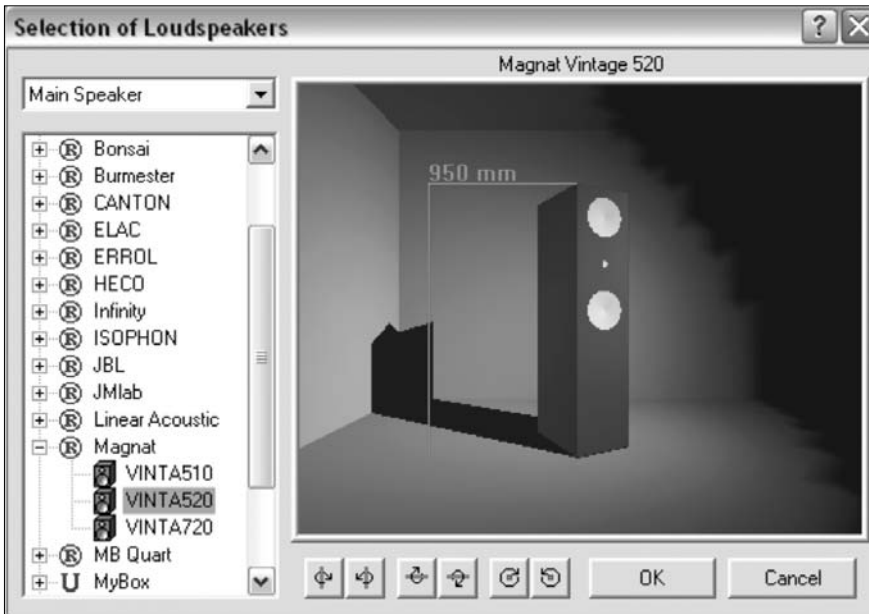


13. ábra  
Az utóhangési idő mérése, Brüel-Kjaer 2260-as analizátorral, „lufidurrantásos” módszerrel



### 3.1. A D1-es 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



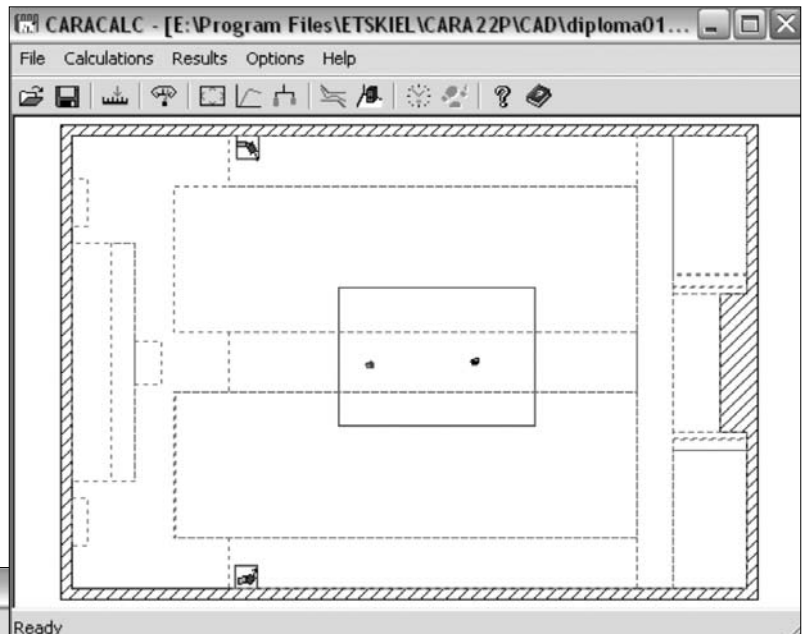
14. ábra  
Magnat-hangsugárzó a listából kiválasztva

15. ábra  
Az új hangsugárzó-elhelyezés és a hallgató helye a zónán belül. A hangszórókhöz közeli hallgatási pont a legjobb.

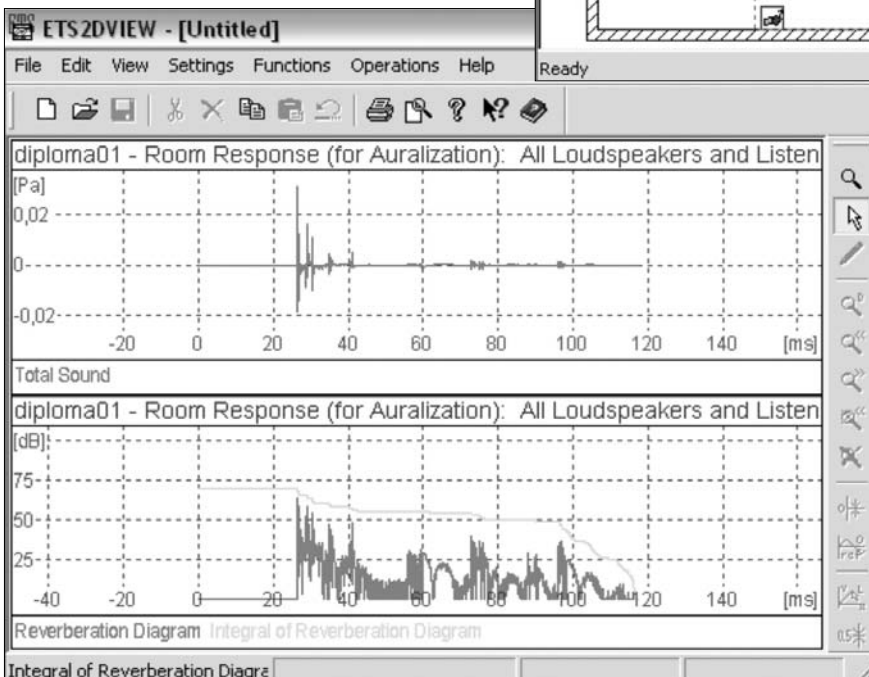
oldalán. Fent a bejárati dupla ajtó is fa. A padló borítása 8 mm-es PVC szőnyeg.

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).

A tanári asztal, padosorok és radiátorok, mint 3D objektumok kerülnek be a modellbe. Ha ezek nem találhatók meg a sémában, kénytelenek vagyunk megépíteni ő-

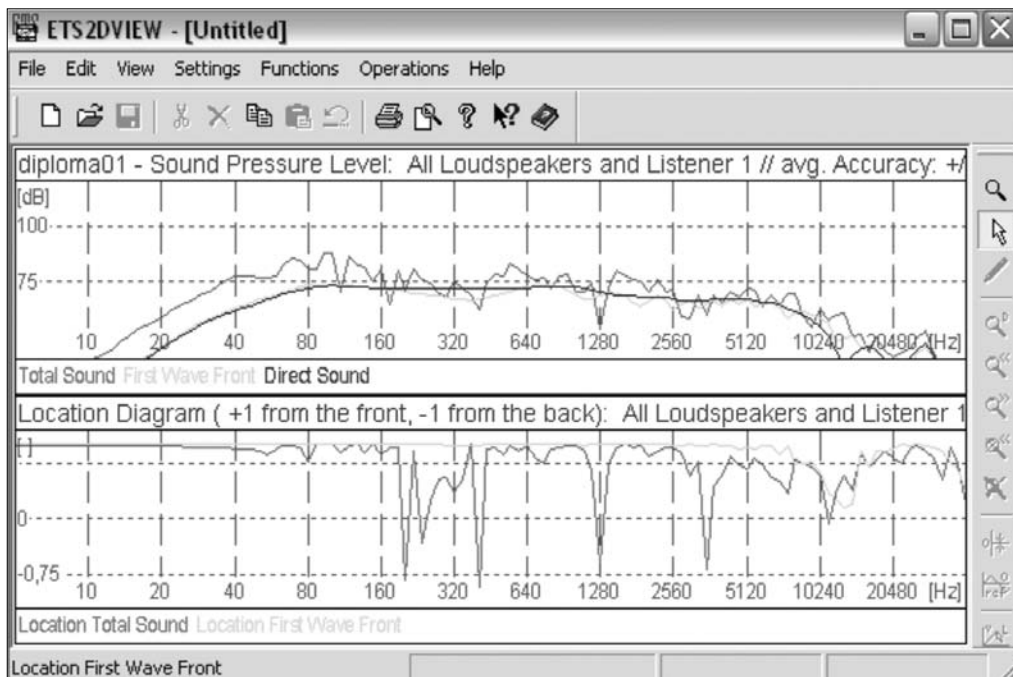


16. ábra  
A terem válszfüggvényei.  
Fent az impulzusválasz, alul az echogram.



ket a méretük alapján. A padok, mivel nem négyzetesek, egyben a székekkel kerültek megtervezésre (fából). Ilyen jellegű termeknél a fapadok és -székek helyett „emberrel” is boríthatjuk a felületet, magyarárn vizsgálhatjuk az üres és az emberekkel teli környezetet is.

Az akusztikai vizsgálat során az így kialakított termet vizsgálja a program. Ahogy az ábrán is látszik, elégedett az eredménnyel. Ezt a következtetést az utözengési idő és az átlagos elnyelési tényező ismeretében vonta le. Természetesen, ha a modellünk nem jó, vagy nem elég pontos, az eredmények hibásak is



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

lehetnek. Ilyen esetben célszerű méréssel ellenőrizni azokat. Ha az utózengezési idő gyanúsán alacsony értékű, méréssel ellenőrizve – különösen mélyfrekvencián – nagy eltérést tapasztalunk. Ennek oka az elégtelenül felépített modell lehet.

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

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

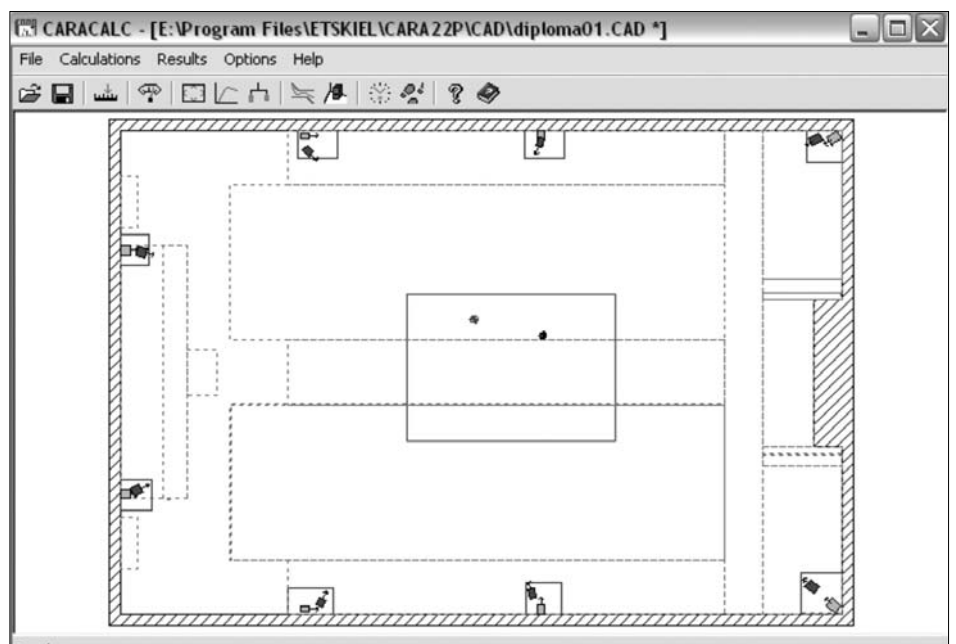
A program lehetőséget nyújt auralizációra is [11]. Lehet az összes hangsugárzóval egyszerre vagy egye-

sével is a szimulációt létrehozni. Wave-fájlba elmenthető a terem szimulált impulzusválasza, mellyel tetszőlegesen betöltött hangmintát, zenét színezhetünk. Egy utasítással összehasonlíthatjuk a hangzást optimalizálás előtt és után.

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

Hasonlóan, rögzített frekvencia mellett az időbeni hullámterjedést is felrajzoltathatjuk.

Végezetül két ábra egy optimalizált, nyolchangsórós elrendezésre 2D-ben és 3D-ben, ugyanazon terem számára.



19. ábra  
Nyolc hangsugárzóra optimalizált terem 2D és 3D ábrázolása (jobbra, a túlodalon)



18. ábra  
117 Hz, 1500 Hz és 25000 Hz-es  
kialakult hangnyomásszint-eloszlás a teremben.  
Sötéttel a hangsugárzók,  
világossal a hallgatók vannak jelölve.

### 3.2. Otthoni lakószoba

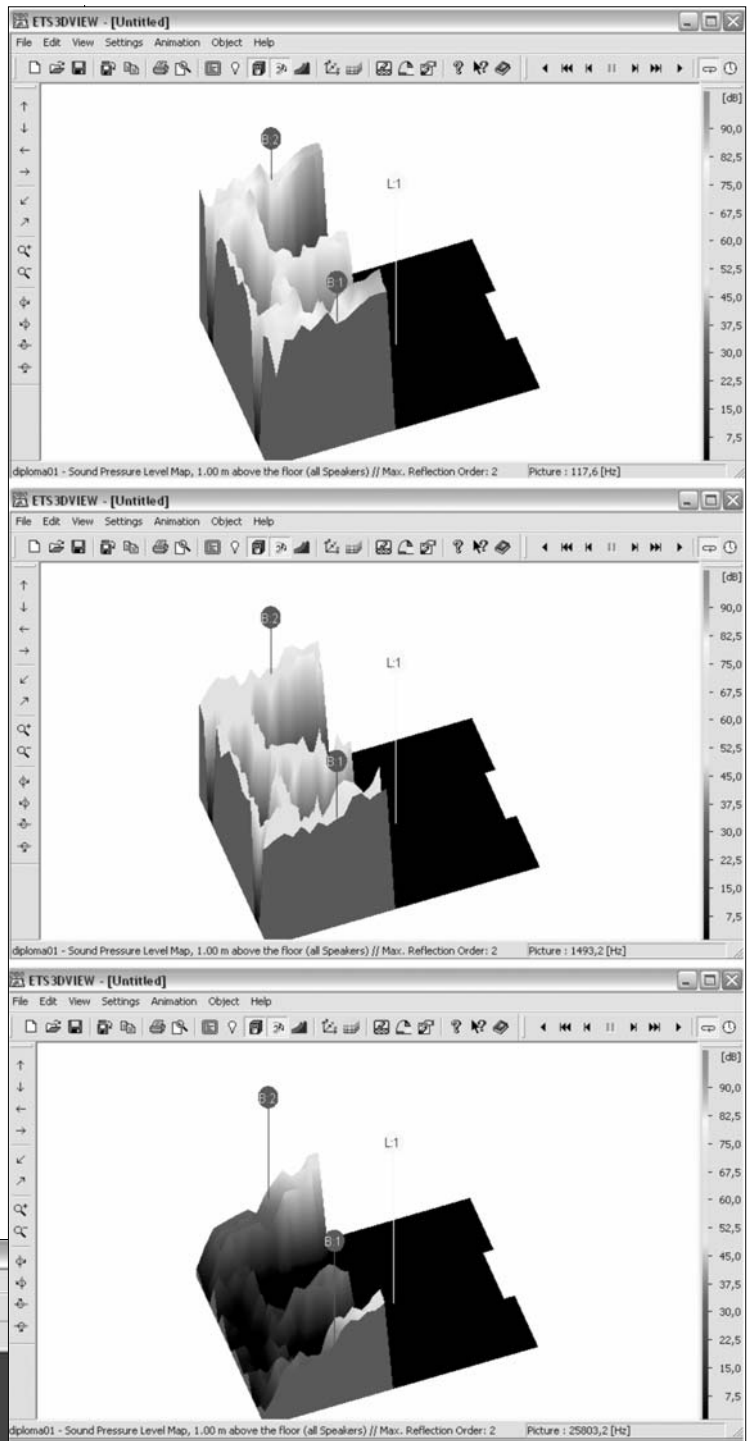
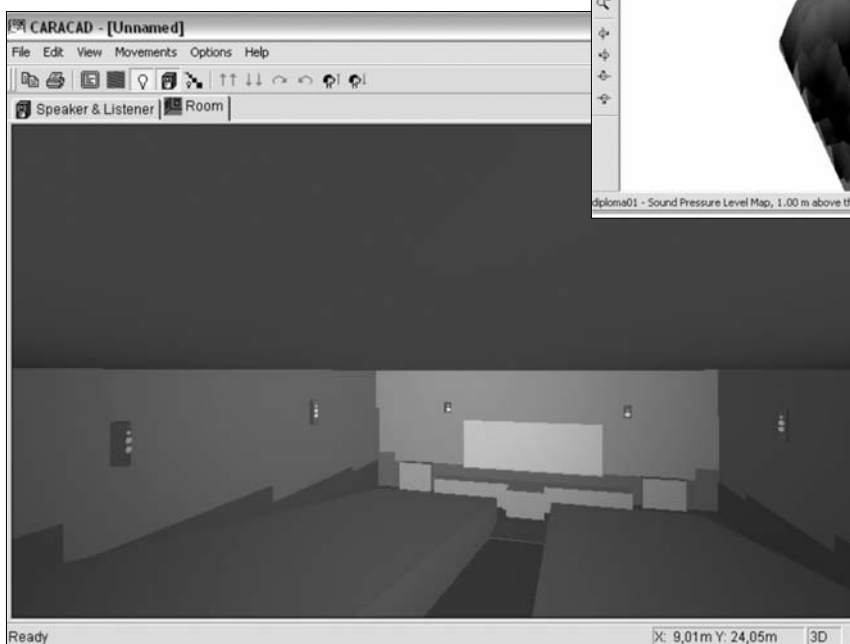
Utolsó rövid példánkban egy otthoni nappali házimozi-hangrendszer vizsgálatát láthatjuk. A 20. ábra bal és jobb oldalán az 5.1 elrendezés optimalizált javaslata látható egy hallgató, illetve két hallgató esetén. Alatta a 3D megjelenítés azok elhelyezésére (21. ábra), illetve az 50 Hz-es mélyhang eloszlása a mélynyomó (sub-woofer) környezetében (22. ábra).

## 4. Összefoglalás

A teremakusztikai tervezés számítógépes lehetőségei közül bemutatásra került egy költség-hatékony, 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 mérésrel történő ellenőrzésének fontosságára. Ugyanakkor látható, hogy a mai számítási kapacitás lehetővé teszi az akusztikai tervezés és hangtérkialakítás alapvető lépéseinek felgyorsítását és vizualizálását.

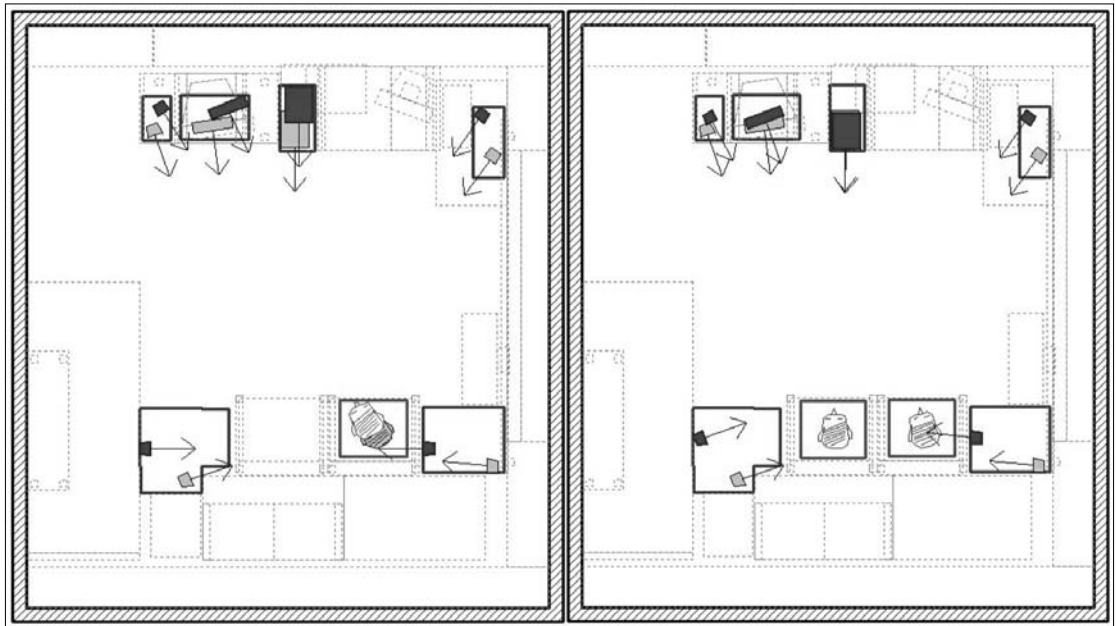
Segítségével képet kaphatunk a terem hangképéről, követhetjük a javaslatokat és az optimalizálási stratégiákhoz ötleteket meríthetünk. A végső szót úgyis a hallgató, a tesztalany, a nézősereg hozza meg szubjektív benyomásai alapján.



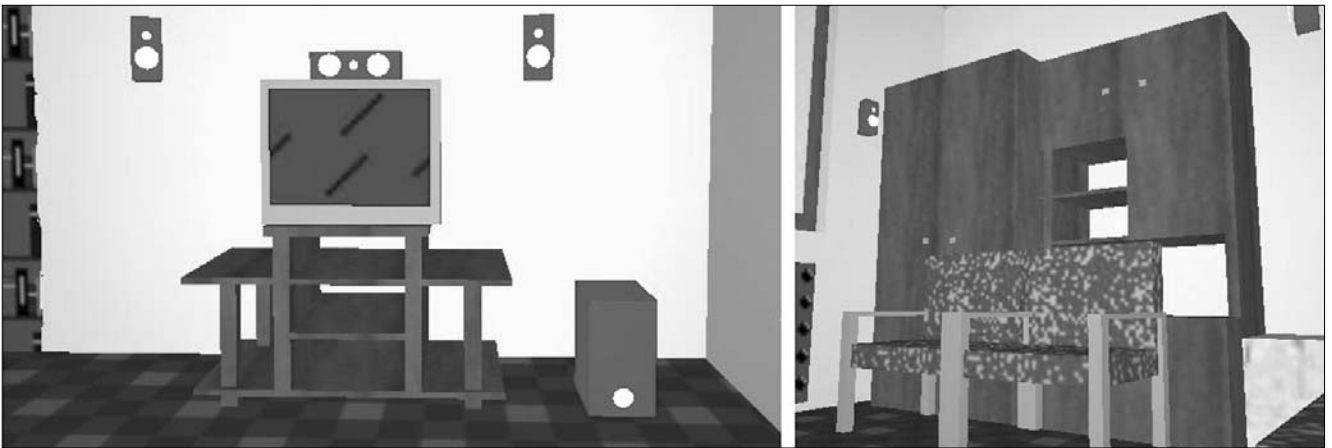
### A szerzőről

**Wersényi György** a Budapesti Műszaki Egyetem villamosmérnöki szakán szerzett egyetemi diplomát 1998-ban. Négy évig doktorandusként dolgozott a Távközlési és Telematikai Tanszéken, majd PhD fokozatot szerzett a Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus-tól, Németországban, 2002-ben. Jelenleg a győri Széchenyi István Egyetem Távközlési Tanszékének oktatója, egyetemi docens beosztásban. Szakterülete a hang- és képtechnika, a telekommunikáció, akusztika. Aktuális kutatási témái: emberi térhallás vizsgálatok, lokalizáció, virtuális valóság szimulátorok, műfejes mérés technika. Tagja az Audio Engineering Society-nek (AES), a Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesületnek (HTE), az OPAKFI-nak és az International Community for Auditory Display-nek (ICAD).

20. ábra  
Egy, illetve két  
hallgatóra  
optimalizált  
elrendezés



21. ábra  
3D megjelenítés



**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 hangversenyterem akusztikai tervezése – tervezett és kész állapot. Akusztikai Szemle, VI. évf. 2., 2005, p.19–21.  
 [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, 1993, pp.861–875.

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

